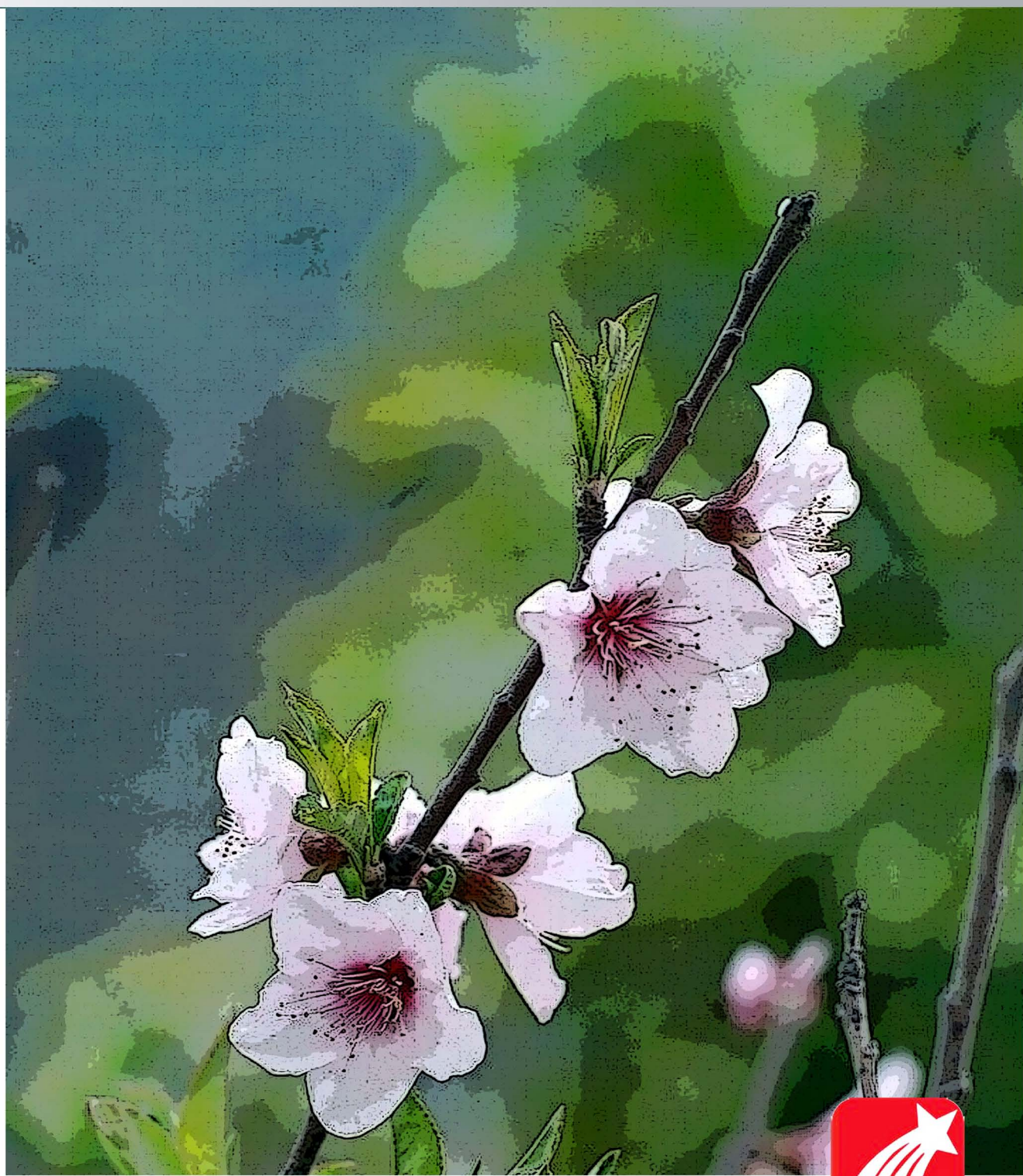


# 郑州大学学报(工学版)

2014年11月 第35卷 第6期



## 目 次

### 化工与能源

三角区漏流对螺旋折流板换热器综合性能的影响 .....	刘敏珊, 许伟峰, 靳遵龙, 王永庆, 王 丹( 1 )
腰果酚缩水甘油醚侧链双键的环氧化研究 .....	陈卫航, 张明伟, 王宏力( 5 )
螺旋格栅纽带开发及其综合换热性能分析 .....	吴金星, 彭 旭, 李俊超, 刘青锋, 贺 敏, 李国立( 10 )
3 种类型波节管的强化传热模拟分析 .....	韩 勇, 王定标, 张灿灿, 向 颀( 14 )
$(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ 的制备及热物理性能 .....	张红松, 温 倩, 张 冰( 19 )
SAPO-56 分子筛的形貌和粒径控制 .....	詹予忠, 董佳佳, 宋孟璐, 韩 丽, 陈宜俚( 23 )
改性热解炭吸附水体中苯胺的热力学及动力学研究 .....	邹卫华, 周秀丽, 刘静萱( 27 )
萃取精馏分离甲苯 - 正庚烷混合物的模拟研究 .....	胡秀英, 马 迪, 杨廷海, 邓育苟( 31 )
FDS6 对隧道火灾温度场模拟的适用性研究 .....	钟 委, 李兆周, 吕金金, 梁天水( 35 )
氮源与其补加方式对 1,3-丙二醇生物合成的影响 .....	乔建援, 赵 峰, 齐笑飞, 孙沛勇, 杜风光( 39 )

### 信息工程

多用户多进制 FM-DCSK 误码率分析 .....	刘 平, 李 宁, 邢军阳( 43 )
WSN 中基于非均匀梯度的分簇拓扑算法 .....	阎新芳, 张永坤, 李 腾, 王晓晓( 47 )
基于喷泉码的数字图像水印的研究 .....	张卫党, 李方圆, 陈美玲( 52 )
基于条纹丢失补偿的自混合干涉位移测量算法 .....	叶会英, 朱君瑶, 王珍雪( 56 )
基于 Android 平台的智能医疗系统的设计与实现 .....	郭志涛, 郭 忠, 王 振( 60 )
传统软阴影算法在 GPGPU 构架上的优化技术研究 .....	高明磊, 赵新灿, 詹 云( 64 )
基于 SURF 和伪 Zernike 矩的图像拼接算法研究 .....	李喜艳, 纪东升, 吴崇正( 69 )

### 土木与交通工程

配置 HRB500 钢筋的混凝土桥墩滞回性能研究 .....	戎 贤, 宋 鹏, 张健新, 刘 平( 74 )
混凝土桥面铺装用环氧沥青的制备与性能研究 .....	丛培良, 刘建飞, 赵志强, 陈拴发( 78 )
台风 - 波浪耦合作用下钢管桩施工平台力学行为分析 .....	李胜利, 胡亚楠, 王东炜( 82 )
基于运行模式分布的平面交叉口汽车排放评估 .....	邱兆文, 张广昕, 郝艳召( 86 )
土钉墙 - 桩锚联合支护结构设计参数分析 .....	宋建学, 庞宏飞( 91 )
交通荷载作用下港区道路受力特性研究 .....	牛力强( 95 )

### 机械与电气工程

基于 C# 的继电保护整定系统关键技术研究 .....	杨胡萍, 左士伟, 钟耀星, 陈 豪( 100 )
基于滑模变结构的 IPMC 跟踪控制系统设计 .....	王瑗琿, 张 强, 王东云, 刘 萍( 104 )
喷丸残余应力场 SPH/FEM 耦合建模与仿真 .....	王利平, 王建明, 裴信超, 赵莉莉( 108 )
高海拔地区电子设备散热分析 .....	黄延平, 曹国华, 王淑坤( 113 )
基于 CAGD 的单层球形网壳构型设计 .....	马泳涛, 李 伟, 陈天跃( 118 )
三轴车辆全轮转向系统方案设计与性能仿真 .....	袁 磊, 刘西侠, 刘维平( 121 )

### 管理工程

基于 AHP-TOPSIS 的物流园区综合竞争力评价模型研究 .....	李玉民, 郭利利, 刘旻哲( 125 )
--------------------------------------	----------------------

CONTENTS

[Chemical Engineering and Energy]

- Impact of Triangle Leakage on Comprehensive Performance of Heat Exchangers with Helical Baffles ..... LIU Min-shan, XU Wei-feng, JIN Zun-long, WANG Yong-qing, WANG Dan (1)
- Study on the Epoxidation of Double Bond in Cardanol Glycidyl Ether Side Chain ..... CHEN Wei-hang, ZHANG Ming-wei, WANG Hong-li (5)
- Analysis on Comprehensive Heat Transfer Characteristics and Development of the Spiral Grid Twisted Tape ..... WU Jin-xing, PENG Xu, LI Jun-chao, LIU Qing-feng, HE Min, LI Guo-li (10)
- Numerical Comparative Study on Three Types of Corrugated Tube ..... HAN Yong, WANG Ding-biao, ZHANG Can-can, XIANG Sa (14)
- Preparation and Thermophysical Properties of  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  ..... ZHANG Hong-song, WEN Qian ZHANG Bing (19)
- Control of Crystal Morphology and Size of SAPO-56 Molecular Sieve ..... ZHAN Yu-zhong, DONG Jia-jia, SONG Meng-lu, HAN Li, CHEN Yi-liang (23)
- Equilibrium and Kinetic Studies on Aniline Adsorption from Aqueous Solution by Modified Pyrolytic Carbon ..... ZOU Wei-hua, ZHOU Xiu-li, LIU Jing-xuan (27)
- Simulation of Separating Toluene-N-heptane Mixture by Extractive Distillation ..... HU Xiu-ying, MA Di, YANG Ting-hai, DENG Yu-gou (31)
- Study on Applicability of FDS 6 to Simulate the Fire in Horizontal Long Tunnel ..... ZHONG Wei, LI Zhao-zhou, LV Jin-jin, LIANG Tian-shui (35)
- The Effect of Nitrogen and Its Adding Modes on 1, 3-Propanediol Biosynthesis ..... QIAO Jian-yuan, ZHAO Feng, QI Xiao-fei, SUN Pei-yong, DU Feng-guang (39)

[Information Engineering]

- Bit Error Rate Analyze of Multiple-Access M-ary FM-DCSK ..... LIU Ping, LI Ning, XING Jun-yang (43)
- A Clustering Topology Algorithm Based on Uneven Gradient in WSN ..... YAN Xin-fang, ZHANG Yong-kun, LI Teng, WANG Xiao-xiao (47)
- Study of Digital Image Watermarking Based on Fountain Code ..... ZHANG Wei-dang, LI Fang-yuan, CHEN Mei-ling (52)
- A Self-Mixing Interference Displacement Measurement Algorithm with Fringe-Loss Phenomenon and Compensation ..... YE Hui-ying, ZHU Jun-yao, WANG Zhen-xue (56)
- Design and Realization of Intelligent Medical System Based on Android Platform ..... GUO Zhi-tao, GUO Zhong, WANG Zhen (60)
- Study of Traditional Soft Shadow Algorithm Optimization Technology in the GPGPU Framework ..... GAO Ming-lei, ZHAO Xin-can, ZHAN Yun (64)
- The Research of Image Mosaic Algorithm Based on SURF and Pseudo-Zernike Moments ..... LI Xi-yan, JI Dong-sheng, WU Chong-zheng (69)

[Civil Engineering and Transportation Engineering]

- Experimental Research on Hysteretic Behavior of HRB500 Reinforced Concrete Piers ..... RONG Xian, SONG Peng, ZHANG Jian-xin, LIU Ping (74)
- Preparation and Properties of Epoxy Asphalt Applied for Concrete Bridge Deck ..... CONG Pei-liang, LIU Jian-fei, ZHAO Zhi-qiang, CHEN Shuan-fa (78)
- Mechanical Behavior Analysis of Steel Pipe Pile Construction Platform Under the Coupling Action of the Typhon and Wave Loads ..... LI Sheng-li, HU Ya-nan, WANG Dong-wei (82)
- Estimation for Vehicles Emissions of At-grade Intersections Based on Operating Mode ..... QIU Zhao-wen, ZHANG Guang-xin, HAO Yan-zhao (86)
- Study on Deformation Corresponding to Different Design Parameters of Excavation Retaining Structure with Soil Nail and Pile Anchor ..... SONG Jian-xue, PANG Hong-fei (91)
- Study on Mechanical Characteristics of Port Road under the Vehicle Load ..... NIU Li-qiang (95)

[Mechanical Engineering and Electrical Engineering]

- Research on Key Technology of Protective Relay Setting System Based on C# ..... YANG Hu-ping, ZUO Shi-wei, ZHONG Yao-xing, CHEN Hao (100)
- Position Tracking Control Design for IPMC Based on Sliding Mode Variable Structure ..... WANG Ai-hui, ZHANG Qiang, WANG Dong-yun, LIU Ping (104)
- Numerical Simulating for Residual Compressive Stress of Shot-peening Based on SPH Coupled FEM ..... WANG Li-ping, WANG Jian-ming, PEI Xin-chao, ZHAO Li-li (108)
- Heat Dissipation Analysis of Electronic Equipment in High Altitude Area ..... HUANG Yan-ping, CAO Guo-hua, WANG Shu-kun (113)
- Single-Layer Spherical Shell Configuration Design Based on CAGD ..... MA Yong-tao, LI Wei, CHEN Tian-yue (118)
- The Design and Simulation for All-wheel Steering Vehicle with Three Axles ..... YUAN Lei, LIU Xi-xia, LIU Wei-ping (121)

[Management Engineering]

- The Research of Evaluation Model on the Comprehensive Competitiveness of Logistics Park Based on AHP and TOPSIS ..... LI Yu-min, GUO Li-li, LIU Min-zhe (125)

文章编号:1671-6833(2014)06-0001-04

# 三角区漏流对螺旋折流板换热器综合性能的影响

刘敏珊, 许伟峰, 靳遵龙, 王永庆, 王 丹

(郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**对螺旋角为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  的  $1/3$  椭圆螺旋折流板换热器进行数值模拟, 研究连续搭接相邻折流板间三角区漏流对换热器传热及阻力性能的影响. 通过分析换热器存在三角区漏流与堵住三角区无漏流模型的模拟计算结果可知: 三角区漏流使壳侧流体流动短路现象严重; 三角区漏流使换热器整体传热系数、壳程压降、综合性能降低; 堵住三角漏流区后, 传热系数增加  $8.5\% \sim 11\%$ , 壳程压降增加幅度不大, 综合性能增加  $8.1\% \sim 11.1\%$ .

**关键词:** 换热器; 螺旋折流板; 漏流; 数值模拟

**中图分类号:** TQ051.5; TK223.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.001

## 0 引言

针对传统管壳式换热器的缺点<sup>[1-3]</sup>, 如壳程流体流动存在流动死区、流阻大、传热系数较低、易结垢和振动等, 科研人员提出螺旋折流板换热器的概念, 并由 ABB 公司于 1994 年实现了产业化<sup>[4]</sup>. 与弓形折流板换热器相比, 螺旋折流板换热器壳程流体呈螺旋状流动, 不但能够很好地解决弓形折流板换热器存在的问题; 同时, 螺旋流动增加了壳程流体流动的扰动, 从而达到强化传热的效果<sup>[5]</sup>. 目前, 工程中由于受螺旋面加工工艺的限制, 大都采用若干块椭圆形或扇形平板搭接成近似的螺旋曲面. Lutch 等<sup>[6]</sup>设计了  $1/4$  螺旋折流板换热器, 但此方案较适合于正方形布管. 陈亚平等<sup>[7]</sup>提出了一种适合于正三角形排列布管的三分螺旋折流板方案. 由于折流板是由椭圆形或扇形平板连续搭接形成的近似螺旋面, 相邻搭接折流板间存在三角间隙(简称三角区), 壳程流体流动在三角区产生漏流<sup>[8]</sup>. 笔者针对三角漏流区采用大型 CFD 分析软件 FLUENT, 考察三角区漏流对螺旋折流板换热器综合性能的影响, 为换热器的性能优化设计提供参考.

## 1 几何模型

$1/3$  螺旋折流板分为椭圆和扇形两种, 均由椭圆切割得到. 笔者采用  $1/3$  椭圆螺旋折流板, 对螺旋折流板换热器漏流的研究主要存在于相邻搭接折流板间的三角区. 为了单独考察三角区漏流的影响, 取折流板与管束和筒体间的间隙为  $0\text{ mm}$ , 即假设折流板与管束和筒体之间不存在间隙. 在计算中, 假定进口段、出口段充分发展, 忽略进口及出口对整体特征参数的影响.

建立两种  $1/3$  椭圆螺旋折流板模型(见图 1), 模型 a 为螺旋折流板间存在三角漏流区; 模型 b 为堵住螺旋折流板间的三角区(保持其他结构参数不变, 采用  $1\text{ mm}$  厚度板将三角区堵住), 不产生三角区漏流. 对应 a、b 两种折流板模型, 建立螺旋角为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  两组换热器模型: a1、b1; a2、b2.

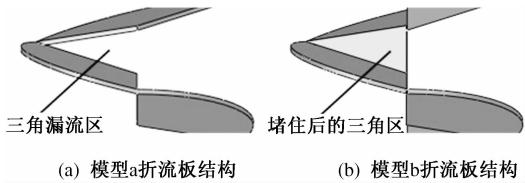


图 1 螺旋折流板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of helical baffles

其中, a1、a2 分别为螺旋角  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  时螺旋折

收稿日期:2014-06-20; 修订日期:2014-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51376163); 中国博士后科学基金特别资助项目(201104400)

作者简介:刘敏珊(1943-), 女, 河南商丘人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事过程装备传热与节能技术研究.

通讯作者:靳遵龙(1973-), 男, 河南淮阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事过程设备流体流动与强化传热方面的研究工作, E-mail: zljn@zzu.edu.com.



流板间存在三角漏流区的换热模型,  $b_1$ 、 $b_2$  分别为螺旋角  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  时堵住折流板间三角区的换热器模型. 换热器的整体及内部结构尺寸如表 1 所示.

表 1 换热器的结构尺寸

Tab.1 Structural parameters of heat exchanger					
筒体内径/ mm	螺旋角/ ( $^\circ$ )	换热器长度/ mm	换热管直径/ mm	管孔距离/ mm	折流板厚度/ mm
200	15, 20	510	25	32	4

2 网格划分及边界条件

2.1 网格划分

螺旋折流板换热器内部结构复杂, 网格划分采用正四面体与金字塔形的非结构化网格. 采用换热器整体传热系数作为评价模型网格划分的指标并进行网格无关性验证, 通过网格独立性分析及计算时间综合考虑, 最终确定模型  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  的网格单元数分别为 388 万、539 万、339 万、461 万.

2.2 边界条件设置

壳程进口采用速度进口, 进口流体温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 出口采用压力出口, 出口压力和温度保持默认; 管壁温度设置为  $80\text{ }^\circ\text{C}$  恒壁温; 湍流模型采用  $k-\varepsilon$  模型方程; 压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法; 动量和能量离散采用二阶迎风格式.

3 流场分布

笔者考察了存在三角漏流区与堵住三角区时壳程流体流动三角区附近流线分布(图 2)及壳程流体流动整体流线分布(图 3). 可以看出: ①螺旋折流板换热器存在三角漏流区时, 部分流线直接通过三角区, 壳程流体流动在三角区产生漏流; 壳程中心部位部分流线几乎与壳程中心轴线平行, 流体流动短路现象严重; ②堵住三角区后, 三角区不再产生漏流, 减少了壳程流体流动的短路现象, 流线沿螺旋折流板螺旋流动增强.

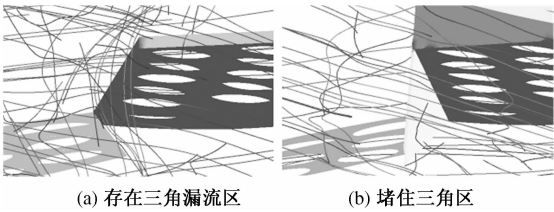


图 2 壳程流体流动三角区附近流线分布  
Fig.2 Streamline distribution of shell-sided fluid flow near the triangle

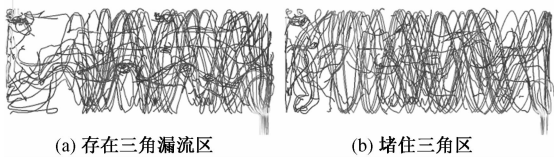


图 3 壳程流体流动整体流线分布  
Fig.3 Overall streamlines distribution of shell-sided fluid flow

4 模拟结果分析

4.1 漏流对换热器传热性能影响

图 4 为不同模型换热器壳程传热系数随壳程雷诺数的变化曲线. 从图 4 可以看出, 漏流使换热器传热性能下降; 堵住折流板三角区, 能有效改善换热器的传热性能.

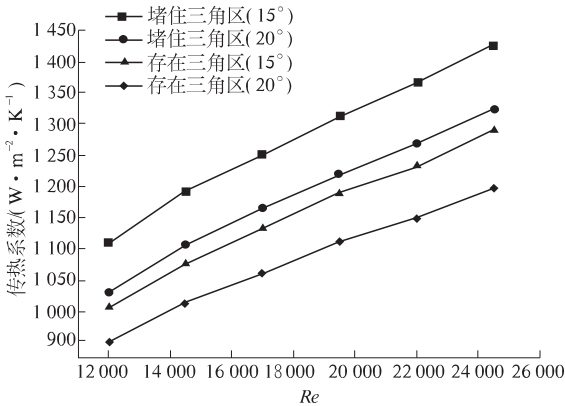


图 4 传热系数随壳程雷诺数的变化曲线  
Fig.4 Heat transfer coefficient varies with different Reynolds number in shell side

具体原因分析如下: ①三角区堵住之后, 三角区不再产生漏流; 由壳程流体流动整体流线分布(图 3)可以看出, 壳程流体流动短路现象有所改观, 增加了壳程流体与换热管管束的接触时间; ②垂直管束方向分别取  $a_1$ 、 $b_1$  模型  $Z=0.25\text{ m}$  的截面, 两种换热器截面速度矢量如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 三角区堵住后, 壳程流体流动近螺旋运动增强, 增加了壳侧流体流动的扰动程度; 螺旋流动斜向冲刷换热管管壁, 使换热管管束外壁面边界层减薄, 减小了管程与壳程之间的传热热阻. 综合以上因素: 堵住三角区, 换热器的传热系数增大, 可使换热器传热性能增加  $8.5\% \sim 11\%$ .

4.2 漏流对换热器压降影响

图 6 为不同模型换热器进出口压降随壳程雷诺数的变化曲线. 从图 6 可以看出, 三角区堵住后, 换热器整体压降有所升高, 但升高幅度不大.

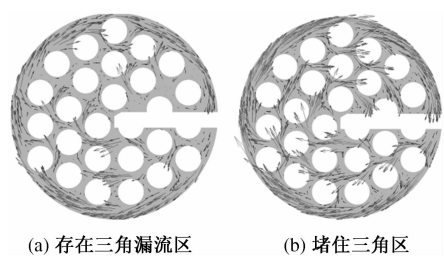


图 5 截面速度矢量图

Fig.5 Velocity vector of section

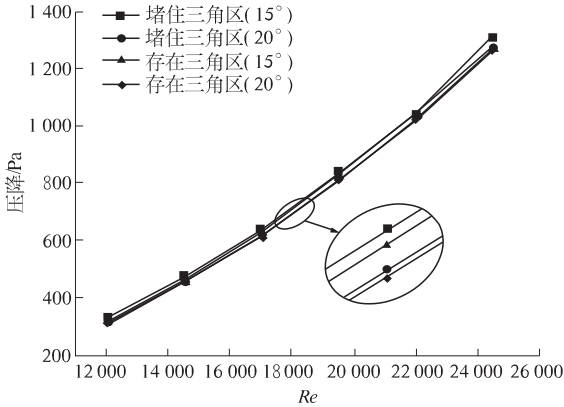


图 6 壳程压力损失随壳程雷诺数的变化

Fig.6 Curve of pressure drop varies with different Reynolds number in shell side

具体原因分析如下:①三角区堵住后,壳程流体流动不再产生三角区漏流,但壳程流体流动有与三角区构成的三角平面垂直方向的流动分量(图 7),流体垂直冲击用于堵住三角区的封板,产生动能损失,流动阻力增大;②王良<sup>[9]</sup>关于 1/4 椭圆螺旋折流板螺旋角为 10° 和 15° 时换热器加与不加阻流板的性能实验得出:增加阻流板后,流体对阻流板产生冲击,壳程压力损失显著增大.笔者模拟计算结果得出,堵住 1/3 椭圆螺旋折流板换热器三角区后,壳程流动流阻变化较小,所以堵住 1/3 椭圆螺旋折流板三角区,对于改善螺旋折流板换热器壳程流体流动三角区漏流现象,提高换热器性能,具有现实意义.

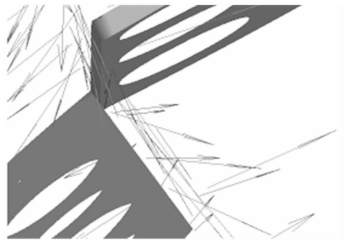


图 7 三角漏流区速度矢量图

Fig.7 Velocity vector of triangle leakage area

但值得提出的是,垂直管束方向分别取 a1、

b1 模型  $Z=0.25\text{ m}$  的截面,两种换热器截面压力分布如图 8 所示.由截面压力分布可以看出,堵住三角区后,截面整体压力分布变化较大,需进一步对其进行研究.

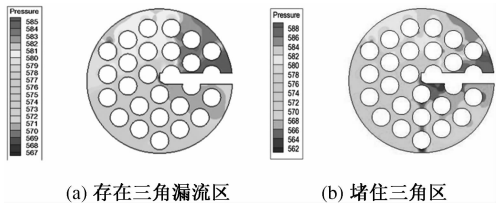


图 8 截面压力分布图

Fig.8 Pressure distribution of section

4.3 漏流对换热器综合性能的影响

用  $Nu/\sqrt[3]{\Delta P}$  作为考查换热器综合性能的参数.图 9 为不同换热器模型综合性能随壳程雷诺数的变化曲线.由图 10 可以看出,三角区漏流使换热器综合性能下降;堵住三角区后,可有效增强换热器的综合性能.通过实验模型数值模拟计算结果对比分析得出,堵住三角区可使换热器综合性能提高 8.1% ~ 11.1%.

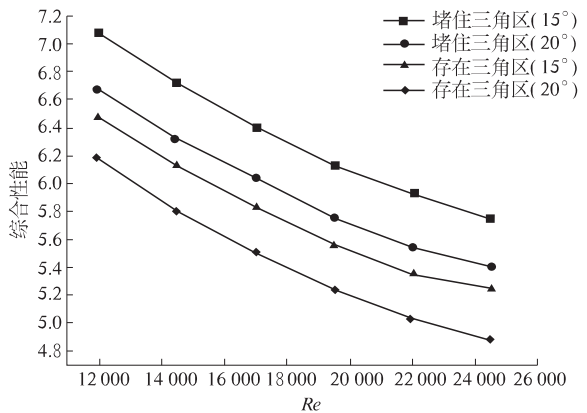


图 9 换热器综合性能随壳程雷诺数的变化

Fig.9 Curve of comprehensive performance varies with different Reynolds number in shell side

具体原因分析如下:①堵住三角区后,三角区不再产生漏流,减小了壳程流体流动短路现象,提高了壳程流体流动的扰动程度,强化了传热;②堵住三角区后,换热器整体压降有所升高,但与壳程传热系数的升高幅度相比,压降升高幅度较小.综合以上因素表明:堵住三角区的换热器综合性能增强.

5 结论

通过对 1/3 椭圆螺旋折流板换热器存在三角漏流区与堵住三角区两种情况进行数值模拟并分

析可知:

(1)三角区漏流使换热器传热系数降低,堵住三角区可使换热器传热性能提高 8.5% ~ 11%,能有效改善换热器的换热性能,强化传热.

(2)三角区漏流使换热器整体压降降低,堵住三角区后,压降升高,但升高幅度不大,说明三角漏流区的存在对换热器整体压降影响较小.

(3)通过与文献中 1/4 椭圆螺旋折流板螺旋角为 10°和 15°换热器加与不加阻流板的性能实验的结论进行对比可知:堵住三角区后,1/3 椭圆螺旋折流板换热器堵板对换热器整体压降影响较小,因而在工程实际应用中,堵住 1/3 椭圆螺旋折流板三角漏流区,具有现实意义.

(4)三角区漏流使换热器综合性能降低,堵住三角区后,换热器综合性能提高 8.1% ~ 11.1%.

三角区漏流使换热器的传热系数、整体压降、综合性能降低.实际应用中可以根据具体应用情况,综合考虑所需传热效果与压降因素,并考虑增加堵板后壳测流动对换热管管束振动的影响,对三角区进一步优化,改善漏流区的作用,提高换热器综合性能.

## 参考文献:

[1] 董其伍,张焱.换热器[M].北京:化学工业出版社,

2008:3-9.

- [2] MASTER B I, CHUNANGAD K S, BOXMA A J, et al. Most frequently used heat exchanger from pioneering research to worldwide application [J]. Heat Transfer Engineering, 2006,27(6):4-11.
- [3] 潘振,陈宝东,商丽艳.螺旋折流板换热器的研究与进展[J].节能技术,2006,24(1):82-85.
- [4] 王秋旺,罗来勤,曾敏,等.交错螺旋折流板管壳式换热器壳侧传热与压力降性能[J].化工学报,2005,56(4):598-601.
- [5] 王欢,张国富,宋天民,等.不同螺旋角螺旋折流板换热器传热性能对比试验[J].节能技术,2009,27(6):519-521.
- [6] LUTCHA J, NEMCAANSKY J. Performance improvement of tubular heat exchanger by helical baffles [J]. Chemical Engineering Research & Design, 1990,68(3):263-270.
- [7] 陈亚平.适合于正三角形排列布管的螺旋折流板换热器[J].石油化工设备,2008,7(6):1-5.
- [8] 孙海涛,陈亚平,吴嘉峰.周向重叠三分螺旋折流板换热器壳侧传热性能[J].化工学报,2012,63(5):1361-1366.
- [9] 王良,罗来勤,王秋旺,等.螺旋折流板换热器中阻流板对换热器沿程压降的影响[J].工程热物理学报,2001,22(增刊):173-176.

## Impact of Triangle Leakage on Comprehensive Performance of Heat Exchangers with Helical Baffles

LIU Min-shan, XU Wei-feng, JIN Zun-long, WANG Yong-qing, WANG Dan

(Key Laboratory of Process Heat Transfer Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A numerical simulation of trisection-ellipse heat exchangers with helical baffles is carried out, and the helix angles are 15° and 20° respectively, and we studied the impact of triangle leakage between continuously overlapped and adjacent baffles on heat transfer and resistance performance of heat exchangers. Through the comparative analysis about the simulation results of existing triangle leakage and that of blocking triangle area without leakage, the results show: triangle leakage makes a more serious short circuit flow for the shell-sided fluid; Triangle leakage makes heat transfer coefficient, shell-sided pressure drop and comprehensive performance of heat exchanger reduce. When triangle leakage is blocked, heat transfer coefficient increases by 8.5% ~ 11%, shell-sided pressure drop increases marginally, comprehensive performance increases by 8.1% ~ 11.1%.

**Key words:** heat exchanger; helical baffle; leakage; numerical simulation

# 腰果酚缩水甘油醚侧链双键的环氧化研究

陈卫航<sup>1</sup>, 张明伟<sup>1</sup>, 王宏力<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省化工研究所有限责任公司, 河南 郑州 450052)

**摘要:**以双氧水和冰乙酸为氧化剂, 将腰果酚缩水甘油醚的侧链双键氧化成环氧基. 以环氧值为主要指标, 采用单因素试验探讨了各反应条件对多环氧基腰果酚缩水甘油醚(PEGCGE)环氧值的影响, 确定了反应较适宜的工艺条件. 采用正交法设计试验得到合成 PEGCGE 的适宜工艺条件为:  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}):n(\text{双氧水})=1:1.5:2.5$  (摩尔比),  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}):m(\text{固体酸})=1:3:0.5$  (质量比), 最终得到 PEGCGE 的环氧值为  $0.601 \text{ mol}/100 \text{ g}$ , 收率为  $89.2\%$ . 另外, 采用 FT-IR 和  $^1\text{H-NMR}$  对其结构进行了表征.

**关键词:**腰果酚; 腰果酚缩水甘油醚; 环氧化; 环氧值

**中图分类号:** TQ323.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.002

## 0 引言

腰果酚(Cardanol)是从腰果壳中提取得到的天然、可再生酚类物质, 其侧链 C15 是含有 0~3 个不饱和烯烃双键的直链<sup>[1]</sup>. 由于腰果酚具有来源丰富、价格低廉、无毒无味等优点, 因此腰果酚衍生物的研究与开发具有广泛的应用前景.

腰果酚缩水甘油醚(Cardanol Glycidyl Ether 简称: CGE)是一种带有长链烃基和苯环的环氧类化合物, 具有黏度低、柔性好以及性质稳定等特点<sup>[2]</sup>, 目前关于 CGE 侧链双键的环氧化研究在国内外报道较少<sup>[3-4]</sup>. 笔者以环氧值为主要指标, 考察 CGE 经氧化得到多环氧基腰果酚缩水甘油醚(Poly-Epoxy Group Cardanol Glycidyl Ether, PEGCGE)的适宜工艺条件. PEGCGE 的环氧值较高, 可取代乙二醇二缩水甘油醚作为氯化石蜡的辅助热稳定剂. 最终得到的制备方法简单、经济, 适宜于工业化生产, 为腰果酚的广泛应用开辟了新的途径, 并为后续工艺开发奠定了理论基础.

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

DF-101S 型集热式恒温加热磁力搅拌器(郑州欧卡仪器设备有限公司); SHB-III 型循环

式多用真空泵(巩义市予华仪器有限责任公司); RE-52AA 型旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂); IMP410 型傅里叶变换红外光谱仪(上海市实验仪器厂).

腰果酚(山东浩博生物材料有限公司); 环氧氯丙烷(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 氢氧化钠(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 苄基三乙基氯化铵(化学纯, 国药集团化学试剂有限公司); 冰乙酸(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 双氧水(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 甲苯(化学纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 固体酸(化学纯, 沧州宝恩吸附材料科技有限公司).

### 1.2 多环氧基腰果酚缩水甘油醚的合成

以腰果酚和环氧氯丙烷为主要原料合成 CGE<sup>[5]</sup>, 参照 GB/T 1677—2008《增塑剂环氧值的测定》测得 CGE 的环氧值为  $0.279 \text{ mol}/100 \text{ g}$ . 将一定比例的 CGE、冰乙酸和固体酸加入 250 mL 的三口烧瓶中, 采用磁力搅拌, 升温至一定温度后, 开始定量滴加质量分数为 30% 的双氧水, 然后控制一定温度, 继续反应数小时后, 用温水将有机物洗涤至中性, 减压蒸馏得到浅黄色透明液体, 即 PEGCGE.

收稿日期: 2014-06-07; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 河南省重大科技专项资助项目(豫科技[2011]6号)

作者简介: 陈卫航(1957-), 女, 湖南湘潭人, 郑州大学教授, 主要从事化学分离工程研究, E-mail: cwh295@126.com.



## 2 实验原理

在催化剂作用下,由腰果酚与环氧氯丙烷为主要原料合成 CGE,再用环氧化剂将 CGE 的侧链双键氧化成环氧基得到 PEGCGE. 合成路线如图 1 所示.

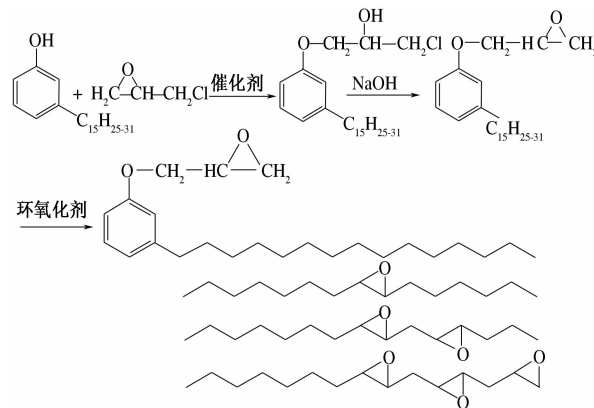


图 1 多环氧基腰果酚缩水甘油醚的合成路线

Fig. 1 The synthetic route of PEGCGE

## 3 结果与讨论

### 3.1 反应影响因素考察

在 PEGCGE 合成的两个步骤中,由于环氧基遇酸易开环,故第二步是合成多环氧基腰果酚缩水甘油醚的关键步骤. 笔者主要研究了其第二步的合成工艺,考察了冰乙酸用量、双氧水用量、固体酸用量、甲苯用量、反应温度以及反应时间对 PEGCGE 环氧值的影响. 文中 CGE、冰乙酸、双氧水之间的比值采用摩尔比;CGE、甲苯、固体酸之间的比值采用质量比.

#### 3.1.1 冰乙酸用量对 PEGCGE 环氧值的影响

在固体酸质量为 CGE 质量的 40%,  $n(\text{CGE}):n(\text{双氧水}) = 1:3$ ,  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:1$ , 反应温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 反应时间为 5 h 条件下,考察冰乙酸用量对 PEGCGE 环氧值的影响,如图 2 所示.

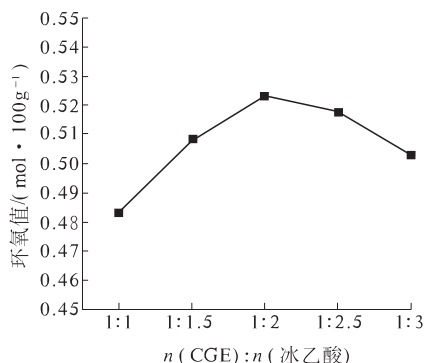


图 2 冰乙酸用量对环氧值的影响

Fig. 2 Effects of glacial acetic acid on epoxy value

图 2 表明,环氧值随冰乙酸用量的增加先增大后减小,当  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}) = 1:2$  时环氧值最大. 产生此结果的可能原因:冰乙酸用量较少时,反应速率较慢,双键环氧化不完全;用量较大时,过量的冰乙酸更易造成产物开环,降低产物的环氧值<sup>[6]</sup>. 故将  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}) = 1:2$  作为较适宜的原料配比.

#### 3.1.2 双氧水用量对 PEGCGE 环氧值的影响

在固体酸质量为 CGE 质量的 40%,  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}) = 1:2$ ,  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:1$ , 反应温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 反应时间为 5 h 条件下,考察双氧水用量对 PEGCGE 环氧值的影响,如图 3 所示.

图 3 表明,当双氧水用量较少时,氧化较慢,有限的时间内双键不能被完全环氧化,因此环氧值随双氧水用量的增加而增加;当  $n(\text{CGE}):n(\text{双氧水}) = 1:2.5$  时环氧值达到最大;继续增加双氧水用量,已生成的环氧基易发生水解<sup>[7]</sup>. 故将  $n(\text{CGE}):n(\text{双氧水}) = 1:2.5$  作为较适宜的原料配比.

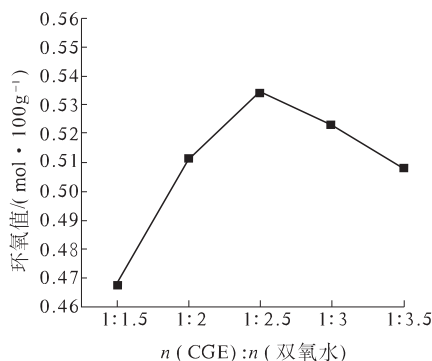


图 3 双氧水用量对环氧值的影响

Fig. 3 Effects of hydrogen peroxide on epoxy value

#### 3.1.3 甲苯用量对 PEGCGE 环氧值的影响

在固体酸质量为 CGE 质量的 40%,  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}):n(\text{双氧水}) = 1:2:2.5$ , 反应温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 反应时间为 5 h 条件下,考察甲苯用量对 PEGCGE 环氧值的影响,如图 4 所示.

图 4 表明,甲苯作为反应溶剂,环氧值随甲苯用量的增加先增大后降低,当  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:3$  时环氧值最大. 故将  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:3$  作为最适宜的原料配比.

#### 3.1.4 固体酸用量对 PEGCGE 环氧值的影响

在  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}):n(\text{双氧水}) = 1:2:2.5$ ,  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:3$ , 反应温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 反应时间为 5 h 的条件下,考察固体酸用量对 PEGCGE 环氧值的影响,如图 5 所示.

图5表明,环氧值随固体酸用量的增加而增大,当固体酸的质量分数大于CGE质量的50%时,环氧值随固体酸用量的增加基本不再变化,故将固体酸用量为CGE质量的50%作为适宜的反应条件.

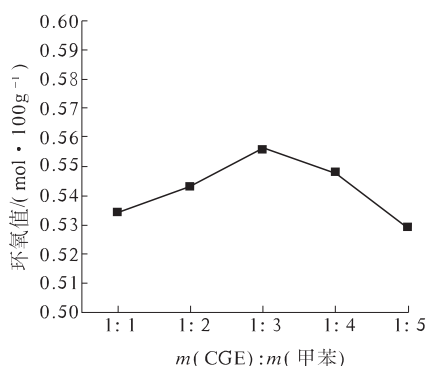


图4 甲苯用量对环氧值的影响

Fig.4 Effects of toluene on epoxy value

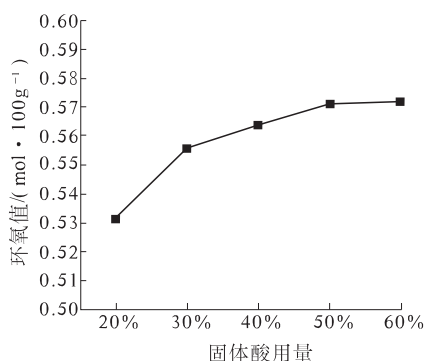


图5 固体酸用量对环氧值的影响

Fig.5 Effects of solid acid on epoxy value

### 3.1.5 反应温度对PEGCGE环氧值的影响

在固体酸质量为CGE质量的50%,  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}):n(\text{双氧水}) = 1:2:2.5$ ,  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:3$ , 反应时间为5 h条件下, 考察反应温度对PEGCGE环氧值的影响, 如图6所示.

图6表明, 当反应温度低于60℃时, 环氧值随着温度升高而增大; 当反应温度为60℃时环氧值最大; 温度过高, 双氧水易水解且环氧基易开环, 使产物的环氧值降低<sup>[7]</sup>. 故将60℃作为较适宜的反应温度.

### 3.1.6 反应时间对PEGCGE环氧值的影响

在固体酸质量为CGE质量的50%,  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}):n(\text{双氧水}) = 1:2:2.5$ ,  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:3$ , 反应温度为60℃条件下, 考察反应时间对PEGCGE环氧值的影响, 如图7所示.

图7表明, 环氧值随反应时间的增加先增大后降低. 当反应时间为5 h时, 双键环氧化反应已

基本完成, 超过5 h, 只会促进酸对环氧基的破坏, 使产物的环氧值降低<sup>[4]</sup>, 故将5 h作为较适宜的反应时间.

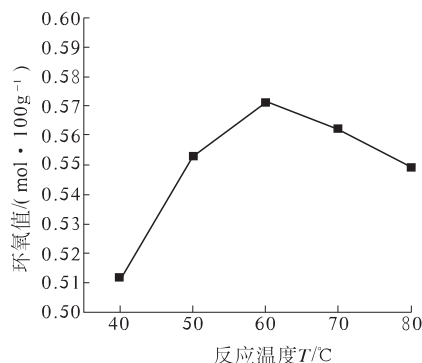


图6 反应温度对环氧值的影响

Fig.6 Effects of reaction temperature on epoxy value

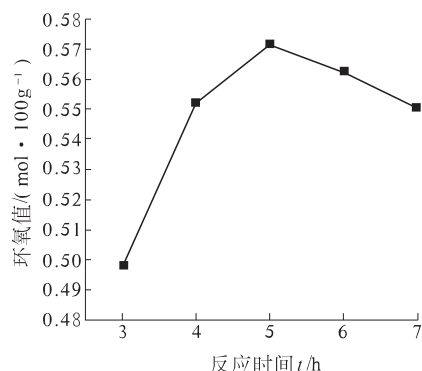


图7 反应时间对环氧值的影响

Fig.7 Effects of reaction time on epoxy value

综上单因素试验结果可知, 合成PEGCGE较适宜的工艺条件为: 固体酸质量为CGE质量的50%,  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}):n(\text{双氧水}) = 1:2:2.5$ ,  $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:3$ , 反应温度60℃, 反应时间5 h. 通过单因素试验还可看出, 冰乙酸、反应温度和反应时间对环氧值的影响较大. 笔者以上述三因素为变量设计正交试验, 探求更加适宜的合成工艺条件.

### 3.2 正交试验结果及分析

表1为三因素水平表, 表2为正交试验结果. 从表2可知, 3种因素的适宜组合为 $A_2B_2C_1$ . 在此试验条件下得到PEGCGE的环氧值和收率分别为0.601 mol/100 g和89.2% (3次平行试验的平均值). 由于C因素为边界条件, 由验证试验10#得到PEGCGE的环氧值为0.571 mol/100 g, 小于0.601 mol/100 g. 故 $A_2B_2C_1$ 为合成PEGCGE的适宜工艺条件, 即反应温度为60℃, 反应时间为5 h,  $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}) = 1:1.5$ .

表 1  $L_9(3^4)$  因素水平表  
Tab.1  $L_9(3^4)$  factors – level table

水平	因素			
	$T/^{\circ}\text{C}$	$t/\text{h}$	$n(\text{CGE})/$ $n(\text{冰乙酸})$	空列 D
	A	B	C	D
1	50	4	1:1.5	1
2	60	5	1:2.0	2
3	70	6	1:2.5	3

表 2  $L_9(3^4)$  正交试验设计表及环氧值结果  
Tab.2 Orthogonal experimental( $L_9(3^4)$ )  
and results of epoxy value

试验号	因素				环氧值/ ( $\text{mol} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ )
	$T/^{\circ}\text{C}$	$t/\text{h}$	$n(\text{CGE})/$ $n(\text{冰乙酸})$	空列	
	A	B	C	D	
1#	1	1	1	1	0.554
2#	1	2	2	2	0.569
3#	1	3	3	3	0.538
4#	2	1	2	3	0.553
5#	2	2	3	1	0.565
6#	2	3	1	2	0.556
7#	3	1	3	2	0.552
8#	3	2	1	3	0.568
9#	3	3	2	1	0.547
10#	2	2	0	1	0.571
$K_1$	1.661	1.659	1.678	1.666	$T = 5.002$
$K_2$	1.674	1.702	1.669	1.672	
$K_3$	1.667	1.641	1.655	1.659	
$R$	0.013	0.061	0.023	0.013	

注：试验号 10#为验证试验。

由极差  $R_B > R_C > R_A$  可知,PEGCGE 合成工艺条件中,3 个因素对环氧值的影响程度从高到低依次为:反应时间、冰乙酸用量和反应温度。

3.3 FT-IR 和  $^1\text{H-NMR}$  光谱分析

Cardanol、CGE 和 PEGCGE 的 FT-IR 谱图见图 8。CGE 与 Cardanol 的 FT-IR 谱图相比,3 348  $\text{cm}^{-1}$  处的酚羟基特征峰明显减弱,说明酚羟基发生了反应;1 158.87  $\text{cm}^{-1}$ 、1 046  $\text{cm}^{-1}$  为 C—O—C 的伸缩振动峰<sup>[8]</sup>;911  $\text{cm}^{-1}$  和 857  $\text{cm}^{-1}$  为环氧基的特征吸收峰<sup>[3]</sup>。PEGCGE 与 CGE 的 FT-IR 谱图相比,3 007  $\text{cm}^{-1}$  处 C=C 上 C—H 的伸缩振动峰消失;环氧基的特征吸收峰依然存在。

Cardanol、CGE 和 PEGCGE 的  $^1\text{H-NMR}$  谱图见图 9。图中已给出 Cardanol 中各个峰所对应的基团结构,CGE 与 Cardanol 的  $^1\text{H-NMR}$  谱图相比,酚羟基在化学位移  $\delta = 6.2 \sim 6.3$  处的峰消失;化

学位移  $\delta$  为 2.7 和 3.8 以及 3.8 ~ 3.9 和 4.3 的峰对应 CGE 结构中的基团<sup>[9]</sup>。PEGCGE 与 CGE 的  $^1\text{H-NMR}$  谱图相比,化学位移  $\delta = 5.0 \sim 6.0$  处 C=C 上氢的峰消失,说明侧链双键已被完全氧化;化学位移  $\delta = 2.3 \sim 2.4$  处出现新峰,对应于 PEGCGE 结构中链中的环氧基团<sup>[3]</sup>。

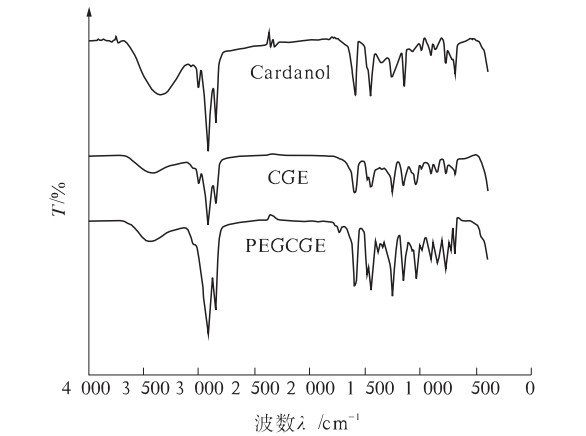


图 8 Cardanol、CGE 和 PEGCGE 的 FT-IR 谱图  
Fig.8 FT-IR spectra of Cardanol、CGE and PEGCGE

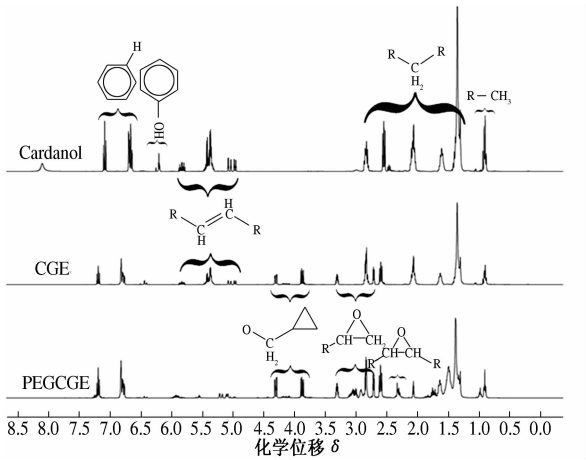


图 9 Cardanol、CGE 和 PEGCGE 的  $^1\text{H-NMR}$  谱图  
Fig.9  $^1\text{H-NMR}$  spectra of Cardanol, CGE and PEGCGE

采用国标环氧值的测定方法以及 FT-IR 谱图和  $^1\text{H-NMR}$  谱图的综合分析可知,本实验合成出了 CGE 和 PEGCGE。

4 结论

选择固体酸为催化剂,合成了一种可用作氯化石蜡热稳定剂的新型物质——PEGCGE。通过单因素试验和正交试验,确定了合成 PEGCGE 的适宜工艺条件为:固体酸质量为 CGE 质量的 50%, $n(\text{CGE}):n(\text{冰乙酸}):n(\text{双氧水}) = 1:1.5:2.5$ , $m(\text{CGE}):m(\text{甲苯}) = 1:3$ ,反应温度为 60  $^{\circ}\text{C}$

以及反应时间为 5 h,此反应条件下得到 PEGCGE 的环氧值为 0.601 mol/100 g,收率为 89.2%。最后,采用 FT-IR 和  $^1\text{H-NMR}$  对其结构进行了表征。合成 PEGCGE 的方法简单、经济,为腰果酚的应用开辟了新的途径,并为后续腰果酚衍生物生产工艺的开发提供了理论依据和数据支持。

### 参考文献:

- [1] SULTANIA M,RAI J S P,SRIVASTAVA D. Process modeling,optimization and analysis of esterification reaction of cashew nut shell liquid (CNSL)-derived epoxy resin using response surface methodology [J]. J Hazardous Materials,2011,185(2/3):1198-1204.
- [2] 徐丽,张亚男,刘国际,等.腰果酚缩水甘油醚的制备[J].精细石油化工,2013,30(1):1-4.
- [3] RAO B S,PALANISAMY A. Synthesis of bio based low temperature curable liquid epoxy, benzoxazine monomer system from cardanol: Thermal and viscoelastic properties [J]. J European Polymer, 2013, 49(8): 2365-2376.
- [4] 米桢.腰果酚衍生物的制备及其在环氧树脂领域的应用研究[D].北京:中国林业科学院,2013.
- [5] 张明伟,王宏力,赵立新,等.腰果酚缩水甘油醚的工艺技术研究[J].河南化工,2013,30(10):38-41.
- [6] 杨艳,向开权,侯宾,等.环氧蓖麻油优化合成条件的研究[J].湖北民族学院学报:自然科学版,2012,30(4):450-453.
- [7] 史润萍,蒋平平,施赛泉.大豆酸化油甲酯环氧化合成无毒环保型增塑剂[J].中国油脂,2008,33(6):36-39.
- [8] 石晓华,刘娜,熊冕,等.羟基特戊酸新戊二醇二丙烯酸酯(HPHPDA)的合成及性能研究[J].郑州大学学报:工学版,2013,34(2):4-6.
- [9] CHRYSANTHOS M,GALY J,PASCAULT J P. Preparation and properties of bio-based epoxy networks derived from isosorbide diglycidyl ether [J]. J Polymer, 2011,52(16):3611-3620.

## Study on the Epoxidation of Double Bond in Cardanol Glycidyl Ether Side Chain

CHEN Wei-hang<sup>1</sup>, ZHANG Ming-wei<sup>1</sup>, WANG Hong-li<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Chemical Industry Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Hydrogen peroxide and glacial acetic acid as oxidant, the double-bonds of side chain in cardanol glycidyl ether are oxidized into epoxy group, using the single factor experiment, we choose epoxy value as the main index to discuss the influence of various reaction conditions to the epoxy value of poly-epoxy group cardanol glycidyl ether (PEGCGE), and the more suitable process conditions are determined. Through orthogonal experiment, the suitable process conditions of synthesis PEGCGE are obtained: The mole ratio is:  $n(\text{CGE}):n(\text{glacial acetic acid}):n(\text{hydrogen peroxide})=1:1.5:2.5$ ; The mass ratio is:  $m(\text{CGE}):m(\text{toluene}):m(\text{solid acid})=1:3:0.5$ . Finally, the epoxy value of PEGCGE is 0.601 mol/100 g and the yield is 89.2%, its structure is characterized by FT-IR and  $^1\text{H-NMR}$ .

**Key words:** cardanol; cardanol glycidyl ether; epoxidation; epoxy value



文章编号:1671-6833(2014)06-0010-04

# 螺旋格栅纽带开发及其综合换热性能分析

吴金星<sup>1</sup>, 彭旭<sup>1</sup>, 李俊超<sup>1</sup>, 刘青锋<sup>2</sup>, 贺敏<sup>2</sup>, 李国立<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南力威热能设备制造有限公司, 河南 郑州 450101)

**摘要:** 针对燃气真空锅炉中较大直径的换热管, 开发了一种新型管内插入物——螺旋格栅纽带, 用于强化管内对流换热. 分别建立了管内插入螺旋格栅纽带及相同结构参数普通纽带的三维几何模型, 在相同工况下用 FLUENT 软件模拟了管内综合换热性能, 根据模拟结果分析了螺旋格栅纽带强化管内对流换热的 3 种机理, 即流通截面当量直径减小、螺旋流速度增大、离心力引发二次流等. 结果表明: 相同工况下, 螺旋格栅纽带的对流换热系数比普通纽带减小了 8.6%, 同时单位长度螺旋格栅纽带的压降比普通纽带减小了 32%, 而综合评价因子  $J$  值大于 1, 表明螺旋格栅纽带具有良好的综合换热性能.

**关键词:** 燃气真空锅炉; 管内插入物; 螺旋格栅纽带; 强化换热; 数值模拟

**中图分类号:** TQ051.5; TK124 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.003

## 0 引言

对于大直径换热管(如  $\Phi \geq 25$  mm)的内部强化换热, 要改变换热管的几何形状, 加工难度较大, 因此常采取增设管内插入物的方法, 如内插各种型式的翅片或扰流子等. 各种翅片的加工成本较高且重量较大, 而管内插入扰流子则是一种结构简单、更加经济实用的方法<sup>[1]</sup>. 高翔等<sup>[2-3]</sup>把管内插入扰流子形成的旋流分为衰减性旋流和非衰减性旋流两种, 研究表明, 螺旋肋片形成的非衰减性旋流比多翅管和衰减性旋流在传热系数上分别提高 60%~85% 和 49%, 但其阻力损失也较大, 在较低 Reynolds 数下非衰减性旋流的综合热力学性能较好. 文献[4-11]表明, 在各种型式的管内插入物中, 螺旋纽带具有结构简单、加工方便、强化传热、经济实用的良好综合性能. 笔者针对燃气真空锅炉中较大直径的换热管, 用插入物来强化管内自来水的对流换热, 重点是减小管内流阻, 在综合分析现有管内插入物结构及性能特点的基础上, 开发了一种新型螺旋格栅纽带.

## 1 新型螺旋格栅纽带的开发

流体在圆管内充分发展流动时, 中心区域流体速度较大但速度梯度很小, 而近壁处存在着流

体速度较小但速度梯度较大的滞留层, 流体与管壁的对流换热热阻主要集中在滞留层中. 管内插入普通纽带可使管内全部流体产生螺旋流动, 有效强化流体对流换热, 但管内流体的流阻也显著增大, 从而增加了泵功耗<sup>[1]</sup>. 为了减小管内流体的流阻, 笔者开发了一种螺旋格栅纽带. 格栅纽带的加工工艺如下: 首先按照换热管的内径和长度剪裁出金属片, 接着在薄平金属片上按照设计尺寸间隔铣轧出矩形孔, 然后按照预定扭率扭制成格栅状. 格栅纽带的整体结构呈现为变形的矩形孔和孔桥交替排列的形式, 与普通纽带的对比如图 1 所示. 格栅纽带中心区域被挖空, 使得管内中心区域速度较大的流体直接掠过纽带, 不再产生旋流, 而近壁区流体在格栅纽带的诱导下产生非衰减性旋流, 不但增大了滞留层流体速度, 而且改变了流体的流动方向, 能有效提高流体的湍流度, 从而达到强化管内对流传热的目的.

格栅纽带属于非衰减性螺旋发生装置<sup>[2]</sup>, 在真空锅炉的换热管中全程放置. 如换热管内径  $D_i$  为 20 mm 时, 格栅纽带一般选取厚度  $\delta$  为 1 mm、宽度  $b$  为 19 mm(略小于管内径)的不锈钢金属片扭制而成, 纽带的扭率  $\gamma$  定义为纽带扭转  $180^\circ$  沿轴线的延伸长度  $H$  与纽带宽度  $b$  之比.

收稿日期:2014-06-06; 修订日期:2014-09-05

基金项目:河南省重点科技攻关计划项目(132102210406)

作者简介:吴金星(1968-), 男, 河南通许人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事强化传热与节能技术研究, E-mail: wujx@zzu.edu.cn

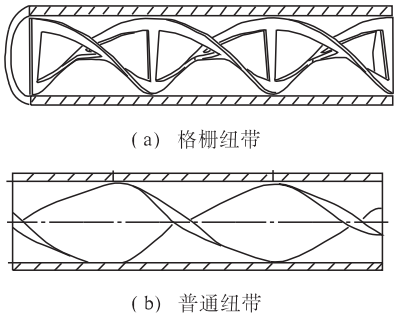


图 1 格栅纽带与普通纽带结构对比图  
Fig. 1 Comparison of structure between grid twisted tape and ordinary twisted tape

2 格栅纽带强化管内换热机理分析

2.1 换热管流通截面当量直径减少

格栅纽带插入换热管后,管内流体的流通区域被分隔成两部分,格栅纽带占据了管内部分流通截面,其当量直径的计算公式为

$$D_e = \frac{4A_1}{C_1} = \frac{D_i(1 - 4b\delta/(\pi D_i))}{1 + 2(b/D_i + \delta/D_i)/\pi}$$
 (1)

式中: $A_1$  为流通截面积, $m^2$ ;  $C_1$  为流道润湿周长, $m$ .

从式(1)可见,换热管插入纽带后,其当量直径比光管内径小<sup>[3]</sup>,在相同流量下管内流体流速自然会增大,有利于强化换热.

2.2 螺旋流动速度增大

管内插入格栅纽带后,流体在管内做螺旋流动,与光管相比流体流程增长,在流量不变的情况下,管内流体流速必然增大,且流体的湍流度增强,对管内壁面冲刷更加强烈,使壁面流体滞留层遭到破坏,对流换热得到强化.

2.3 离心力引发二次流

当流体在管内流动时,格栅纽带使近壁区流体产生螺旋流动和离心力,离心力和管壁面的反作用力使流体产生二次流.文献[4-6]通过对螺旋流动数值研究指出,随着  $Re$  增加和纽率减小,纽带一侧的二次流由一个变成两个.设管内插入格栅纽带后产生二次流的合成速度为  $u_{2s}$ ,管内流体整体螺旋运动的合成速度是  $u_s$ ,则合成速度为

$$u_{2s} = u_s \frac{1}{1 - 4b\delta/(\pi D_i^2)} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2\gamma}\right) + \frac{1}{4\gamma^2} \left(\frac{\pi}{4} + 1\right)^2}$$
 (2)

由式(2)可知,换热管内部存在较大的二次流速,必然会加强管内各部分流体的掺混,具有强化换热的作用.

3 格栅纽带与普通纽带的综合性能模拟

3.1 物理模型与模拟方法

在相同纽率、相同结构参数和相同工况下,建立格栅纽带和普通纽带的三维几何模型.选取格栅纽带模型参数为:纽带中心区的矩形孔尺寸为  $15\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ ,矩形孔中心间距为  $20\text{ mm}$ ,纽率  $\gamma = 4.2$ .普通纽带(中心区无开孔)主要结构参数与格栅纽带相同.

计算过程做如下假设:①不考虑重力影响;②所有液-固接触面为无滑移;③流体流过管后无质量增加;④管壁为等壁温;⑤流体为不可压缩稳态流体.模拟条件设置为:换热介质为水,进口流量为  $0.147\text{ kg/s}$ .边界条件为:操作在标准大气压下进行,选取进口温度为  $288\text{ K}$ ;换热管设为恒壁温,壁面温度为  $358\text{ K}$ ;换热管进出口采取周期性边界条件.采用标准  $k-\varepsilon$  方程湍流模型;压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法;动量、能量及湍流参量的求解采用二阶迎风格式,能量方程残差控制在  $10^{-8}$  数量级,其余方程残差控制在  $10^{-6}$  数量级.

在模型的网格划分时,因为近壁区流体速度梯度很大,所以近壁区网格需要加密处理,以确保计算结果的精确性.综合考虑计算机的性能和经济性,笔者进行了网格独立性验证.以扭率  $\gamma = 1.05$  为例,分别取网格数量为 30 万、40 万、50 万、60 万、70 万进行计算,结果发现,当网格数大于 60 万时,换热系数和压降的计算结果基本稳定,因此,判定网格数为 60 万时已能满足计算精度要求.

3.2 格栅纽带与普通纽带的综合性能分析

在相同工况条件下,格栅纽带和普通纽带的计算结果见表 1.可见,格栅纽带比普通纽带的换热系数减小了  $8.6\%$ ,同时其单位管长压降比普通纽带减小了  $32\%$ .这是因为格栅纽带的中心区域开孔,纽带的堵塞面积减少了近  $20\%$ ,使中心区域流体做直线流动,管内压降必然显著减小.

表 1 两种纽带在相同工况下换热系数与压降对比  
Tab.1 Comparison of heat transfer coefficient and pressure drop of two kind twisted tapes under identical conditions

纽带类型	换热系数 $h/$	压降 $\nabla P/$
	( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	( $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ )
格栅纽带	3 528.243	1 131.977
普通纽带	3 861.647	1 665.526

用公式  $J = (h/h_0)/(\nabla P/\nabla P_0)^{1/2}$  来评价组带的综合性能<sup>[3]</sup>,评价因子  $J$  的数值大于 1,说明格栅组带的综合性能优于普通组带.

3.3 内置格栅组带的管内流场分析

图 2(a)是格栅组带开孔中心处横截面流场图,图 2(b)是格栅组带孔桥处横截面流场图.两处的流场分布皆可看出,流体在横截面上呈现较强的螺旋流动,并产生由内到外流动趋势,从而使各部分流体的充分掺混,达到强化换热的目的.

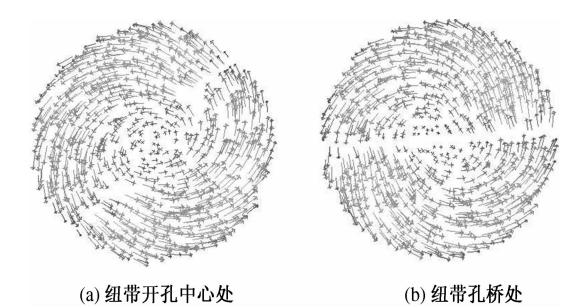


图 2 内插格栅组带的管内两个横截面流场  
Fig. 2 Flow field of two cross sections in tube inserted with grid twisted tape

4 雷诺数及组率对换热和压降的影响

为分析不同组率格栅组带的性能,格栅组带的组率  $\gamma$  分别取:1.05,2.10,3.16,4.20,5.26,建立的模型长度为  $2H$ ,即扭转  $360^\circ$  的螺旋长度.设流体流量为:0.073 6,0.147,0.220,0.294,0.368 kg/s,对应雷诺数分别为 5 000,10 000,15 000,20 000,25 000.其他参数和条件不变,模拟结果如图 3、图 4 所示.图 3(a)是不同组率格栅组带的换热系数随雷诺数的变化情况;图 3(b)是不同组率格栅组带的单位长度压降随雷诺数的变化情况.

从图 3(a)可以看出,管内插入格栅组带后,对流换热系数随着雷诺数的增加而增大,且随着组率减小,对流换热系数也增大.当雷诺数达到 20 000,组率  $\gamma > 3$  时,换热系数的增长速率减小,而组率  $\gamma$  为 1.05 和 2.1 的管内换热系数依然增长较快.其原因是组率较小时,格栅组带对管内流体扰动更强烈,管内流体湍流度更大.图 3(b)表明,随着雷诺数增大,管内压降快速增大,且组率越小压降增大越快.

图 4 反映了换热系数与单位长度压降之比随雷诺数的变化情况,比值越大说明格栅组带插入换热管后综合性能越好.从图 4 可以看出,随着雷诺数增大,比值迅速减小,综合性能变差.当雷诺

数超过 20 000 时,各种组率格栅组带的综合性能差别不大.综合来看,要获得最佳的综合换热效果,需要选择适当的组率和流体雷诺数.

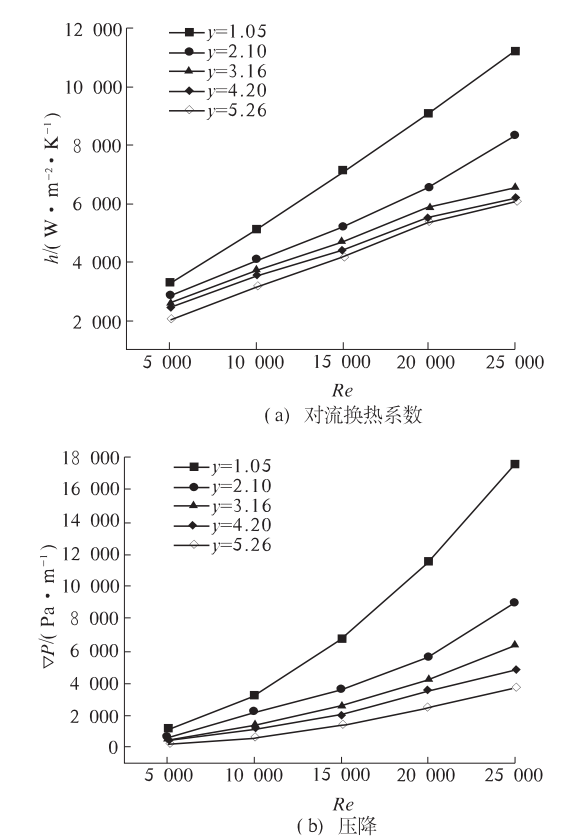


图 3 雷诺数对换热系数和压降的影响  
Fig. 3 Influence of Reynolds number on convective heat transfer coefficient and pressure drop

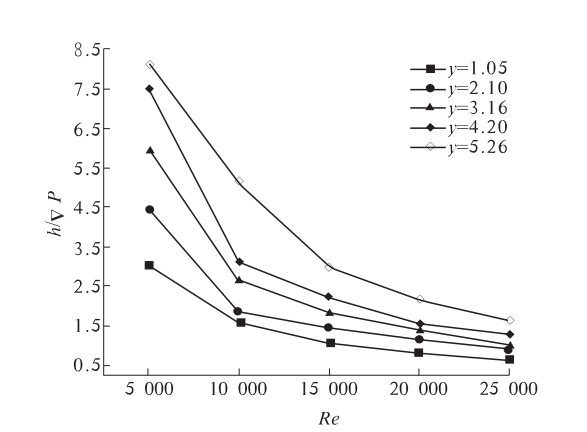


图 4 综合换热性能随雷诺数的变化  
Fig. 4 Relation of comprehensive heat transfer characteristics and Reynolds number

5 结论

(1) 格栅组带结构简单,加工制造方便,具有明显的强化换热和减小流阻的效果.其强化管内对流换热有 3 种机理,即插入格栅组带使管内流

通截面的当量直径减小、管内流体螺旋流动使流体速度增大及螺旋流动引发二次流。

(2)随着雷诺数增大,管内格栅纽带的综合性能迅速变差。在雷诺数达到 20 000 且扭率  $\gamma > 3$  时换热系数增大速率减小,但压降仍增长较快。

(3)相同工况下,格栅纽带比普通纽带的对流换热系数减少了 8.6%,同时其单位长度压降比普通纽带减少 32%,而综合评价因子  $J$  值大于 1,表明格栅纽带能很好地改善管内对流换热条件,具有良好的综合换热性能。

(4)随着扭率增大,插入格栅纽带的管内对流换热系数变小,扭率  $\gamma > 3$  时对流换热系数受扭率变化的影响很小,但压降却继续增大。因此,要获得最佳的综合换热效果,需要选择适当的扭率和流体雷诺数。

### 参考文献:

- [1] 吴金星,韩东方,曹海亮. 高效换热器及其节能应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [2] 高翔,骆仲泐,周劲松,等. 衰减性旋流强化传热性能的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5): 184-188.
- [3] 高翔,骆仲泐,周劲松,等. 螺旋肋片形成非衰减性旋流的强化传热性能[J]. 化工学报,2003,54(9): 1205-1208.
- [4] 张琳,钱红卫,俞秀民,等. 内置螺旋纽带换热管的传热强化机理[J]. 机械工程学报,2007,43(1): 139-143.
- [5] DATE A W. Predictin of fully developed flow in a tube containing a twisted-tape[J]. Int. J. Heat and Mass Transfer,1974,17:845-859.
- [6] MANGLIK R M, BERGLES A E. Heat transfer and pressure drop correlation for twisted-tape inserts in isothermal tubes(Part I): laminar flows[J]. Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, 1993, 115(4): 881-889.
- [7] 朱冬生. 插入物强化管壳式换热器管内高粘度流体的传热[J]. 石油炼制与化工, 1998, 29(7): 39-42.
- [8] 刘雯,骆政园,白博峰. 管内含螺旋纽带诱导的螺旋涡特性[J]. 化工学报, 2011, 62(11): 3115-3122.
- [9] 吴剑恒. 螺旋纽带自动除垢防垢和强化传热技术的原理及应用[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(2): 151-154.
- [10] 刘舜尧,管文华. 管壳式换热器纽带强化传热实验研究[J]. 广东化工, 2009, 36(10): 175-177.
- [11] 刘雯,骆政园,白博峰. 管内螺旋涡流的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 32(12): 2060-2063.

## Analysis on Comprehensive Heat Transfer Characteristics and Development of the Spiral Grid Twisted Tape

WU Jin-xing<sup>1</sup>, PENG Xu<sup>1</sup>, LI Jun-chao<sup>1</sup>, LIU Qing-feng<sup>2</sup>, HE Min<sup>2</sup>, LI Guo-li<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Leway Thermal Equipment Manufacturing Co. Ltd., Zhengzhou 450101, China)

**Abstract:** In order to enhance convective heat transfer of the heat transfer tubes with bigger diameter, a new kind of tube insert, spiral grid twisted tape, was developed for the gas-fired vacuum boiler. 3D geometric models of the spiral grid twisted tape and the classic twisted tape with the same twist ratio inserted the tubes were set up respectively. The comprehensive heat transfer characteristics in the tube was simulated using the FLUENT software under the same conditions. The mechanisms of heat transfer enhancement, such as decrease of hydraulic diameter of flow section, increase of spiral flow speed, the secondary flow caused by centrifugal force etc. are analyzed. The results show that the convective heat transfer coefficient of the spiral grid twisted tape decreases 8.6% than that of the classic twisted tapes and pressure drop decreases 32.0%, and comprehensive evaluation factor  $J$  is greater than 1. It shows that the spiral grid twisted tape has a good comprehensive heat transfer performance.

**Key words:** gas-fired vacuum boiler; tube insert; spiral grid twisted tape; heat transfer enhancement; numerical simulation



文章编号:1671-6833(2014)06-0014-05

### 3 种类型波节管的强化传热模拟分析

韩 勇, 王定标, 张灿灿, 向 颀

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**针对外凸波节管、内凹波节管以及波纹相间波节管,用  $k-\varepsilon$  模型对此 3 种类型波节管的流动和传热特性进行了数值研究,比较了 3 种波节管在不同  $Re$  数下的流动和传热综合性能(PEC):在  $Re = 2\,300 \sim 11\,000$  时,外凸波节管最优,波纹相间波节管次之,内凹波节管最差.对波节管的换热机理和阻力机理进行了分析,得出波节管强化换热和压力损失的原因在于管内压力的强烈波动,特别在波节段末尾处的强烈负压区是压降损失过大的主要因素.另外,用热势容概念分析了波节管的性能,得到了进出口热势容差  $\Delta E$  随  $Re$  数的变化曲线.

**关键词:**强化换热;数值模拟;波节管;焓

**中图分类号:** TQ 051.5; TK172 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.004

#### 0 引言

波节管换热器具有传热效率高、不易结垢和热补偿性好等优点<sup>[1-3]</sup>,已被广泛应用在石油、化工、电力及制冷等行业的换热设备上.自上世纪 80 年代郎逵<sup>[4]</sup>在国内申请波节管换热器发明专利以来,针对波节管强化换热技术,已经有众多学者进行了相关的研究.杜满河等<sup>[3]</sup>介绍了波节管换热器在工业应用中的优点和缺陷,提出了波节管在设计、制造、验收过程中应注意的若干问题.张伟玮等<sup>[5]</sup>对外凸波节管进行数值模拟研究,得到了不同的波谷圆角半径和波节高度对传热特性的影响规律.张登庆等<sup>[6]</sup>对内凹波节管的换热和阻力特性进行了实验研究,研究结果表明, $Re < 3\,000$  波节管的换热系数与阻力性能比明显好于光管等, $Re > 7\,000$  时两者的换热系数与阻力性能比非常接近.徐建民等<sup>[7]</sup>利用数值模拟方法并结合场协同理论对外凸波节管管内流动进行了研究,考察了 4 种常用规格外凸波节管的管内流动及传热性能,在湍流范围内,外凸波节管的强化传热倍数最高达到相同条件下直管的 2.4~3.3 倍.韩怀志等<sup>[8]</sup>对变节距外凸波节管分别用 RST 模型和 DNS 模型进行了数值模拟研究,指出与传统的外凸波节管相

比,综合传热性能最多提高 32.3%;他们还发现壳侧流体在波节的去流侧形成了一个脱体旋涡,破坏了流体的速度边界层和温度边界层,同时使得其内部的摩擦阻力和热扩散能力明显提高,起到了明显的强化换热效应<sup>[9]</sup>.汪威等<sup>[10]</sup>对波节管中脉动流强化换热机理进行了探讨和数值模拟研究,得出脉动速度进口可使波节管换热效果提高 90%.

笔者通过 FLUENT 用  $k-\varepsilon$  模型对外凸、内凹及波纹相间波节管分别进行数值研究,考察不同  $Re$  数下光管与 3 种波节管的  $Nu$  和  $f$  的变化规律,对换热机理进行了探讨,并用热势容概念分析了 3 种管的综合性能.

#### 1 模型建立

##### 1.1 几何模型

内凹波节管(c1)、外凸波节管(c2)和波纹相间波节管(c3)的几何结构如图 1 所示.图中,直径:  $D_1 = D_2 = D_3 = 22\text{ mm}$ ;进口段:  $L_{11} = L_{21} = L_{31} = 102\text{ mm}$ ;出口段:  $L_{13} = L_{23} = L_{33} = 102\text{ mm}$ ;波节段:  $L_{12} = L_{22} = L_{32} = 276\text{ mm}$ ;内凹曲线表达式:  $y = -\cos(\pi \cdot x/5)$ ;外凸曲线表达式:  $y = \cos(\pi \cdot x/5)$ ;波节深度:  $H_1 = H_2 = H_{31} = H_{32} = 2\text{ mm}$ ;节距:  $P_1 = P_2 = P_{31} = P_{32} = 14\text{ mm}$ .

收稿日期:2014-05-30;修订日期:2014-06-19

基金项目:河南省科技创新杰出青年人才计划项目(124100510020);河南省科技攻关计划项目(142102210494)

作者简介:韩勇(1987-),男,河南汝州人,郑州大学博士研究生,研究方向为过程工业节能技术及高效装备.

通讯作者:王定标(1967-),男,浙江杭州人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事工业节能技术与装备的研究与开发,E-mail: wangdb@zzu.edu.cn.

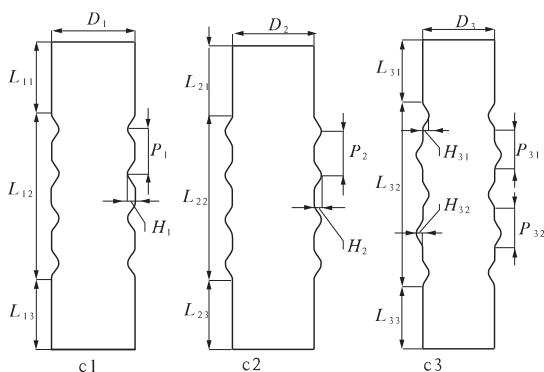


图1 3种波节管几何结构示意图

Fig.1 The geometry structure of corrugated tube

采用 ICEM CFD 对波节管进行网格划分, 整个波节管采用规则的六面体结构化网格. 全局尺寸为 0.5 mm, 在壁面处进行网格加密, 壁面处网格尺寸第一层为 0.1 mm, 从壁面处增长率为 1.2, 直到湍流核心的 0.5 mm. 根据入口  $Re$  数, 调整第一层网格的尺寸, 如图 2 所示.

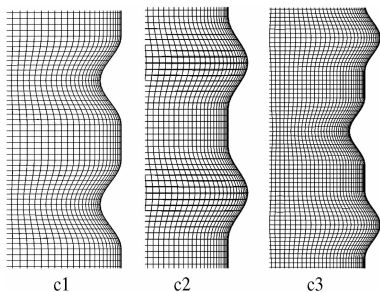


图2 3种波节管网格划分示意图

Fig.2 Meshing of 3D corrugated tube

## 1.2 物理模型

对物理模型进行合理假设: ①流体为不可压缩牛顿流体; ②流动为定常流动; ③传热在三维稳态条件下进行; ④壁面为无滑移边界条件; ⑤不考虑重力的影响; ⑥物性不随温度变化. 根据以上假设, 得到式(1)<sup>[11]</sup>, 连续性方程、动量方程(时均 N-S 方程)和能量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \\ \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}); \\ \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho e + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_i}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \mu u_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right]. \end{cases} \quad (1)$$

由以上控制方程可知, 因有雷诺应力项  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ , 方程不封闭, 选用标准  $k-\varepsilon$  模型将雷诺应力包含在湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  项内, 将雷诺应力转化为对  $k$  和  $\varepsilon$  的方程, 使方程可解, 如公式(2)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon; \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ ;  $\mu_t$  为涡耗散率;  $G_k$  为平均速度梯度产生的湍动能;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_\mu$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  的取值为 1.44, 1.92, 0.09, 1.0, 1.03.

## 1.3 计算设置

模型通过基于有限体积法的 FLUENT 进行求解. 采用基于压力的隐式稳态格式、标准  $k-\varepsilon$  模型、增强壁面函数; 压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法; 能量方程、动量方程和连续性方程的离散方法采用二阶迎风格式, 残差的收敛精度确定为  $10^{-5}$ ; 边界条件具体设置如下.

(1) 入口条件:  $u = u_{in}$ ,  $v = 0$ ,  $w = 0$ ,  $T = T_{in} = 300 \text{ K}$ , 进口的湍流强度  $I = 0.16 Re^{-0.125}$ , 水力直径为进口管道直径  $D_e = D_1 = D_2 = 22 \text{ mm}$ ;

(2) 出口条件: 表压力  $P_{out} = 0$ , 出口参数采用同进口相同的设置;

(3) 壁面条件: 在管壁处采用第一类边界的定温边界  $T = 330 \text{ K}$ , 管内壁为无滑移边界  $u = v = w = 0$ .

## 2 计算结果讨论

### 2.1 数据处理

根据恒定物性牛顿流体的 Gnielinski<sup>[12]</sup> 公式对照光管的传热性能 ( $Nu_s$ ) 的相符合程度来验证本文数值研究方法的准确性, 验证结果如图 3 所示. 在  $Re$  为 2 300 ~ 12 000 时, Gnielinski 关联式与数值模拟值基本重合, 证明笔者的研究方法是可行的. 采用相同的方法研究内凹波节管 (c1)、外凸波节管 (c2) 以及波纹相间波节管 (c3) 的换热性能 ( $Nu_{ci}/Nu_s$ )、阻力性能 ( $f_{ci}/f_s$ ) 以及综合性能 ( $PEC$ ).

不同进口  $Re$  数下, 换热性能 ( $Nu_{ci}/Nu_s$ ) 如图 4(a) 所示. 可以看出, 波纹相间波节管 (c3) 的换热性能最好, 外凸波节管 (c2) 次之. 在  $Re < 8 756$  时波纹相间波节管明显优于其他两种管. 在  $Re > 8 756$  时, 波纹相间波节管 (c3) 同外凸波节

管(c2)相差很小,内凹波节管(c1)的换热性能最差. 阻力性能( $f_{ci}/f_s$ )如图 4(b)所示,与换热性能相类似,波纹相间波节管(c3)和外凸波节管(c2)的阻力性能优于内凹波节管(c1). 不同的是,外凸波节管(c2)阻力性能要明显优于其他两种波节管,仅仅是光管的 2 倍左右,而波纹相间波节管(c3)是光管的近 4 倍,内凹波节管(c1)是光管的 4 倍还多. 综合性能  $PEC((Nu_{ci}/Nu_s)/(f_{ci}/f_s)^{1/3})$  如图 4(c)所示. 可以看出,外凸波节管(c2)的综合性能最好,内凹波节管(c1)的综合性能最差. 综合来看,外凸波节管(c2)的阻力最小,阻力性能远远优于其他两种波节管,所以综合性能最好.

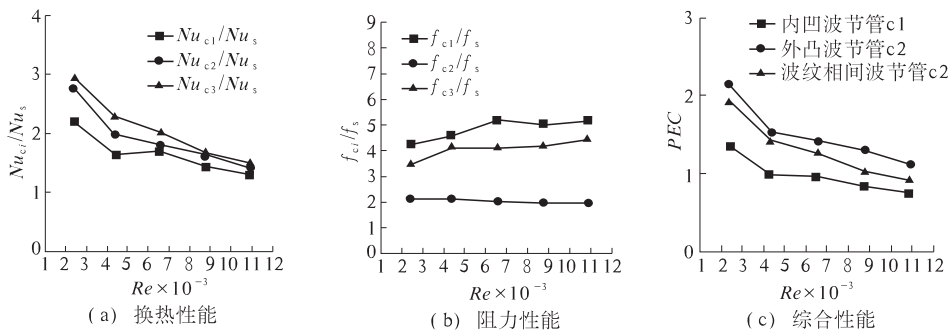


图 4 3 种波节管性能随  $Re$  变化  
Fig.4 The performances of three different types of corrugated tubes

3 换热机理的探讨

3 种类型的波节管性能的差异, 需要从换热和流动机理上进行探讨. 3 种类型的波节管都是轴对称结构, 所以通过轴线的截面能反映出管道内部整体的情况. 图 5 显示了进口速度为 0.3 m/s ( $Re = 6\ 567$ ) 时, 3 种波节管的速度 ( $u$ )、温度 ( $T$ ) 分布云图.

从图 5 可以看出, 内凹波节管(c1)波节段主流区的速度不断增大, 达到 0.55 m/s 以上, 且高速区域收缩, 形成了无源加速效应, 边界的低速流体区域与高速区域形成明显的速度分层; 内凹波节管(c1)中的流体到达波节段末尾处的温度大部分于 304 K 以下. 外凸波节管(c2)波节段的速度分布平稳, 在 0.3 ~ 0.45 m/s 之间, 主流区和边界区域速度差异最小; 外凸波节管(c2)中的流体到达波节段末尾处时, 部分流体达到 306 K. 波纹相间波节管(c3)波节段的速度分布形成了无源脉动波动, 最大速度达 0.5 m/s 以上; 波纹相间波节管(c3)在波节段末端温度就达到 306 K. 综上所述, 就换热效果而言, 波纹相间波节管

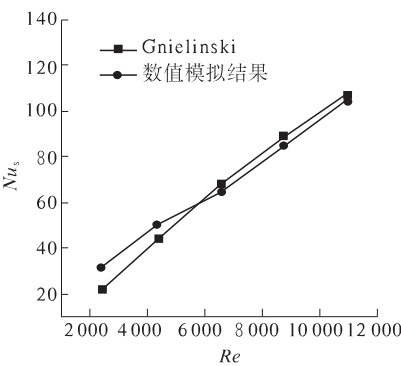


图 3 光管模拟值与 Gnielinski 关联式的比较  
Fig.3 Comparisons between empirical formula and computational results of smooth tube

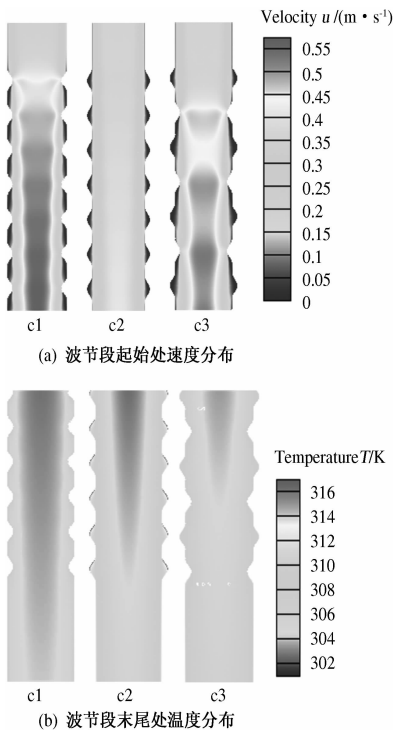


图 5 3 种波节管的波节段  $z/D = 0.5$  截面的速度分布、温度分布  
Fig.5 The variable distribution of different types of corrugated tubes at section  $z/D = 0.5$

(c3)最好,外凸波节管(c2)次之,内凹波节管(c1)最差.这种现象说明内凹波节管(c1)中的无源加速效应对强化换热的效果不明显,而波纹相间波接管(c3)中的速度波动可以有效强化流体内部的热传.

图6为3种类型波节管中心线压力分布.从图6可以看出,内凹波节管(c1)进出口压差最大,近250 Pa;波节段( $x=0 \sim 273$  mm)压力波动较大,有较小的逆压梯度( $dP/dx > 0$ ),在波节段和出口区域交界处( $x=300$  mm),有强烈的负压区,压差极大,达到-50 Pa;强烈的逆压梯度可以有效破坏边界层,但能量损失过大,阻力性能最差.外凸波节管(c2)进出口压差最小,大约100 Pa,波节段( $x=0 \sim 273$  mm)压力变化平稳,波节段没有逆压梯度,能量损失最少,阻力性能最好.波纹相间波节管(c3)的进出口压差大约为200 Pa.与内凹波节管(c1)不同的是,波纹相间波节管(c3)管道内部出现了强烈的周期性的波动,且在波节段末尾处有一个明显的压力波动.综上所述,外凸波节管(c2)的阻力性能最优,波纹相间波节管(c3)次之,内凹波节管(c1)最差.对于波节管而言,压力波动是造成压降损失的原因,而造成波节管阻力性能差的主要原因是负压区的产生.

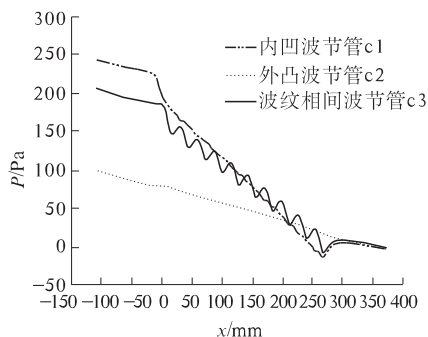


图6 3种波节管中心线压力分布

Fig. 6 Pressure distribution along axis of different types of corrugated tubes

#### 4 热势容——焓分析

过增元院士基于热质说理论,效仿熵的概念,类比于电容,提出热量传递势容——焓(Entransy,  $E$ )<sup>[13]</sup>的概念, $E$ 表示物体的热量传递能力,它是场协同优化理论的最新成果,如式(3)所示,流体在开口系流动过程中焓的变化为( $\Delta E$ )<sup>[14]</sup>.

$$\begin{cases} E = \frac{1}{2} \dot{m} T = \frac{1}{2} \dot{m} c_p T^2; \\ \Delta E = \frac{1}{2} \dot{m} T_2 - \frac{1}{2} \dot{m} T_1 = \frac{1}{2} \dot{m} c_p T_2^2 - \frac{1}{2} \dot{m} c_p T_1^2. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E$ 为流体的热势容,焓; $\Delta E$ 为流体的热势容差,焓变化量; $i_1$ 、 $i_2$ 为流体进出口的焓值; $c_p$ 为热容; $T_1$ 、 $T_2$ 为流体的进出口的温度; $\dot{m}$ 为质量流量.

3种波节管的 $\Delta E$ 随 $Re$ 数的变化曲线如图7所示.从图7可以看出,外凸波节管热势容差( $\Delta E_{c2}$ )和波纹相间波节管热势容差( $\Delta E_{c3}$ )的变化曲线接近, $Re=2\,300 \sim 4\,000$ 时, $\Delta E_{c2} = \Delta E_{c3}$ , $Re > 4\,000$ 时, $\Delta E_{c2} > \Delta E_{c3}$ ;光管热势容差( $\Delta E_s$ )最小, $Re=2\,300 \sim 4\,000$ 时, $\Delta E_s < 8 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{K}$ ,其值远远小于其他两种管;内凹波节管热势容差( $\Delta E_{c1}$ )仅高于光管热势容差( $\Delta E_s$ ).根据热量传递势容的定义式,要提高单管热效率,需要将 $\Delta E$ 尽可能地提高.最后,得到了与综合性能相一致的结果:外凸波节管(c2)性能最好,波纹相间波节管(c3)次之,内凹波节管(c1)的性能最差.

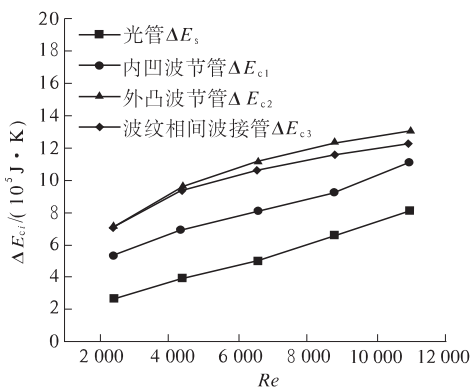


图7 光管以及3种波节管 $\Delta E$ 随 $Re$ 的变化  
Fig. 7 Changes of  $\Delta E$  along  $Re$  of smooth tube and corrugated tubes

#### 5 结论

(1) 针对外凸、内凹以及波纹相间3种波节管进行了数值研究,分别比较了它们的换热性能、阻力性能以及综合性能,得出 $Re=2\,300 \sim 11\,000$ 时,内凹波节管性能最差,外凸波节管的换热性能仅次于波纹相间波节管,而其阻力系数仅为波纹相间波节管的60%,综合评价指标 $PEC$ 最高达到2,因此,外凸波节管的综合性能最好.

(2) 对3种波节管换热机理和阻力机理进行了分析,得出管内速度波动是造成波节管换热性能差异的原因;波节段末尾处产生的强烈负压



区,是造成压降损失过大的主因,这为波节管的优化设计研究提供了参考。

(3)对3种波节管进行了热势容分析,得出了进出口热势容差 $\Delta E$ 随 $Re$ 的变化曲线,用热势容——焓分析了波节管的性能,得到了与综合评价指标 $PEC$ 相同的结论。

### 参考文献:

- [1] 靳遵龙,董其伍,刘敏珊,等.缩放管结构优化数值研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(4): 105-107.
- [2] BARBA A, RAINIERI S, SPIGA M. Heat transfer enhancement in a corrugated tube[J]. Int Commun Heat Mass Transfer, 2012(3): 313-322.
- [3] 杜满河.波节管换热器[J]. 化工装备技术, 2000, 21(1): 42-44.
- [4] 郎逵.波节管强化传热式换热器的开发与应用[J]. 节能, 1994(7): 44-46.
- [5] 张伟玮,韩聪,韩怀志,等.波节形状对波节管结构稳定性和传热特性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(7): 57-62.
- [6] 张登庆,王宗明,李宗堂,等.波节管管内换热与阻力特性的实验研究[J]. 石油机械, 2003, 30(4): 4-6.
- [7] 徐建民,王晓清.波节管管内流动和传热的数值模拟[J]. 石油化工设备, 2008, 37(1): 4-7.
- [8] 韩怀志,李炳熙,何玉荣,等.非对称型外凸式波节管内的传热和流动特性[J]. 化工学报, 2013, 64(6): 1916-1924.
- [9] 韩怀志,李炳熙,何玉荣,等.外凸式波节套管换热器壳程流动与传热机理的数值模拟[J]. 化工学报, 2014, 65(S1): 85-94.
- [10] 汪威,俞九阳,杨侠.波节管脉冲流强化对流换热数值分析[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(3): 89-91.
- [11] 王定标,姜逢章,杨丽云.蜂窝板传热元件的数值模拟[J]. 郑州大学学报:工学版, 2008, 29(1): 5-9.
- [12] 王定标,董永申,向飒,等.基于螺旋片强化的套管换热器性能[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014, 65(4): 1208-1214.
- [13] 李志信,过增元.对流传热优化的场协同理论[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [14] 程雪涛,王文华,梁新刚.开口热力学系统的火积分析[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1489-1495.

## Numerical Comparative Study on Three Types of Corrugated Tube

HAN Yong, WANG Ding-biao, ZHANG Can-can, XIANG Sa

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Flow and heat transfer characteristics of convex corrugated tube, concave corrugated tube and bellows corrugated tube are studied, based on the  $k-\varepsilon$  model with numerical comparative method, the flow and heat transfer performance with the changes of  $Re$  is obtained; The heat transfer mechanism and the resistance mechanism are analyzed, the main causes of loss in heat transfer and pressure drop are detected. The performance of the corrugated tube is analyzed in heat transport potential capacity(Entransy), and the entransy difference,  $\Delta E$ , between inlet and outlet with the changes of  $Re$  is acquired.

**Key words:** enhanced heat transfer; numerical investigation; corrugated tube; entransy

文章编号:1671-6833(2014)06-0019-04

(Sm<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的制备及热物理性能

张红松<sup>1</sup>, 温倩<sup>1</sup>, 张冰<sup>2</sup>

(1. 河南工程学院 机械工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 以 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CeO<sub>2</sub> 为原料, 基于固相反应法制备了 (Sm<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 陶瓷, 用 X 射线衍射(X-Ray Diffraction Method, 简称 XRD) 分析了其物相组成, 并采用扫描电子显微镜(SEM) 和电子能谱(EDS) 分析其显微组织和元素组成, 最后, 用激光脉冲法和推杆膨胀法分别测试了其热导率和热膨胀系数. 结果表明, 所制备的 (Sm<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 陶瓷具有单一的萤石结构, 其微观组织致密, 晶界清晰, 无其他相和未反应物存在; 大半径 La<sup>3+</sup> 的引入不仅降低其热导率, 而且提高了其热膨胀系数.

关键词: 热障涂层; 稀土钨酸盐; 热导率; 热膨胀系数

中图分类号: TG174.75 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.005

0 引言

热障涂层由于能有效地保护先进发动机关键热端部件, 在先进发动机的发展过程中举足轻重<sup>[1]</sup>. 然而, 随着发动机热端部件服役环境温度的进一步增加, 传统氧化钇部分稳定氧化锆(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Stabilized Zirconia, 简称 YSZ) 陶瓷涂层由于表面陶瓷层材料的高温相变、烧结收缩等缺点, 已难于满足先进发动机的发展需求<sup>[1]</sup>. 为克服氧化锆涂层的不足, 最可行的方法是在采用高温镍基合金基体和先进冷却技术的前提下开发新型陶瓷材料, 以替代氧化锆<sup>[2]</sup>. 在选择新型热障涂层材料时, 最主要的要求是<sup>[2]</sup>: ①较低的热导率(≤2W/(m·K)); ②较高的热膨胀系数(≥9×10<sup>-6</sup>/K); ③良好的高温相稳定性能. A<sub>2</sub><sup>3+</sup>Ce<sub>2</sub><sup>4+</sup>O<sub>7</sub> (A 为三价稀土元素) 型氧化物因其良好的热物理性能而被认为是极具潜力的新一代热障涂层陶瓷材料<sup>[3-6]</sup>. 为进一步降低其热导率并提高其热膨胀系数, 作者曾以 Sm<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 为基础, 研究了 Dy<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup> 和 Gd<sup>3+</sup> 等小半径稀土元素掺杂对 Sm<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 热物理性能的影响<sup>[7-9]</sup>. 结果表明, 小半径稀土离子掺杂虽然能有效降低其热导率, 但也降低了其热膨胀系数. 在前期研究基础上, 笔者采用固相反应法合成了 (Sm<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 陶瓷, 其目的是考

察 La 掺杂对其热物理性能的影响.

1 实验材料与方法

以 CeO<sub>2</sub> (纯度 ≥ 99.99%), La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (纯度 ≥ 99.99%) 和 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (纯度 ≥ 99.99%) 粉末作为原材料. 首先根据 (Sm<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的化学式称量各种原材料, 而后将称量好的粉末在玛瑙研钵中充分研磨, 并用陶瓷粉末压片机将研磨后的粉末压制成圆柱状的预制坯体, 最后将压制好的预制坯体在 1 600℃ 下烧结 10 h. 为与 Sm<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 进行对比, 笔者采用同样的方法制备了 Sm<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 陶瓷.

采用阿基米德排水方法测量样品的实际密度. 用 X 射线衍射仪(XRD, D/max-RB, Japan) 对样品进行物相分析. 利用扫描电子显微镜(SEM, 日本高新技术株式会社 QUANTA 250 型) 和电子能谱仪(EDS) 分析样品的微观结构及元素组成.

用激光脉冲法测量(flashlinetm<sup>3000</sup>, 美国安特) 样品在 200~1 000℃ 范围内的热扩散系数(λ). 样品厚度约 1 mm, 直径约 12.7 mm. 根据 (Sm<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 氧化物的组成, 采用纽曼-柯普定律计算合成材料的比热. 试样的热导率(κ) 根据公式(1) 由比热(c<sub>p</sub>)、实际密度(ρ) 和热扩散系数(λ) 三者相乘得到.

κ=λ·ρ·c<sub>p</sub>. (1)

收稿日期:2014-06-07;修订日期:2014-09-16  
基金项目:河南省高校科技创新人才资助计划项目(13HASTIT018);河南省科技攻关计划项目(132102210142)  
作者简介:张红松(1976-),男,河南睢县人,河南工程学院副教授,博士,主要从事新型热障涂层及其陶瓷材料的研究,E-mail: zhsandchen@126.com.

由于烧结的样品不可能完全致密,为排除样品中气孔率的影响,对得到的热导率用公式(2)进行修正.其中, $\phi$  是样品气孔率,系数  $4/3$  是用来消除气孔率对热导率的影响<sup>[7]</sup>.

$$\frac{\kappa}{\kappa_0}=1-\frac{4}{3}\phi.$$

(2)

用热膨胀仪(型号耐驰 DIL 402C/7,德国)在氦气气氛中测量样品的热膨胀系数,样品尺寸为  $25\text{ mm}\times3\text{ mm}\times4\text{ mm}$ ,加热速率为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

## 2 结果及讨论

### 2.1 物相分析

图 1 是合成陶瓷材料与标准  $\text{CeO}_2$  的 XRD 图谱.由图 1 可知,  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的 XRD 图谱与  $\text{CeO}_2$  标准图谱一致,且无其他相的衍射峰存在.

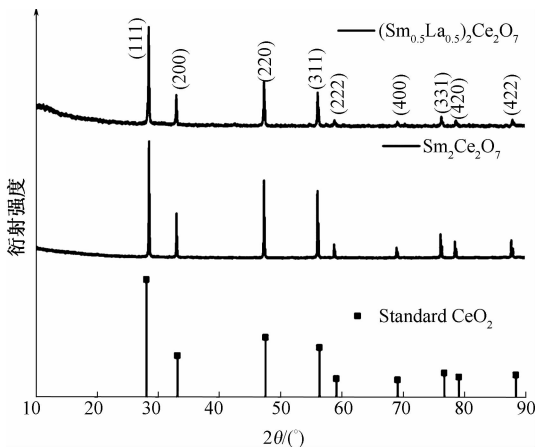


图 1  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  与  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的 XRD 图谱  
Fig. 1 XRD patterns of  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  and  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  ceramics

前人研究表明<sup>[10]</sup>,在  $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$  型化合物中存在两种晶体结构,一种是烧绿石结构,另一种是萤石结构.这两种结构在 XRD 图谱上的典型区别为在  $2\theta=40^{\circ}\sim50^{\circ}$  之间是否存在两个微弱的衍射峰.存在两个微弱的衍射峰是烧绿石结构,反之则为萤石结构.根据这一点,可知笔者合成的  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  陶瓷均为纯净的萤石结构.除此之外,在  $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$  型化合物中,其晶体结构主要取决于 A 位与 B 位金属离子的半径比( $r_A/r_B$ ).离子半径比小于 1.46,则形成缺陷型萤石结构<sup>[3]</sup>.  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的 A 位离子半径可根据元素组成,采用方程(3)计算得到.结果表明,  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的离子半径比分别为 1.154 和 1.11,明显小于 1.46,说明

$(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  具有典型的萤石结构,这与 XRD 分析结果一致.

$$r_A=(r(\text{La}^{3+})+r(\text{Sm}^{3+}))/2.$$

(3)

### 2.2 显微组织及元素组成

图 2 为样品的显微组织.从图 2 可以看出,  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  陶瓷显微组织致密,其相对致密度分别为 92.3% 和 96.4%,平均晶粒尺寸  $5\sim10\text{ }\mu\text{m}$ ,晶界清晰,在界面处无其他相和未反应氧化物存在.合成  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  陶瓷的元素摩尔比如表 1 所示.由表 1 可知,各元素的摩尔比与它们的化学式非常接近.

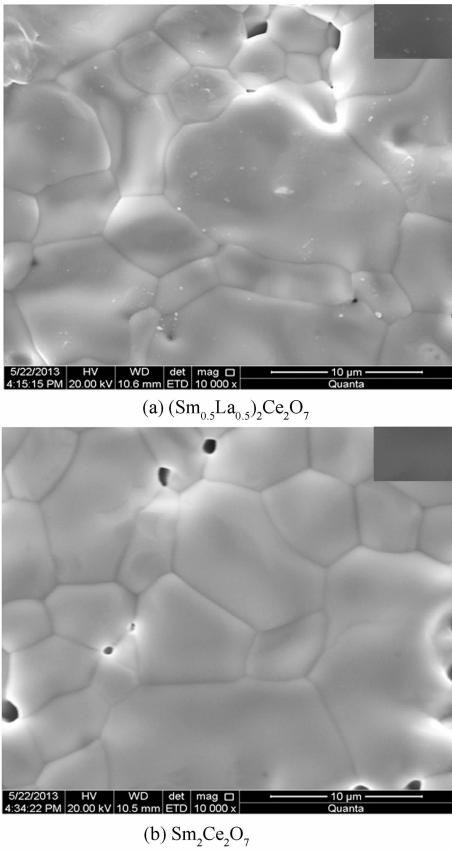


图 2 样品的显微组织  
Fig. 2 Microstructure of samples

表 1 合成  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  陶瓷的元素摩尔比  
Tab. 1 Element atomic ratio of the synthesized  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  ceramic

陶瓷材料	Sm	La	Ce	O
$(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$	9.5	6.7	16.8	67.0
$\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$	17.8	0	17.6	64.6

### 2.3 热膨胀系数

$(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的线性热膨胀系数随温度变化曲线如图 3 所示.由图 3 可知,  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的线性热膨胀系数( $TEC$ )均随温度升高而增加,这是由于温度升

高使原子之间平均距离增加所致<sup>[9]</sup>. 而且 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的线性热膨胀系数均大于现役的 8YSZ 陶瓷,这有利于降低由于陶瓷层与金属粘结涂层之间界面的热膨胀不匹配而产生的残余热应力. 由图 3 还可以看出, ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的热膨胀系数明显大于  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ . 这是由于  $\text{La}^{3+}$  的半径大于  $\text{Sm}^{3+}$ , 当  $\text{La}^{3+}$  部分取代  $\text{Sm}^{3+}$  位置后,致使  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的 A 位离子半径增大,即 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的离子半径比明显大于  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ . 离子半径比的增加,使 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  晶格中氧空位分布的混乱程度降低,相当于氧空位对热膨胀系数的贡献增大,所以 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的线性热膨胀系数较  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  有所提高<sup>[11]</sup>.

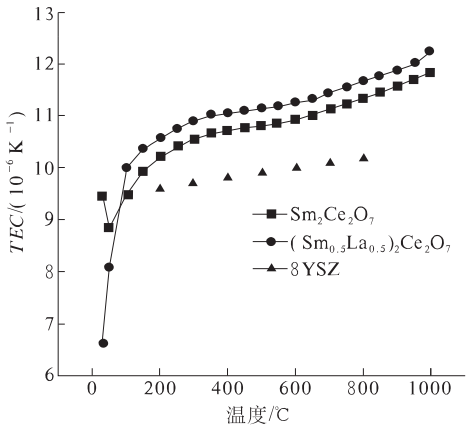


图 3 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  热膨胀系数

Fig.3 Thermal expansion coefficient of ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$

2.4 热导率

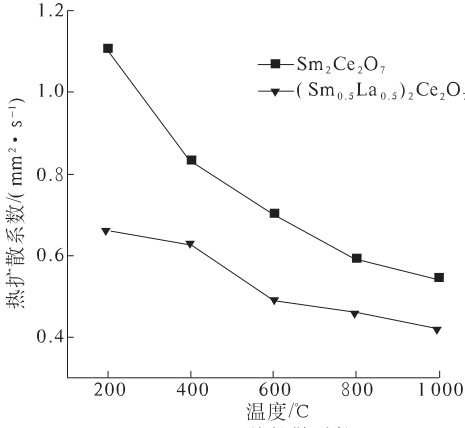
采用纽曼 - 柯普定律计算得到的 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的比热如表 2 所示. 由表 2 可知,在 200 ~ 1 000 °C 范围内,所合成陶瓷材料的比热均随温度的升高而增大.

表 2 合成样品的比热

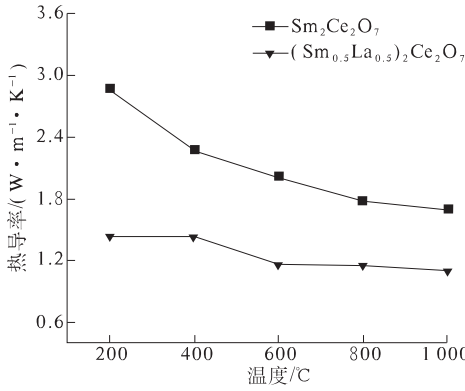
材料成分	J · g <sup>-1</sup> · °C <sup>-1</sup>				
	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
$\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$	0.389	0.410	0.431	0.451	0.471
$\text{SmLaCe}_2\text{O}_7$	0.391	0.415	0.439	0.463	0.487

( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的热扩散系数随温度的变化关系如图 4 (a) 所示. 由图 4 (a) 可知, ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的热扩散系数随温度的升高而降低,表现出典型的声子导热机制,这与大多数无机非金属材料相同<sup>[7-10]</sup>. 随着温度的升高, ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的

热扩散系数分别从 200 °C 时的 0.66, 1.1 mm<sup>2</sup>/s 逐渐降低到 1 000 °C 时的 0.42, 0.54 mm<sup>2</sup>/s. 根据所测试的热扩散系数、密度以及计算得到的比热,采用公式 (1) 和 (2) 得到 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的热导率随温度的变化曲线如图 4 (b) 所示. 由图 4 (b) 可知,随着温度的升高, ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的热导率逐渐从 200 °C 的 1.42 W/(m · K) 逐渐减小至 1 000 °C 时的 1.09 W/(m · K). 而且, ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的热导率明显低于  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ . 根据声子导热理论,当材料晶格中引入外来取代原子时,由于取代原子与基质原子之间半径及质量的差别,增加声子的散射程度,降低了声子的平均自由程,故 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  具有较低的热导率<sup>[8-10]</sup>.



(a) 热扩散系数



(b) 热导率-温度

图 4 合成样品的热扩散系数及热导率

Fig.4 Thermal diffusivities and thermal conductivities of synthesized samples

较低的热导率是热障涂层陶瓷材料最重要的性能参数之一. 笔者所制备的 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  的平均热导率分别为 1.25, 2.12 W/(m · K), 满足热障涂层的要求,故笔者所制备的 ( $\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5}$ ) $_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  可用作新一代热障涂层的表面陶瓷材料.

### 3 结论

以  $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$  为原料,采用固相反应法成功制备了纯净萤石结构的  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  陶瓷. 掺杂离子的引入加剧了声子的散射过程,使得  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  具有较低的热导率. 而掺杂引起氧空位混乱程度的降低使得  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  具有较高的热膨胀系数. 所制备的  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  有潜力用作新一代热障涂层表面陶瓷层材料.

### 参考文献:

- [1] VAßEN R, JARLIGO M O, STEINKE T, et al. Overview on advanced thermal barrier coatings [J]. Surf Coat Technol, 2010, 205(4): 938–942.
- [2] WINTER M R, CLARKE D R. Oxide materials with low thermal conductivity [J]. J Am Ceram Soc, 2007, 90: 533–540.
- [3] 张红松, 朱涛, 魏媛. 钙钛矿及  $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$  型热障涂层用陶瓷材料研究进展[J]. 稀土, 2010(4): 75–80.
- [4] ZHANG Hong-song, LIAO Su-ran, DANG Xu-dan, et al. Preparation and thermal conductivities of  $\text{Gd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  and  $(\text{Gd}_{0.9}\text{Ca}_{0.1})_2\text{Ce}_2\text{O}_{6.9}$  ceramics for thermal barrier coatings[J]. J Alloys Compds, 2011, 509: 1226–1230.
- [5] ZHANG Hong-song, CHEN Xiao-ge, GANG Li, et al. Influence of  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  addition on thermophysical properties of  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  ceramics for thermal barrier coatings [J]. J Eur Ceram Soc, 2012, 32: 3693–3700.
- [6] ZHANG Hong-song, LV Jiang-guo, GANG Li, et al. Investigation about thermophysical properties of  $\text{Ln}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  ( $\text{Ln} = \text{Sm}, \text{Er}$  and  $\text{Yb}$ ) oxides for thermal barrier coatings[J]. Mater Res Bull, 2012, 47: 4181–4186.
- [7] CHEN Xiao-ge, YANG Shu-sen, ZHANG Hong-song, et al. Preparation and thermophysical properties of  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  oxides for thermal barrier coatings [J]. Mater Res Bull, 2014, 51: 171–175.
- [8] ZHANG Hong-song, YAN Shu-qing, Preparation and thermophysical properties of fluorite-type samarium-dysprosium-cerium oxides [J]. J Eur Ceram Soc, 2014, 34: 55–61.
- [9] ZHANG Hong-song, LI Xiao-chun, GANG Li, et al. Preparation, characterization and thermophysical properties of  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  solid solutions [J]. Ceram Inter, 2014, 40: 4567–4573.
- [10] LIU Zhan-guo, OUYANG Jia-hu, ZHOU Yu, et al. Effect of Ti substitution for Zr on the thermal expansion property of fluorite-type  $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  [J]. Mater Des, 2009, 30: 3784–3788.

## Preparation and Thermophysical Properties of $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$

ZHANG Hong-song<sup>1</sup>, WEN Qian<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Chemistry and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In this paper, the  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  ceramic was synthesized by solid reaction using  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  and  $\text{CeO}_2$  as raw materials. Its phase composition microstructure and composition was analyzed by X-ray diffraction, scanning electrical microscope (SEM) and electronic diffraction spectrum (EDS), respectively. Its thermal diffusivity and thermal expansion coefficient are measured by laser flash method and pushing rod technique. Research results show that synthesized  $(\text{Sm}_{0.5}\text{La}_{0.5})_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  ceramic has single fluorite structure and dense microstructure. No other phase or un-reacted oxides exist in the interfaces between grains. Its lower thermal conductivity and higher thermal expansion coefficient can be attributed to the La-doping.

**Key words:** thermal barrier coating; rare earth cerium oxide; thermal conductivity; thermal expansion coefficient



文章编号:1671-6833(2014)06-0023-04

# SAPO-56 分子筛的形貌和粒径控制

詹予忠, 董佳佳, 宋孟璐, 韩 丽, 陈宜俚

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**以 N,N,N',N'-四甲基-1,6-己二胺(TMHD)为模板剂,采用静态水热法合成了 SAPO-56 分子筛,考察了硅铝比、正丙胺作为部分替代模板剂以及加入晶种对 SAPO-56 形貌和粒径的影响.结果表明:各实验条件下均能合成结晶度相近的纯 SAPO-56 分子筛相;硅铝比增大,合成的 SAPO-56 由正六边形的片状变成圆片状,粒径为 20  $\mu\text{m}$  左右;用正丙胺作为部分替代模板剂可以缩短晶化时间,而且 SAPO-56 由正六边形片状变成了厚的切顶六方双锥,但粒径变化不明显;再向其中加入晶种之后,合成的 SAPO-56 变成了六方双锥,粒径显著变小至 3  $\mu\text{m}$  左右.因此,可以通过改变实验条件调节 SAPO-56 分子筛的形貌和粒径.

**关键词:**SAPO-56 分子筛;水热合成;模板剂;晶种;晶体粒径;晶体形貌

**中图分类号:**TQ426.95 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.006

## 0 引言

SAPO-56 分子筛是一种新型的小孔磷酸硅铝分子筛,由 Wilson 等在 1994 年首次报道<sup>[1]</sup>.它具有三维八元环结构,孔口尺寸为 0.34 nm $\times$ 0.36 nm<sup>[2-3]</sup>.凭借其特殊的孔道结构,SAPO-56 分子筛在甲醇制烯烃(MTO)反应中具有较好的发展前景<sup>[4-5]</sup>.同时,SAPO-56 分子筛对二氧化碳有较大的吸附容量,有望作为天然气等混合气中二氧化碳的捕集剂<sup>[6]</sup>.微波辅助合成的小晶粒 SAPO-56 分子筛对二氧化碳的吸附容量大于常规合成产物,用于催化环氧氯丙烷与二氧化碳反应合成氯丙烷碳酸酯较常规产物有高得多的催化活性(产率由 42.2% 提高至 84.8%)<sup>[7]</sup>.

通常条件下合成的 SAPO-56 分子筛粒径较大,一般为几十微米的六方片状.如 2001 年田鹏等<sup>[4]</sup>报道了合成 SAPO-56 的三元体系相图,典型条件下合成出的 SAPO-56 最大粒径为 25  $\mu\text{m}$ .2003 年杨一青等<sup>[5]</sup>研究了 SAPO-56 晶化过程中晶粒的变化过程,六方片状晶粒的直径从 48 h 的 40  $\mu\text{m}$  长大到 120 h 的 84  $\mu\text{m}$ .分子筛粒径大则孔道长,对分子在孔道内的扩散有限制作用,会严重

影响分子筛的吸附和催化性能<sup>[8]</sup>.2013 年, Xie 等<sup>[7]</sup>用微波辅助晶化法合成出了粒径约 3~4  $\mu\text{m}$  的小晶粒 SAPO-56,但是产物含有 SAPO-17 杂晶.同年,中国石油化工股份有限公司申请了用廉价的有机胺部分替代原合成模板剂 N,N,N',N'-四甲基-1,6-己二胺(TMHD)的专利,发现合成的 SAPO-56 粒径有所减小<sup>[9]</sup>.

目前有关 SAPO-56 的合成研究很少,而通常合成条件下所得晶粒较大,因此,研究影响 SAPO-56 粒径和形貌的因素有实际意义.笔者分别考察了硅铝比、廉价模板剂替代下晶化时间以及晶种加入量对 SAPO-56 形貌和粒径的影响.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与材料

磷酸(分析纯,洛阳市化学试剂厂);拟薄水铝石(工业级,山西铝厂);白炭黑(工业级,苏州市东化钒硅有限公司);N,N,N',N'-四甲基-1,6-己二胺(TMHD)(工业级,玛雅高纯度化学品);正丙胺(化学纯,阿拉丁试剂);去离子水(自制).

### 1.2 样品的合成方法

采用静态水热法合成 SAPO-56 分子筛.向定

收稿日期:2014-07-02;修订日期:2014-09-03

基金项目:河南省人才培养联合基金项目(U1204215074SGYS30250);中国石油天然气股份有限公司项目(12-08-05-05)

作者简介:詹予忠(1965-),男,河南罗山人,郑州大学教授,博士,主要从事应用表面与胶体化学研究,E-mail:zhanyz@zzu.edu.cn

量磷酸中加入定量的去离子水,在搅拌下加入拟薄水铝石和白炭黑,然后加入模板剂 TMHD. 若需加替代模板剂或晶种,则在加模板剂 TMHD 之后加入并混合均匀. 将凝胶转移至 100 mL 带有聚四氟乙烯内衬的不锈钢反应釜内,置于烘箱中于 200 ℃ 静态水热晶化一定时间. 产品经抽滤并用去离子水洗涤至滤液接近中性,120 ℃ 干燥,550 ℃ 灼烧 6 h 除去模板剂.

### 1.3 样品的表征

晶体结构测定采用德国 BRUKER - AXS 有限公司的 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪,使用石墨单色器, Cu K $\alpha$  射线,管电压 30 kV,管电流 20 mA,扫描速度 5°/min. 形貌观察采用日本 JEOL 公司的 JSM - 7500 F 型扫描电子显微镜,根据显微镜照片标尺估算晶体粒径.

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅铝比对分子筛晶粒的影响

硅铝比是分子筛合成中一个比较关键的因素,会影响合成的晶化区、晶化曲线,也影响产物的结晶度、形貌、晶粒大小等<sup>[10]</sup>. 笔者首先研究了硅铝比变化对合成的影响,采用的原料摩尔配比为 2 (TMHD):  $x$  (SiO $_2$ ): 1 (Al $_2$ O $_3$ ): 1 (P $_2$ O $_5$ ): 40 (H $_2$ O), 其中  $x$  分别为 0.5, 0.7, 0.9. 图 1 为不同硅铝比合成样品的 XRD 图. 对比文献可知,硅铝比为 0.5, 0.7, 0.9 时,均能合成出纯净的 SAPO-56 分子筛,没有杂晶,产物的相对结晶度也相差不大<sup>[11]</sup>.

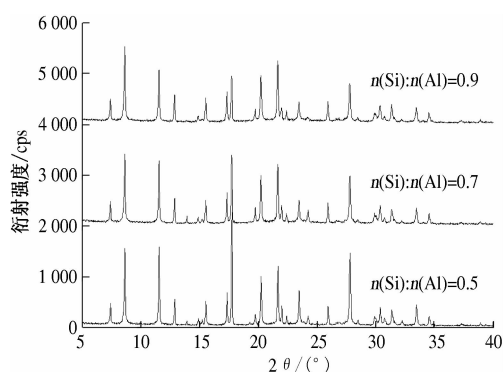


图 1 不同硅铝比合成样品的 XRD 图

Fig.1 XRD patterns of products synthesised with different ratio of silicate to aluminium

图 2 为不同硅铝比下合成样品的 SEM 图. 从图中可以看出,随着硅铝比的增加,SAPO-56 分子筛的粒径和形貌也发生了变化. 硅铝比为 0.5 时,粒径在 18  $\mu$ m 左右,呈正六边形片状结构,晶粒

不均匀,晶体表面不光滑. 硅铝比为 0.7 和 0.9 时,晶体由正六边形片状逐步变成了圆片形,粒径分布也不均匀,平均粒径为 20  $\mu$ m.

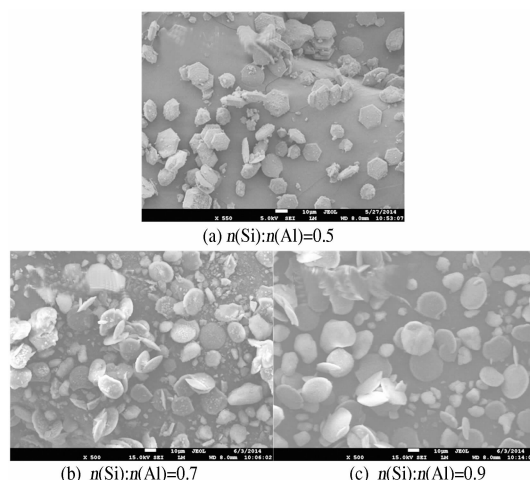


图 2 不同硅铝比合成样品的扫描电镜图

Fig.2 SEM images of products synthesised with different ratio of silicate to aluminium

### 2.2 正丙胺部分替代模板剂对分子筛晶粒的影响

许多分子筛的合成需要特定分子结构的模板剂,不加模板剂就不能合成相应的分子筛<sup>[12]</sup>. 然而模板剂在分子筛合成中起着非常复杂的作用,其中可能只有一部分起模板导向作用,大部分可能只是起调节合成体系碱性的作用,这就使得用廉价模板剂部分代替昂贵模板剂成为可能. 现选择正丙胺部分替代模板剂 TMHD,并且大幅度降低了总有机胺配比. 原料摩尔配比为: 0.6 (CH $_3$ CH $_2$ CH $_2$ NH $_2$ ): 0.8 (TMHD): 0.5 (SiO $_2$ ): 1 (Al $_2$ O $_3$ ): 1 (P $_2$ O $_5$ ): 40 (H $_2$ O), 晶化时间分别为 12 h、48 h 和 72 h.

图 3 是不同晶化时间下合成样品的 XRD 图. 由图 3 可以看出,晶化 12 ~ 72 h 都能合成出 SAPO-56 分子筛,并且其相对结晶度差别不大,这表明正丙胺作为替代模板剂之后,12 h 就能生成 SAPO-56 晶核,但此时产物中含有一些无定形物,48 h 就能合成出纯净的 SAPO-56,晶化时间可以明显缩短.

图 4 是合成产物的 SEM 图. 由图 4 可知,用正丙胺部分替代模板剂 TMHD 后,SAPO-56 的形貌发生了明显变化,由原来的六边形片状变成了比较厚的切顶六方双锥. 晶化时间为 12 h 时,六方体晶粒初步长成,粒径分布不均匀,平均粒径为 18  $\mu$ m. 此时体系中还有一些无定形物,晶体表面不光滑,表明晶化不完全. 随着晶化时间的增长,无定型物逐渐减少,晶粒也逐渐在长大. 晶化 48 h

时,粒径在 20  $\mu\text{m}$  左右,此时体系中无定型物消失,并且晶粒比较均匀,晶体表面光滑,表明此时晶化完全. 晶化 72 h 时,粒径在 21  $\mu\text{m}$  左右,体系中有一些细小的碎屑,与只用 TMHD 作为模板剂相比,粒径变化不大. 因此晶化 48 h 时可以合成出粒径分布均匀的纯净的 SAPO-56 分子筛.

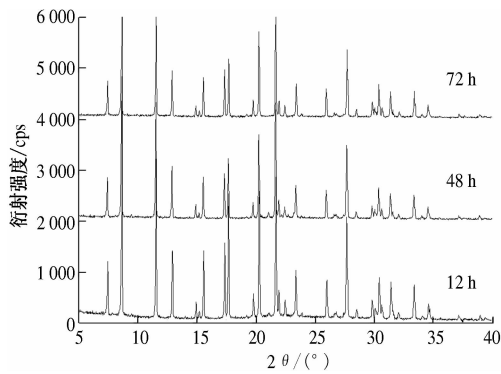


图 3 不同晶化时间合成样品的 XRD 图  
Fig. 3 XRD patterns of products synthesised with different crystallization time

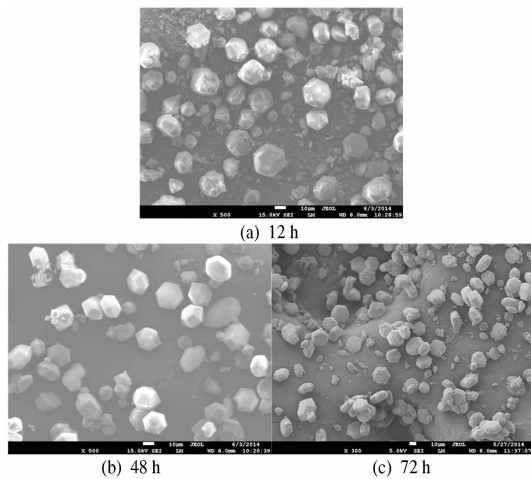


图 4 不同晶化时间合成样品的扫描电镜图  
Fig. 4 SEM images of products synthesised with different crystallization time

2.3 添加晶种对分子筛晶粒的影响

用正丙胺部分替代模板剂后,合成的 SAPO-56 的粒径变化不是很明显. 因此在替代模板剂的基础上,向体系中加入同配比制成的 SAPO-56 原粉作为晶种,晶化时间缩短为 24 h,考察晶种加入量的影响.

图 5 为不同晶种加入量下合成样品的 XRD 图. 由图 5 可以看出,晶种加入量为 1% (质量分数,晶种添加质量占硅铝总质量的百分比)到 10% (质量分数)时都能合成出 SAPO-56,相对结晶度相差不大,并且没有杂晶. 由此可以得出结论:加入晶种之后 SAPO-56 的合成时间可以进一步缩短.

图 6 为不同晶种加入量下合成样品的 SEM 图. 由图 6 可以看出,加入晶种后,分子筛由原来的切顶六方双锥变成了六方双锥. 随着晶种加入量的增加,SAPO-56 晶粒逐渐变小,平均粒径为 3  $\mu\text{m}$ ,并且晶粒很均匀,表面也很光滑. 加入晶种之后,晶粒明显变小,这是因为晶核的形成速率和晶体的增长速率会影响晶体的粒径,向合成体系中加入晶种之后,为晶体的生长提供了生长表面,体系中单位体积的晶核数增加,从而粒径也会变小.

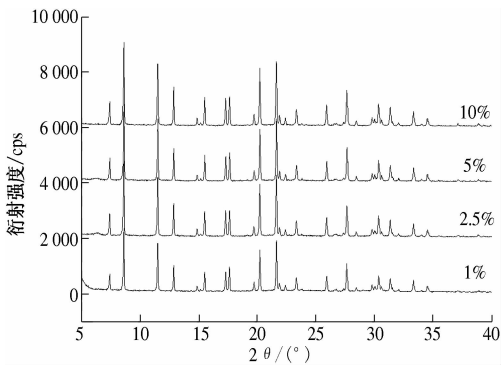


图 5 不同晶种加入量合成样品的 XRD 图  
Fig. 5 XRD patterns of products synthesised with different seed crystal contents

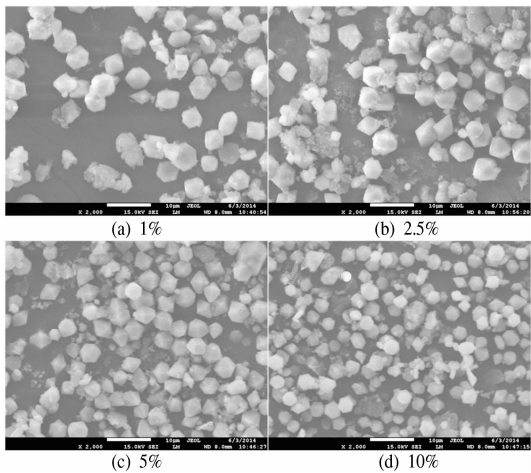


图 6 不同晶种加入量合成样品的扫描电镜图  
Fig. 6 SEM images of products synthesised with different seed crystal contents

2.4 关于 SAPO-56 分子筛形貌的讨论

SAPO-56 分子筛晶体属于三方晶系<sup>[3]</sup>. 三方晶系晶体的单形可为六方双锥,聚形可为切顶六方双锥<sup>[13]</sup>. 晶体的实际外形与晶面的生长速度有关,晶体呈现的晶面是生长速度较慢的晶面. 通常条件下合成的 SAPO-56 呈六方片状,表明 {001} 面生长慢,加入正丙胺后 {001} 面生长变快,晶体为较厚的切顶六方双锥. 加入晶种后 {001} 面生长进一步加快,{001} 面最后消失,合成的晶体呈

六方双锥形。

### 3 结论

笔者研究了影响 SAPO-56 形貌和粒径变化的因素。结果表明:不同硅铝比和用正丙胺作为替代模板剂,都会使产物的形貌发生变化,但是粒径变化不大;在替代模板剂的基础上向体系中加入晶种后,分子筛的形貌发生了很大的变化,由正六边形的片状结构变成了六方双锥,并且随着加入晶种量的增加,粒径也逐渐减小,最终粒径可以达到  $3\text{ }\mu\text{m}$  左右。因此,可以通过改变实验条件调节 SAPO-56 分子筛的形貌和粒径。

### 参考文献:

- [1] WILSON S T. Crystalline silicoalumino phosphates SAPO-36 and SAPO-56; US, 5370851 [P]. 1994 - 09 - 04.
- [2] WILSON S T, BROACH R W, BLACKWELL C S, et al. Synthesis, characterization and structure of SAPO-56, a member of the ABC double-six-ring family of materials with stacking sequence AABCCBB [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 1999, 28: 125 - 137.
- [3] BAERLOCHER C, MEIER W M, OLSON D H. Atlas of zeolite framework types [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [4] 田鹏, 许磊, 刘中民, 等. 新型磷酸硅铝分子筛 SAPO-56 的合成与表征 [J]. 高等学校化学学报, 2001, 22(6): 991 - 994.
- [5] 杨一青, 刘红星, 谢在庄, 等. SAPO-56 分子筛的晶化历程及其催化性能 [J]. 工业催化, 2003, 11(1): 43 - 46.
- [6] CHEUNG O, LIU Qing-ling, BACSIK Z, et al. Silicoaluminophosphates as  $\text{CO}_2$  sorbents [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2012, 156: 90 - 96.
- [7] XIE Zhen-zhen, ZHU Min-qi, NAMBO A, et al. Microwave-assisted synthesized SAPO-56 as catalyst in the conversion of  $\text{CO}_2$  to cyclic carbonates [J]. Dalton Trans, 2013, 42: 6732 - 6735.
- [8] PÉREZ-RAMÍREZ J, CHRISTENSEN C H, EGE-BLAD K, et al. Hierarchical zeolites: enhanced utilisation of microporous crystals in catalysis by advances in materials design [J]. Chem Soc Rev, 2008, 37: 2530 - 2542.
- [9] 赵昱, 刘红星, 钱坤, 等. SAPO-56 分子筛的制备方法: CN, 103058208 [P]. 2013 - 05 - 07.
- [10] BARRER R M. Hydrothermal Chemistry of Zeolites [M]. New York: Academic Press, 1982.
- [11] TREACY M M J, HIGGINS J B. Collection of simulated XRD powder patterns for zeolites [M]. New York: Elsevier, 2007.
- [12] CUNDY C S, COX P A. The hydrothermal synthesis of zeolites: Precursors, intermediates and reaction mechanism [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2005, 82: 1 - 78.
- [13] 秦善. 晶体学基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.

## Control of Crystal Morphology and Size of SAPO-56 Molecular Sieve

ZHAN Yu-zhong, DONG Jia-jia, SONG Meng-lu, HAN Li, CHEN Yi-liang

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** SAPO-56 molecular sieve was hydrothermally synthesized with N,N,N',N'-tetramethyl-hexane-1, 6-diamine (TMHD) as template agent. The effects of silica alumina ratio, propylamine partly replacing template, and seeding in synthetic system on morphology and size of SAPO-56 were investigated. The results showed that pure SAPO-56 phase with similar crystallinity could be obtained under the experimental conditions. With the increase of silica alumina ratio, the morphology of SAPO-56 synthesized changed from hexagonal flake to disk, and the crystal size was about  $20\text{ }\mu\text{m}$ . Propylamine partly replacing the template agent could decrease the crystallization time, and the synthesized SAPO-56 changed to thick cutter top hexagonal-dipyramidal, but the crystal size showed little change. Further seeding into the synthetic system the SAPO-56 changed to hexagonal-dipyramidal, and the crystal size decreased significantly to about  $3\text{ }\mu\text{m}$ . So the morphology and crystal size of SAPO-56 could be adjusted by changing experimental conditions.

**Key words:** SAPO-56 molecular sieve; hydrothermal synthesis; template agent; seed crystal; crystal size; morphology

文章编号:1671-6833(2014)06-0027-04

# 改性热解炭吸附水体中苯胺的热力学及动力学研究

邹卫华, 周秀丽, 刘静萱

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**以  $\text{CaCl}_2$  溶液浸渍及微波加热对脱硅稻壳热解炭进行改性,并将其用于对水中苯胺的吸附.结果表明:改性热解炭(MW-PC)较未改性热解炭(PC)对苯胺有更好的吸附效果;吸附过程符合 Langmuir 等温吸附模型,298 K 时最大吸附量为 0.623 mmol/g;苯胺吸附为自发的吸热熵增过程;苯胺的吸附动力学符合准二级模型;无水乙醇对苯胺的静态脱附再生效果较好.

**关键词:**改性热解炭;苯胺;吸附;再生

**中图分类号:**X703 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.007

## 0 引言

苯胺作为一种重要的化工原料,被广泛应用于国防、染料、农药、橡胶等行业.由于其毒性大,难降解,因此对水生植物造成严重危害<sup>[1]</sup>,一旦进入人体,严重者可能会导致癌症的发生,我国已将其列入“中国环境优先污染物黑名单”.国内外已尝试使用化学混凝法、离子交换法、电化学法等多种技术和方法去除水中难降解污染物,其中,吸附法较为有效<sup>[2]</sup>.我国存在大量的农林副产品废弃物,利用副产物做热解原料,可得到生物油或化学品,同时产生大量热解炭.近年来,以热解炭为吸附剂处理废水污染问题<sup>[3]</sup>成为研究热点,不仅变废为宝,节省资源,同时也减少环境负担.为提高热解炭吸附性能,需对其进行一定改性.例如,童锡臻等<sup>[4]</sup>采用  $\text{FeCl}_3$  及中功率微波对煤质活性炭进行改性,对全氟辛烷磺酸(PFOS)的吸附性能有明显提高;V. K. Gupta等<sup>[5]</sup>采用  $\text{H}_3\text{PO}_4$  浸渍及微波加热法得到无花果活性炭对  $\text{Cr(VI)}$  有较好的吸附效果.

本研究以脱硅稻壳热解炭(PC)为原料,采用氯化钙浸渍及微波辅助加热对其进行改性,研究改性热解炭(MW-PC)对废水中苯胺的吸附行为,并对其吸附机理和再生性能进行了初步探讨.

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂、材料和仪器

氯化钙、苯胺:分析纯;UV-2012 PV 型紫外可

见分光光度计(上海尤尼柯上海仪器有限公司);SHZ-82 恒温气浴振荡器(常州国华电器有限公司).

### 1.2 改性热解炭的制备

称取一定量 PC 于  $\text{CaCl}_2$  溶液浸泡 24 h 后清洗、烘干,再进行微波加热得到 MW-PC,筛分出 0.45~0.90 mm 的 MW-PC 备用.

### 1.3 吸附实验

平衡吸附实验:将 1.0 g/L 的 MW-PC 放入 50 mL 锥形瓶中,加入不同初始浓度苯胺溶液 10 mL (pH 为 8.03,未调节盐度),分别在 298, 308, 318 K 下振荡吸附 480 min.

吸附动力学实验:于盛有 1.0 g/L MW-PC 的锥形瓶中分别加入 10 mL 3 组不同初始浓度的苯胺溶液,不同时间间隔取出测定溶液中苯胺的量.

### 1.4 苯胺测定方法

采用紫外可见分光光度计在 229 nm 处测定吸光度.单位质量吸附剂对苯胺的吸附量为  $q_e = (C_0 - C_e) \times v/w$ .其中  $C_0$  和  $C_e$  分别为吸附前和平衡时苯胺溶液浓度,mmol/L; $v$  为苯胺溶液体积,L; $w$  为吸附剂用量,g; $q_e$  为平衡吸附量,mmol/g.

## 2 结果与分析

### 2.1 X 射线荧光(XRF)分析

PC 改性前后的 XRF 结果见表 1.从表 1 可以看出,改性后 PC 中 CaO 的质量分数有所增加,

收稿日期:2014-06-04;修订日期:2014-08-19

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A150650)

作者简介:邹卫华(1967-),女,湖南桃源人,郑州大学副教授,博士,主要从事环境分析,E-mail:whzhou@zzu.edu.cn.



MgO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等含量减小,这可能是 Ca<sup>2+</sup> 与 PC 炭层间的 Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 等无机离子发生离子交换<sup>[6]</sup> 所致。

表 1 X 射线荧光分析结果  
Tab.1 Results of XRF analyses

成分	质量分数/%	
	PC	MW-PC
MgO	0.351	0.271
SiO <sub>2</sub>	7.260	6.270
SO <sub>3</sub>	0.515	0.507
K <sub>2</sub> O	0.285	0.171
CaO	2.540	2.610
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.217	0.206

2.2 MW-PC 与 PC 对苯胺吸附性能的比较

将 1.0 g/L PC 或 MW-PC 与 10 mL 浓度为 1.0 mmol/L 苯胺溶液混合,振荡 480 min,得到 PC 和 MW-PC 对苯胺的吸附量分别为 0.147, 0.314 mmol/g. 可见,MW-PC 对苯胺有更好的吸附效果。

2.3 等温吸附及热力学研究

温度与平衡浓度对吸附苯胺的影响如图 1 所示.由图 1 可知,随着苯胺浓度的增大,MW-PC 对苯胺的吸附量增加,这是因为苯胺浓度越大,溶液与 MW-PC 表面浓度梯度越大,使吸附容易进行.并且温度升高,苯胺吸附量增加,说明该吸附为吸热过程。

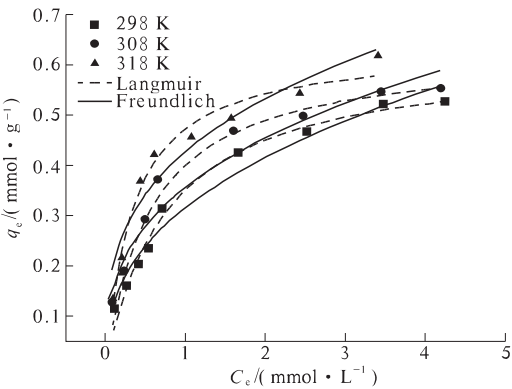


图 1 MW-PC 吸附苯胺吸附等温拟合曲线  
Fig.1 Adsorption isotherms fitting curves

选用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型对平衡数据进行拟合. Langmuir<sup>[7]</sup>、Freundlich<sup>[8]</sup> 方程分别为

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}; \tag{1}$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n}. \tag{2}$$

式中: $q_e$  和  $q_m$  分别为平衡时和饱和时苯胺吸附量,mmol/g; $C_e$  为平衡浓度,mmol/L; $K_L$  和  $K_F$  分别是 Langmuir 和 Freundlich 常数, $K_L$  与吸附剂和吸附质之间的结合能有关。

对实验结果进行非线性回归分析,并用 Chi-square 统计参数进行误差分析,表达式为<sup>[9]</sup>

$$\chi^2 = \sum \frac{(q_e - q_c)^2}{q_c}. \tag{3}$$

式中: $q_e$  和  $q_c$  分别为实验值和理论计算值,mmol/g. 所得等温拟合参数及  $\chi^2$  值见表 2。

从表 2 可知,由 Langmuir 和 Freundlich 等温方程拟合得到  $\chi^2$  值相差不大,但由 Langmuir 拟合得到的  $R^2$  较大,说明 Langmuir 等温模型能较好地描述 MW-PC 对苯胺的吸附行为.随着温度升高, $K_L$  值增大,表明苯胺与 MW-PC 的表面结合力增强,温度从 298 K 升高至 318 K,苯胺的最大吸附量从 0.623 mmol/g 增大到 0.635 mmol/g. Freundlich 模型拟合得到的  $1/n$  小于 1,表明吸附容易进行。

表 2 MW-PC 对苯胺的等温吸附模型及参数

Tab. 2 Adsorption isotherm models and parameters of aniline on MW-PC				
等温模型	参数	298 K	308 K	318 K
Langmuir	$q_m / (\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	0.623	0.628	0.635
	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mmol}^{-1})$	1.307	1.782	2.942
	$R^2$	0.984	0.970	0.976
	$\chi^2$	0.249	0.142	0.095
Freundlich	$K_F$	0.317	0.358	0.429
	$1/n$	0.395	0.349	0.316
	$R^2$	0.975	0.947	0.945
	$\chi^2$	0.220	0.139	0.119

根据文献,对比其他吸附材料与 MW-PC 对苯胺的吸附效果见表 3.由表 3 可知,MW-PC 对苯胺有较好吸附性能。

表 3 不同吸附材料对苯胺吸附量的比较

Tab.3 Comparison of adsorption capacity for aniline on different materials		
吸附材料	$q_m / (\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	参考文献
粉末活性炭	0.054	[10]
Bamboo-Charcoal	0.397	[11]
modified lignin	0.849	[12]
MW-PC	0.623	本文

吸附热力学分析可用来确定温度对吸附剂吸附苯胺的影响.吉布斯自由能变化( $\Delta G$ ,kJ/mol)、焓变( $\Delta H$ ,kJ/mol)和熵变( $\Delta S$ ,J/(mol·K))可分别按下式进行计算。

$$\Delta G = -RT\ln K; \tag{4}$$
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S. \tag{5}$$

式中: $K$  为 Langmuir 吸附平衡常数.

计算得到 298, 308, 318K 下的  $\Delta G$  分别为  $-0.663, -1.479, -2.853$  kJ/mol,表明吸附过程可自发进行,而且随温度升高, $\Delta G$  负值越大,表明吸附越容易进行.  $\Delta H$  和  $\Delta S$  分别为 32.06 kJ/mol 和 109.5 J/(mol · K),表明该吸附为吸热的熵增过程,这主要是由于苯胺分子较水分子大,吸附一个苯胺分子会使得多个水分子脱附,导致吸附体系熵增.

2.4 吸附动力学

时间与浓度对吸附苯胺的影响如图 2 所示. 从图 2 看出,吸附初期,吸附量增幅较大,480 min 时基本达到吸附平衡.

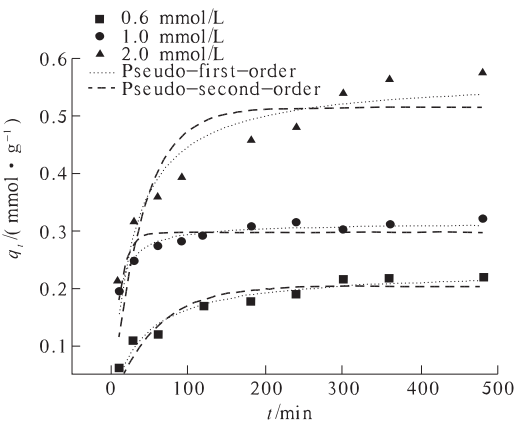


图 2 MW-PC 吸附苯胺动力学拟合曲线  
Fig.2 Kinetic fitting curves of aniline on MW-PC

分别选用准一级和准二级动力学模型对吸附的动力学实验数据进行分析,如表 4 所示.

准一级和准二级动力学方程<sup>[13]</sup>表达式分别为

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}); \tag{6}$$

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}. \tag{7}$$

式中: $q_t$  和  $q_e$  分别为时间  $t$  和平衡时吸附量, mmol/g; $k_1$  ( $\text{min}^{-1}$ ) 和  $k_2$  ( $\text{g} \cdot \text{mmol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 分别为准一级和准二级吸附速率常数.

从表 4 可以看出,准二级模型拟合得到的  $R^2$  值较大,且  $\chi^2$  值较小,可用来描述苯胺的吸附动力学行为,说明该吸附存在化学吸附,这可能是一  $\text{NH}_2$  上电负性较大的 N 原子与 MW-PC 表面的一  $\text{COOH}$  或一  $\text{OH}$  上的 H 形成氢键. 此外,苯胺分子上带负电的一  $\text{NH}_2$  与一  $\text{CO}-\text{OH}$  的一  $\text{OH}$  也可能进行离子交换,生成酰胺基一  $\text{CO}-\text{NH}-$ .

表 4 MW-PC 对苯胺的吸附动力学参数

Tab.4 Adsorption kinetics parameters of aniline on MW-PC

动力学模型	参数	初始浓度/(mmol · L <sup>-1</sup> )		
		0.6	1.0	2.0
准一级	$k_1$	0.018	0.093	0.026
	$q_e/(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	0.205	0.298	0.514
	$R^2$	0.880	0.737	0.767
	$\chi^2$	0.059	0.013	0.143
准二级	$k_2$	0.105	0.462	0.066
	$q_e/(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	0.232	0.314	0.567
	$R^2$	0.948	0.944	0.902
	$\chi^2$	0.029	0.003	0.075
粒子内扩散	$k_{\text{id}} \times 10^2$	0.008	0.017	0.027
	$C_1 \times 10^2$	0.058	0.148	0.146
	$R_1$	0.968	0.989	0.985
	$k_{\text{id}2} \times 10^2$	—	0.003	0.015
	$C_2 \times 10^2$	—	0.254	0.270
	$R_2$	—	0.924	0.967

2.5 吸附机理探讨

为了研究吸附的速率控制因素,采用粒子内扩散方程进一步分析动力学数据. 按照 Weber-Morris 理论,粒子内扩散方程<sup>[13]</sup>为

$$q_t = k_{\text{id}} t^{1/2} + C. \tag{8}$$

式中: $k_{\text{id}}$  为粒子内扩散速率常数, mmol/(g · min<sup>1/2</sup>);  $C$  为膜扩散程度.

以  $q_t$  对  $t^{1/2}$  作图,如图 3 所示. 图中曲线分为两部分,曲线的初始部分代表膜扩散,后续部分代表粒子内扩散. 由图 3 可知,当苯胺初始浓度为 0.6 mmol/L 时,吸附过程呈线性;当初始浓度为 1.0 和 2.0 mmol/L 时,吸附过程可分为两个阶段,而且曲线未通过原点,说明粒子内扩散不是唯一控速步骤. 由表 4 可知,浓度越大, $k_{\text{id}}$  越大,说明表面扩散速率越大,这是溶液中苯胺与吸附剂表面浓度梯度越大的缘故.

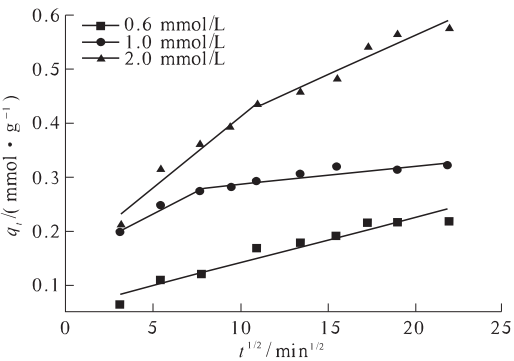


图 3 粒子内扩散图  
Fig.3 Intra-particle diffusion plots of aniline on MW-PC

3 MW-PC 的再生与重复使用

将 1.0 g/L 的 MW-PC 吸附苯胺达到饱和后,

分别用 0.1 mol/L 的 HCl、HNO<sub>3</sub>、NaOH、CaCl<sub>2</sub> 以及无水乙醇等解析剂对其进行脱附再生. 其中, 无水乙醇对 MW-PC 的再生效果较好, 再生率可达到 88.1%, 脱附再生 3 次后, 再生率仍能达到 83.09%. 因此, 笔者所制 MW-PC 可用无水乙醇进行再生.

#### 4 结论

(1) 经改性后稻壳热解炭比未改性热解炭对苯胺有更好的吸附性能, 其对苯胺的吸附为自发的吸热和熵增过程;

(2) 该吸附过程为单层吸附, 吸附过程以化学吸附为主;

(3) 速控步骤是由膜扩散和粒子内扩散联合控制;

(4) 经无水乙醇 3 次脱附再生后, MW-PC 对苯胺仍有较好吸附效果.

#### 参考文献:

- [1] ABRAM F S H, SIMS I R. The toxicity of aniline to rainbow trout [J]. *Water Research*, 1982, 16 (8): 1309 - 1312.
- [2] YUE Du-yuan, JING Yan, MA Jun, et al. Removal of Neutral Red from aqueous solution by using modified hectorite [J]. *Desalination*, 2011, 267(1): 9 - 15.
- [3] YUAN Jin-hua, XU Ren-kou, ZHANG Hong. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488 - 3497.
- [4] 童锡臻, 石宝友, 解岳, 等. 改性活性炭对水中 PFOS 的吸附去除研究 [J]. *环境科学*, 2012, 33 (9): 3132 - 3138.
- [5] GUPTA V K, PATHANIA D, SHARMA S, et al. Preparation of bio-based porous carbon by microwave assisted phosphoric acid activation and its use for adsorption of Cr(VI) [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 102(3): 125 - 132.
- [6] 梁卫东, 贺晓娟, 李海风, 等. 氯化钙改性凹凸棒处理亚甲基蓝废水的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(11): 63 - 68.
- [7] LANGMUIR I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids [J]. *American Chemical Society*, 1916 (38): 2221 - 2295.
- [8] FREUNDLICH H M F. Over the adsorption in solution [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1966 (57): 385 - 471.
- [9] 邹卫华, 李苛, 高帅鹏, 等. 乙二胺改性锯末对刚果红的吸附研究 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2013, 34 (3): 28 - 31, 36.
- [10] 傅金祥, 王锋, 李敬宝, 等. 应急处理苯胺污染水源水的粉末活性炭吸附工艺的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(8): 689 - 692, 703.
- [11] WANG Gui-xian, WANG Mu-hua, ZHANG Qi-wei. Adsorption property of aniline on bamboo-charcoal [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(3): 135 - 139.
- [12] LIN Xiao-yan, ZHANG Jian-ping, LUO Xue-gang, et al. Removal of aniline using lignin grafted acrylic acid from aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 172(2/3): 856 - 863.
- [13] HAMEEDA B H, EL-KHAIARY M I. Malachite green adsorption by rattan sawdust: Isotherm, kinetic and mechanism modeling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159(2/3): 574 - 579.

### Equilibrium and Kinetic Studies on Aniline Adsorption from Aqueous Solution by Modified Pyrolytic Carbon

ZOU Wei-hua, ZHOU Xiu-li, LIU Jing-xuan

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The adsorption performance of pyrolytic carbon from rice husk modified with CaCl<sub>2</sub> soaking and microwave heated method for aniline from aqueous solution was studied. The experimental results showed that modified pyrolytic carbon (MW-PC) exhibited larger adsorption capacities than unmodified pyrolytic carbon (PC) for aniline. The adsorption isotherm of aniline followed the Langmuir model and the maximum adsorption capacity was 0.623 mmol/g at 298K. The adsorption of aniline was a process of spontaneity, enthalpy increase and entropy increase. The experimental data followed the pseudo-second-order kinetic model. The best desorption reagent for saturated MW-PC with aniline was absolute ethyl alcohol.

**Key words:** modified pyrolytic carbon MW-PC; aniline; adsorption; regeneration

文章编号:1671-6833(2014)06-0031-04

# 萃取精馏分离甲苯-正庚烷混合物的模拟研究

胡秀英, 马迪, 杨廷海, 邓育苟

(江苏理工学院 化学与环境工程学院, 江苏 常州 213001)

**摘要:**以苯酚为萃取剂,以 NRTL 模型作为气液平衡的计算模型,用化工流程模拟软件 Aspen Plus 对萃取精馏分离甲苯-正庚烷混合物的过程进行模拟.考察了萃取精馏塔理论板数、萃取剂进料位置、原料进料位置、回流比、溶剂比(萃取剂与原料的质量比)等对分离效果的影响.模拟结果表明,在满足塔顶产品中正庚烷质量分数和收率均达到 99% 的条件下,优化的工艺条件为:萃取精馏塔理论塔板数 24 块,萃取剂进料位置第 6 块塔板,原料进料位置第 14 块塔板,回流比 5.8,溶剂比 2.5.此工艺条件下,塔顶产品正庚烷质量分数为 99.4%,正庚烷回收率达到 99%.

**关键词:**甲苯;正庚烷;萃取精馏;过程模拟

**中图分类号:** TQ 028.3

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.008

## 0 引言

甲苯是优良的有机溶剂,以煤炭为原料制取纯甲苯<sup>[1]</sup>,即将煤炭进行化学加工生产出石油产品,从中取得主要成分为正庚烷的 C<sub>7</sub> 馏分,将其作为原料在高温下催化脱氢环化,可以得到甲苯<sup>[2]</sup>.但所得的产物中含有大部分未作用的正庚烷,目前关于甲苯和正庚烷二者分离方法的报道很少,仅有采用支撑液膜法分离的报道<sup>[3-4]</sup>,但该方法支撑液膜具有性质不稳定、所用的离子液体成本高等问题影响其规模化生产.常见分离芳烃/烷烃的方法主要有萃取精馏、吸附分离、渗透汽化分离等<sup>[5-7]</sup>.甲苯和正庚烷两者的沸点非常接近,难以采用普通精馏方法分离得到高纯度产品.要使正庚烷的纯度达到 99% 以上,选取萃取精馏法分离甲苯和正庚烷混合物最为合适.萃取精馏是化学工业中广泛采用的分离方法,特别适用近沸点或共沸物体系<sup>[8-9]</sup>.

本研究利用 Aspen Plus 流程模拟软件模拟甲苯和正庚烷二元体系的萃取精馏分离过程,通过灵敏度分析,考察萃取精馏塔理论板数、萃取剂进料位置、原料进料位置、回流比、溶剂比(萃取剂与原料的质量比)等对分离效果的影响,寻求最佳工艺操作条件,并对结果进行了实验验证.

## 1 萃取精馏过程建模

### 1.1 模拟流程

萃取精馏分离甲苯和正庚烷的全过程模拟流程如图 1 所示.

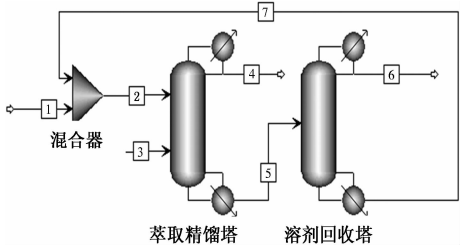


图 1 甲苯-正庚烷体系萃取精馏工艺流程图  
Fig. 1 The process of extractive distillation of toluene-n-heptane system

图 1 中主要包括萃取精馏塔和溶剂回收塔.用萃取精馏塔首先分离出正庚烷,再用普通精馏塔分离出甲苯和萃取剂苯酚.甲苯-正庚烷混合物的溶液从萃取精馏塔中部进料,萃取剂则从塔上部进料,萃取精馏塔顶部馏出的产品是正庚烷,底部则馏出甲苯和萃取剂混合物,这部分物料从溶剂回收塔中部进入,溶剂回收塔顶部出甲苯,底部出萃取剂,萃取剂返回混合器,与补充的新鲜萃取剂混合后进入萃取精馏塔循环使用.图 1 中萃

收稿日期:2014-06-06;修订日期:2014-09-05

基金项目:江苏省高校自然科学基金基础研究项目(13KJB530004);

作者简介:胡秀英(1975-),女,四川德阳人,江苏理工学院实验师,主要从事化学工程与工艺研究,E-mail: yingxi-  
uhu867@163.com.

取精馏塔最为复杂,本研究主要针对萃取精馏塔的操作条件进行优化.

1.2 模拟方法与条件

本研究选用 Aspen Plus 流程模拟软件中的 RadFrac 严格精馏模块<sup>[10]</sup>,以 NRTL 模型计算气液平衡(相关模型参数见表 1),对萃取精馏塔进行模拟. 萃取精馏塔的参数设定为:原料进料量 3.4 kg/h, 正庚烷和甲苯的质量分数分别为 52%、48%. 以苯酚为萃取剂,原料和萃取剂均为常温进料(设为 25 ℃). 萃取精馏塔操作压力为 124 kPa, 塔顶冷凝器均为全凝器,要求分离得到塔顶馏分中正庚烷的质量分数( $x_{\text{HEP}}$ )和收率( $\eta_{\text{HEP}}$ )均达到 99% 以上. 在萃取精馏塔模拟结果的基础上,对溶剂回收塔进行模拟计算,溶剂回收塔的理论板数为 9 块,进料位置为第 5 块塔板,常压蒸馏,回流比为 2,要求塔顶甲苯及塔釜苯酚质量分数达到 99% 以上.

表 1 甲苯(1)–正庚烷(2)–苯酚(3)体系的 NRTL 模型参数

Tab.1 The interaction parameters of NRTL for the toluene(1)–N–heptane(2)–phenol(3) system

组分 $i$	组分 $j$	$B_{ij}$	$B_{ji}$	$\alpha$
1	2	213.964	-80.530	0.303
1	3	563.131	-97.667	0.293
2	3	563.648	353.113	0.293

2 过程模拟与分析

2.1 理论板数的影响

在原料进料位置为第 14 块塔板,溶剂进料位置为第 6 块塔板,回流比为 5.8,溶剂比为 2.5 的条件下考察萃取精馏塔理论板数对分离效果的影响,结果如图 2 所示.

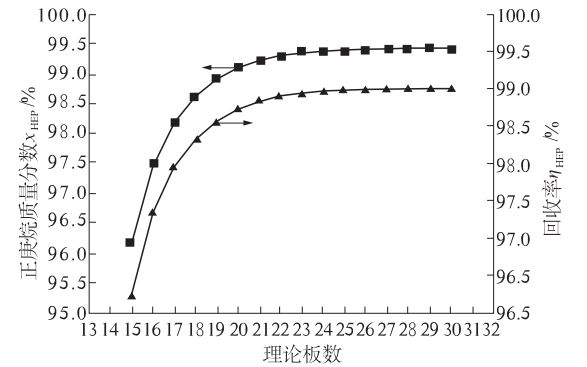


图 2 理论板数对分离效果的影响  
Fig.2 Effect of theoretical plate number on the separation results

由图 2 可知,塔顶正庚烷的质量分数和回收率都随着理论板数的增加而增加,理论板数小于 24 块时,两者增速较快,当理论板数增加至 24 块时,塔顶正庚烷的质量分数增加到 99.4%,回收率增加到 99%. 随着理论塔板数增加,两者变化不明显. 为节省设备投资,选取理论板数 24 块.

2.2 溶剂进料位置的影响

在理论板数为 24,原料进料位置为第 14 块塔板,回流比为 5.8,溶剂比为 2.5 的条件下考察溶剂进料位置对分离效果的影响,结果如图 3 所示. 由图 3 可看出,溶剂在第 1 块塔板上进料时,正庚烷回收率为 100%,但正庚烷质量分数只有 48.47%;当进料位置变为 2 时,正庚烷质量分数有大幅提高,达到 95.06%,正庚烷回收率略有下降,降为 92.40%. 溶剂进料位置从第 3 块塔板下移到第 6 块塔板时,正庚烷质量分数和回收率分别逐渐上升到 99.4% 和 99.0%,溶剂进料位置从第 7 块塔板下移时,正庚烷质量分数和回收率均逐渐下降. 综合考虑,选取萃取剂进料位置为第 6 块塔板比较合适.

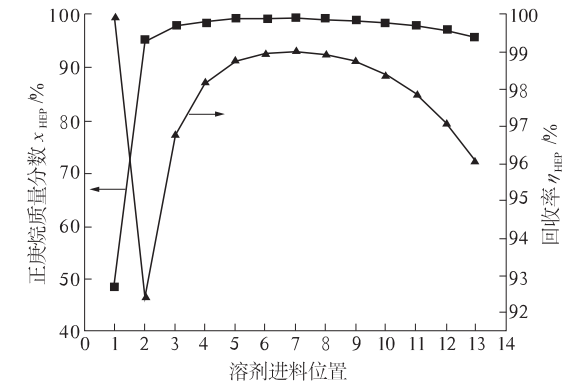


图 3 溶剂进料位置对分离效果的影响  
Fig.3 Effect of of solvent feeding position on the separation results

2.3 原料进料位置的影响

在理论板数为 24,溶剂进料位置为第 6 块塔板,回流比为 5.8,溶剂比为 2.5 的条件下考察原料的进料位置对分离效果的影响,结果如图 4 所示. 由图 4 可以看出,随着原料进料位置的下移,塔顶正庚烷的质量分数和收率是先增大后减小的过程. 当原料进料位置低于 14 时,馏出物中正庚烷的质量分数和收率都随着进料位置的下移而逐渐增大;当原料进料位置在第 14~21 块间变化时,两者基本保持不变,但进料位置下移,塔釜负荷将不断增加;从第 22 块板开始,随着进料位置下移,两者变得越来越低,分离效果变差. 进料位



置在第 14 块塔板时,板上液相脱溶剂组成与原料液组成较为相近,原料进塔后返混程度小,因此分离效果较好,回收率较高,此时塔顶正庚烷组成和回收率分别为 99.4% 和 99.0%,均满足要求,因此选取第 14 块塔板为最佳原料进料位置。

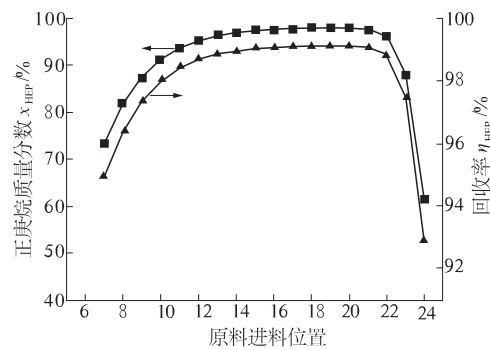


图 4 原料进料位置对分离效果的影响  
Fig. 4 Effect of of material feeding position on the separation results

2.4 回流比的影响

在理论板数为 24,溶剂进料位置为第 6 块塔板,原料进料位置为第 14 块塔板,溶剂比为 2.5 的条件下考察回流比对分离效果的影响,结果如图 5 所示.由图 5 可以看出,回流比由 5 增至 5.8,塔顶正庚烷质量分数呈线性急剧增加,由 90.0% 增大到 99.3%,而回收率基本保持不变,接近 100%;继续增大回流比,塔顶馏出物中正庚烷的质量分数保持平稳,而回收率开始直线下降.综合考虑回流比为 5.8 较合适,此时正庚烷质量分数和回收率分别为 99.27% 和 99.86%,均满足要求.

2.5 溶剂比的影响

在理论板数为 24,溶剂进料位置为第 6 块塔板,原料进料位置为第 14 块塔板,回流比为 5.8 的条件下考察溶剂比对分离效果的影响,结果如图 6 所示.当溶剂比由 2 增大到 2.5 时,塔顶馏出物中正庚烷的质量分数由 87.88% 增大到 99.27%,正庚烷回收率接近 100%,继续增大溶剂比,塔顶馏出物中正庚烷的质量分数趋于平稳,塔顶回收率开始下降到 99% 以下.综合考虑回收塔塔釜热负荷及回收成本,选取溶剂比为 2.5 比较合适,此时正庚烷质量分数及回收率分别为 99.27% 和 99.86%,均达到分离要求.

2.6 工艺优化结果

萃取精馏塔理论塔板数 24 块,萃取剂进料位置第 6 块塔板,原料进料位置第 14 块,回流比 5.8,溶剂比 2.5.溶剂回收塔的理论塔板数 8 块,进料位置第 5 块,回流比 2,模拟结果见表 2.

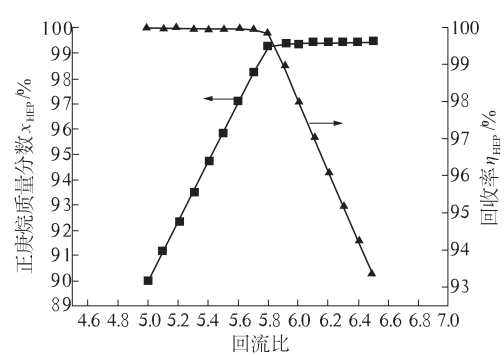


图 5 回流比对分离效果的影响  
Fig. 5 Effect of reflux ratio on the separation results

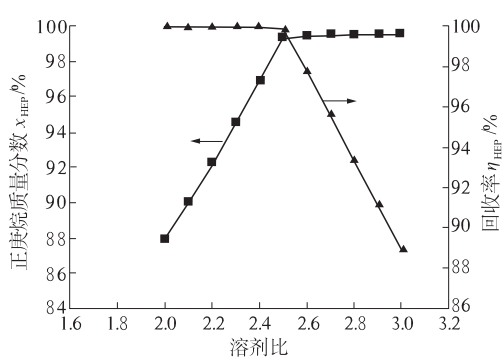


图 6 萃取精馏塔的溶剂比对分离效果的影响  
Fig. 6 Effect of extractant ratio of solvent to feedstock on the separation results

表 2 工艺优化模拟计算结果 (质量分数)

组分	萃取精馏塔		溶剂回收塔	
	塔顶	塔底	塔顶	塔底
正庚烷	99.27	0.03	0.16	0
甲苯	0.42	16.05	99.21	0.57
苯酚	0.31	83.92	0.63	99.40

3 萃取精馏实验验证

为检验模拟结果的可靠性,采用萃取精馏实验装置对模拟结果进行验证.验证实验在玻璃填料精馏塔中进行,塔身设有多个进料口,填料塔直径为 40 mm,填料高度 1.5 m,填料规格为  $\phi 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,填料类型为  $\theta$  丝网填料,塔顶回流用电磁棒调节.实验前用正庚烷-甲基环己烷二元理想混合液对理论板进行标定,得到理论板数为 24.实验操作参数同模拟所得最优参数一致,实验产品组分含量用山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司 SP-6800A 气相色谱仪进行分析,分析条件:氢火焰离子化检测器,氮气作载气,柱前压 0.08 MPa, HJ-5 毛细管柱 (30 m  $\times$  0.32 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ),柱温在 80 ~ 160  $^{\circ}\text{C}$  程序升温,汽化室 200  $^{\circ}\text{C}$ ,检测室

200 ℃,用面积归一法计算含量.实验结果与模拟结果如表 1 所示.由表 1 看出,塔顶产品质量分数及回收率的模拟值与实验值的相对误差均小于 1%,说明模拟结果可靠.

表 3 塔顶产品中模拟结果与实验结果对比

Tab.3 Comparison of simulation results and

experiment results		%
项目	模拟结果	实验结果
$x_{\text{HEP}}$	99.27	98.78
$\eta_{\text{HEP}}$	99.00	98.34

4 结论

(1)甲苯和正庚烷混合物萃取精馏工艺优化结果为萃取精馏塔理论塔板数 24 块,萃取剂进料位置第 6 块塔板,原料进料位置第 14 块塔板,溶剂比 2.5,回流比 5.8.此条件下可使塔顶产品中正庚烷达到 99.4%,回收率达到 99%.

(2)采用 NRTL 模型和 Aspen RadFrac 塔模型对甲苯和正庚烷混合物萃取精馏过程进行模拟与参数优化,模拟结果与实验结果吻合良好.说明采用的模拟方法适用于甲苯-正庚烷混合物萃取精馏过程的模拟.

参考文献:

[1] 张婧元,孔凡贵,贺德福,等. 乙烯裂解原料生产现状[J]. 化工中间体, 2007, 7(8): 31-34.  
[2] 韩世钧,宗汉兴. 甲苯正庚烷正庚烯-3 三元系统气液平衡的研究[J]. 浙江大学学报, 1962, 7(1):

1-3.

[3] 冯浩. 离子液体支撑液膜分离甲苯和正庚烷的研究[D]. 北京:北京化工大学化工学院, 2012.  
[4] MEINDERSMA G W, DEHAAN A B. Conceptual Process design for aromatic/aliphatic separation with ionic liquids[J]. Chem Eng Res Des, 2008, 86(7): 745-752.  
[5] SEILER M, JORK C, KAVARNOU A, et al. Separation of azeotropic mixtures using hyperbranched polymers or ionic liquids[J]. AIChE J, 2004, 50(10): 2439-2454.  
[6] RUTHVEN D M. Zeolites as selective adsorbents[J]. Chem Eng Progr, 1988, 84(2): 42-50.  
[7] SMITHA B, SUHINYA D, SRIDHAR S, et al. Separation of organic-organic mixtures by pervaporation-a review[J]. Journal of Membrane Science, 2004, 241(3): 1-21.  
[8] YANG Xiao-jian, YIN Xuan, OUYANG Ping-kai. Simulation of 1, 3-butadiene production process by dimethylformamide extractive distillation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(1): 27-35.  
[9] RUIZ C, COCAL J, VEGA A, et al. Extractive distillation of hydrocarbons with dimethylformamide: experimental and simulation data[J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 36(11): 4934-4939.  
[10] WANG Huan-yu, WANG Ren-yuan, XU Zhen-liang. Aspen plus in benzothiophene application of extractive distillation process[J]. Fuel and Chemical Processes, 2008, 39(3): 41-45.

Simulation of Separating Toluene-N-heptane Mixture by Extractive Distillation

HU Xiu-ying, MA Di, YANG Ting-hai, DENG Yu-gou

(School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** Extractive distillation process for separating toluene-N-heptane mixture was simulated by using Aspen Plus process simulation software and NRTL model. Phenol was chosen as the extractant. The effects of major design parameters, such as theoretical tray number of extractive distillation column, extractant feeding position, material feeding position, reflux ratio, mass ratio of extractant and feed (solvent ratio) and extractant feeding temperature, on the separation were investigated. Aimed at the N-heptane mass fraction of 99% and the recovery of 99% in the product, the optimal process conditions were theoretical tray number of extractive distillation column of 24, extractant feeding position of the 6th tray, the mixture feeding position of the 14th tray, reflux ratio of 5.8, solvent ratio of 2.5. Under the conditions, the N-heptane mass fraction and recovery ratio in the product reached 99.4% and 99% respectively.

**Key words:** toluene; N-heptane; extractive distillation; process simulation

文章编号:1671-6833(2014)06-0035-04

# FDS6 对隧道火灾温度场模拟的适用性研究

钟 委, 李兆周, 吕金金, 梁天水

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 采用火灾动力学软件 FDS6 对隧道火灾开展数值模拟, 得到不同火源功率下羽流区温度分布和纵向风作用下羽流撞击区最高温度. 将模拟结果与 FDS5 的模拟结果进行对比发现, 采用了新的湍流燃烧模型后, FDS6 模拟的火源高温区集中在火羽流底部, 燃烧产生的热量有相当部分通过热辐射的形式向周围空气传递, 并导致隧道顶棚下方羽流撞击区温度明显低于 FDS5 的模拟结果. 对纵向风作用下羽流撞击区最高温度的模拟结果表明, FDS6 的预测值明显低于 Kurioka 模型预测值和隧道火灾实验值.

**关键词:** FDS; 隧道火灾; 羽流区温度; 最高温度

**中图分类号:** U458.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.009

## 0 引言

在隧道火灾的相关研究中, FDS 作为国内外学者普遍认可的分析和验证性工具得到了大量运用, 如研究隧道火灾羽流撞击区最高温度<sup>[1]</sup>, 抑制烟气逆流临界纵向风速<sup>[2]</sup>, 隧道自然排烟效果<sup>[3]</sup>等. 因此, FDS 对隧道火灾温度场模拟的准确性尤为重要. Chen<sup>[4]</sup>通过实验和 FDS5 研究了隧道内烟气流动和温度分布; Hu<sup>[5]</sup>针对隧道顶棚下方最高温度开展了全尺寸火灾实验模拟, 并将 FDS5 模拟的最高温度与实验值进行了对比. 研究表明, FDS5 的模拟值与实验值吻合得相当好, 可以有效地模拟火灾中烟气流动和热传递过程. 2012 年 12 月, NIST 发布了最新版 FDS6, 在原有模型的基础上进行了许多重要改进. 其中, 在原 LES 模型的混合分数燃烧模型基础上, 采用了部分扰动分批处理反应器模型 (Partially - Stirred Batch Reactor), 目的是为了地更好地模拟湍流燃烧. 当然, 增加新特性后, 软件对隧道火灾的模拟效果还有待进一步验证. 因此, 笔者采用 FDS6 中 LES 模型模拟隧道火灾场景, 研究隧道内火源区域温度分布和纵向风作用下顶棚下方最高温度.

## 1 理论基础

FDS5 包括两种燃烧模型: 混合分数燃烧模型和有限速率多步反应模型. FDS6 在 FDS5 燃烧模型的基础上进行了较大改进. 无化学反应发生时,

网格内局部质量分数如下:

$$\frac{dY_{\alpha}}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{mix}}} (\bar{Y}_{\alpha} - Y_{\alpha}). \quad (1)$$

式中:  $Y_{\alpha}$  为初始物质  $\alpha$  的质量分数;  $\tau_{\text{mix}}$  为网格内特征混合时间;  $\bar{Y}_{\alpha}$  为网格内物质  $\alpha$  的平均质量分数.

在模型中, 网格内某一个时刻只存在两种状态: 完全未混合和完全混合.

次网格的概率密度函数 (PDF) 如下:

$$f(\psi_{\alpha}) = w_1 \delta(0 - \psi_{\alpha}) + w_2 \delta(1 - \psi_{\alpha}) + w_3 \delta(\bar{Y}_{\alpha} - \psi_{\alpha}). \quad (2)$$

式中:  $\delta(x)$  为单位脉冲函数;  $\psi_{\alpha}$  为组成的样本空间且  $\psi_{\alpha} \in (0, 1)$ ;  $w_1, w_2, w_3$  为权重.

只有在燃料和氧气混合后的区域才可能发生化学反应. 这里分为两个部分: 混合 (质量从未混合区到混合区) 与反应. 在 FDS 每一步计算完后, 混合区和未混合区重新产生最终的网格内平均质量分数,  $\bar{Y}_{\alpha}(t)$ .

$$\frac{dm_{\alpha}}{dt} = M \frac{d\hat{Y}_{\alpha}}{dt} + \hat{Y}_{\alpha} \frac{dM}{dt} = M \frac{d\hat{Y}_{\alpha}}{dt} - \hat{Y}_{\alpha,0} \frac{dU}{dt}. \quad (3)$$

$$\hat{Y}_{\alpha}(t) = \frac{m_{\alpha}(t)}{M(t)}. \quad (4)$$

式中:  $m_{\alpha}$  为物质  $\alpha$  的质量;  $M(t)$  为已混合质量;  $U(t)$  为未混合质量. 一旦知道最后混合区域的质量, 通过重组混合区和非混合区的份额, 计算区域的结构为

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51104132); 火灾科学国家重点实验室开放课题 (HZ2012-KF01)

作者简介: 钟委 (1978-), 男, 重庆江津人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事地下建筑火灾防治及化工安全技术研究, E-mail: zhongwei@zzu.edu.cn.

$\bar{Y}_\alpha(t) = \zeta(t) \bar{Y}_{\alpha,0} + (1 - \zeta(t)) \hat{Y}_\alpha(t).$  (5)

式中: $\zeta$  为未混合分数.

2 模拟试验设计

2.1 模型参数设定

隧道尺寸为 60 m × 10 m × 5 m (长 × 宽 × 高). 火源设置在隧道中心 30 m 处, 尺寸为 1 m × 1 m × 0.2 m (长 × 宽 × 高). 在距隧道入口 30 m 处的火源中心线上, 每隔 0.2 m 设置一个热电偶, 共设置 24 个. 在距隧道顶部 0.2 m 处, 设置的第一个热电偶距中心线为 0.5 m, 设置其它热电偶的间距为 1 m, 共设置 20 个, 如图 1 所示.

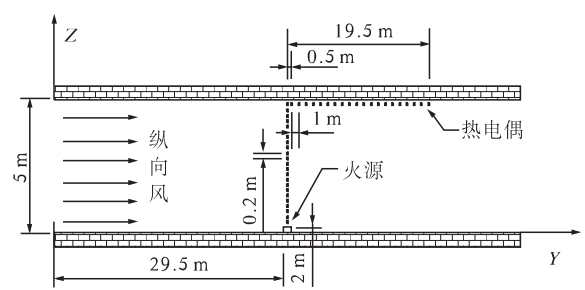


图 1 隧道模型示意图  
Fig.1 Schematic view of tunnel model

2.2 网格设置

FDS 用户指南<sup>[6]</sup>建议在计算网格系统时可以参考特征火源直径与网格尺寸的比值, 即  $D^* / \delta(x)$ . 其中, 特征火源直径定义为

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5}.$$
 (6)

式中:  $\dot{Q}$  为火源热释放速率;  $\rho_\infty$  为空气密度;  $c_p$  为空气比热容;  $T_\infty$  为环境温度;  $g$  为重力加速度.

研究表明, 当  $D^* / \delta(x)$  的取值在 4 ~ 16 时, 数值模型可以很好地解决火灾烟气中的湍流问题. 经计算, 火源功率 5 MW 较适合的网格大小在 0.10 ~ 0.45 m 之间.

7 种不同网格大小模拟的火源上方温度如图 2 所示. 从图可知, 当网格密度大于 0.1 m 时, 隧道高度 4 ~ 5 m 处温度变化不大. 因此, 网格选取 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m 时符合网格独立性要求.

2.3 试验算例设置

模拟的算例可以分为 2 个系列, 隧道尺寸、热电偶布置、网格设置都相同, 火源燃料均为煤油, 环境温度为 20 ℃. 在系列 1 中分别利用 FDS6 和 FDS5 模拟火源功率为 5 MW, 无纵向风时隧道火灾羽流区温度分布; 系列 2 中分别利用 FDS6 和 FDS5 模拟工况 4 ~ 25, 所有工况都考虑热辐射效应, 如表 1、表 2 所示.

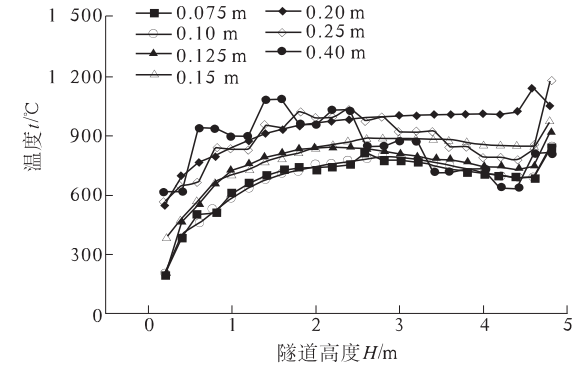


图 2 火源上方垂直温度分布  
Fig.2 The vertical temperature distribution above the fire source

表 1 系列 1 工况的参数设置  
Tab.1 Parameter settings of series 1

工况	版本	火源功率 $\dot{Q} / \text{MW}$	纵向风速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	热辐射
1	FDS6	5	0	开启
2	FDS5	5	0	开启
3	FDS6	5	0	关闭

表 2 系列 2 工况的参数设置  
Tab.2 Parameter settings of series 2

工况	火源功率 $\dot{Q} / \text{MW}$	纵向风速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	工况	火源功率 $\dot{Q} / \text{MW}$	纵向风速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
4	5	0.1	15	5	4.0
5	5	0.2	16	5	4.5
6	5	0.3	17	5	5.0
7	5	0.4	18	5	5.5
8	5	0.5	19	5	6.0
9	5	1.0	20	1	2.0
10	5	1.5	21	7	2.0
11	5	2.0	22	10	2.0
12	5	2.5	23	15	2.0
13	5	3.0	24	20	2.0
14	5	3.5	25	30	2.0

3 结果与讨论

3.1 火源区温度分布

图 3 给出了火源功率为 5 MW 时, 采用 FDS6 和 FDS5 模拟得到的火源区温度分布. 从图 3 可以看出, FDS6 模拟的火源高温区主要集中在火源底部, 出现了温度超过 1 000 ℃ 区域, 而温度超过 800 ℃ 的区域主要集中在 2 m 以下, 顶棚下方出现了 470 ℃ 的温区. FDS5 模拟的羽流底部温度不高于 600 ℃, 而 800 ℃ 高温区出现在羽流中部, 并在顶棚下方出现了 1 000 ℃ 的高温.

在火羽流周围空气区温度分布方面, FDS5 模

拟结果中火羽流附近空气温升不明显,图 3(b)中 25 ℃ 等温线高度在 4 m 左右,这表明火源对周围空气的加热作用不明显,绝大部分热量在羽流内部传递.而 FDS6 的模拟结果中火羽流附近空气有明显温升,图 3(a)中 25 ℃ 等温线高度降到了 1.5 m.

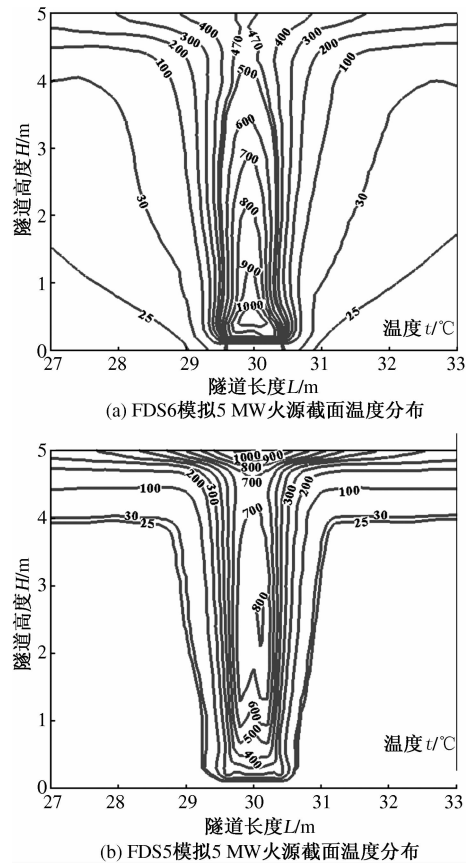


图 3 过火源截面温度分布  
Fig.3 The temperature distribution of fire section

由以上分析可知,FDS6 对燃烧模型的算法改进后,模拟的燃烧反应主要集中在火羽流底部,且辐射热损失较大,而 FDS5 模拟的燃烧反应主要集中在羽流中上部.因此,隧道顶棚下方羽流撞击区的温度必然低于 FDS5 的模拟结果.

3.2 热辐射对羽流温度的影响

为了验证热辐射对羽流温度分布的影响,在算例 3 中关闭了 FDS6 中的热辐射选项,对火源功率为 5 MW 时羽流温度分布进行了模拟,结果如图 4 所示.可以看出,在不考虑羽流热辐射的情况下,羽流周围空气温度有明显的降低,其中 25 ℃ 等温线升高至 4 m 左右;而羽流高温区也升温明显,800 ℃ 高温区超过了 2 m,顶棚下方出现了 500 ℃ 以上的高温.对比图 3(a)可见:FDS6 中由于热辐射作用,导致羽流内部温度下降.

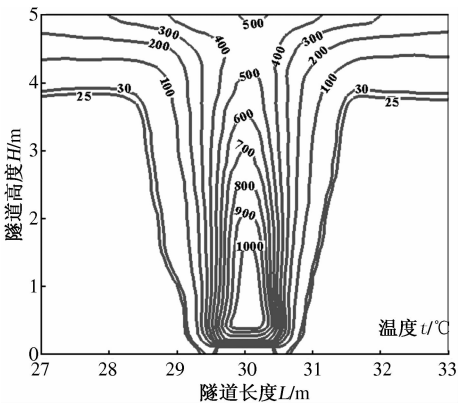


图 4 不考虑热辐射时羽流温度分布  
Fig.4 The plume temperature distribution without radiant heat

3.3 顶棚下最高温度

在隧道火灾中,火源上方及近火源区域产生的高温常常对隧道拱顶结构产生严重破坏,因而对隧道顶棚下方烟气最高温度的研究具有重要意义.Kurioka<sup>[7]</sup>通过小尺寸试验,对不同纵向风速下隧道内火源区温度进行了研究,建立了经验关系式预测顶棚下最高温度.将 Kurioka 最高温度模型的预测值与 FDS6、FDS5、Li<sup>[8]</sup>(FDS5)、周湘川<sup>[9]</sup>(FDS5)的模拟值及 Liu<sup>[10]</sup>、Ingason<sup>[11]</sup>、王彦富<sup>[12]</sup>的实验结果进行比较,如图 5 所示.

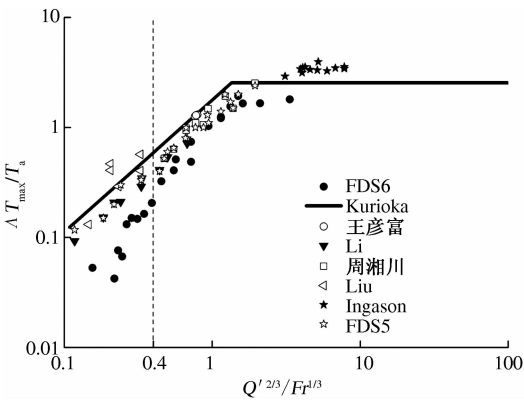


图 5 Kurioka 最高温度模型与模拟值和实验值比较  
Fig.5 Comparison of maximum temperature by the model of Kurioka, simulations and previous experiments

从图 5 可知,FDS5 模拟的羽流撞击区最高温度与 Kurioka 模型的预测值符合的较好,Liu、王彦富和 Ingason 的实验也验证了 Kurioka 模型的有效性.FDS6 模拟的最高温度增长趋势与 Kurioka 模型基本一致,也可分为增长段和稳定段.然而 FDS6 模拟的最高温度明显低于 Kurioka 模型的预测值,当火源功率较小或者纵向风较大,即  $Q^{1/3}/Fr^{1/3} < 0.4$  时,二者的偏差尤为严重.



## 4 结论

(1)采用新的湍流燃烧模型后,FDS6 模拟的燃烧反应主要集中在火羽流底部,且辐射热损失较大,羽流的热量有相当部分通过热辐射的形式向周围空气传递,导致以对流形式在羽流内部传递的热量减少。

(2)FDS5 模拟的隧道顶棚最高温度值与 Kurioka 模型的预测值及实验值符合较好;而 FDS6 模拟的最高温度值则明显低于 Kurioka 模型的预测值,在火源功率较小或者纵向风较大的情况下,FDS6 的模拟结果与 Kurioka 模型预测值偏离较为严重,在使用 FDS6 对隧道火灾进行数值模拟计算时应注意。

## 参考文献:

- [1] JI Jie, FAN Chuan-gang, ZHONG Wei, et al. Experimental investigation on influence of different transverse fire locations on maximum smoke temperature under the tunnel ceiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(17): 4817-4826.
- [2] DENG Jun, MA Li, WANG Zhen-ping, et al. Simulation study on critical velocity of longitudinal ventilation tunnel fire[J]. Procedia Engineering, 2013, 52: 67-71.
- [3] JI Jie, GAO Zi-he, FAN Chuan-gang, et al. A study of the effect of plug-holing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21): 6032-6041.
- [4] CHEN Xiao-jun. Simulation of temperature and smoke distribution of a tunnel fire based on modifications of multi-layer zone model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1): 75-79.
- [5] HU Long-hua, HOU Ran, PENG Wei, et al. On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 650-655.
- [6] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOTT R. Fire dynamics simulator (version 6) user's guide[R]. Washington DC: NIST Special Publication, 2013: 37.
- [7] KURIOKA H, OKA Y, SATOH H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(4): 319-340.
- [8] LI Li-ming, LI Sen, WANG Xue-gui, et al. Fire-induced flow temperature along tunnels with longitudinal ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32: 44-51.
- [9] 周湘川. 特长公路隧道现场火灾试验与衬砌结构抗火性能研究[D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2011.
- [10] LIU Z G, KASHEF A H, LOUGHEED G D, et al. Investigation on the performance of fire detection systems for tunnel applications (part 2): full-scale experiments under longitudinal airflow conditions[J]. Fire Technology, 2011, 47(1): 191-220.
- [11] INGASON H, LI Ying-zhen. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(6): 371-384.
- [12] 王彦富, 蒋军成, 龚延凤, 等. 隧道火灾拱顶附近烟气最高温度的研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 17(10): 39-44.

## Study on Applicability of FDS 6 to Simulate the Fire in Horizontal Long Tunnel

ZHONG Wei, LI Zhao-zhou, LV Jin-jin, LIANG Tian-shui

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Fire dynamics software FDS6 is used to simulate the scenarios of tunnel fire, the temperature distribution of the plume and the maximum temperature of plume impingement zone under the action of longitudinal wind are obtained with different fire power. With a new turbulent combustion model, the results of FDS6 show that the high temperature zone of fire source focus on the bottom of plume and a considerable part of plume heat transfer to ambient by thermal radiation. The heat transferred by convection in plume is reduced, and the temperature of the plume impact region under tunnel ceiling is obviously lower than the results of FDS5. The maximum temperature of plume impingement zone under the action of longitudinal wind obtained by FDS6 is significantly lower than the Kurioka model predictions and the tunnel fire experimental values.

**Key words:** FDS; tunnel fire; plume zone temperature; maximum temperature

文章编号:1671-6833(2014)06-0039-04

# 氮源与其补加方式对 1,3-丙二醇生物合成的影响

乔建援, 赵 峰, 齐笑飞, 孙沛勇, 杜风光

(河南天冠企业集团有限公司 试验中心, 河南 南阳 473000)

**摘 要:** 氮源是发酵法生产 1,3-丙二醇的一种重要原料, 培养基中氮源浓度的高低直接影响了发酵结果. 从氮源的选择与补加方式着手, 研究了各种有机氮与无机氮的使用及补加方式对发酵的影响. 研究表明: 纯有机氮源无法满足 1,3-丙二醇生产的需求, 而 3.0 g/L 的玉米浆粉可以有效替代 1.0 g/L 的酵母浸粉成为工业大生产中的有机氮源, 并且采用与 pH 值控制耦合的方式进行补加, 使甘油转化生产 1,3-丙二醇的最终含量提高到 72.5 g/L.

**关键词:** 氮源; 补加方式; 1,3-丙二醇; 生物合成

**中图分类号:** TQ923 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.010

## 0 引言

1,3-丙二醇(1,3-propanediol, 以下简称 PDO) 是一种重要的精细化工原料, 主要用作合成聚酯和聚氨酯的单体等<sup>[1]</sup>. 近几年的研究表明, 以 PDO 为单体合成的对苯二甲酸丙二醇酯(PTT) 具有优良的加工、染色等性能<sup>[2]</sup>, 可以广泛地应用于纺织工业. 最近十几年国际市场上甘油的生产过剩, 也促进了甘油生物转化法生产 PDO 的研究. 和化学法相比, 微生物转化法具有安全、环保和可持续发展性, 特别是随着石化资源的日益枯竭, 生物基化学品的研究不断升温, 微生物转化法生产 PDO 已成为研究的热点<sup>[3-4]</sup>.

陶春平等研究表明<sup>[5]</sup>: 培养基中氮浓度较低时, 菌体生长和产物生成都会因氮源不足受到影响; 氮源浓度较高时会导致菌体过度生长和副产物的大量生成, 降低 PDO 的最终浓度以及甘油生产 1,3-丙二醇的转化率. 笔者在进行产业化评估时发现, 以目前的培养基配方来进行产业化, 不仅成本高, 而且在氮源的添加方面没有一个较好的控制方式, 这必将制约 PDO 的产业化.

笔者从培养基成本及氮源的控制角度出发, 研究了 3 种不同的有机氮源、无机氮源用量情况以及不同的补加方式下对发酵法生产 1,3-丙二醇的影响.

## 1 实验部分

### 1.1 菌株与培养基

克雷伯氏肺炎杆菌: 河南天冠企业集团有限公司车用燃料生物技术国家重点试验室保存.

种子培养基 (g/L)<sup>[6]</sup>:  $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$  7.0,  $(NH_4)_2SO_4$  4.0,  $KH_2PO_4$  2.0,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  0.1, 酵母浸粉 1.0, 微量元素液 0.3 mL, pH 值 7.0.

发酵培养基 (g/L):  $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$  6.8,  $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$  1.38,  $(NH_4)_2SO_4$  3.5,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  0.26, 酵母浸粉 1.0, 微量元素液 0.3 mL, pH 值 7.0.

### 1.2 试剂和仪器

化学试剂均为市购, 分析纯; 酵母浸粉为安琪 FM801; 玉米浆粉为上海西王淀粉糖有限公司产品; 全脂黄豆粉为本地黄豆经粉碎而成.

全自动发酵罐为上海国强生化装备有限公司出产. 摇床采用上海智诚 ZHWY-2112C 型. pH 监测采用 Mettler Inpro2000 型电极, M400 变送器.

### 1.3 培养方法

种子培养条件: 三角瓶装液量 50 mL/250 mL, 摇床培养温度 37 °C, 转速 175 r/min, 培养时间 12 h.

发酵采用 50 L 全自动发酵罐, 初始发酵培

收稿日期: 2014-05-07; 修订日期: 2014-08-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA02A208)

作者简介: 乔建援(1974-), 男, 河南新野人, 河南天冠企业集团有限公司工程师, 主要从事新产品的开发及中试放大研究, E-mail: qiaojy@163.com

培养基体积 35 L, 接种量 1% (质量分数), 初始甘油浓度 25 g/L, 发酵液 pH 值 6.3, 发酵温度 37 ℃, 转速 120 r/min, 风量为 0.56 Nm<sup>3</sup>/h. 采用 2 mol/L 的氢氧化钠溶液控制发酵过程中 pH 值, 过程流加甘油, 发酵时间 48 h.

1.4 分析方法

1.4.1 生物量

生物量通过测定发酵液在 650 nm 下的吸光度值转换所得. 分光光度计采用 Unico722 型.

1.4.2 化学成分的测定

甘油、PDO 及副产物中的有机酸<sup>[7]</sup> 采用高效液相色谱法测定. 高效液相色谱为安捷伦 1200.

1.4.3 氨氮的测定方法

氨氮的测定采用 HJ 535—2009<sup>[8]</sup> 中的碘化汞-碘化钾-氢氧化钠法测定, 添加酒石酸钠钾来消除金属离子的影响. 分光光度计采用 Unico722 型.

2 结果与讨论

2.1 初始氮用量对 PDO 生物合成的影响

通过试验发现, 如果降低初始氮用量, 会延长菌体的对数生长期, 且 PDO 的最终含量也较高. 因此, 选择基础培养基中初始氮用量的 50%、75%、100% (质量比) 为条件, 保持 3 种条件下发酵全过程总氮用量相同, 研究了初始氮用量对发酵的影响, 结果如图 1 所示.

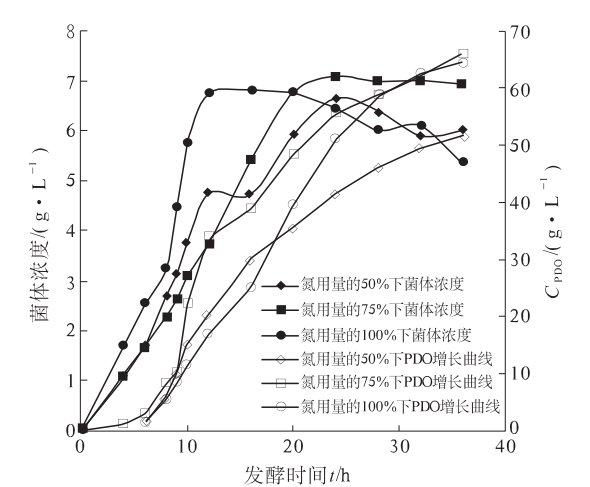


图 1 不同的初始氮用量对发酵的影响  
Fig. 1 Effects of different initial nitrogen content in the fermentation

由图 1 可知, 当初始氮用量过低时, PDO 合成明显放慢, 且操作中, 补氮时间明显提前, 在 9 h 左右就必须补入氮源, 补氮后菌浓出现了快速提升. 由于菌体处于亚健康状态, 50% 的初始氮用量

下的最终 PDO 的合成远低于另两种方式. 而初始氮用量 100% 的条件下, 菌体的增长明显较快, 但 PDO 的增长低于 75% 的状态.

同时测量了不同初始氮用量下的培养基在消毒前后的氨氮含量, 如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 起始氮源用量高时, 氨氮的损失也大, 消毒后培养基的颜色也较深. 因此认为, 消毒时在高温的作用下氨氮与培养基中的糖分发生美拉德反应, 从而损失了部分氨氮, 产生了氨基糖, 造成了发酵液颜色加深.

表 1 不同初始氮用量下氮源的损失率  
Tab. 1 The nitrogen loss rate of different initial nitrogen by disinfection treatment

初始氮用量/%	氨氮含量/(mg · L <sup>-1</sup> )		损失率/%
	消毒前	消毒后	
50	415.3	402.2	3.15
75	612.1	591.5	3.37
100	814.5	786.0	3.50

2.2 纯无机氮对 PDO 生物合成的影响

在做学术研究时, 试验方案中可以采用优质的氮源为原料, 但大生产中高成本将是一个新产品进入市场的关键制约因素. 因此, 笔者试验了纯无机氮源对 PDO 生物合成的影响, 结果如图 2 所示.

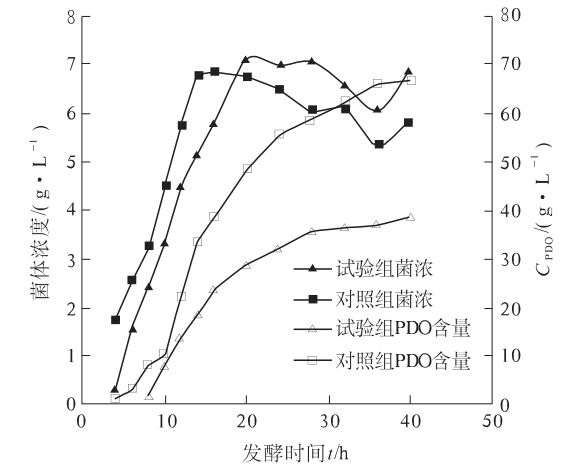


图 2 纯无机氮源对 PDO 生物合成的影响  
Fig. 2 Effects of pure inorganic nitrogen sources on PDO biosynthesis

试验组选用了初始氮用量的 75%, 两次间隙补加无机氮源, 保持总氮用量不变, 对照组也为初始氮用量的 75%. 图 2 的对比试验表明, 纯无机氮对菌体生长基本没有影响, 但 PDO 合成速度低, 且合成滞后, 发酵终了 PDO 的含量低. 表明纯无机氮无法提供产物合成用的一些微量生物因子.

2.3 有机氮对 PDO 生物合成的影响

针对工业中常使用的几种有机氮源,笔者选用安琪酵母浸粉、西王玉米浆粉、全脂黄豆粉等 3 种有机氮源进行了对比试验,试验结果如图 3 所示.

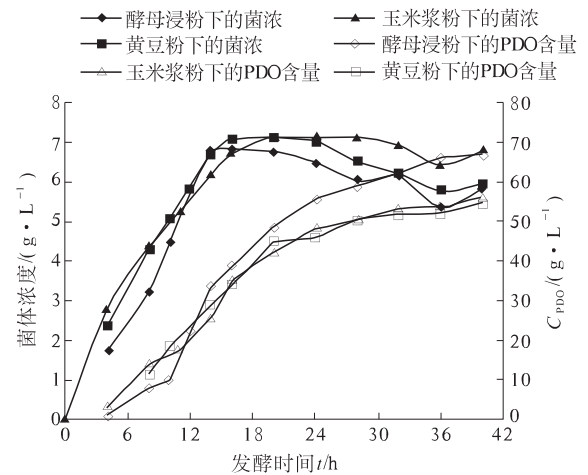


图 3 等量有机氮下对发酵的影响  
Fig.3 Effect on Fermentation of equal amount of organic nitrogen

试验表明,相同用量下后两者比酵母浸粉差.因此,笔者对不同氮源的添加量进行了优化,结果如图 4 所示.通过优化试验发现,3.0 g/L 玉米浆粉、2.5 g/L 的全脂黄豆粉与 1.0 g/L 酵母浸粉的 PDO 生物合成结果相当.但全脂黄豆粉虽提供了充足的有机物,却在发酵中产生了大量的泡沫,对发酵的影响较大,因此,玉米浆粉是 PDO 产业化中的最佳选择.

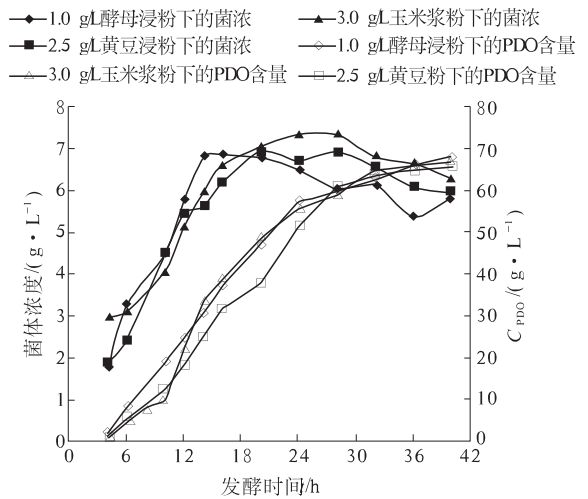


图 4 优化后不同有机氮对发酵的影响  
Fig.4 Effect of different organic nitrogen on fermentation after optimizing

2.4 补加方式对 PDO 生物合成的影响

为了分析氮源浓度对发酵的影响,笔者试验了 3 种补加方式:二次间隙补料、连续稳定的补

加、与 pH 值耦合补加,试验结果如图 3 所示.试验表明:常用的二次间隙补料存在着氨氮浓度的起伏,对菌株的生长不利;而连续稳定的补加方式,在发酵中前期发酵液氨氮含量会逐渐下降,使 PDO 合成较慢,而后期最终发酵液中氨氮含量的增加,不利于废水的处理.

随后笔者选用了与 pH 值调控耦合的补加方式,分析了发酵过程 pH 值与氮源消耗的变化规律.该补加方式前期主要产乙酸,乙酸有利于 PDO 的生成<sup>[9]</sup>,此时氮源消耗随碱液消耗的增大而增大,后期产乳酸,氮源消耗与碱液消耗基本没有关系.因此,笔者选择了前 24 h 与 pH 值的调控耦合补加氮源,而后期停止补加的方式,并取得较好的发酵结果,试验结果如图 5.

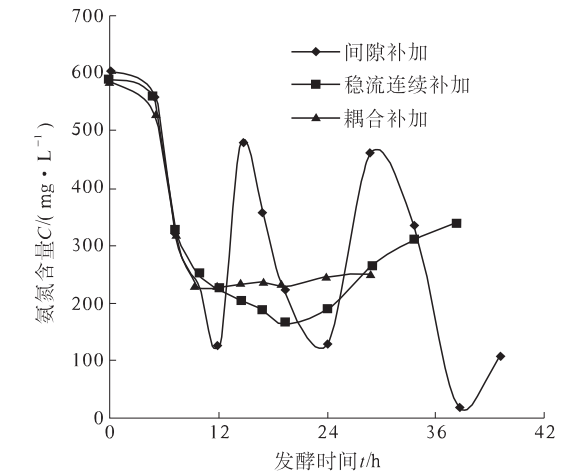


图 5 3 种补加方式下氨氮的变化曲线  
Fig.5 Variation curves of ammonia nitrogen in three feeding mode

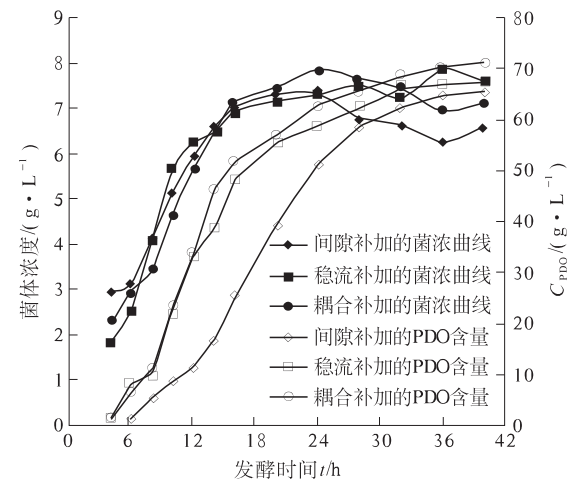


图 6 3 种补加方式的发酵的影响  
Fig.6 Effects of three kinds of adding method in fermentation

试验表明:连续补加有利于氨氮含量的稳定,

对菌株生长及 PDO 生物合成有利;而与 pH 值调控相耦合的补加方式,更有利于发酵料中氮含量的稳定,有利于大生产中的操控. 试验证明,采用与 pH 值调控相耦合的方式, PDO 的最终含量提高到 72.5 g/L.

### 3 结论

(1)本试验表明,纯有机氮只能提供菌株生长需要的氮源,但无法提高 PDO 的产量,说明必要的有机氮源添加是促进 PDO 生物合成的有效方式.

(2)初始氮含量的控制不仅有效地减少氮源的损失,而且能促进菌株转化甘油为 PDO,提高最终发酵液中 PDO 的含量. 氮源与糖类物质的美拉德反应所产生的物质是否会阻碍菌株合成 PDO 仍有待研究.

(3)3.0 g/L 的玉米浆粉与 1.0 g/L 的酵母浸粉均能有效地促进甘油转化为 PDO. 说明玉米浆粉可以成为工业大生产中的有机氮源,从而降低产品的生产成本.

(4)氮源的补加方式是 PDO 生物合成的一个重要的影响因子,控制稳定的氮源浓度使得 PDO 的生物合成可以得到显著的提高. 采用与 pH 值调控相耦合的补加方式能有效地稳定发酵液中的氮源浓度,使 PDO 的最终含量达到 72.5 g/L.

### 参考文献:

- [1] 刘德华,刘宏娟,程可可. 微生物发酵法生产 1,3-丙二醇研究进展[J]. 合成纤维,2005,(6):11-15.
- [2] ZHANG Zong-ming, HU Qiu-long. Statistical optimization of culture conditions for 1,3-propanediol by *klebsiella pneumoniae* AC15 via control composite design[J]. Bioresour. Technology, 2008, 99:1052-1056.
- [3] 刘婷,刘均洪,刘登. 微生物转化甘油生产 1,3-丙二醇的研究进展[J]. 上海化工,2010(4):24-27.
- [4] 张文斗,孟宋冬,马春玲,等. 微生物法生产 1,3-丙二醇的研究进展[J]. 山东轻工业学院学报,2011(4):11-14.
- [5] 陶春平,刘朋波,宫衡,等. 控制氮源浓度提高 1,3-丙二醇的发酵水平[J]. 化学与生物工程,2007,(5):38-41.
- [6] 徐佳杰,刘朋波,宫衡,等. 1,3-丙二醇发酵过程中盐浓度的胁迫作用[J]. 生物工程学报,2008, 24(6): 1098-11021.
- [7] 张浩勤,张伟,刘金盾,等. 气相色谱法测定牛粪厌氧发酵液中挥发性脂肪酸[J]. 郑州大学学报:工学版,2007(2):51-53.
- [8] 中国环境保护部. HJ 535—2009,水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S]. 北京:中国环境科学出版社,2009.
- [9] 张延平. 1,3-丙二醇生物合成过程中的辅因子代谢调控[D]. 北京:清华大学化工学院,2006.

## The Effect of Nitrogen and Its Adding Modes on 1,3-Propanediol Biosynthesis

QIAO Jian-yuan, ZHAO Feng, QI Xiao-fei, SUN Pei-yong, DU Feng-guang

(Technology Center, Henan Tianguan Enterprise Group Co., Ltd., Nanyang 473000, China)

**Abstract:** Nitrogen source is an important raw material for the production of 1,3-propanediol fermentation, nitrogen concentration in the medium directly influences the fermentation results, from the choice of nitrogen source and adding mode, research the use of a variety of organic nitrogen and inorganic nitrogen, the effect of addition on fermentation. Through the study, the pure organic nitrogen sources can not appease the demand of PDO production, while the corn steep powder 3.0 g/L as organic nitrogen source can be used in industrial production effectively instead of yeast extract. With the complement model of uniting the PH value control model, the final content of 1,3-propylene glycol glycerol was increased to 72.5 g/L.

**Key words:** Nitrogen source; adding mode; 1,3-propanediol, biosynthesis

多用户多进制 FM-DCSK 误码率分析

刘 平, 李 宁, 邢军阳

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 多用户调频差分混沌键控已经得到了深入研究, 其非周期性、宽带性、不可预测性特别适合应用于多用户无线保密通信系统, 但是传统的二进制多用户调频差分混沌键控传输效率较低. 针对这种情况, 提出一种新的多用户多进制调频差分混沌键控通信系统, 解决了二进制系统传输效率低的缺点, 并且在选择合适的电平间隔后, 可以有效改善多用户多进制调频差分混沌键控通信系统的误码率. 另外, 给出了多用户多进制调频差分混沌键控调制系统的原理以及系统的误码率公式. 仿真结果表明, 误码率公式与理论分析相符合, 具有实际应用的价值.

关键词: 多用户; 多进制; FM-DCSK; 误码率

中图分类号: TN911.4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.011

0 引言

混沌信号以其类随机性、良好的互相关、自相关等统计学特性在混沌扩频通信领域获得了飞速的发展<sup>[1]</sup>. 比较突出的有混沌键控(CSK)、差分混沌键控(DCSK)、频率调制差分混沌键控(FM-DCSK)<sup>[2-3]</sup>. Carroll 和 Pecora 提出了多路传送的混沌信号技术, 并且将混沌映射产生的扩频码用于传统的 CDMA 通信系统中<sup>[4]</sup>. Kennedy 等<sup>[5]</sup>提出了多路差分混沌键控系统(MA-DCSK). 多路频率调制差分混沌键控(MA-FM-DCSK)的性能已经被 Jako 等人深入研究<sup>[6]</sup>. 笔者提出一种多进制和 Walsh 码相结合的多用户 FM-DCSK 混沌通信系统, 并且分析了在多用户情况下的系统性能, 给出了误码率公式.

1 MAMA-FM-DCSK 系统原理

假设在 MAMA-FM-DCSK 系统中有  $N$  个用户, 第  $k$  个用户的发送端原理图如图 1 所示.

在发送端输入的二进制序列经过分组映射后变成多进制码元序列. 对每一个  $L$  进制信息码元, 假设多进制 FM-DCSK 调制系统的扩频系数为  $2M$ , 即在每个码元周期内, 参考段和信息段各包含  $M$  个混沌基函数  $x_i^k$ . 根据发射多进制码元不同, 信

息序列为  $b_l^k x_{i-M}^k$ ,  $b_l$  为传输码元, 在多进制系统中,  $b_l \in (\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(L-1))$ . 笔者讨论第  $k$  个用户的第 1 个发射码元. 用户  $k$  的发射信号为

$$s_i^k = \begin{cases} x_i^k, & 0 < i \leq M; \\ b_1^k x_{i-M}^k w_{i-M}^k, & M < i \leq 2M. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $M$  为扩频系数;  $i$  为第  $i$  个混沌基函数;  $b_1^k$  为第  $k$  个用户发射的第 1 个发射码元;  $w_i^k$  为长度为  $M$  的 Walsh 码序列.

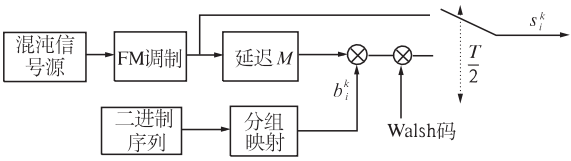


图 1 发送端原理图

Fig. 1 The schematic diagram of sending side

系统中有  $N$  个用户, 发送端发射的信号为

$$S_i = \sum_{k=1}^N s_i^k = \begin{cases} \sum_{k=1}^N x_i^k, & 0 < i \leq M; \\ \sum_{k=1}^N b_1^k x_{i-M}^k w_{i-M}^k, & M < i \leq 2M. \end{cases} \quad (2)$$

假定信道噪声为高斯白噪声, 发射端叠加高斯白噪声  $\zeta_i$ , 所以输入解调器的信号为

收稿日期: 2014-06-29; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 河南省重点科技攻关计划项目(112102310073)

作者简介: 刘平(1957-), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事开关电源、电路原理、射频电路及等离子体等方面的研究, E-mail: iepliu@zzu.edu.cn



$$r_i = S_i + \zeta_i = \sum_{k=1}^N s_i^k + \zeta_i. \quad (3)$$

由于  $\zeta_i$  为平稳随机高斯过程,所以对任意  $i \neq j$ ,  $\zeta_i$  和  $\zeta_j$  是统计独立的;其双边功率谱密度为  $N_0/2$ .

用户  $k$  的接收端原理图如图 2 所示. 图 2 中输入信号延迟半个码元周期后与未延迟信号以及 Walsh 码相乘,该组 Walsh 码与用户  $k$  在发送端叠加的 Walsh 码相同,则接收机的相关器的输出为

$$c_1^k = \sum_{i=1}^M r_i r_{i+M} w_i^k. \quad (4)$$

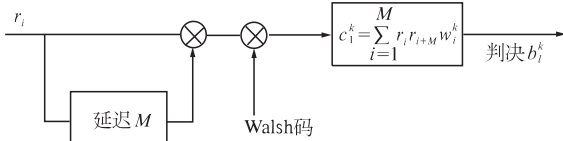


图 2 接收端原理图

Fig. 2 The schematic diagram of sending side

将式(2)和式(3)代入式(4)中,可以得到:

$$\begin{aligned} c_1^k &= \sum_{i=1}^M \left[ \left( \sum_{l=1}^N x_i^l + \xi_i \right) \left( \sum_{u=1}^N b_1^u x_{i+M}^u w_{i+M}^u + \xi_{i+M} \right) w_i^k \right] \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^N \sum_{u=1}^N b_1^u x_i^l x_{i+M}^u w_i^k + \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^N x_i^l \xi_{i+M} w_i^k + \\ &\quad \sum_{i=1}^M \sum_{u=1}^N b_1^u x_i^u \xi_i w_{i+M}^u + \sum_{i=1}^M \xi_i \xi_{i+M} w_i^k \\ &= \alpha + \beta + \eta. \end{aligned} \quad (5)$$

根据 Walsh 码的正交性和  $\zeta_i$  的统计特性,并且 FM-DCSK 调制中码元能量  $E_b$  恒定,即

$$E_b = 2M \langle (x_i^k)^2 \rangle = 2 \left[ \sum_{i=1}^M (x_i^k)^2 - \lambda \right]. \quad (6)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^M (x_i^k)^2 - E_b/2. \quad (7)$$

所以  $\alpha, \beta, \eta$  可以表示为

$$\alpha = b_1^k \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^N x_i^l x_i^k + b_1^k E_b/2 + b_1^k \lambda; \quad (8)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^N x_i^l \xi_{i+M} w_i^k + \sum_{i=1}^M b_1^u x_i^u \xi_i; \quad (9)$$

$$\eta = \sum_{i=1}^M \xi_i \xi_{i+M} w_i^k. \quad (10)$$

式(8)中第一项为多用户干扰项,  $\beta$  和  $\eta$  为噪声干扰项,  $b_1^k \lambda$  为误差干扰项. 所以式(5)可以表示为

$$c_1^k = b_1^k E_b/2 + b_1^k \sum_{l=1, l \neq u}^N \sum_{i=1}^M x_i^l x_i^k + \beta + \eta + b_1^k \lambda. \quad (11)$$

令  $\varepsilon = b_1^k \sum_{l=1, l \neq u}^N \sum_{i=1}^M x_i^l x_i^k + \beta + \eta + b_1^k \lambda$ , 则上式可以

表示为

$$Z = \begin{cases} \pm 1 \frac{E_b}{2} + \varepsilon, & \text{当发送电平为 } \pm 1 \text{ 时;} \\ \pm 3 \frac{E_b}{2} + \varepsilon, & \text{当发送电平为 } \pm 3 \text{ 时;} \\ \vdots & \vdots \\ \pm (L-1) \frac{E_b}{2} + \varepsilon, & \text{当发送电平为 } \pm (L-1) \text{ 时.} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $Z$  为接收机相关器输出.

式(5)中多用户干扰和噪声干扰非常严重,引入 Walsh 码以后,由于 Walsh 码的正交性消除了大部分干扰,如式(11)所示. 对于二进制系统,相关器输出的判决门限为零;而多进制系统由于发送多个电平,如式(12)所示,所以其判决门限根据发送码元不同而不同<sup>[7]</sup>.

## 2 MAMA-FM-DCSK 系统性能分析

在本文的分析中,使用零均值 Logistic 映射产生混沌序列. 零均值 Logistic 映射为  $x_{k+1} = 1 - 2x_k^2$ ;其概率密度方程为  $\rho(y) = 1/\pi \sqrt{1-y^2}$ ;方差为  $1/2$ .

根据文献[8],误差干扰项  $\lambda$  的方差为

$$\sigma_\lambda^2 = E_b^2/2M. \quad (13)$$

对于多进制系统,判决门限应该为  $(0, \pm 2 \frac{E_b}{2}, \dots, \pm (L-2) \frac{E_b}{2})$ ;所以相邻电平间隔为  $2d = E_b$ . 当噪声抽样值  $|\varepsilon| > d$  时,将发生错判. 例外情况是,当发送电平为  $+(L-1)$  时,  $\varepsilon > +d$  时不会发生错判;当发送电平为  $-(L-1)$  时,  $\varepsilon < -d$  时也不会发生错判. 由于每个电平都是等概率发送,所以多进制系统的平均误码率为

$$\begin{aligned} p_e &= \frac{L-2}{L} p(|\varepsilon| > d) + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{L} p(|\varepsilon| > d) \\ &= (1 - \frac{1}{L}) p(|\varepsilon| > d). \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= b_1^k \sum_{l=1, l \neq u}^N \sum_{i=1}^M x_i^l x_i^k + b_1^k \lambda + \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^N x_i^l \xi_{i+M} w_i^k + \\ &\quad \sum_{i=1}^M b_1^u x_i^u \xi_i + \sum_{i=1}^M \xi_i \xi_{i+M} w_i^k. \end{aligned} \quad (15)$$

由于  $\xi_i$  为均值为零,方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声;  $x_i$  为混沌序列,当扩频系数  $M$  足够大时,  $x_i$  近似为高斯随机过程. 所以,  $\varepsilon$  也为高斯随机过程. 式(14)可以表示为

$$p_e = (1 - \frac{1}{L}) p(|\varepsilon| > d) = (1 - \frac{1}{L}) \operatorname{erfc}(\frac{d}{\sqrt{2}\sigma_n}). \quad (16)$$

式中:  $d$  为电平间隔;  $\sigma_n$  为干扰项  $\varepsilon$  的方差;  $\text{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数.

由于对任意  $i \neq j$ ,  $\zeta_i$  和  $\zeta_j$ ,  $x_i$  和  $x_j$ ,  $\zeta_i$  和  $x_i$  都是统计独立的.  $\zeta_i$  双边功率谱密度为  $N_0/2$ ;  $x_i$  的方差为式  $\frac{1}{2}$ ,  $w_i$  的方差近似为  $1^{[9]}$ . 所以

$$\begin{aligned} \sigma_n^2 = & \text{var} \left[ b_1^k \sum_{l=1}^N \left[ \sum_{i=1}^M x_i^l x_i^k + b_1^k \lambda + \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^N x_i^l \xi_{i+M} w_i^k + \sum_{i=1}^M b_1^u x_i^u \xi_i + \sum_{i=1}^M \xi_i \xi_{i+M} w_i^k \right] \right] = \\ & (b_1^k)^2 \sum_{l=1}^N \left[ \sum_{i=1}^M \text{var}(x_i^l x_i^k) \right] + (b_1^k)^2 \sigma_\lambda^2 + \\ & \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^N \text{var}(x_i^l \xi_{i+M}) + (b_1^u)^2 \sum_{i=1}^M \text{var}(x_i^u \xi_i) + \\ & \sum_{i=1}^M \text{var}(\xi_i \xi_{i+M}) = (b_1^k)^2 \frac{1}{4} M(N-2) + \\ & (b_1^k)^2 \frac{E_b^2}{2M} + \frac{N_0}{4} MN + (b_1^u)^2 \frac{N_0}{4} M + \frac{N_0^2}{4} M. \quad (17) \end{aligned}$$

由于  $b_l$  等概率发送, 所以式 (17) 中第一项, 第二项和第四项是变动的,  $b_l^2$  的平均值可以表示为

$$\overline{b_l^2} = \frac{2}{L} \sum_{i=1}^{M/2} (2i-1)^2 = \frac{L^2-1}{3}. \quad (18)$$

所以将式 (18) 代入式 (17) 得  $\varepsilon$  的方差的平均值  $\overline{\sigma_n^2}$ :

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_n^2} = & \frac{L^2-1}{3} \cdot \frac{1}{4} M(N-2) + \frac{L^2-1}{3} \cdot \frac{E_b^2}{2M} + \frac{N_0}{4} MN + \\ & \frac{L^2-1}{3} \cdot \frac{N_0}{4} M + \frac{N_0^2}{4} M. \quad (19) \end{aligned}$$

因为  $E_b = 2M \langle (x_i^k)^2 \rangle \approx 2M \text{var}(x_i)$ ,  $\text{var}(x_i) = \frac{1}{2}$ ; 所以  $E_b = M$ .

将式 (19) 和电平间隔表达式  $2d = E_b$  代入式 (16) 得新系统的误码率为

$$\begin{aligned} p_e = & (1 - \frac{1}{L}) p(|\varepsilon| > d) = (1 - \frac{1}{L}) \text{erfc}(\frac{d}{\sqrt{2}\sigma_n}) \\ = & (1 - \frac{1}{L}) \text{erfc} \left[ \frac{2(L^2-1)(N-2)}{3M} + \frac{4(L^2-1)}{3M} + \right. \\ & \left. 2N(\frac{E_b}{N_0})^{-1} + (\frac{2(L^2-1)}{3})(\frac{E_b}{N_0})^{-1} + \right. \\ & \left. 2M(\frac{E_b}{N_0})^{-2} \right]^{\frac{1}{2}} = (1 - \frac{1}{L}) \text{erfc} \left[ \frac{2(L^2-1)N}{3M} + \right. \\ & \left. 2N(\frac{E_b}{N_0})^{-1} + \frac{2(L^2-1)}{3}(\frac{E_b}{N_0})^{-1} + 2M(\frac{E_b}{N_0})^{-2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (20) \end{aligned}$$

当  $M$  较大时,  $\frac{2(L^2-1)N}{3M}$  趋近于零, 可以忽略

不计, 此时误码率可近似为

$$\begin{aligned} p_e = & (1 - \frac{1}{L}) \text{erfc} \left[ 2N(\frac{E_b}{N_0})^{-1} + \right. \\ & \left. \frac{2(L^2-1)}{3}(\frac{E_b}{N_0})^{-1} + 2M(\frac{E_b}{N_0})^{-2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (21) \end{aligned}$$

当  $L=2, N=1$  时上式为单用户二进制 FM-DCSK 误码率, 单用户二进制 FM-DCSK 误码率由文献 [10] 给出.

### 3 仿真结果及分析

仿真结果表示在图 3~5 中, 其中仿真值表示仿真结果, 理论值表示利用式 (21) 仿真得到的理论结果, 传统多用户二进制 FM-DCSK 误码率公式由文献 [11] 给出.

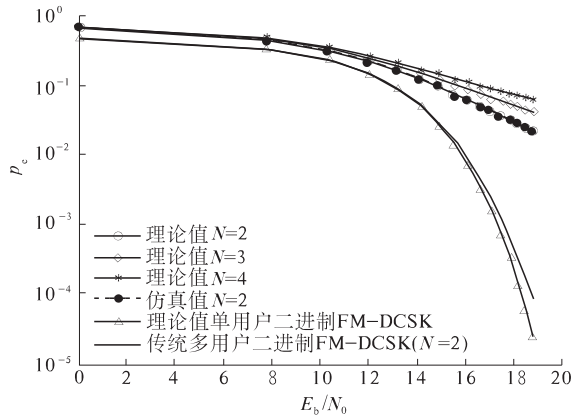


图3  $N$  不同时的误码率情况

Fig.3 The BER with different  $N$

图 3 表示  $N$  不同时的误码率情况, 在本次仿真中  $L=4$ , 扩频系数  $M=100$ , 分别对  $N=2, 3, 4$  进行仿真分析. 多用户多进制通信系统比单用户二进制通信系统误码率有较大的增加, 这是因为多进制判决门限增加, 且判决门限不为零, 增加了系统误码率. 另外, 随着用户数目的增加, 误码率也有明显的增加, 这是因为用户数目的增加, 多用户之间的干扰增加, 造成了误码率的上升.

图 4 为改变电平间隔后不同用户数目的误码率情况. 在图 4 的仿真中电平间隔  $d = E_b/2$ , 当增加电平间隔至  $d = \sqrt{2}E_b/2$  时, 仿真结果见图 4. 从图 4 可以看出, 适当增加电平间隔能显著地改善系统性能. 但是, 增加电平间隔将会在发送端需要更多的发射功率, 所以, 电平间隔不能无限制地增加.

图 5 为当用户数目  $N=3$  时, 不同进制的误码率情况. 选取  $N=3$ , 扩频系数  $M=100$ , 分别对  $L=2, 3, 4$  进行仿真. 从图 5 可以看出, 当  $L$  增加

是误码率明显上升,主要是由于  $L$  增加,判决门限数目增加,由此造成了误码率的上升.

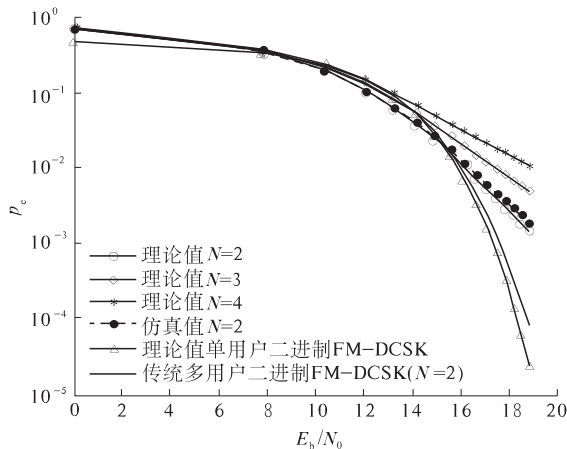


图 4 改变电平间隔后  $N$  不同时的误码率

Fig.4 The BER with different  $N$  and different level interval

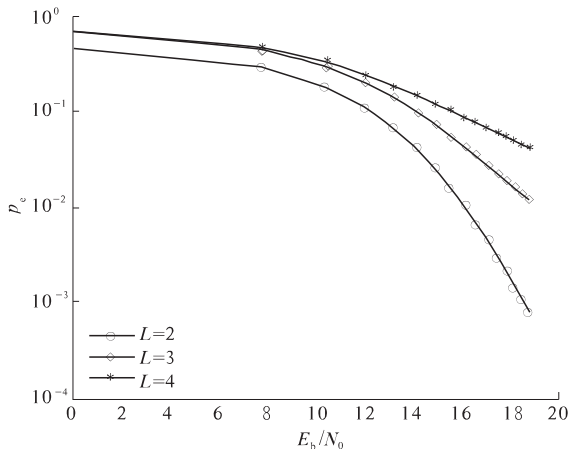


图 5  $N=3$  时,不同进制的误码率情况

Fig.5  $N=3$ , The BER with different multi-system

## 4 结论

笔者提出了一种新的多用户多进制 FM-DCSK 混沌通信系统,并且在系统中利用 Walsh 码,大大降低了多用户之间的干扰;详细地分析了新系统的原理性能,并给出了误码率公式;并且通过仿真验证了系统的性能.新系统在基本不增加系统复杂性的同时,大大提高了二进制码元传输效率;同时,其误码率相比传统多用户系统仅有略微增加.通过选取适当的电平间隔,误码率将得到显著的改善.由于篇幅限制,只讨论了理想信道下的误码率;当信道噪声影响到 Walsh 码的正交性时,

误码率将会显著增加,所以下一步工作将致力于实际环境条件下系统性能的研究.

## 参考文献:

- [1] KOLUMBAN G, KENNEDY M P, CHUA L O. The role of synchronization in digital communications using chaos (Part I): Fundamentals of digital communications[J]. IEEE Trans Circuits Syst I, 1997, 44(8): 927 - 936.
- [2] HERVE D, MICHAEL P K, MARTIN H. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing chua's circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1993, 40(10): 634 - 642.
- [3] KOLUMBAN G, KIS G, JAKO Z, Michael Peter Kennedy FM-DCSK: A Robust modulation scheme for chaotic communications[J]. IEICE Trans. 1998, E81(9): 1798 - 1802.
- [4] CARROLL T L, PECORA L M. Using multiple attractor chaotic systems for communication[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 1999, 9(2): 445 - 451.
- [5] KENNEDY M P, KOLUMBAN G, JAKO Z. Recent advances in communicating with chaos[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Monterey, CA, USA: IEEE Press, 1998: 461 - 464.
- [6] JAKO Z, KIS G, KOLUMBAN G. Multiple access capability of the FM-DCSK chaotic communications system[C]//NDES2000, Catania, Italy. 2000: 52 - 55.
- [7] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2006: 205 - 207.
- [8] CHERNOV N I. Limit theorems and markov approximations for chaotic dynamical systems [J]. Probability Theory and Related Fields, 1995, 101(3): 321 - 362.
- [9] 周志波, 周童, 王进祥. 一种改进的多用户 DCSK 性能分析. 西安电子科技大学学报: 自然科学版. 2009, 36(4): 732 - 735.
- [10] GALIAS Z, MAGGIO G M. Quadrature chaos shift keying: theory and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2001, 48(12): 1510 - 1518.
- [11] 李辉. 混沌数字通信[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2004: 47 - 48.

(下转第 51 页)

# WSN 中基于非均匀梯度的分簇拓扑算法

阎新芳<sup>1</sup>, 张永坤<sup>1</sup>, 李 腾<sup>2</sup>, 王晓晓<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

**摘 要:** 针对 ETBG 算法中靠近基站的簇头因负担过重而致其能量过早耗尽的问题, 提出了一种基于非均匀梯度的分簇拓扑算法. 该算法利用层次分析法来确定各个因素的权系数, 且基于非均匀梯度的思想改进簇成员入簇策略, 使得靠近基站的簇的规模小于远离基站的簇, 从而为簇间数据转发预留能量. 仿真结果表明, 该算法使整个网络的能量消耗较为均衡, 延长了网络的生存期.

**关键词:** WSN; 层次分析法; 权系数; 非均匀梯度

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.012

## 0 引言

路由技术是无线传感网(Wireless Sensor Network, WSN)的一个关键技术, 而目前 WSN 发展最大的瓶颈就是节点能量有限且不易补充. 因此, 避免不必要的通信、均衡整个网络的能耗成为路由协议设计的关键因素<sup>[1-2]</sup>. 基于分簇的层次路由算法由于其能量高效且易于扩展而被广泛研究和应用<sup>[3-6]</sup>. 其中, 文献[6]提出一种基于能量的分级簇算法 ETBG(Energy-Aware Topology Protocol Based on Gradient)算法, 该算法参考定向扩散协议中梯度的思想, 根据节点的通信半径把网络建成一个梯度场, 以减少分级簇等级和数据分组转发跳数, 降低延迟时间, 同时延长网络生存周期. ETBG<sup>[7-8]</sup>是分布式、异步并行算法, 但存在如下问题: 靠近基站的簇首由于转发大量数据而负载过重, 可能过早耗尽能量而失效.

为解决这个问题, 笔者提出了一种基于梯度的分簇拓扑算法 CTAUG(a Clustering Topology Algorithm Based on Uneven Gradient in WSN), 即将网络划分为依次递增的非均匀梯度, 并对簇成员入簇的策略进行改进, 使得靠近基站的簇的规模小于远离基站的簇的规模, 从而使靠近基站的簇头可以为簇间的数据转发预留更多能量, 延长网络的生存周期.

## 1 基于非均匀梯度的分簇算法

无线传感器节点被随机部署到目标区域以后, 基站按照等差数列的方法将整个网络以基站为圆心从近到远, 划分为大小不等、依次递增的非均匀梯度, 并将梯度信息以一个初始化消息向全网广播. 网内节点收到该消息后, 开始执行 CTAUG 算法.

如图 1 所示, 算法将时间划分为轮, 总体分为簇树建立和数据传输两个阶段. 簇树建立包括以下几个过程: 判断梯度、构建邻居集、簇头竞争、节点入簇、簇树形成等. 数据传输阶段包括簇内数据传输和簇间数据传输.

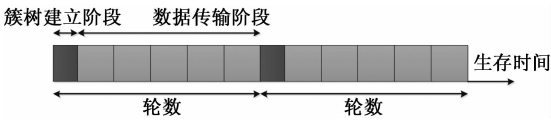


图 1 CTAUG 协议的生存时间划分

Fig. 1 The divided of CTAUG agreement survival time

### 1.1 非均匀梯度的划分

基站感知它到网络的最远距离和最近距离, 分别记为  $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$ , 然后以自己为圆心把网络划分为多个半径不同的同心圆环梯度, 最大半径为  $R_{\max}$  ( $R_{\max} = d_{\max}$ ), 最小半径为  $R_{\min}$  ( $R_{\min} = d_{\min}$ ). 基站规定圆环梯度层数  $L$  及每个梯度的上界值  $UG$  和下界值  $LG$ , 把以基站为圆心,  $R_{\min}$  为半径的

收稿日期: 2014-06-25; 修订日期: 2014-09-03

基金项目: 郑州市科技攻关计划项目(20120555).

作者简介: 阎新芳(1958-), 女, 河南嵩县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事无线传感网等方向研究, E-mail: iexfyang@zzu.edu.cn.

圆定义为第 0 梯度  $L_0$ , 然后把以半径  $R_{\min}$  到  $R_{\max}$  的这个圆环划分为大小不等、依次递增的圆环梯度, 划分方法如下:

$$R_{\max} - R_{\min} = La_1 + L(L-1)r/2. \quad (1)$$

其中, 层数值  $L$  和第 1 层梯度的跨度  $a_1$  均由基站决定, 等差数列的差值  $r$  在  $L$ 、 $a_1$  的值确定后, 由式(2)可得.

$$r = 2(R_{\max} - R_{\min} - La_1)/(L-1)L. \quad (2)$$

由此可得第  $i$  ( $i=2, \dots, L$ ) 层梯度的跨度:

$$a_i = a_1 + (i-1)r = a_1 + 2(i-1)(R_{\max} - La_1)/(L-1)L. \quad (3)$$

假设  $LG_1 = R_{\min}$ , 基站可采用以下公式计算每层梯度的上界值和下界值:

$$UG_i = LG_i + a_i \quad (i=1, \dots, L); \quad (4)$$

$$LG_i = UG_{i-1} \quad (i=2, \dots, L). \quad (5)$$

划分成三层的非均匀梯度如图 2 所示.

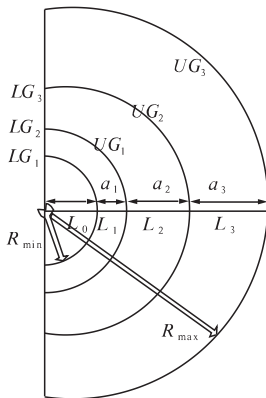


图 2 非均匀梯度划分示意图

Fig. 2 Schematic division of uneven gradient

算法开始时, 基站向全网广播初始化消息 INITMessage, 消息格式如下.

各层上边界:  $UG_L, \dots, UG_2, UG_1 (L \geq 2)$ ;

各层下边界:  $LG_L, \dots, LG_2, LG_1 (L \geq 2)$ .

## 1.2 簇树建立阶段

### 1.2.1 判断梯度

收到基站发出的初始化消息后, 各节点根据自己到基站的近似距离和初始化消息中各个梯度的上下边界, 计算得到自己的梯度等级和到自己在所在梯度中心线的距离  $D_m$ .

### 1.2.2 构建邻居集

(1) 第一次信息交互. 首先各个节点启动定时器 T1, 开始以  $R$  为功率半径向其邻居节点广播当前状态信息 STATUSMessage, 其中包括节点 ID、当前剩余能量  $E_r$ 、梯度  $L$ 、状态  $status$ 、到梯度中心线的距离  $D_m$ . 然后将交互得到的邻居信息保

存在自己的邻居集中, 并对邻居节点个数进行计数.

(2) 综合权值的计算. 在 T1 计时结束之后, 节点根据自己邻居集中的信息开始计算自己的综合权值  $W$ , 其定义为

$$W = w_1 E_r + w_2 / N_d + w_3 / D_a + w_4 / D_m. \quad (6)$$

式中:  $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ ;  $E_r$  为节点剩余能量;  $N_d$  为节点邻居节点数目;  $D_a$  为到邻居节点的平均距离;  $D_m$  为到节点所在梯度中心线的距离.

用层次分析法<sup>[9-10]</sup>来确定各自的权系数. 此方法通过两两比较的方式确定诸因素的相对重要性, 然后综合人的判断, 决定诸因素总的顺序.

(3) 第二次信息交互. 节点计算好自己的综合权值后, 启动定时器 T2, 进行第二次信息交互, 将自己的综合权值发送给所有的邻居. 节点将所有邻居第二次交互时发送来的综合权值保存在自己的邻居集中.

### 1.2.3 簇头竞争

等邻居集构建完成后, 节点将自己的综合权值与邻居节点的综合权值进行比较, 如果自己的权值是邻居集中最大的, 就宣布自己是簇头, 并向周围邻居节点广播簇头消息 HEADMessage, 这样就选出了部分在邻居节点中综合权值最大的节点为簇头节点.

### 1.2.4 节点入簇

此阶段节点启动定时器 T3, 开始接收邻居簇头发来的簇头消息 HEADMessage, 并将其保存在自己的簇头列表中.

在 T3 计时结束后, 节点如果只收到一个簇头消息, 就直接加入该簇头所在的簇中, 并向其发送 JOINMessage; 如果收到两个或两个以上的簇头消息, 则优先选择加入到梯度较大的簇头中, 并向其发送 JOINMessage; 如果这几个簇头在同一梯度中, 则优先加入到剩余能量较大的簇头中, 并向该簇头发送 JOINMessage; 如果没有收到簇头消息, 且邻居中综合权值比自己大的节点状态都已经确定, 则宣布自己成为簇头, 并向邻居节点中比自己权值小的节点广播簇头消息 HEADMessage. 否则, 继续等待并接收来自邻近节点发来的消息, 直到分簇完成.

考虑到 WSN 中节点与基站直接通信的能耗和其先将数据发送到簇头再转发到基站的能耗相近, 则让这些节点与基站直接通信不仅可以减少在数据转发中产生的额外负载, 也减少了靠近基站的簇头的簇成员数量, 从而可以为数据转发预

留更多的能量.因此该算法拟让能与基站通信的节点直接与基站进行通信,其他节点则按照以上方法入簇,分簇完成后,按照 ETBG 算法形成簇树.

1.3 特例说明

特例:假设在一个 100 m × 100 m 的区域内随机抛洒 50 个传感器节点,采用参考文献[3]所示能量模型,最大通信半径  $R = 30$  m,梯度层数  $L = 3$ ,第一层梯度的跨度  $a_1 = 20$  m.

图 3 为算法改进前后的分簇对比图.由图 3(b)和图 3(a)可以看出:图 3(b)中产生的簇头兼顾剩余能量的同时,更接近所在梯度的中心,且更靠近簇的质心位置.

由图 3(c)和图 3(b)可以看出:图 3(c)中的灰色节点 14,23,30,27,8,35,47,49,3,40,6,42,29,21 按照优化的规则选择了加入梯度较大、剩余能量更多的簇头节点,而白色节点依然保留在原来的簇中.例如:节点 39 只收到簇头 9 发来的簇头消息,则依然保留在原来的簇中;节点 35 收到两个簇头 46,48 发来的簇头消息,选择梯度更

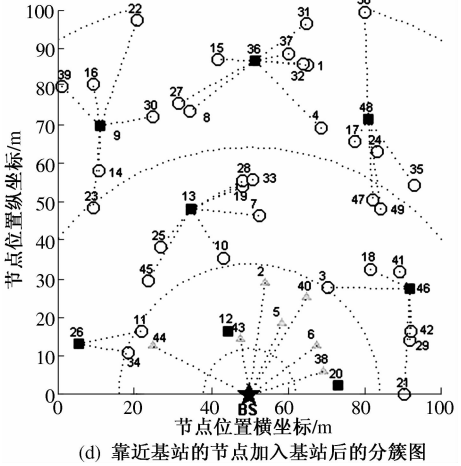
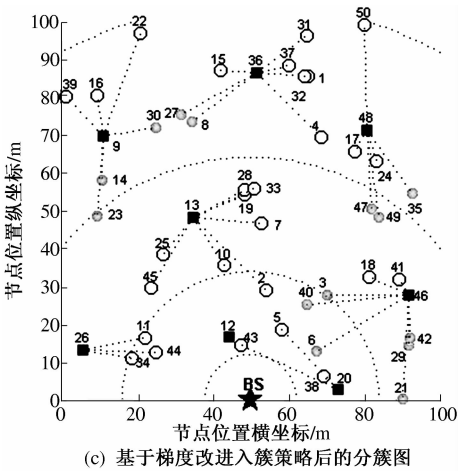
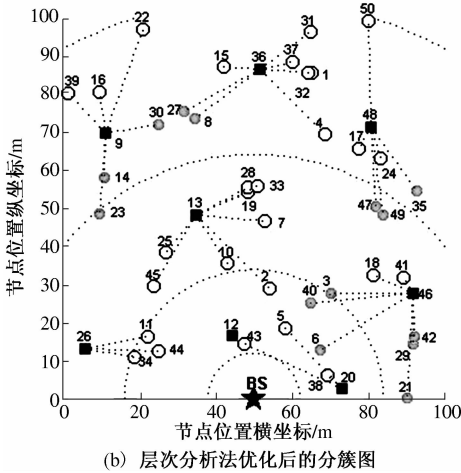
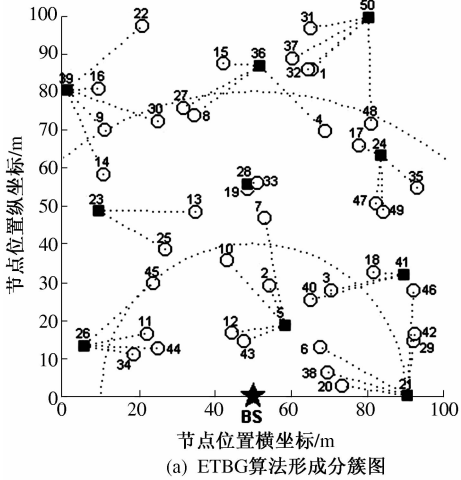


图 3 算法改进前后的分簇对比图

Fig.3 Comparison chart of before and after algorithm optimization

高的 48 作为自己的簇头;节点 8 收到 3 个簇头 9,13,36 发来的簇头消息,其中 13 的梯度比自己低,而 9,36 和自己同一梯度,因此选择剩余能量更多的 36 作为自己的簇头.

图 3(d)和图 3(c)还可以看出:图 3(d)中的三角形节点 44,43,2,5,40,6,38 按照优化的规则直接与基站进行通信.

2 性能分析

2.1 梯度层数对生存期的影响

设定簇头轮换频率为 1 500 轮/次,通信半径为 30 m,所有仿真结果都是模拟 10 次的均值,图 4 为梯度层数  $L$  的变化对网络生存期的影响.

从图 4 可以看出:两种算法的生存期都在  $L = 2$  时最短及  $L = 3$  时最长;随着  $L$  值继续增大,生存期慢慢变短,曲线成山峰型.这是因为当  $L$  值较小即梯度层数较少时,最外层的簇首的成员过多,簇内通信能耗增大,节点过早死亡;而当  $L$  值



较大即梯度层数较多时,各层跨度变窄,非均匀程度降低,簇间路由增多,导致靠近基站的簇头容易过早死亡。

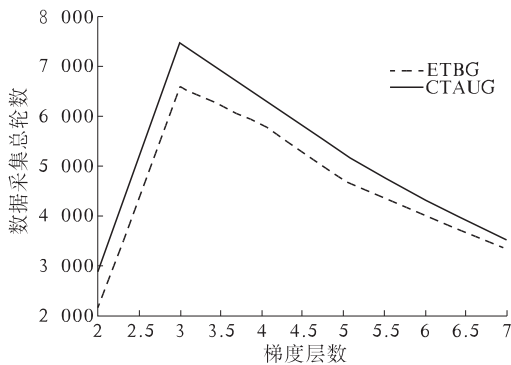


图4 不同梯度的生存期对比图

Fig.4 Lifetime versus layers of gradient

## 2.2 簇首消耗的能量之和

簇头轮换频率设定为 1 500 轮/次,梯度层数  $L=3$ ,节点个数分别为 20, 40, ..., 180, 200, 从实验中随机选取 10 轮,统计各轮中所有簇头消耗的能量,结果如图 5 所示。

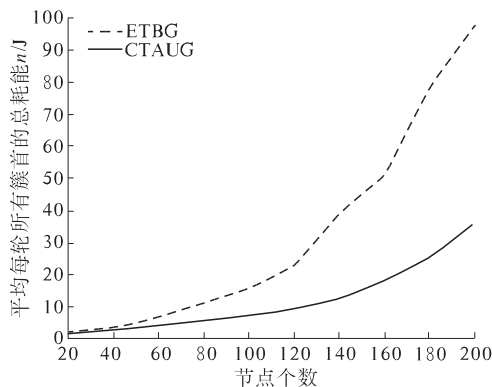


图5 不同节点个数时每轮所有簇首消耗能量对比图

Fig.5 Average energy dissipation versus nodes' number

从图 5 可以看出,随着区域内节点个数的增加,节点也越来越密集,相应的簇头的任务也更加繁重,簇首所消耗的总能量随之快速增加。但在 CTAUG 算法中由于靠近基站的节点直接与基站通信,其余节点优先加入梯度等级较高、剩余能量较大的簇头所在的簇中,因此 CTAUG 算法中每轮所有簇头的能耗仍大大低于 ETBG 算法中每轮所有簇头的能耗。

## 3 结论

通过研究 ETBG 算法中存在的“热区”问题,提出了一种基于非均匀梯度的分簇拓扑结构算法 CTAUG。该算法综合考虑节点剩余能量、邻居节

点个数、到邻居节点之间距离的平均值和到梯度中心线的距离等因素构造综合权值,且用层次分析法来确定各个因素的权系数,使生成的簇头分布更加合理。另外,该算法划分了非均匀梯度,使靠近基站的节点直接与基站通信,其余节点则优先加入梯度较大、剩余能量较多的簇头所在的簇中,有效解决“能量空洞”问题,延长了网络的生存期,适用于大规模的网络。

## 参考文献:

- [1] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor network [J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325 - 349.
- [2] JAMAL N A, AHMED E K. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Wireless Communication, 2004, 11(6): 6 - 28.
- [3] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor network [J]. Wireless Communication, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [4] MANJESHWAR A, AGRAWAL D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]//IEEE Conference Proceedings on Parallel and Distributed Processing. San Francisco CA, USA: IEEE Press, 2001: 2009 - 2015.
- [5] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems [C]//IEEE Conference Proceedings on Aerospace. Los Angeles, CA, USA: IEEE Press, 2002: 1125 - 1130.
- [6] AN Na, YAN Xin-fang, ZHU Yu-fang, et al. A virtual backbone network algorithm based on the multilevel cluster tree with gateway for wireless sensor networks [C]//The IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Sensor Networks. Shanghai, China: IET Press, 2007: 462 - 465.
- [7] 阎新芳, 段磊, 李腾. 无线传感网中基于梯度的拓扑控制算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(2): 95 - 98.
- [8] 阎新芳, 王志龙, 闫新生, 等. WSN 中基于梯度场拓扑控制算法的维护更新 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30(8): 56 - 58.
- [9] SAATY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 180 - 230.
- [10] KWANG E Y, YOUN C C. Analytic hierarchy process approach for identifying relative importance of factors to improve passenger security checks at airports [J]. Air Transport Management, 2006, 12(3): 135 - 142.

## A Clustering Topology Algorithm Based on Uneven Gradient in WSN

YAN Xin-fang<sup>1</sup>, ZHANG Yong-kun<sup>1</sup>, LI Teng<sup>2</sup>, WANG Xiao-xiao<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

**Abstract:** After a study of the classical clustering algorithms such as ETBG, a clustering topology algorithm Based on Uneven Gradient in WSN was proposed. This algorithm not only uses analytical hierarchy Process to determine the coefficient of each factor, but also improves cluster members choice strategy based on the idea of uneven gradient, thus the cluster heads closer to the base station can preserve some energy for the inter-cluster data forwarding. Simulation experiments demonstrate that this algorithm provides an efficient solution to cope with the energy hole problem and prolongs entire network lifetime.

**Key words:** wireless sensor network; analytical hierarchy process; coefficient; uneven gradient

(上接第 46 页)

## Bit Error Rate Analyze of Multiple-Access M-ary FM-DCSK

LIU Ping, LI Ning, XING Jun-yang

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Multiple-Access Frequency Modulated Differential Chaos Shift Keying (MAFM-DCSK) has been studied for a long time; the features of aperiodic, broadband and unpredictable of MAFM-DCSK are particularly suitable for multiple-access communication systems. But the transmission efficiency of traditional binary MAFM-DCSK is very low. In this paper, we propose a Multiple-Access M-ary FM-DCSK communication system which can improve the transmission efficiency significantly. This paper introduces the principle of Multiple-Access M-ary FM-DCSK communication system and gives the Bit Error Rate (BER) formula. Through the simulation, we can conclude that the BER formula coincide with the theoretical analysis. So the Multiple-Access M-ary FM-DCSK communication system has the actual value of application.

**Key words:** multiple-access; M-ary; FM-DCSK; BER

文章编号:1671-6833(2014)06-0052-04

# 基于喷泉码的数字图像水印的研究

张卫党, 李方圆, 陈美玲

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了提高数字图像水印信息传输过程中的鲁棒性, 这里提出一种基于喷泉码的数字水印算法, 该方案利用喷泉码在删除信道中的优异性能, 将信道编码与扩频水印结合后在图像中嵌入水印信息. 然后对这种方案在水印系统中的鲁棒性进行了一系列仿真测试, 并与未编码方案及水印系统中常用到的 LDPC 编码方案作了比较. 仿真证明, 应用该方案可以提高数字水印系统的鲁棒性, 降低水印信息在传输过程中的误码率, 而且水印编码复杂度要远远低于 LDPC 方案.

**关键词:** 数字水印; 喷泉码; 鲁棒性

**中图分类号:** TP309.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.013

## 0 引言

数字水印技术目前已成为多媒体信息安全研究领域发展最快的热点技术之一. 数字水印算法主要分为空间域和变换域两大类<sup>[1]</sup>. 空间域算法实现简单, 能满足水印的不可见性要求, 但其鲁棒性较差; 相比于空间域水印算法, 变换域算法对常见图像处理和压缩更有鲁棒性, 但缺点是水印嵌入量较小, 计算复杂. 数字水印系统与通信系统之间存在着相似性, 为了进一步提高水印信息在传输过程中的抗干扰能力, 增强其鲁棒性, 很多研究者将信道编码技术引入到数字水印系统中作为水印信息的预编码, 并和一些成熟的水印算法结合, 取得了不错效果. 文献[2]将线性分组码引入到水印系统中取得了一定的效果; 文献[3]中将 CDMA 扩频水印与 Turbo 码结合在 DCT 和 DWT 混合变换域中嵌入水印提高了水印的安全性和鲁棒性; 文献[4]利用 LDPC 码的纠错性能和人眼视觉特性实现了图像的水印嵌入和提取.

Michael Luby 在 1998 年提出了用于删除信道的喷泉码 (fountain code) 的概念, 并于 2002 年提出了第一种实用的喷泉码——LT 码<sup>[5]</sup>. LT 码是一种性能很好的纠删码, 其编码速率动态可变, 适用于删除概率未知的信道, 因其编译码方法简单且复杂度低, 故具有很好的应用前景<sup>[6]</sup>.

笔者基于以上考虑, 将文献[7]中用到的基于双伪随机序列的扩频水印与 LT 编码相结合提

出一种新的数字水印算法. 该算法以变换域中 DCT 变换为基础, 结合符合人眼视觉特性的 HVS 视觉模型<sup>[8]</sup>, 利用 LT 码良好的纠删性能, 在水印检测过程中将不能正常判定的信息删除, 利用能判定出的信息恢复出水印. 笔者研究了该方案在水印传输过程中的鲁棒性, 并与水印系统中纠错性能很好的 LDPC 码的性能作了对比分析.

## 1 水印的生成算法

本文的水印生成算法将基于双伪随机序列扩频水印与 LT 编码结合来产生待嵌入的水印信息, 原始水印可采用一副二值图像以减少待嵌入信息的数据量. 水印图像首先转换成一维二进制序列  $\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_k]^T$ , 然后进行 LT 编码. 具体 LT 码的编译码方案及 LT 码的性能参考文献[9]和[10]. 设定 LT 编码后的信息长度为  $N$ , 并构造出生成矩阵  $\mathbf{G}$ , 得到编码后的信息序列. 设编码后信息为单极性二值序列, 即

$$\mathbf{m}' = \{m'_i \mid m'_i \in \{0, 1\}, 0 \leq i \leq N-1\}. \quad (1)$$

然后采用基于双伪随机序列的扩频方法生成扩频水印, 设要生成待嵌入的水印序列长度为  $N \cdot R$ . 首先由密钥  $S$  产生两个长度为  $R$  的独立二值伪随机序列如下:

$$\begin{cases} \mathbf{p}_0 = \{p_{0j} \mid p_{0j} \in \{1, -1\}, 0 \leq j \leq R-1\}; \\ \mathbf{p}_1 = \{p_{1j} \mid p_{1j} \in \{1, -1\}, 0 \leq j \leq R-1\}. \end{cases} \quad (2)$$

最终生成的待嵌入的水印序列可描述如下:

收稿日期:2014-06-07; 修订日期:2014-09-09

基金项目:国家自然科学基金委员会-中国民用航空总局联合研究基金项目(U1204607)

作者简介:张卫党(1958-), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事信道编码研究, E-mail:iewdzhang@zzu.edu.cn.

$$\mathbf{w} = \left\{ w_k \mid w_k = \begin{cases} p_{0j}, m_i = 0 \\ p_{1j}, m_i = 1 \end{cases} \right\}, \quad (3)$$

其中,  $i = \left\lceil \frac{k}{R} \right\rceil, j = k \bmod(R), 0 \leq k \leq N \cdot R - 1$ .

2 水印的嵌入算法

水印的嵌入算法采用基于 DCT 域 HVS 视觉模型,为平衡不可见性与抗攻击性,将图像进行  $8 \times 8$  分块后选择在子块 DCT 域的中频区域嵌入水印,这里修改待嵌入子块的 22 个中频系数来嵌入水印. 水印嵌入算法采用加法规则,如式(4)表示

$$I_w(x, y) = I(x, y) + \alpha \cdot w(x, y). \quad (4)$$

式中: $\alpha$  为嵌入强度; $I(x, y)$ 、 $I_w(x, y)$  分别为图像嵌入水印前后的 DCT 系数; $w(x, y)$  为由密钥  $S$  生成的伪随机序列扩频而得的待嵌入序列. 这样就可把待嵌入的信息嵌入到图像的指定位置.

3 水印的提取

对待测图像进行水印提取时,首先对待测图像进行  $8 \times 8$  分块 DCT 变换,取出每个子块的 22 个中频系数,通过密钥  $S$  生成与嵌入时相同的两组独立的伪随机序列  $p_1$  和  $p_0$ ,计算伪随机序列与提取出的子块的中频系数的相关值. 相关值的计算式子如(5)所示,  $I'_w(i)$  为第  $i$  块提取出的 22 个中频系数,其中  $\overline{I'_w(i)}, \overline{p_1}, \overline{p_0}$  分别为  $I'_w(i), p_1, p_0$  的均值.

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_1(i) &= \frac{\sum_{j=1}^{22} (I'_w(i, j) - \overline{I'_w(i)}) (p_1(j) - \overline{p_1})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{22} (I'_w(i, j) - \overline{I'_w(i)})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{22} (p_1(j) - \overline{p_1})^2}}; \\ \delta_0(i) &= \frac{\sum_{j=1}^{22} (I'_w(i, j) - \overline{I'_w(i)}) (p_0(j) - \overline{p_0})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{22} (I'_w(i, j) - \overline{I'_w(i)})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{22} (p_0(j) - \overline{p_0})^2}}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

相关值反映了提取出的中频系数与嵌入的信息的相关程度,它的取值在  $[-1, +1]$  之间,如果该值超过某一阈值,就可以判定图像中该子块含有水印信息. 此处设定两个阈值  $z_1$  和  $z_0$ ,提取公式如下:

$$\begin{cases} \text{if } \delta_1(i) > \delta_0(i) \text{ and } |\delta_1(i)| > z_1, w'(i) = 1; \\ \text{if } \delta_0(i) > \delta_1(i) \text{ and } |\delta_0(i)| > z_0, w'(i) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

否则,视为该处未提取出水印信息,并把 LT 编码的生成矩阵  $G$  中的相应列删除. 阈值的设定由实验得出. 本文中取  $z_1 = \overline{|\delta_1|}, z_0 = \overline{|\delta_0|}, \overline{|\delta_1|}, \overline{|\delta_0|}$  分别为  $N$  个子块中的中频系数与  $p_1, p_0$  相关值的绝对值的平均值. 由提取出的信息及更新过

的生成矩阵  $G$  进行 LT 译码即可恢复出水印序列  $m''$ .

4 所提方案性能分析

仿真测试中,原始载体图像采用  $512 \times 512$  的 lena 灰度图像,水印采用  $32 \times 32$  的二值图像. 图 1 为原始载体图像和 LT 编码方案的含水印图像;图 2 为二值水印图像.



(a) Lena 原始图像 (b) 含水印图像  
图 1 lena 原始载体图像和含水印图像  
Fig. 1 Original image and watermarked image

copy

图 2 二值图像水印

Fig. 2 Watermark

因嵌入强度大小与水印的抗攻击性有关,嵌入强度越小抗攻击性越差,反之,不可见性又会受到影响. 为了平衡抗攻击性和不可见性的关系,实验采用的嵌入强度  $\alpha = 15$ ,图 1(b) 的峰值信噪比 (PSNR) 为 31.99 dB. 本实验中原始载体图像可划分为 4 096 个  $8 \times 8$  的子块,3 种方案均采用双伪随机序列扩频方法, LDPC 编码方案采用码率为 1/4, LLR BP 译码算法且最大迭代次数为 100 次的非规则 LDPC 码,其校验矩阵的列重为 3,行重不固定. LT 编码方案和 LDPC 编码方案均将原始水印编码成 4 096 bit 待嵌入信息嵌入到载体图像的每一块中,未编码方案的水印信息嵌入到原始图像方差最高的前 1 024 块. 表 1 是 3 种方案在未攻击情况下提取出的水印图像及误码率 (BER).

表 1 未攻击情况下提取出的水印图像及 BER

Tab. 1 The BER and recovered watermark under no attack

方案	图像水印	BER/%
未编码	copy	0.781 3
LDPC 编码	copy	0.488 3
LT 编码	copy	0

4.1 抗 JPEG 压缩性能

图 3 为 JPEG 压缩品质因数  $Q$  与提取出来的水印误码率之间的关系图. 图像压缩  $Q$  的取值为  $0 \sim 100$ ,  $Q$  值越大表明压缩越少,图像质量越高.

由图 3 可以看出,当  $Q$  值大于 40 时,应用 LT 编码方案能够无差错地将水印信息提取出来,性

能优于未编码及 LDPC 编码方案;当  $Q = 30$  时,LT 编码方案性能低于 LDPC 方案,这是由于当  $Q$  过低时,图像出现严重失真,水印检测过程中能正确提取出来的信息不足以让 LT 码进行完全译码,所以使恢复出的水印的误码率变大.

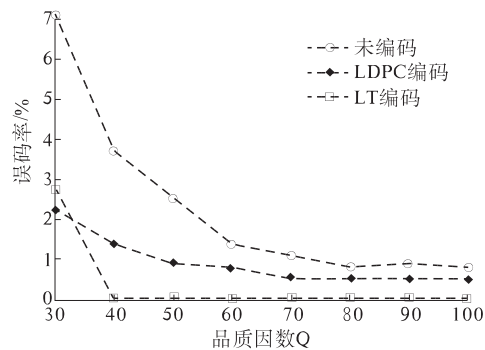


图 3 JPEG 压缩下的 BER 性能  
Fig.3 The BER under JPEG attack

4.2 抗剪切性能

表 2 中给出了不同剪切比例下 3 种方案的抗剪切性能.其剪切位置为含水印图像的左上角.可

表 2 不同剪切比例下提取出的水印及 BER  
Tab.2 The BER and recovered watermark caused by crop attack

方案	剪切比 25%		剪切比 50%		剪切比 65%	
	水印	BER/%	水印	BER/%	水印	BER/%
未编码		13.671 9		41.406 3		55.273 4
LDPC 编码		0.488 3		0.488 3		12.402 3
LT 编码		0		0		0

表 3 中值滤波提取的水印及 BER  
Tab.3 The BER and recovered watermark caused by Median filtering attack

方案	窗宽 1		窗宽 2		窗宽 3	
	水印	BER/%	水印	BER/%	水印	BER/%
未编码		0.781 3		12.402 3		16.015 6
LDPC 编码		0.488 3		8.496 1		5.273 4
LT 编码		0		0		1.562 5

4.4 抗噪性能

在含水印图像中加入不同类型的噪声干扰会引起水印的部分丢失.为了验证本文所提方案对噪声攻击下的鲁棒性,实验采用方差为 0.005 和 0.5 的高斯白噪声和密度为 0.01 和 0.1 的椒盐噪声分别对含水印图像进行攻击,表 4 中为两种类型的噪声攻击下提取出的水印信息的 BER,其中高斯白噪声攻击实验的 BER 是进行了 100 次的平均值.

从表 4 可以看出,对于高斯噪声攻击,当噪声方差小时 LT 编码方案的 BER 低于未编码方案;

以看出,加入信道编码后的方案要比未编码时的抗剪切性好的多.因为 LT 码在删除信道中的性能优异,在剪切攻击中,被剪切掉的子块中含有的水印信息提取不出来而被删除,而剩余的子块中则可以正确提取出嵌入的信息,只要提取出来的信息个数能够使 LT 码译码成功就可以无失真恢复出水印图像.在 LT 编码方案中,若要译码成功,就必须提取出足够的信息使其进行译码,也就是说如果剪切比例太大,提取不出足够的信息进行 LT 译码,就会使 BER 急剧增加,例如,本实验中若剪切比例为 70%,经验证,此时提取出的水印信息的误码率为 71.191 4%.

4.3 抗中值滤波性能

对图像进行中值滤波是用来减少高频噪声,而往图像中添加水印相当于引入噪声,故含水印图像在中值滤波后会产生失真.含水印图像经过不同窗宽的中值滤波后提取水印的 BER 如表 3 所示.由表 3 可以看出,在抵抗中值滤波攻击中,LT 编码方案的误码率更低,所体现的性能更佳.

而当噪声方差较大时,LT 编码方案的 BER 甚至高于未编码方案,这是由于在噪声方差过大时,图像污染严重,在水印信息检测时,LT 编码方案提取出了大量错误信息,再进行译码时因其不具备纠错功能,故使恢复出的水印的误码率增大.

对于椒盐噪声,由表 4 可知,在噪声密度较小时,LT 编码方案中可以将加噪的子块完全区别出来,故可以完全恢复出水印图像,优于另外两种方案.而当噪声密度过大时,误码率升高的很快.因此,LT 编码方案对弱噪声攻击有一定的抵抗性,其在强噪声攻击下的性能还有待提高.

表 4 高斯噪声椒盐噪声引起的 BER  
Tab.4 The BER caused by Gaussian noise  
or pepper and salt noise %

方案	高斯噪声		椒盐噪声	
	0.005	0.5	0.01	0.1
未编码	5.631	11.020	2.343 8	16.210 9
LDPC 编码	3.828	16.370	2.050 8	15.625 0
LT 编码	3.830	21.990	0	25.000 0

笔者还对 3 种方案的水印嵌入时间作了一个对比,水印嵌入实验均仿真 100 次,取 100 次嵌入时间的平均值,未编码、LDPC 编码和 LT 编码方案下平均水印嵌入时间分别为 1.69 s、334.4 s 和 121.8 s. 加 LDPC 编码方案的水印嵌入时间要远远大于未编码方案,而加 LT 编码方案水印嵌入时间虽然也较未编码方案长,但比 LDPC 编码方案要短很多. 由于 LT 编码方案对水印信息鲁棒性的提高有很好的效果,综合考虑认为该方案是可行的算法.

5 结束语

利用双伪随机序列扩频水印方法将 LT 码引入到了数字水印系统中,对数字水印中常见攻击下的鲁棒性有了较好的改善,因其编译码复杂度比 LDPC 码简单的多,故在数字水印系统中 LT 方案比 LDPC 方案实现起来简单. 为了进一步更好地改善抗攻击性,今后可将 LT 码与传统的纠错码结合,尽可能降低水印信息在传输过程中的误码率,更好地提高数字水印系统的鲁棒性.

参考文献:

[1] 尹浩,林闯,邱锋等. 数字水印技术综述[J]. 计算机

研究与发展,2005,42(7):1093 – 1099.

[2] CHEN Yong-cong, CHANG Long-wen. A secure and robust digital watermarking technique by the block cipher RC6 and secure hash algorithm[C]//Proceedings of 2001 IEEE, International conference on Image Processing. Thessaloniki, Greece; IEEE Rress, 2001: 518 – 521.

[3] 许文丽,李磊,王育民. 抗噪声、几何失真和 JPEG 压缩攻击的鲁棒数字水印方案[J]. 电子与信息学报, 2008,30(4):933 – 936.

[4] 霍智勇,朱秀昌. 基于 LDPC 码的数字图像水印技术研究[J]. 中国图像图形学报,2007,12(11): 2018 – 2025.

[5] MICHAEL L. LT Codes [C]// Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on the Foundations of Computer Science. Vancouver B C, Canada; IEEE Press, 2002:271 – 280.

[6] 慕建君,焦晓鹏. 数字喷泉码及其应用的研究进展与展望[J]. 电子学报,2009,37(7):1571 – 1577.

[7] MORA-JIMENEZ I, NAVIA-VAZQUEZ A. A new spread spectrum watermarking method with self-synchronization capabilities[C]//Proceedings of 2000 IEEE, International Conference on Image Processing. Vancouver BC, Canada; IEEE Press, 2000:415 – 418.

[8] 易开祥. 数字图像加密与数字水印技术研究[D]. 杭州:浙江大学信息工程学院,2001.

[9] DAVID J C M. Fountain codes[J]. IEEE Communications Proceedings,2005,152(6):1062 – 1068.

[10] SHOKROLLAHI A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551 – 2567.

Study of Digital Image Watermarking Based on Fountain Code

ZHANG Wei-dang, LI Fang-yuan, CHEN Mei-ling

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This paper presents a new algorithm based on fountain code to improve robustness of the watermark in digital image watermarking system. Employing the outstanding performance of LT codes in erasure channel, the proposed scheme combines channel coding with spread spectrum watermarking to recover watermark. In the end, this paper makes a series of tests with fountain coding scheme and LDPC coding scheme and non coding scheme, the result shows the scheme proposed in this paper can raise robustness of the digital watermarking system, lower the bit error rate (BER) between watermark and recovered watermark effectively. In addition, fountain coding scheme has lower complexity compared with LDPC coding scheme.

**Key words:** digital image watermark; fountain code; robustness



# 基于条纹丢失补偿的自混合干涉位移测量算法

叶会英, 朱君瑶, 王珍雪

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 自混合干涉位移传感测试系统在高反馈水平因子条件下会出现条纹丢失现象, 若不加以补偿则将降低位移测量精度. 基于 Lang-Kobayashi 方程, 研究外部物体做周期运动时在高反馈水平因子条件下自混合干涉条纹丢失现象, 得出反馈水平因子  $C$  和半个周期内条纹丢失数目  $m$  之间的规律为:  $C < 4.6, m = 0$ ;  $4.6 \leq C < 4.8, m = 1$ ;  $4.8 \leq C < 7.9, m = 2$ ; 并设计基于条纹丢失补偿的自混合干涉位移测量算法, 以提高位移测量精度.

**关键词:** 位移测量; Lang-Kobayashi 方程; 高反馈水平因子; 条纹丢失补偿

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.014

## 0 引言

光反馈自混合干涉 (OFSMI) (即自混合干涉) 是指激光器输出光经外部反射体反射或散射后, 其中一部分光又反馈回激光器谐振腔, 反馈光与腔内光相混合, 从而调制激光器输出光<sup>[1]</sup>. 由于 OFSMI 信号携带了外部反射体和激光器自身参数的信息, 并且系统装置简单, 所以近年来很多学者应用光反馈自混合干涉系统对物体位移<sup>[2-4]</sup>、距离<sup>[5]</sup>、速度<sup>[6]</sup>、加速度<sup>[7]</sup>及激光器自身参数<sup>[8]</sup>等的测量进行深入研究.

笔者基于 Lang-Kobayashi 方程建立的 OFSMI 数学模型<sup>[9]</sup>:

$$\varphi_f(\tau) = \varphi_0(\tau) - C \cdot \sin[\varphi_f(\tau) + \arctan \alpha]. \quad (1)$$

$$P(\varphi_f(\tau)) = P_0[1 + mG(\varphi_f(\tau))]. \quad (2)$$

$$G(\varphi_f(\tau)) = \cos(\varphi_f(\tau)). \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  是半导体激光器线宽展宽因数;  $\varphi_0(\tau) = \omega_0\tau$ ,  $\varphi_f(\tau) = \omega_f\tau$ ;  $\omega_f(\tau)$ 、 $\omega_0(\tau)$  分别是有光反馈和无反馈时激光的角频率;  $\varphi_f(\tau)$ 、 $\varphi_0(\tau)$  分别为有光反馈和无光反馈时的激光器外腔相位;  $\tau = 2L/c$ ,  $L$  是外腔长度,  $c$  是光速;  $C$  是光反馈水平因子;  $P(\varphi_f(\tau))$  和  $P_0$  分别是有光反馈和无光反馈时半导体激光器的输出功率;  $m$  为调制系数 (典型值为  $m \approx 10^{-3}$ );  $G(\varphi_f(\tau))$  是干涉函数, 它体现了外腔光相位对激光输出功率的影响.

$C$  是模型中的重要参数, 当  $C < 1$  时, 光反馈水平较弱, 为弱光反馈; 当  $1 < C < 4.6$  时, 为适度光反馈; 在弱光反馈和适度光反馈的情况下不会出现条纹丢失现象, 此时可利用条纹计数法来测量物体的位移; 当  $C > 4.6$  时, 为强光反馈, 此时会出现条纹丢失现象<sup>[10]</sup>. 本文研究  $C > 4.6$  条件下的条纹丢失规律, 并进行条纹丢失补偿算法的研究, 提高测量的精度.

## 1 条纹丢失规律

通过对高反馈水平因子条件下的自混合干涉信号进行行为分析<sup>[11]</sup>, 发现当  $C < 1$  时,  $\varphi_0$  和  $\varphi_f$  成一一对应的关系, 此时 OFSMI 信号为正弦波信号, 和传统干涉条纹一致; 当  $1 < C < 4.6$  时,  $\varphi_0$  和  $\varphi_f$  之间的关系变得比较复杂, 一个  $\varphi_0$  对应着 3 到 5 个  $\varphi_f$ , 此时 OFSMI 信号为锯齿波信号; 当  $C > 4.6$  时, 一个  $\varphi_0$  对应 5 个甚至更多  $\varphi_f$ , 如图 1 所示, 此时, OFSMI 信号会出现条纹丢失现象.

设外部物体做正弦波运动, 研究高反馈水平因子条件下的自混合干涉条纹丢失规律的步骤:

第一步, 选取  $\varphi_f = 19$ , 即外腔的移动位移为一个定值, 然后分别令  $C = 4, 4.7, 4.8, 5, 6, 7.9, 8, 9$ , 所对应的 OFSMI 信号如图 2 所示. 从图 2 中可以得出, 对于确定的  $\varphi_f$  值,  $\varphi_f = 19$ , 在半个周期内条纹的数目  $N$  随  $C$  值的变化情况: 当  $C < 4.8$

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60871031)

作者简介: 叶会英 (1966-), 河南开封人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事光电测试技术及信号处理等方面的研究, E-mail: iehyye@zzu.edu.com.

时,  $N=6$ ; 当  $4.8 \leq C < 5$  时,  $N=5$ ; 当  $5 \leq C < 7.9$  时,  $N=4$ ; 当  $7.9 \leq C < 9$  时,  $N=3$ .

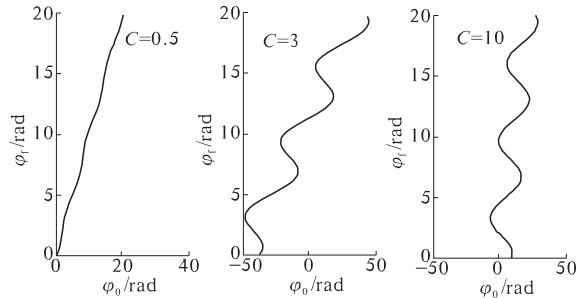


图 1 当  $C=0.5, 3, 10$  时,  $\varphi_f$  与  $\varphi_0$  的关系

Fig. 1 Relationship between  $\varphi_f$  and  $\varphi_0$  where  $C=0.5, 3, 10$

第二步, 改变  $\varphi_f$  的值, 取  $\varphi_f=25$ , 按照上述的方法, 令  $C=4, 4.7, 4.8, 5, 6, 7.9, 8, 9$ , 所对应的 OFSMI 信号如图 3 所示. 从图 3 可以得出, 当  $C < 4.6$  时,  $N=8$ ; 当  $4.6 \leq C < 4.8$  时,  $N=7$ ; 当  $4.8 \leq C < 7.9$  时,  $N=6$ ; 当  $7.9 \leq C < 9$  时,  $N=3$ .

在实验中, 物体位移最大约  $10 \mu\text{m}$ , 对应的外腔相位变化最大约  $160 \text{ rad}$ , 所以在  $\varphi_f$  为  $(0, 160)$  的范围内, 随机取 100 个值, 按照上述的方法研究在半个周期内, 条纹丢失数目  $m$  随着  $C$  的变化规律为:  $C < 4.6, m=0$ ;  $4.6 \leq C < 4.8, m=1$ ;  $4.8 \leq C < 7.9, m=2$ .

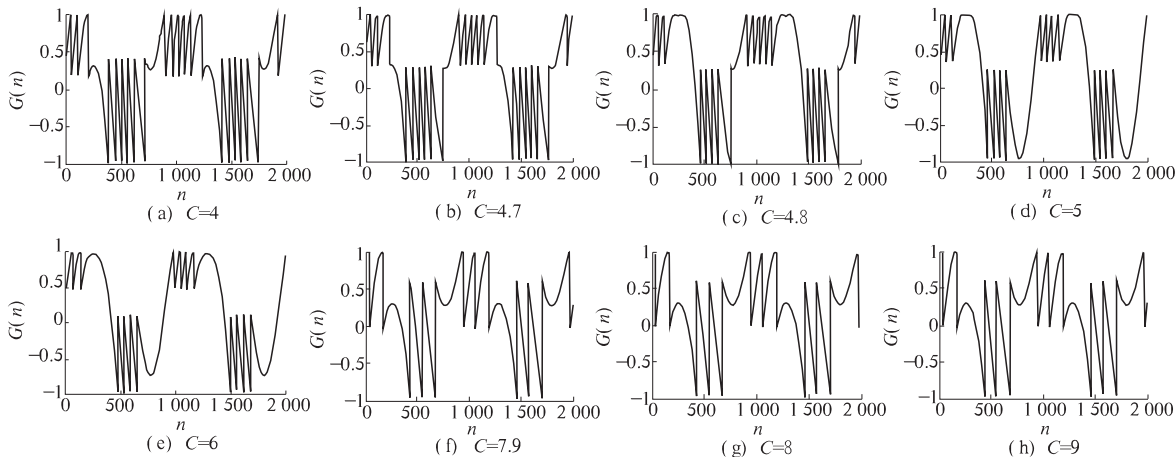


图 2  $\varphi_f=19$  时  $C$  取不同值对应的 OFSMI 信号

Fig. 2 Simulated OFSMI signals with different  $C$  values corresponding to  $\varphi_f=19$

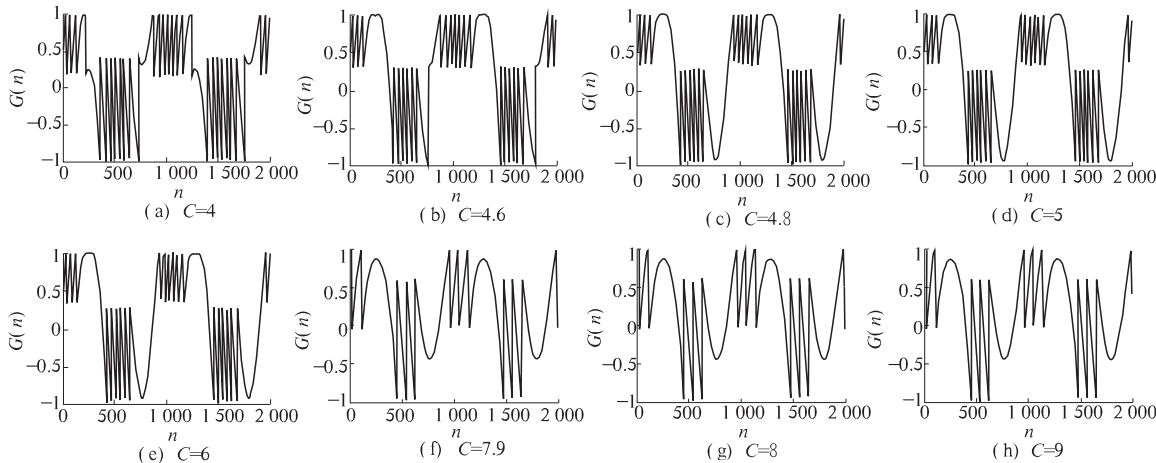


图 3  $\varphi_f=25$  时  $C$  取不同值对应的 OFSMI 信号

Fig. 3 Simulated OFSMI signals with different  $C$  values corresponding to  $\varphi_f=25$

## 2 位移重构

光反馈自混合干涉的基本规律是: 当  $\varphi_f(\tau)$  有  $2\pi$  相位的变化 (即外腔移动半个光波波长  $\lambda_0/2$ ) 时, 则  $G(\tau)$  产生一个周期波动的信号, 称之为一个整数条纹; 小于  $2\pi$  相位的  $\varphi_f(\tau)$  的变化, 所

产生的  $G(\tau)$  变化量, 称之为小数条纹. 因此把  $\varphi_f(\tau)$  的变化  $\Delta\varphi_f(\tau)$  分为两部分, 记做:  $\Delta\varphi_f(\tau) = A_I + A_D$ . 其中,  $A_I$  为整数干涉条纹所对应的相位,  $A_I = 2N\pi$ ,  $N$  为整数条纹的个数;  $A_D$  为小数条纹所对应的相位. 物体位移  $D(t)$  与外腔相位变化量  $\Delta\varphi_f(\tau)$  之间的关系为<sup>[12]</sup>

$$D(t) = \Delta\varphi_f(\tau) \times \lambda_0/(4\pi).$$
 (4)

利用锯齿段的最小二乘线性拟合,可得出小数条纹 $G(A_D)$ 表达式为<sup>[13]</sup>

$$G(A_D) = -0.95 + 0.39A_D.$$
 (5)

由实验的自混合干涉信号测得  $G(n_A)$  和  $G(n_B)$  如图 4 所示.

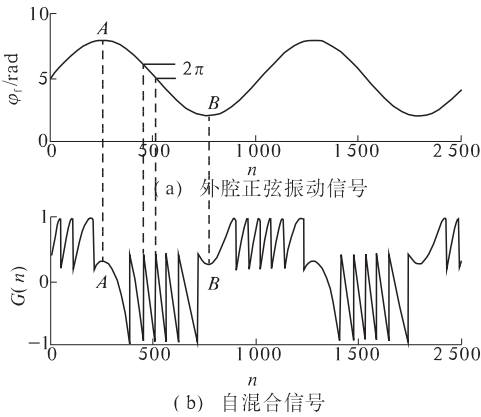


图 4 外腔正弦振动信号及其对应的自混合信号  
Fig. 4 Sinusoidal displacement of an external object OFSMI signal

把  $G(n_A)$  和  $G(n_B)$  代入  $G(A_D)$ , 可计算出相应的小数相位, 分别记做  $A_{DA}$  和  $A_{DB}$ , 则一个小数条纹所对应的相位为  $(A_{DA} + A_{DB})/2$ .

在适度光反馈及强光反馈下, 利用条纹计数法测量物体位移时, 把得到的 OFSMI 信号进行微分处理, 得到正负脉冲信号  $D(n)$ , 如图 5 所示. 图中正脉冲表示物体沿正方向移动, 负脉冲表示物体沿反方向移动. 在没有考虑条纹丢失情况时, 位移算法的流程图为图 6<sup>[14]</sup>.

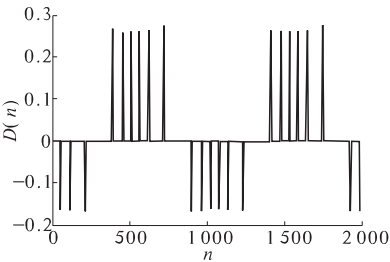


图 5 OFSMI 信号进行微分得到的正负脉冲信号  
Fig. 5 Differential signal of the OFSMI signal

用  $s(n)$  表示检测到的脉冲信号的正负,  $n$  表示检测到的脉冲数目,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . 当  $s(n) = 1$ , 表示检测到的第  $n$  个条纹是正脉冲;  $s(n) = -1$ , 表示检测到的第  $n$  个条纹为负脉冲.

对正负脉冲信号进行检测, 当  $s(n)$  等于  $s(n-1)$ , 表示脉冲的方向没有发生改变, 此时用  $s(n) * 2\pi$  表示, 输入到累加模块中; 当  $s(n)$  不等

于  $s(n-1)$ , 表示脉冲的方向发生改变, 则表示为  $s(n) * [2\pi + (A_{DA} + A_{DB})/2]$ ,  $(A_{DA} + A_{DB})/2$  表示一个小数条纹代表的相位, 输入到累加模块中, 把累加模块中的数据求和, 然后乘上  $\lambda_0/(4\pi)$  得到物体的移动位移  $D(t)$ .

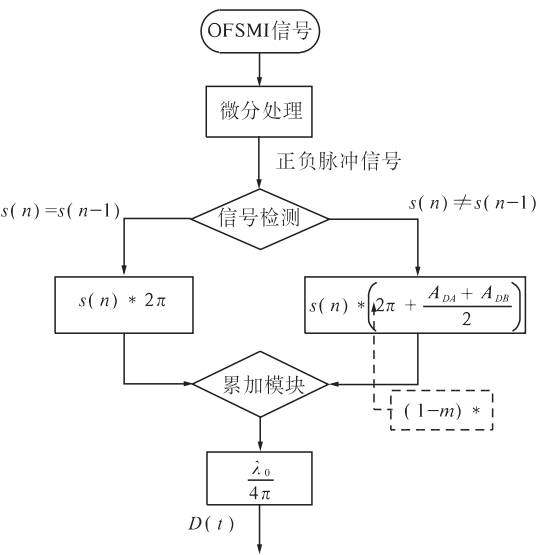


图 6 未考虑条纹丢失的位移算法  
Fig. 6 The displacement algorithm without considering the fringe-loss

为提高条纹计数法测位移的精度, 则需考虑条纹丢失并进行条纹丢失补偿, 重构位移算法的模式加入虚框图中的系数.

当检测到的  $s(n)$  不等于  $s(n-1)$ , 表示检测到的脉冲信号的方向发生改变, 此时要对丢失的条纹进行补偿, 有  $s(n) * [(1+m) * 2\pi + (A_{DA} + A_{DB})/2]$ ,  $m$  表示半个周期内条纹丢失的数目, 输入到累加模块中, 把累加模块中的数据求和, 然后乘上  $\lambda_0/(4\pi)$  得到物体的位移  $D(t)$ .

3 实验结果

在仿真实验中, 分别取  $C = 4.7$  和  $C = 7$  时, 对算法 1 (未考虑条纹丢失所测位移) 和算法 2 (考虑条纹丢失并进行补偿所测位移 (位移重构)) 进行对比, 如表 1 所示.

从表 1 可得出, 在未考虑条纹丢失时, 所测得的物体的移动位移与实际位移相差较大, 精度不高; 考虑条纹丢失现象并进行补偿时, 测得的物体的移动位移与物体的实际位移相差约  $0 \sim 0.2 \mu\text{m}$ , 测量的精确度有了很大的提高. 笔者提出的算法更适合用于条纹计数法测量物体的位移.

表 1  $C=4.7,7$  时算法 1 和算法 2 的比较

Tab.1 Comparison of algorithm 1 and 2 with  $C=4.7,7$

$C$	物体实际 位移/ $\mu\text{m}$	算法 1 位移/ $\mu\text{m}$	算法 2 位移/ $\mu\text{m}$	算法 2 精度
4.7	1.62	1.18	1.57	3.0%
	2.38	1.96	2.36	0.8%
	3.33	2.75	3.14	5.7%
	4.00	3.53	3.92	2.0%
	4.75	3.92	4.71	0.8%
7	1.62	0.79	1.50	7.4%
	2.38	1.57	2.11	11.3%
	3.33	2.36	3.04	10.0%
	4.00	3.14	3.82	4.5%
	4.75	3.92	4.63	2.5%

4 结束语

在高反馈水平因子条件下,会出现条纹丢失现象,此时利用条纹计数测位移的精度比较低.本文研究了在  $0 < C < 7.9$  范围内,条纹丢失的条数,并在重构位移时进行条纹丢失补偿,同时本文提出的算法考虑到小数条纹所代表的位移,使得测得的物体位移更精确,为下一步高光反馈水平因子条件下的其他研究奠定了基础.

参考文献:

[1] 赵岩,禹延光,叶会英. 基于光反馈自混合干涉的对称折叠算法的精度分析[J]. 激光技术,2009,33(4):387-390.

[2] 杨振宇,王鸣,夏巍,等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析[J]. 光学学报,2013,33(4):0412007(1-7).

[3] 杨颖,李醒飞,寇科,等. 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用[J]. 光学精密工程,2012,20(8):1740-1746.

[4] ZABIT U, BERNAL O D, BOSCH T. Mixing laser sensor for large displacement signal recovery in the pres-

ence of speckle[J]. IEEE Sensor Journal, 2013, 13(2):824-831.

[5] 胡险峰. 用激光二极管自混合干涉测量距离[J]. 物理实验,2013,33(1):26-29.

[6] 张照云,高杨,赵兴海,等. 半导体激光自混合变速测量的离散 Chirp-Fourier 变换方法[J]. 红外与激光工程,2012,41(4):1074-1077.

[7] 杨颖,李醒飞,李洪宇,等. 基于激光自混合效应的加速度传感器[J]. 光学学报,2013,33(2):0228003(1-7).

[8] 张玉燕,胡伟,监雄,等. 一种自混合干涉位移测量系统中参数  $C$  的测量方法[J]. 光电子·激光,2013,24(6):1150-1157.

[9] BES C, PLANTIER G, BOSCH T. Displacement measurements using a self-mixing laser diode under moderate feedback[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2006,55(4):1101-1105.

[10] ZABIT U, BONY F, BOSCH T. A self-mixing displacement sensor with fringe-loss compensation for harmonic vibrations[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010,22(3):410-412.

[11] YU Yan-guang, XI Jiang-tao. Optical feedback self-mixing interferometry with a large feedback factor  $C$ : behavior studies[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics,2009,45(7):840-848.

[12] MAGNANI A, NORGIA M, PESATORI A. Optical displacement sensor based on novel self-mixing reconstruction method[C]//IEEE SENSORS 2010 Conference. Kona, HI:IEEE Press. 2010:517-520.

[13] 禹延光,郭常盈,叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. 光学学报,2007,26(8):1430-1434.

[14] SERVAGENT N, GOUAUX F, BOSCH T. Measurements of displacement using the self-mixing interference in a laser diode[J]. Optical, 1998, 29(6):168-173.

A Self-Mixing Interference Displacement Measurement Algorithm  
with Fringe-Loss Phenomenon and Compensation

YE Hui-ying, ZHU Jun-yao, WANG Zhen-xue

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The disappearance of self-mixing interference fringes in the high feedback-regime decreases the displacement measurement accuracy. The proposed method based on Lang-Kobayashi equation detects the fringe-loss with a large optical feedback factor  $C$ . And the relationship between  $C$  and  $m$  which represents the number of fringe-loss in half cycle is obtained:  $C < 4.6, m = 0$ ;  $4.6 \leq C < 4.8, m = 1$ ;  $4.8 \leq C < 7.9, m = 2$ . A self-mixing interference displacement measurement algorithm is presented that is able to remedy the influence of fringe-loss. The measurement accuracy is improved greatly.

**Key words:** displacement measurement; lang-kobayashi equation; high feedback regime; fringe-loss compensation

文章编号:1671-6833(2014)06-0060-04

# 基于 Android 平台的智能医疗系统的设计与实现

郭志涛<sup>1</sup>, 郭忠<sup>2</sup>, 王振<sup>2</sup>

(河北工业大学 信息工程学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300401)

**摘要:** 智能医疗这个全新的概念越来越被人们所接受,但现有的智能医疗系统存在网络架构不明确,达不到实时性传输数据的问题.为了解决这些问题,并且针对市场上对于移动化、便携化的需要,开发基于 Android 平台的智能医疗系统.本系统通过穿戴在人体身上的配有无线网络模块的传感器节点监控人体的生命体征,包括血氧饱和度、体温、脉率等,并通过网关将数据通过无线网络传送到基于 Android 手机操作系统的客户端进行展示与分析.实验结果表明:系统网络架构良好,达到了实时性传输数据的目的,并且满足了市场上移动化、便携化的需要.

**关键词:** 医疗; Android; 传感器; 网关; 实时性

**中图分类号:** TP311.52; R311 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.015

## 0 引言

智能医疗是通过打造健康档案区域医疗信息平台,利用最先进的物联网技术,实现患者与医务人员、医疗机构、医疗设备之间的互动,逐步达到信息化.在不久的将来医疗行业将融入更多人工智慧、传感技术等高科技,使医疗服务走向真正意义的智能化,推动医疗事业的繁荣发展.在中国新医改的大背景下,智能医疗正在走进寻常百姓的生活.

随着人们对无处不在的网络迅速增长的需求,以及近年来老龄化加剧、各种疾病发病率的增长,无线体域网的应用越来越引起人们的关注.体域网是人体上的生理参数收集到传感器或移植到人体内的生物传感器共同形成的一个无线网络,这些传感器节点之间的数据传输一般在两米的超短距离.一个基本的体域网由多个节点和一个网络管理器(简称网关,即体域网和外部网络之间的桥梁,使数据能够得以安全地传送和交换)组成.每个传感器节点负责采集身体参数如体温、血氧饱和度以及脉率等,而网关则是作为一个微型服务器收集所有节点采集的数据并转发到网络端,通过网络与手机端进行数据交互与传输.传感器、网关分别配有无线网络模块,智能手机出厂时

也配有无线网络模块,采用这样的无线传输而不是利用生物传感器与手机硬件直接相连,拓展性强,操作简单,而且任意手机都可安装使用.综上,这样的网络架构很明确,而且实现起来也简单,成本低廉.测试结果表明,此智能医疗系统可以成功实现对数据的收发,而且速度几乎同步,这对于智能医疗实现实时性传输数据具有重要的参考价值,同时满足了便携性、移动化的需要<sup>[1]</sup>.

## 1 平台介绍

Android 是 Google 于 2007 年 11 月 5 日宣布的一种基于 Linux 的自由及开放源代码的操作系统,主要应用于便携设备,如智能手机和平板电脑等. Android 一词的本义指“机器人”,目前尚未有统一中文名称,中国大陆地区较多人使用“安卓”或“安致”.

Android 的系统架构和其操作系统一样,采用了分层的架构.从架构图看,Android 分为 4 个层,从高层到低层分别是应用程序层、应用程序框架层、系统运行库层和 Linux 核心层.

结合 Android 的系统架构以及 Android 平台具有开放性、挣脱运营商的束缚、丰富的硬件选择、无缝结合 Google 应用等优势,为以后程序的扩展以及版本的升级与不断改进带来了极大的方

收稿日期:2014-06-08;修订日期:2014-08-31

基金项目:天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目(11JCYBJC00200)

作者简介:郭志涛(1979-),男,河北唐山人,河北工业大学讲师,博士,主要研究方向:嵌入式系统、射频识别、视频处理, E-mail: mrnow@hebut.edu.cn.

便,使得智能医疗这个全新的系统能够不断发展进步.

2 系统设计与实现

2.1 系统整体设计

用户通过安装在 Android 手机操作系统上的智能医疗应用程序和网关对人体的血氧饱和度、体温、脉搏等数据进行采集,数据通过手机端显示出来,用户根据显示的数据判断自己身体健康状况.通过底层传感器获取的人体体征值是与专业医疗器械测得的体征值数以千万次对比得出的结果,对于不准的数据或者稍微有些偏差的数据要经过严格校验与修正,测量的信息的准确性可靠、精确.网关是整个系统的关键,底层负责与传感器各个节点交互,上层负责与 Android 手机端交互.这样网络架构的设计,没有引用数据库,省略了对于数据库的写入与读取,大大缩短了数据收发所用时间,提升了速度,满足了系统的实时性,这也是此系统的创新所在.

Android 客户端与网关的通讯是基于 WiFi 与网络 Socket 套接字技术. WiFi 是一种能够将个人电脑、手持设备(如 PAD、手机)等终端以无线方式互相连接的技术. Socket 通常也称作“套接字”,应用程序通常通过“套接字”向网络发出请求或者应答网络请求. Socket 和 ServerSocket 类库位于 java . net 包中. ServerSocket 用于服务器端,Socket 是建立网络连接时使用的. 在连接成功时,应用程序两端都会产生一个 Socket 实例,操作这个实例,完成所需的会话. 对于一个网络连接来说,套接字是平等的,并没有差别,不因为在服务器端或在客户端而产生不同级别. 不管是 Socket 还是 ServerSocket 它们的工作都是通过 SocketImpl 类及其子类完成的<sup>[2]</sup>.

智能医疗系统的整体框架图如图 1 所示.

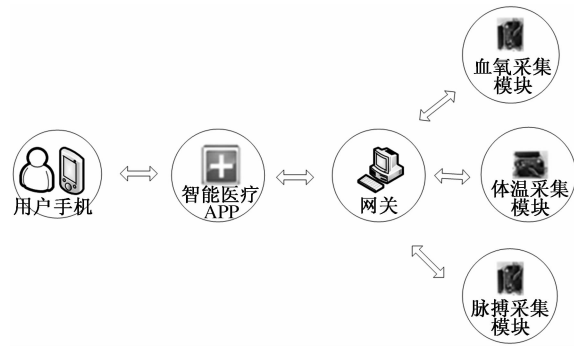


图 1 系统整体框架

Fig. 1 The frame of system

2.2 软件设计

实现主要使用 Java 语言,通过开源的 Eclipse 开发工具安装 ADT 插件进行开发,前提是在开发软件的计算机上已经安装了 Java 语言的开发工具 JDK(Java Development Kit, JDK),关键是采用 Socket 套接字编程技术. 当用户按下键或者更新手机界面时手机端应用程序便会通过 socket 将相应指令通过 WIFI 发送至网关,前提是知道网关的 IP 地址及公共的端口号,手机和网关处于同一个局域网之中. 网关解析完指令,对硬件终端发送命令,网关回复相应指令,手机端按照自定义的协议进行解析,最终可以在手机端将结果展示给用户,Android 手机端主程序流程如图 2 所示<sup>[3]</sup>.

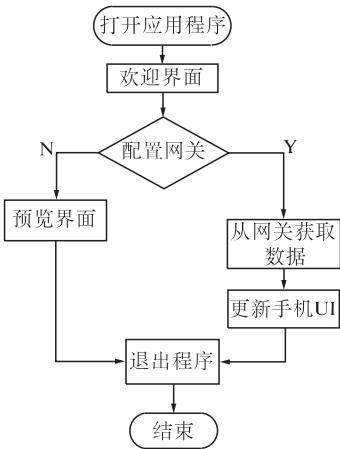


图 2 手机端流程图

Fig. 2 The flowchart of mobile terminal

2.2.1 动态配置网关

软件在设计时,输入网关 IP 地址和端口号是一个动态配置网关的过程,不将 IP 地址和端口号在代码里写成固定值,而是随着网关端口号和 IP 地址的变化而变化给用户操作带来了方便.

2.2.2 套接字编程

我们平时所说的 socket 通常也称作“套接字”,用于描述 IP 地址和端口,是一个通信链的句柄;应用程序通过“套接字”向网络发送请求或者应答网络请求;Socket 有两种主要的操作方式:面向连接(TCP)的和无连接的(UDP);客户端首先知道服务器端的 IP 地址和端口号,然后进行连接发起通讯.

Android 的手机端和网关之间的交互就是利用 socket 编程,将 IP 地址声明成 String 类型的变量,端口号声明成 int 类型的变量,创建 Socket 的对象,将 IP 地址和端口号作为参数传入,然后通过 java 中指定的方法与网关进行发送数据与接



收数据,实现与网关数据的交互<sup>[4]</sup>.

2.2.3 单例设计模式

Android 手机客户端需要经常关闭界面与打开界面,按照常规简单的编程切换界面时 socket 会随着 Android 中 Activity 的消亡而关闭掉,重新回到一个新界面时会重新创建一个 socket. 为了解决这个问题,采用 java 设计模式中的单例设计模式.

单例设计模式的特点:单例类只能有一个实例;单例类必须自己创建自己的唯一实例;单例类必须给所有其他对象提供这一实例. 单例模式确保某个类只有一个实例,而且自行实例化并向整个系统提供这个实例.

2.3 网关设计

核心网关采用 ATMEL 的 AT91SAM9261 - EK 核心板,它本身内存 4MB, NAND FLASH 128MB,支持 SD 卡,自带网口,5 个 USB 口,3 个串口,接口类型丰富,存储空间大,支持嵌入式 Linux 系统,开发方便快捷,运行稳定,可胜任大部分的网关工作.

核心网关负责协调上层应用层与底层硬件无线数据链路层的数据交互. 通过串口连接无线传感网络的网关节点;通过网口连接局域网,通过网络与手机等终端进行数据交互. 网关原理如图 3 所示.

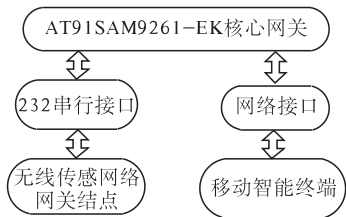


图 3 网关原理图

Fig. 3 Gateway schematic diagram

2.4 硬件设计

实现主要使用 C 语言,通过 MPLAB IDE 集成开发环境实现整个硬件系统的开发. 系统由 NFR24L01 模块组成星型网络. 每个穿戴节点都由传感器模块与 NFR24L01 模块组成,传感器模块采集人体数据,由 PIC1823 单片机对数据进行处理并通过 NFR24L01 模块发送到网关,网关对数据进行解析后发送到手机端. 如图 4 所示为硬件与网关的交互流程图<sup>[5]</sup>.

3 软件操作与实验验证

在 Android 操作系统的手机上安装智能医疗应用程序后,打开软件,经过开始界面,跳转至智能

医疗系统的配置网关界面,如下图 5(a)所示<sup>[6-8]</sup>.

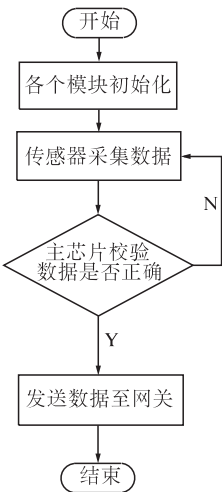
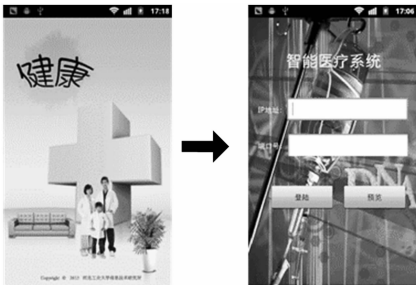
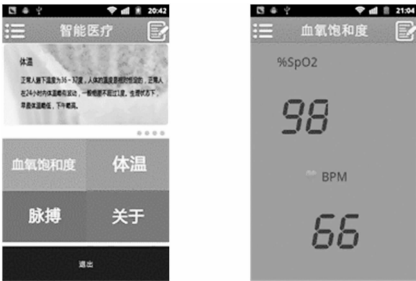


图 4 硬件与网关交互流程图

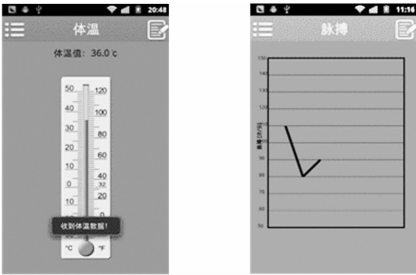
Fig. 4 The flowchart of Gateway interacts with hardware



(a) 开始到配置网关



(b) 血氧饱和度



(c) 体温与脉搏

图 5 操作详解

Fig. 5 Operational details

在相应位置分别输入网关 IP 地址与端口号, 然后点击“登陆”按钮, 来到主界面, 如图 5(b) 左

侧图所示,在没有连接网关或者不对任何人进行体检时,可以点击“预览”按钮进行整个手机软件的初步浏览与熟悉.程序主界面的最上方是应用程序的名字,下方是几个健康小贴士,包括体温、血氧饱和度、脉搏三大健康指标,每隔 5 s 自动更新滑动一次(相隔时间在程序里可以任意设定),并且支持手动向左、向右滑动,点击手机“菜单”键,可以选择退出,当然也可以连续点击“返回”按钮退出手机应用程序.首先配置好网关,各个传感器连接人体的不同位置,如图 5(b)右侧图所示,打开血氧饱和度模块,点击右上方的获取数据按钮,可以分别获得人体动脉血和静脉血的血氧饱和度.

打开体温模块,如图 5(c)左侧图所示,点击右上方的获取数据按钮,可以收集到体温数据,如图 5(c)右侧图所示,打开脉搏模块,点击右上方的获取数据按钮,可以得到连续几次的脉搏次数,绘制成折线便于观察,单位:次/分.

通过对此系统的实验与反复测试表明采用本系统的网络架构,手机端与网关数据交互达到了实时性的特点,这正是我们未来智能医疗所需要与借鉴的.

4 结束语

虽然智能医疗这个概念在若干年前就被提出,直到这几年才进入一个行业迅猛发展的时期.智能医疗这个概念也开始慢慢实物化.本系统以无线通信技术为核心,研究了基于 Android 手机

平台的智能医疗系统的可行性以及实现方案.此系统手机 UI 做的还比较粗糙,后续尚可完善,让用户界面更人性化和更具美感.此外,还面临着对整体系统操作的速度等问题,Android 手机各个版本的测试问题.目前对于不同种类的、不同规格的医疗设备还没有一个统一的实行标准.<sup>[8]</sup>

参考文献:

[1] 李高尚,沈巍. 一种应用于移动健康医疗的 Android 客户端的研究[J]. 电子测试,2012(2):64-67.

[2] 王丽娟,孙西超,底松茂,等. 软件复用与基于面向对象框架的软件开发方法[J]. 郑州大学学报:工学版,2003,24(3):24-28.

[3] 孙迎,宋健. 基于 Android 的远程心电图检测系统[J]. 计算机应用与软件,2013(4):326-329.

[4] 祝锡永,陆忠芳. 基于 Google 云计算的移动医疗服务平台的研究[J]. 成组技术与生产现代化,2013(1):22-27.

[5] 毛中亮,史鸿飞,应俊,等. 基于 Android 平台的移动医疗应用系统[J]. 中国医疗设备,2013(3):73-76.

[6] 陈欣,郭勇,赖武刚. 基于 Android 平台的多生理参数智能手机监护系统的设计[J]. 电子世界,2013(8):122-124.

[7] 吕美丹,祝锡永,傅慧,等. 基于 GAE 云计算的区域移动医疗服务平台[J]. 计算机系统应用,2013(6):29-33.

[8] 季磊,郭旭,施华宇. 移动医疗终端通讯系统的设计与实现[J]. 中国医疗器械杂志,2013(1):37-39.

Design and Realization of Intelligent Medical System Based on Android Platform

GUO Zhi-tao<sup>1</sup>, GUO Zhong<sup>2</sup>, WANG Zhen<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Computer Science & Software, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** With the development of the society and the progress of science and technology, the Internet of things technology by leaps and bounds. The new concept of Intelligent Medical is becoming more and more accepted by people, but there are still the problems of clear network architecture, real-time transmit data. In order to solve these problems, the Intelligent Medical System based on Android Platform was developed. This system monitors the vital signs of body through the sensor nodes on the body, including the blood oxygen saturation, body temperature, pulse frequency, and transfers the data to the Android mobile client for display and analysis through gateway. The experimental results show that this system network architecture is good and can achieve the goal of the real-time data transmission.

**Key words:** medical; Android; sensor; gateway; real-time

传统软阴影算法在 GPGPU 构架上的优化技术研究

高明磊, 赵新灿, 詹云

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对百分比靠近软阴影 PCSS 算法存在阴影粉刺和偏离的问题, 以及图形渲染实时性的要求, 提出一种改进的软阴影算法. 该方法在 PCSS 算法的基础上, 利用深度梯度消除阴影粉刺和偏离现象, 使用方差阴影映射 VSM 算法进行过滤, 利用 GPU 的并行计算能力加速生成区域求和表以实现对阴影图预先滤波. 实验结果表明, 该方法能够得到更高的软阴影质量, 并且可以获得很好的加速比, 实时性明显提高.

关键词: GPGPU; 百分比靠近软阴影; 区域求和表

中图分类号: TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.016

0 引言

近年来, 计算机图形学有着巨大的发展, 随着应用需求的增加, 真实感图形渲染也越来越受到关注, 要生成视觉上十分精确的软阴影效果需要耗费很多的计算. 近些年, GPU 的运算性能快速增长, 其浮点运算能力明显超越了 CPU, 使得 GPU 擅于进行大规模密集型数据的并行计算<sup>[1-2]</sup>. GPU 强大的性能优势为高实时性的阴影研究提供了良好的解决思路, 对设计虚拟场景中真实感强、实时性高的阴影, 特别是对软阴影效果有着重要的研究意义.

阴影绘制算法主要分为阴影体算法<sup>[3]</sup>、阴影映射算法<sup>[4]</sup>和全局光照算法<sup>[5]</sup>. 在真实感方面, 阴影体算法和全局光照算法是以牺牲实时性为代价, 换取稍好的真实感; 而阴影映射算法虽然存在走样等现象, 通过过滤等方式依然能够获得很好的阴影效果<sup>[6]</sup>. 在实时性方面, 阴影体算法和全

局光照算法实时性较差; 而阴影映射算法基于图像空间, 算法复杂度与场景复杂度无关, 且易于 GPU 加速, 实时性较高. 阴影映射算法根据半影区情况分为两大类: 半影区大小固定和半影区大小可变的阴影算法. 半影区大小固定的阴影算法主要有百分比接近滤波 PCF 算法、方差阴影映射 VSM 算法、卷积阴影映射 CSM 算法和指数阴影映射 ESM 算法; 半影区大小可变的阴影算法主要有百分比靠近软阴影 PCSS (Percentage Closer Soft Shadow) 算法<sup>[7]</sup>, 算法性能如表 1 所示.

1 基于 GPGPU 的改进软阴影映射算法

1.1 算法主要改进思想

由表 1 可知, PCSS 算法是相对更好的一种软阴影生成算法, 软阴影效果更加符合阴影的物理特征. 在 PCSS 算法的基础上, 提出一种新的软阴影生成算法, 如图 1 所示.

首先, 针对 PCSS 算法不能硬件预滤波的问

表 1 主要阴影算法特点对比

Tab. 1 Comparison of shadow algorithm

算法名称	算法所需存储量大小	硬件预滤波	半影区固定	算法主要不足之处
PCF	较小, 存深度值	否	是	采样越多速率越低; 自阴影现象
VSM	居中, 存深度值和深度值平方	是	是	漏光现象
CSM	较大, 存深度值正弦值和余弦值	是	是	存储量大; 振铃现象
ESM	较小, 存深度值的指数值	是	是	计算量大; 稳定性较差
PCSS	较小, 存深度值	否	否	采样越多速率越低; 自阴影现象

收稿日期: 2014-06-06; 修订日期: 2014-09-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民用航空总局联合研究基金项目 (U1433106)

作者简介: 高明磊 (1963-), 女, 山东诸城人, 郑州大学实验师, 研究方向为计算机技术, E-mail: iemlgao@zzu.edu.cn.

题,使用 VSM 算法代替 PCF 算法进行过滤,这样在阴影图中存储的是深度值和深度值的平方,对阴影图就可以使用各向异性过滤、区域求和表等滤波技术,加速滤波效率,提高阴影质量.

其次,由于阴影图滤波中每个像素点的滤波区域是动态计算的,生成区域求和表耗时多,针对此问题,笔者采用 DirectCompute 在 GPU 上加速生成区域求和表,提高滤波效率.

最后,使用泊松圆盘采样代替规则采样,无需过多的采样便能提高阴影质量,针对自阴影问题,采用深度梯度法得到可变的深度偏移值来处理.

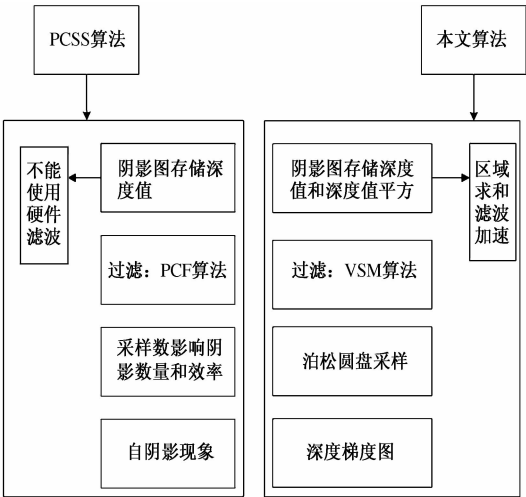


图 1 本文拟采用方法

Fig.1 Research methods of this article

本文软阴影算法由 CPU 端和 GPU 端共同完成,其中,在 CPU 上主要实现场景初始化、信息更新等任务;算法的大部分工作由 GPU 实现,利用 DirectX 11 中可编程部分 vertex shader、pixel shader 和 compute shader,充分利用 GPU 的性能优势,加速和优化算法的实现,从而获得更高的质量和效率,任务划分如图 2 所示.

1.2 基于区域求和表的阴影图预滤波

利用区域求和表技术对阴影图动态滤波,得到深度值和深度值平方的期望,进而计算相应的均值和方差.再根据切比雪夫不等式得到像素点的阴影权值.实现时将接受体当前点深度值与区域求和表求得的滤波区域均值进行比较.如果当前点深度值小于区域均值,则当前点不在阴影中,  $P = 1$ ;如果当前点深度值大于区域均值,则利用切比雪夫不等式求出当前点在阴影中的概率上限  $P_{max}$ ,以此来渲染阴影效果.

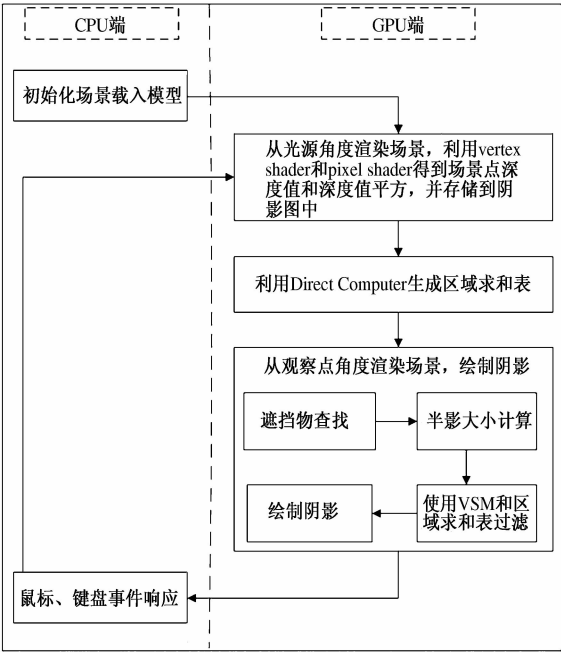


图 2 基于 GPGPU 的软阴影映射算法流程

Fig.2 Soft shadow mapping algorithm based on GPGPU

对于具有元素  $a[i,j]$  的纹理可按公式(1)建立一个区域求和表  $t[i,j]$ :

$$t[i,j] = \sum_{x=0}^i \sum_{y=0}^j a[x,y]. \tag{1}$$

区域求和表中的每个元素为纹理中位于这个元素左侧及上侧所有元素之和,生成区域求和表后,就可以求得任意一个矩形滤波区域的和.通过对滤波区域的 4 个角点进行采样求区域和值,再将区域和值除以区域面积,就可以得到滤波区域的均值.如图 3 所示,左图灰色部分代表滤波区域,采样该区域的 4 个角点 A、B、C 和 D,则该滤波区域的均值为  $(A - B - C + D)/4$ ,即为 4.5.

数据s[x,y]			区域求和表t[i,j]		
1	2	3	A 1	3	6 B
4	7	0	5	14	17
4	5	0	C 9	23	32 D

图 3 区域求和表计算过程

Fig.3 Summed area table calculation process

1.3 基于泊松圆盘采样的遮挡物查找

在遮挡物查找过程中,需要多次采样求遮挡物的平均遮挡深度.采样数目越多,软阴影的质量越好,但是过多的采样数会降低算法的性能.泊松圆盘采样模式 (poisson disk pattern)<sup>[8]</sup>就是目前非常好的一种图像采样方式.通常采用掷标法 (dart throwing)来生成泊松圆盘序列,所有采样点分布在半径为 1 的单位圆盘上,得到的所有采样

点之间的距离都大于一个最小距离(记为阈值),该阈值设置在 0.05 ~ 1.0 最佳.在遮挡物查找过程中,将泊松圆盘采样点与遮挡物查找区域半径相乘作为纹理坐标偏移量,再对处理后的纹理坐标进行采样得到阴影图中相应纹理坐标下的深度值.通过上述得到阴影图中相应坐标下的深度值后与接受体当前点的深度值进行比较,从而计算遮挡物的平均遮挡深度.

#### 1.4 基于深度梯度法的自阴影处理

为了处理自阴影现象,需要动态计算深度偏移值.深度梯度法能够有效地处理自阴影问题,消除阴影粉刺或偏离现象.对于给定的函数  $d(x, y)$ ,在位置  $(x, y)$  处的梯度矢量如公式(2).

$$\mathbf{G}[d(x, y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial d}{\partial x} \\ \frac{\partial d}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

计算深度偏移值时,必须把屏幕空间转换到纹理空间,转换如公式(3):

$$\text{gradient} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d}{\partial u} \\ \frac{\partial d}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} - T \begin{bmatrix} \frac{\partial d}{\partial x} \\ \frac{\partial d}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中,gradient 即为转换到纹理空间的深度梯度; $\mathbf{G}[d(x, y)]$ 是屏幕空间的深度梯度矢量;中间是纹理空间的雅克比矩阵.

将深度梯度值与偏移量  $uv\_offset$  进行点乘,就可以得到深度偏移值,从而计算最终的深度值,如公式(4):

$$d = d_0 + \text{dot}(uv\_offset, \text{gradient}). \quad (4)$$

将该值与相应纹理坐标下采样得到的深度值进行比较,就可以有效消除阴影粉刺或偏离现象.

## 2 基于 GPGPU 的区域求和表生成

### 2.1 区域求和表生成方法

区域求和表生成有两种方法:逐行方法(line-by-line)和回溯倍增方法(recursive doubling).回溯倍增法<sup>[9-10]</sup>可以在 GPU 端并行计算,算法中前缀求和是基于 Hillis 和 Steele 提出的扫描算法,对于一个二进制运算符  $\oplus$  和一个  $n$  元数组  $A = \{a_0, a_1, \dots, a_{n-1}\}$ ,进行前缀求和得到的结果每个元素都是其所有前缀和其自身经过  $\oplus$  运算得到的结果,记为  $B = \{a_0, (a_0 \oplus a_1), \dots, (a_0 \oplus a_1 \oplus \dots \oplus a_{n-1})\}$ .

### 2.2 区域求和表在 GPU 上的实现

(1) 将生成的阴影图分成大小相同的块,每

块对应 GPGPU 的一个线程组,如图 4 所示.笔者采用的 GPU 是 NVIDIA GeForce GT440,每个线程组包含的线程数限制在 1 024 内.对于高和宽分别为  $h$  和  $w$  的阴影图,假设每个分块大小为  $16 * 32$  共 512 个像素点,则需要分成的线程组数为  $(w/16) * (h/32)$ ,如果分块的尺寸不能被线程组的尺寸整除,则实际分配的线程组数应该为  $(w/16 + 1) * (h/32 + 1)$ <sup>[11]</sup>.

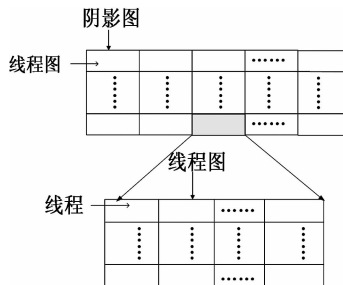


图 4 阴影图分块

Fig. 4 Shadow map block

(2) 将阴影图的每个分块数据读入线程组的共享存储器中,使得线程组内的所有线程可以同时读取分块数据;利用线程对分块的每一行进行并行前缀求和运算,并利用线程同步机制待所有线程执行完毕后再将最终结果写入类型为 RW-Texture2D 的全局存储器中.

(3) 将前面计算得到的每个分块结果的每行最后一个元素值即分块总和,从全局存储器读到共享存储器中,利用线程对这些分块总和进行并行前缀求和运算.将对应行分块总和  $i$  加到分块  $i + 1$  的对应行的所有值上,并将最终结果写入全局存储器中,就完成了阴影图中所有行的前缀求和运算.

(4) 对上一步的结果进行转置运算,对转置后的阴影图数据重复上面三步,进行所有列的运算,再将最终结果进行转置便生成了区域求和表,如图 5 所示.

## 3 基于 GPGPU 的软阴影算法实验结果分析

### 3.1 PCSS 算法规则采样效果

软阴影的渲染速率和阴影质量与采样模式以及采样数等因素密切相关.图 6 所示为场景使用 PCSS 算法在规则采样模式下,分别利用 25, 49, 81 个不同数目的采样点对场景进行阴影渲染的细节特写,阴影图大小为  $1\,024 * 1\,024$ .

当采样数为 25 时,阴影中有明显的带状条纹,随着采样数目的增多,阴影效果越来越好.当

采样数为 81 时,阴影边缘已经比较柔和.但是,随着采样数目的增多,算法的效率却在降低,如表 2 所示.

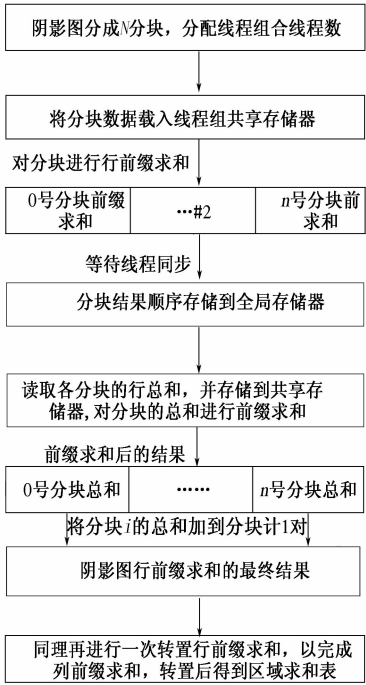


图 5 基于 GPGPU 的区域求和表计算  
Fig. 5 Summed area table calculation based on GPGPU

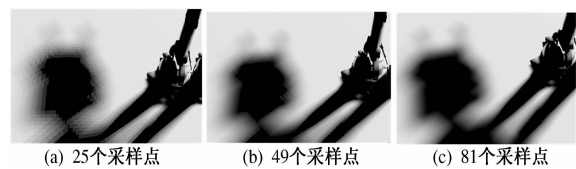


图 6 不同采样数阴影效果细节对比  
Fig. 6 Detail contrast of different sampling number

表 2 PCSS 算法性能分析		
Tab. 2 Performance analysis of PCSS algorithm		
采样数	绘制效果	渲染帧速/(f · s <sup>-1</sup> )
25	较差	108.39
49	一般	81.99
81	较好	58.23

3.2 改进算法泊松圆盘采样效果

为解决阴影质量与渲染效率的矛盾,使用泊松圆盘采样代替规则采样模式.图 7 所示为在两种不同采样模式下的软阴影渲染效果,遮挡物查找阶段使用的采样点数均为 64.

图 7(a)、(b)为 PCSS 算法在规则采样方式下渲染的软阴影效果,过滤阶段采样数分别为 64,361;图 7(c)图为 PCSS 算法在泊松圆盘采样方式下渲染的软阴影效果,过滤阶段采样数为 64.从图中可以看出,图 7(a)图中软阴影边缘仍

有部分带状走样;(b)图过滤阶段使用较多的采样点,软阴影边缘较柔和;而(c)图使用泊松圆盘采样,过滤阶段仅使用 64 个采样点,得到的软阴影与(b)的效果差不多,算法性能如表 3 所示.



图 7 不同采样模式对软阴影效果的影响  
Fig. 7 Effect of the different sampling patterns

表 3 规则采样与泊松圆盘采样效果对比			
Tab. 3 Comparison of two sampling methods			
采样模式	过滤采样数	帧速/(f · s <sup>-1</sup> )	阴影质量
规则采样	64	69.24	一般
	361	47.85	较好
泊松圆盘采样	64	63.17	较好

3.3 改进算法自阴影效果处理

针对自阴影现象采用深度梯度法进行处理,效果如图 8 所示.在图 8(a)中出现了自阴影现象,如模型足部与阴影之间有缝隙,出现了阴影移位,这主要是由于常量深度偏移值选择不当造成的;而图 8(b)中,采用深度梯度法动态计算偏移量,有效地消除了自阴影现象,软阴影效果较好.

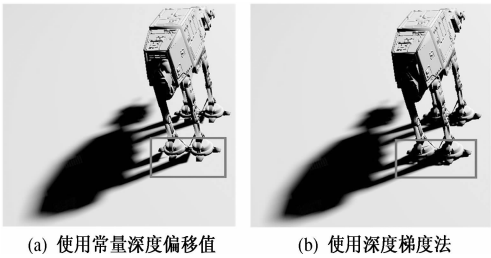


图 8 自阴影现象的消除  
Fig. 8 Elimination of self shadow

3.4 改进算法与原算法整体性能的对比

PCSS 算法和本文算法渲染的效果比较如图 9 所示.从图 9 中可以看出,本文算法渲染的软阴影边缘柔和,效果更加清晰,完全满足了软阴影真实感渲染的需求.

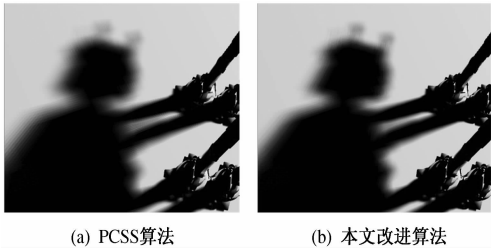


图 9 PCSS 算法与本文改进算法渲染的软阴影效果  
Fig. 9 Rendering soft shadows of PCSS and improved algorithm



改进算法与原算法性能对比如表 4 所示.

表 4 PCSS 算法与改进算法性能对比  
Tab.4 Comparison of PCSS algorithm and improved algorithm

算法	阴影图大小	渲染帧速/(f·s <sup>-1</sup> )
PCSS 算法	512 * 512	69.24
	1 024 * 1 024	88.94
本文算法	512 * 512	157.21
	1 024 * 1 024	205.39

4 结论

鉴于阴影对增强三维场景真实感渲染的重要性,在 PCSS 算法的基础上提出一种改进的软阴影算法.利用深度梯度法得到动态的深度偏移值消除阴影粉刺和偏离问题;在过滤阶段利用 VSM 算法代替 PCF 算法,并结合区域求和表对阴影图进行预先滤波;利用 GPU 通用计算的优势生成区域求和表算法,并和传统的利用 Direct3D 的像素着色器生成区域求和表算法进行了对比.结果表明,改进后的软阴影算法具有更好的阴影质量和更高的性能,加速比是原 PCSS 算法的 3 倍以上,充分体现了本文算法的优越性.

参考文献:

[1] 唐滔.面向 CPU-GPU 异构并行系统的编程模型与编译优化关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学计算机学院,2012.  
[2] 韩博,周秉锋. GPGPU 性能模型及应用实例分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(9): 1219-1226.

[3] TIM H. Real shadows, real time[R]. Iris: Iris Universe,1991:23-31.  
[4] BAVOIL L, CALLAHAN STEVEN P, CLAUDIO T. et al. Robust soft shadow mapping with backprojection and depth peeling[J]. Journal of Graphics Tools, 2008, 13(1):19-29.  
[5] APPEL A. Some techniques for shading machine renderings of solids[C]//AFIPS 1968 Spring Joint Computer Conf. San Francisco, California, 1968, 32: 37-45.  
[6] LIU Lu, XIAO Shuang-jiu. Real-time soft shadows for large-scale virtual environments[C]//2011 International Conference on Multimedia Technology (ICMT). Hangzhou, China:IEEE Press,2011:5464-5467.  
[7] FERNANDO R. Percentage-closer soft shadows[C]//ACM SIGGRAPH 2005 Sketches and Applications. New York:ACM Press, 2005:35  
[8] DUNBAR D,HUMPHREYS G. A spatial data structure for fast poisson-disk sample generation[J]. ACM Transactions on Graphics,2006,25(3):503-508.  
[9] NEHAB D, MAXIMO A, RODOLFO LIMA, et al. GPU-efficient recursive filtering and summed-area tables[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6):1-11.  
[10] FRANKLIN C C. Summed-area tables for texture mapping[C]//SIGGRAPH 1984:Proceedings of The 11th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Minneapolis, Minnesota:ACM Press, 1984:207-202.  
[11] 孙伟东,马宗民.一种适合于 GPU 计算的并行后缀数组构造算法[J]. 小型微型计算机系统,2011,32(5):830-836.

Study of Traditional Soft Shadow Algorithm Optimization Technology in the GPGPU Framework

GAO Ming-lei, ZHAO Xin-can, ZHAN Yun

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the realistic need of shadow rendering, on the basis of the PCSS algorithm, this paper puts forward a soft shadow generation algorithm based on GPGPU. It samples a region by poisson disk pattern instead of regular sampling mode, uses depth gradient to deal with the phenomenon of self-shadowing, uses the VSM algorithm to filter the shadow, and uses the summed area table to filter the shadow map dynamically, which can improve the shadow quality and rendering efficiency in a certain extent.

**Key words:** GPGPU;PCSS; summed area table

基于 SURF 和伪 Zernike 矩的图像拼接算法研究

李喜艳<sup>1</sup>, 纪东升<sup>2</sup>, 吴崇正<sup>1</sup>

(1. 郑州成功财经学院 信息工程系, 河南 郑州 451200; 2. 兰州大学 信息科学与工程学院, 甘肃 兰州 730030)

**摘 要:** 基于特征点匹配的图像拼接方法对图像旋转、噪声等比较敏感,提出了基于 SURF 和伪 Zernike 矩的图像拼接方法,并利用改进的 SURF 算子获取图像中的特征点,计算以特征点为中心邻域窗口的伪 Zernike 矩,获得各个特征点邻域伪 Zernike 矩的 Bray-Curtis 相似性度量的初始匹配点对,利用 RANSAC 算法剔除伪特征点对,之后对输入图像作几何变换进行配准,融合重叠区域,获得良好的拼接图像. 实验表明,改进的 SURF 特征检测算法提取的特征点均匀、准确、迅速,而且图像配准算法对平移、旋转以及噪声均具有鲁棒性.

**关键词:** SURF; 伪 Zernike 矩; RANSAC 算法; 图像拼接

**中图分类号:** TP751.1      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.017

0 引言

图像拼接是通过对多个具有互相重叠部分的图像进行配准,拼接成一个分辨率更高,视野更宽的图像. 图像配准是图像拼接的重要步骤,基于特征点匹配的方法须先从图像上提取不变性特征,如特征角点、矩等,再进行精确匹配. 在图像的各种不变性特征中,角点具有旋转不变性和几乎不受光照条件影响的优点,因此,基于特征点匹配的图像拼接在视频检索、景物匹配以及遥感图像融合等领域都具有十分广泛的应用. 为有效解决图像在旋转、平移变换及光度差异等情况下存在的拼接问题,提出了一种基于改进的 SURF 检测<sup>[1]</sup>和伪 Zernike 矩的图像拼接算法 (SURF Feature Points Pseudo-Zernike Moments Algorithm, SPZMA). 该算法利用形态学极大值改进的 SURF 算子提取图像特征点;然后计算中心邻域窗口的伪 Zernike 矩,通过比较伪 Zernike 矩的 Bray-Curtis 距离得到初始匹配点对;接着运用 RANSAC 算法<sup>[2]</sup>剔除伪特征点对,建立图像对之间的变换模型,实现图像配准;最后,通过利用渐入渐出分段加权函数消除拼接缝,使拼接图像实现平稳过渡,SPZMA 算法流程结构如图 1 所示.

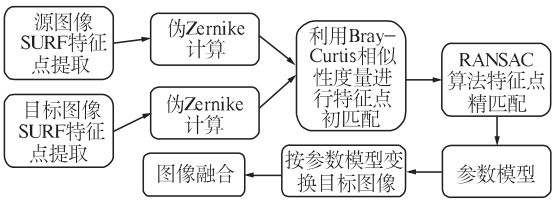


图 1 SPZMA 算法流程图  
Fig.1 SPZMA algorithm flowchart

1 图像特征点检测和描述

1.1 SURF 特征点检测算法

(1) 积分图像中任意一点  $(i, j)$  的值  $ii(i, j)$  为原图像左上角到任意点  $(i, j)$  相应的对角线区域灰度值的总和,即

$$ii(i, j) = \sum_{m \leq i, n \leq j} p(m, n). \tag{1}$$

式中:  $p(m, n)$  表示原图像中点  $(m, n)$  的灰度值.

(2) 给定图像  $I$  中一个点  $x(x, y)$ , 在点  $x$  处, 尺度为  $\sigma$  的 Hessian 矩阵  $H(x, \sigma)$  定义如下:

$$H(x, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{bmatrix}. \tag{2}$$

式中:  $L_{xx}(x, \sigma)$  是高斯二阶微分  $\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma)$  在点  $x$  处与图像  $I$  的卷积,  $L_{xy}(x, \sigma)$  和  $L_{yy}(x, \sigma)$  具有同

收稿日期:2014-06-20;修订日期:2014-09-03  
基金项目:河南省科技攻关计划项目(132102210516)  
作者简介:李喜艳(1983-),女,河南省新乡市人,郑州成功财经学院讲师,主要从事信息安全研究, E-mail:xiyan-li2006@163.com.

样的含义.

为了将模板与图像的卷积转化成滤波<sup>[2]</sup>运算,需要对高斯二阶微分模板进行简化,使简化后的模板只由几个矩形区域组成,矩形区域内填充同一值,用  $D_{xx}$ 、 $D_{yy}$  和  $D_{xy}$  表示模板与图像卷积的结果,这样便可将 Hessian 矩阵<sup>[3]</sup>的行列式作如下简化,其中  $w$  为权重.

$$\text{Det}(\mathbf{H}_{\text{approx}}) = D_{xx}D_{yy} - (wD_{xy})^2. \quad (3)$$

(3) 将二维图像  $I(x, y)$  与高斯核卷积得到不同尺度的空间:  $L(x, y, \sigma) = I(x, y) \cdot G(x, y, \sigma)$ , 其中  $G(x, y, \sigma)$  为尺度可变的高斯函数,再通过建立高斯差分尺度空间寻找图像的局部极值. 在图像高斯差分尺度空间内当前尺度和其相邻两个尺度  $3 \times 3$  的区域内,标记的像素点和周围像素点比较,如果标记的像素灰度值大于或者小于其他像素,那么这个标记像素点就是特征点.

## 1.2 利用局部极值搜索窗口算法的改进

根据 Hessian 矩阵求出尺度图像在  $(x, y, \sigma)$  的极值后,首先在极值点的  $3 \times 3 \times 3$  的立体领域内进行非极大值抑制<sup>[4]</sup>. 为了能够对候选特征点进行亚像素定位,可以在尺度空间和图像空间中使用二次拟合函数进行插值:

$$D(x) = D + \frac{\partial D}{\partial X}X + \frac{1}{2}X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2}X. \quad (4)$$

笔者基于形态学滤波中的局部极大值抑制的思想,采用改进的 HGW (Herk-Gil-Werman) 算法,将局部求极大值抑制的过程转化为在二维窗口内对局部极值的求取,用以加快算法的速度.

**Step1** 先将像素矩阵为  $X$  的图像扩展为  $Y = [Y \ A]$ , 之后将扩展矩阵均分为宽度为  $w$  的多个子矩阵,  $A$  是扩展的零矩阵.

**Step2** 将二维窗口划分为  $2 \times 1$ . 极值二维窗口用下式定义为

$$\max_{\substack{-w \leq k \leq w \\ -w \leq l \leq w}} \{f(x+k, y+l)\} = \max_{-w \leq l \leq w} \left\{ \max_{-w \leq k \leq w} \{f(x+k, y+l)\} \right\}. \quad (5)$$

**Step3** 确定扩展矩阵  $Y$  某行数组  $(x_0, \dots, x_{n-1})$  的局部最大值. 用公式  $y_i = \max_{0 \leq j < p} x_{i+j}$  ( $i = 0, \dots, n-w$ ) 表示求最大值,且将  $x_0, \dots, x_{n-1}$  分成多个小数组  $x_{w-1}, x_{2w-1}, x_{3w-1}, \dots$ . 对每个小数组,定义如下序列元素  $R_k$  和  $Q_k$  ( $k = 0, \dots, w-1$ ).

$$\begin{cases} R_k = R_k(t) = \max(x_m, x_{m-1}, \dots, x_{m-k}) \\ \quad = \max(R_{k-1}, x_{t-k}); \\ Q_k = Q_k(t) = \max(x_m, x_{m+1}, \dots, x_{m+k}) \\ \quad = \max(Q_{k-1}, x_{t+k}). \end{cases} \quad (6)$$

**Step4** 对上一步的小数组做  $2(w-1)$  次比较. 这里对算法进行如下改进:

$$q = \lfloor \frac{w+1}{2} \rfloor = w/2 + (w \bmod 2)/2. \quad (7)$$

计算  $R_k$  和  $Q_k$  平均需要进行  $\max(w-q, q-1) + (w-1) + 1 = 1.5w - (w \bmod 2)/2$  次计算和比较,且小于  $2(w-1)$ .

**Step5** 窗口最大值的函数可表示为

$$t_k = \max(x_{j-k}, \dots, x_j, \dots, x_{j+w-k-1}) = \max(R_k, Q_{w-k-1}). \quad (8)$$

应用二叉树搜索定理可知,每个元素需要搜索  $\lceil \lg(w-1) \rceil / w$  次,进而可以在扩展矩阵  $Y$  内确定最大值的新矩阵  $Z$ ,故数组内每个元素平均比较次数为

$$1.5 + \lceil \lg(w-1) \rceil / w - (w \bmod 2)/(2w). \quad (9)$$

**Step6** 重复进行上述算法的 Step1 至 Step5, 即可得到二维窗口局部极值的分布矩阵  $\tilde{Z}$ , 即  $\tilde{Z}$  表示在某元素半径范围内的最大值的分布情况.

**Step7** 去掉分布矩阵  $\tilde{Z}$  中的扩充矩阵,且与  $X$  矩阵对应元素作减法,若有 0 值,便为  $w \times w$  窗口的局部最大值.

由于在垂直与水平方向上均进行了一次局部极值的求解,改进后的总的元素比较次数就为

$$3 + 2 \lceil \lg(w-1) \rceil / w - (w \bmod 2)/w. \quad (10)$$

图 2 为改进后的 HGW 算法、原 HGW 算法与普通算法实验结果对比. 可以看到,改进后的算法单个元素的比较次数将趋向于 3, 比其他两种算法都要少. 当窗口越来越大时,改进算法的性能优越性就越来越明显.

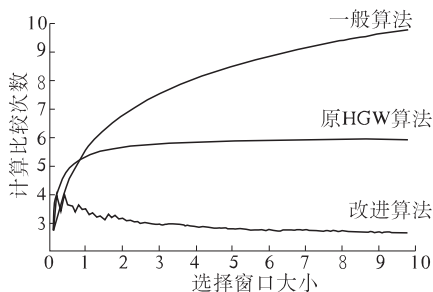


图 2 3 种算法的实验效果比较

Fig. 2 Experimental results compare the three algorithm

实验表明,改进后的 HGW 算法角点检测定位准确,自适应性好,角点提取速度更快,从而得到比原算法更理想的角点检测效果. 图 3~6 为本文算法对角点的偏移、lena 图像、旋转  $45^\circ$  以及加入噪声的检测效果.

图 3 表明,改进算法定位关键点角点更加准确. 图 4 和图 5 可看出,本文算法提取的角点均匀,对图像旋转的适应性好. 图 6 中加入了乘性噪声( $\sigma=0.02$ ),本文算法和原算法相比较,提取角点均匀合理,具有较强的抗噪能力. 表 1 为图像角点提取个数及平均运行时间的统计,运用快速窗口搜索算法的改进算法在运行速度上有了明显提高,虽然提取出的角点数量比原算法减少,但角点分布更加均匀,尤其对关键点角点检测没有漏检.

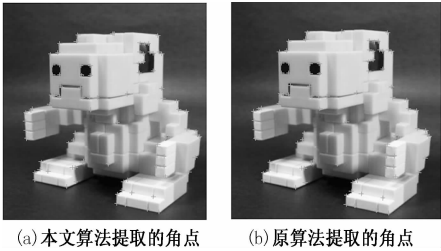


图 3 本文改进算法与原算法对克服角点偏移结果比较  
Fig.3 The improved algorithm with the original algorithm compare the result to overcome offset corner



图 4 本文改进算法与原算法对 Lena 图像实验结果比较  
Fig.4 The experimental results on the Lena image rotation 45 degrees compare



图 5 对 Lena 图像旋转 45 度的实验结果比较  
Fig.5 The experimental results on the Lena image rotation 45 degrees compare



图 6 加入乘性噪声( $\sigma=0.02$ )的实验结果比较  
Fig.6 The join multiplicative noise( $\sigma=0.02$ ) of the experimental results

表 1 检测 Lena 图像角点个数及平均运行时间统计  
Tab.1 Lena image corner detection of the number of points and the average run time statistics

算 法	原图像		旋转 45°		加乘性噪声	
	角点 个数	时间 /s	角点 个数	时间 /s	角点 个数	时间 /s
SURF 算法	379	1.21	257	1.36	1 330	1.85
改进算法	338	0.93	240	1.05	1 285	1.51

1.3 特征点描述

(1)特征点提取后,需要找出两幅图像特征点之间的对应关系,即特征匹配. Zernike 矩是一组正交矩,具有旋转不变性的特性,且 Zernike 矩可以构造任意高阶矩,所以识别效果优于其他方法. 笔者采用特征点邻域的不变矩作为匹配的特征,根据伪 Zernike 矩的不变性,使它具有更多的矩数量及更好的抗噪声性能.

(2)伪 Zernike 矩的选择. 数字图像的像素离散性质使得伪 Zernike 矩的计算产生误差,不同阶矩的计算精确度不同<sup>[5]</sup>,因此,必须对矩进行优化选择. 选择矩时主要考虑两点:1) 当矩的阶数高于某一个值  $N_{\max}$  时,计算量大且计算不再准确,实验中取 10 阶;2) 重复度为  $m=4i(i=0,1,2,\cdots)$  的矩计算是不准确的,应当去除. 而由于矩的共扼对称性,剩下的矩只有一半是独立的. 记选取的矩集合为  $S$ ,即  $S=\{A_{nm},n\leq N_{\max},m\geq 0,m\neq 4i\}$ .

2 图像匹配

2.1 图像的快速匹配

为了达到好的特征点匹配效果,采用“粗—精”的方法以提高特征点匹配的可靠性<sup>[6]</sup>. ①用 Bray-Curtis 相似性度量初步选取伪 Zernike 矩描述的相似匹配特征点对;②采用 RANSAC 算法进一步筛选伪匹配点对.

欧式距离度量通常被用于计算图像之间的相似度,然而,其不能对特征值进行归一化,会有一些高量级的特征点控制着低量级的特征点. 笔者运用 Bray-Curtis 相似性度量,规范其特征值并通过区分不同的相对特征值和绝对值,以计算相似特征点对的匹配度. Bray-Curtis 的相似性度量公式(11)提出了基于特征点的描述:

$$d_c(T,D)=\frac{\sum_{i=0}^{H-1}|f_i(T)-f_i(D)|}{\sum_{i=0}^{H-1}|f_i(T)+f_i(D)|}.$$

(11)

式中:  $f_i(T)$ 、 $f_i(D)$  表示特征向量的测试和数据图像;  $H$  是基于角点特征的数量。

Bray-Curtis 的相似性度量用于伪 Zernike 矩:

$$d_i(T, D) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \|Z_i^T - Z_i^D\|}{\sum_{i=0}^{M-1} \|Z_i^T\| + \|Z_i^D\|}. \quad (12)$$

式中:  $Z_i^T$  和  $Z_i^D$  是伪 Zernike 矩的两目标拼接图像, 考虑到局部和全局特征来描述它的形状, Bray-Curtis 用局部和全局距离特征相结合给出了整体相似度计算公式:

$$d(T, D) = w_c d_c(T, D) + w_r d_r(T, D). \quad (13)$$

式中:  $w_c$  和  $w_r$  代表权重的两图像的相似性度量. 计算相似度和 Bray-Curtis 相似性度量两个欧氏空间, 比较它们的性能. 这样可以计算出原图像中每一个特征点在目标图像中的匹配点, 当然这样的匹配对中会包含部分伪匹配点对。

## 2.2 精确匹配

RANSAC 算法根据一组包含异常数据的样本数据集, 计算出数据的数学模型参数, 并得到有效的样本数据. 利用齐次坐标, 两幅图像之间的投影变换模型可以用矩阵的形式来描述<sup>[7]</sup>:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

式中: 参数  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{21}$ ,  $m_{22}$  表示尺度缩放和旋转;  $m_{13}$  为水平方向位移;  $m_{23}$  为垂直方向位移。

以相邻两幅图像为例, 设匹配特征点对数目为  $N$ , 匹配特征点集合分别记为  $P(1, N)$ ,  $P(2, N)$ . 其中,  $P(1, N)$  为基准图像的特征点集合,  $P(2, N)$  为待匹配图像的特征点集合, 算法步骤如下:

**Step1** 从初始  $N$  对匹配特征点中随机选取 3 对匹配特征点;

**Step2** 由选取的 3 对匹配特征点计算出基准图像和待匹配图像间的相似变换矩阵  $M12$ , 利用变换矩阵  $M12$  将待匹配图像的特征点集合  $P(2, N)$  中剩余的  $N-2$  个特征点  $P(2, N-2)$  变换到基准图像坐标系下, 并记为  $P'(2, N-2)$ ;

**Step3** 计算变换后的特征点  $P'(2, N-2)$  与特征点  $P(1, N-2)$  之间的坐标误差;

**Step4** 从  $N$  对匹配特征点对中找出坐标误差在一定误差阈值内特征点对个数, 记为  $i$ ;

**Step5** 反复迭代 Step1 ~ Step4 步, 直至找到  $i$  最大的集合为最大内点集即为内点, 其余  $N-i$

为误匹配点即为外点. 用最小二乘法来减少误差, 去除了误匹配的影响, 最终得到空间变换矩阵  $M$ 。

## 3 图像融合

采用具有双线插值思想的渐入渐出方法<sup>[8]</sup>. 设  $f_1, f_2$  是两幅待拼接的图像, 将  $f_1$  和  $f_2$  在空间叠加, 则融合后的图像像素  $f$  可表示为

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y), & (x, y) \in f_1; \\ \beta f_1(x, y) + (1 - \beta) f_2(x, y), & (x, y) \in (f_1 \cap f_2); \\ f_2(x, y), & (x, y) \in f_2. \end{cases} \quad (15)$$

设图像间重叠区域宽度为  $L$ , 两幅图像重叠区  $x$  轴和  $y$  轴的最小和最大值分别为  $x_{\min}, x_{\max}$  和  $y_{\min}, y_{\max}$ , 则过渡因子的计算方法为

$$\beta = \frac{x_{\max} - x}{y_{\max} - y_{\min}}. \quad (16)$$

式中:  $\beta, (1 - \beta)$  表示过渡因子, 一般与重叠区域的宽度有关, 且  $0 < \beta < 1$ . 在重叠区域中,  $\beta$  由 1 渐变到 0,  $(1 - \beta)$  由 0 渐变至 1, 由此实现了重叠区域中由  $f_1$  到  $f_2$  的平滑过渡。

## 4 实验结果及分析

图 7~9 是应用本文算法和归一化相似性算法(WC)分别对正常图像、扭曲图像及不同角度的旋转图像拼接效果进行对比. 从图可看出, 当图像没有旋转、扭曲或者色度均匀时不同算法的拼接效果相差很小; 当图像有扭曲现象时本文算法对图像的拼接处理更优; 当图像旋转角度达到  $30^\circ$  时, NC 算法出现了图像失配情况, 而本文算法仍能够实现对图像的拼接. 实验结果表明: 本文算法对图像有更好的旋转适应性。

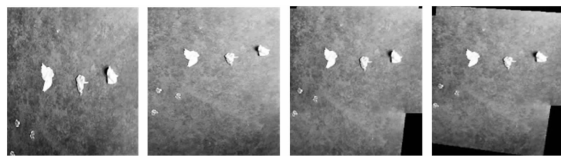


图 7 原图像采用本文算法与 NC 算法的拼接比较  
Fig.7 Original image using the algorithm of this paper compared with NC algorithm of joining together

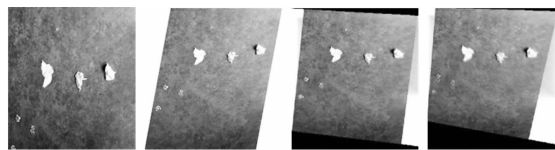


图 8 扭曲  $30^\circ$  图像采用本文算法与 NC 算法的拼接比较

Fig.8 Distorted  $30^\circ$  images using this algorithm and the algorithm of NC joining together

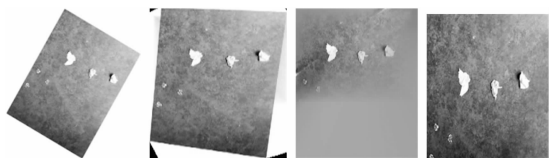


图9 旋转30度图像采用本文算法与NC算法拼接比较  
Fig.9 30° rotation image compared with NC algorithm  
joining together using the algorithm of this paper

## 5 结论

提出了一种 SPZMA 图像拼接算法,该算法利用改进的 SURF 算子获取图像中的特征点,计算以特征点为中心邻域窗口的伪 Zernike 矩,获得各个特征点邻域伪 Zernike 矩的 Bray-Curtis 相似性度量的初始匹配点对,利用 RANSAC 算法剔除伪特征点对,之后对输入图像作几何变换进行配准,融合重叠区域,获得良好的拼接图像。实验结果表明:提取特征点均匀、准确、迅速;图像配准时对平移、旋转以及噪声均具有鲁棒性。

## 参考文献:

[1] KNOPP J, PRASAD M, WILLEMS G, et al. Hough transform and 3D SURF for robust three dimensional classification[C]//Computer Vision-ECCV 2010 - 11th.

Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 589 - 602.  
[2] WONG T C K. Box filter structure; U. S. Patent, 7708,883[P]. 2010 - 05 - 04.  
[3] REININGHAUS J, KOTAVA N, GUNTHER D, et al. A scale space based persistence measure for critical points in 2d scalar fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2011, 17(12): 2045 - 2052  
[4] HEROUT A, HRADIŠ M, ZEMČEK P. EnMS: early non-maxima suppression[J]. Pattern Analysis and Applications, 2012, 15(2): 121 - 132.  
[5] 纪东升. 基于特征点的图像拼接算法研究[D]. 兰州:兰州理工大学计算机与通信学院, 2011.  
[6] SATTTLER T, LEIBE B, KOBELT L. Fast image-based localization using direct 2D-to-3D matching[C]//IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Spain:IEEE Press, 2011: 667 - 674.  
[7] YANG B, LI S. Multifocus image fusion and restoration with sparse representation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(4): 884 - 892.  
[8] ARIVAZHAGAR S, ANISHA J P. Image fusion using spatial unmixing[C]//Signal Processing Image Processing & Pattern Recognition (ICSIPR), 2013 International Conference on IEEE. Coimbatore: IEEE Press, 2013: 238 - 242.

## The Research of Image Mosaic Algorithm Based on SURF and Pseudo-Zernike Moments

LI Xi-yan<sup>1</sup>, JI Dong-sheng<sup>2</sup>, WU Chong-zheng<sup>1</sup>

(1. Finance and Economics Department of Information Engineering, Zhengzhou Chenggong College, Zhengzhou 451200, China;  
2. School of Information Science & Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** The feature points matching image mosaic algorithm was found to be sensitive to rotations and noise, and an automatic image mosaic method based on SURF and Pseudo-Zernike moments algorithm was proposed. The improved SURF feature points detector was used to get the corners, then the pseudo-Zernike moments defined on the interest point neighborhood were computed. Through comparing the Bray-Curtis similarity measure of the pseudo-Zernike moments to extract the initial feature points pair, then the spurious feature points pair were rejected by RANSAC algorithm, then by means of using the geometric transform of input images for registration, the overlapping region of two images was fused and the image Mosaic was finished. Improved SURF feature detection algorithm extract feature points are uniform, accurate and fast. The proposed method of image registration is robust to rotation, translation and noise.

**Key words:** SURF; pseudo-zernike moments; RANSAC algorithm; image mosaic



配置 HRB500 钢筋的混凝土桥墩滞回性能研究

戎 贤<sup>1,2</sup>, 宋 鹏<sup>1</sup>, 张健新<sup>1</sup>, 刘 平<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

**摘 要:** 对 4 根配置 HRB500 钢筋的混凝土桥墩抗震性能进行了拟静力试验的研究, 对其在低周往复荷载作用下的破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化进行分析, 研究钢筋强度、箍筋间距、轴压比对桥墩抗震性能的影响规律. 结果表明, 增大钢筋强度对提高构件的承载能力和变形能力效果显著, 配箍率对构件承载能力和变形能力的影响不大, 轴压比的增大虽可以显著提高构件承载能力但却不能提高构件的变形能力.

**关键词:** HRB500 钢筋; 桥墩; 轴压比; 箍筋间距; 抗震性能

**中图分类号:** TU 375.3      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.018

0 引言

随着社会的发展, HRB500 钢筋因其具有强度高、延性好、社会经济效益显著等一系列优点而得到了更加广泛的应用<sup>[1-2]</sup>. 在地震作用下桥墩极易发生破坏, 因此, 在桥墩中采用高强钢筋替换部分纵筋和箍筋, 利用高强钢筋弹性模量与普通钢筋相近而强度高的材料特性来改善桥墩在强地震作用下损伤后的耗能能力具有十分重要的理论和工程实际意义<sup>[3-4]</sup>. 为推广 HRB500 钢筋在混凝土桥墩中的应用, 笔者对配置 HRB500 钢筋的混凝土桥墩进行了拟静力试验的研究, 分析箍筋间距、轴压比对桥墩抗震性能的影响规律<sup>[5-6]</sup>.

1 试验概况

1.1 试验方案设计

本试验设计了 4 根钢筋混凝土桥墩, 桥墩均由墩身和基座两部分组成. 墩身截面尺寸为 300 mm × 300 mm, 墩身净高 900 mm. 为方便施加水平荷载, 柱端设置高为 240 mm, 截面尺寸为 300 mm × 300 mm 的方形加载头, 柱头内钢筋加密, 以防止柱头局部破坏. 笔者为了体现单位体积内的箍筋量, 引用了配箍特征值这一在高强钢筋和高强混凝土中的常用概念, 而箍筋间距则是配箍率的重要影响因素, 具体试件设计参数见表 1, 试件配筋情况如

图 1 所示. 设计混凝土强度为 C50, 立方体抗压强度实测值为 48.1 MPa, 轴心抗压强度实测值为 33.2 MPa. 保护层厚度 20 mm, 试验纵筋采用直径为 16 mm 的 HRB335 和 HRB500 两种钢筋, 箍筋采用直径为 10 mm 的 HPB300 和 HRB500 两种钢筋, 其具体力学性能指标如表 2 所示.

表 1 试件设计参数  
Tab. 1 Experimental parameters of specimens

构件编号	轴压比	箍筋间距/mm	纵筋强度/(N · mm <sup>-2</sup> )	箍筋强度/(N · mm <sup>-2</sup> )
CJ1	0.07	80	335	300
CJ2	0.07	80	500	500
CJ3	0.07	120	500	500
CJ4	0.14	120	500	500

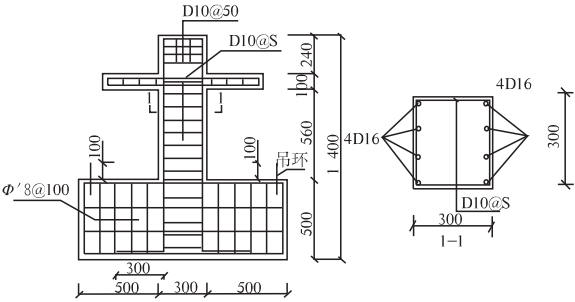


图 1 试件尺寸及配筋 (mm) (图中 s 代指箍筋间距)  
Fig. 1 Dimensions and reinforcement of specimen

收稿日期:2014-05-07;修订日期:2014-09-19  
基金项目:天津市自然科学基金项目(12JCYBJC14100);河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2011052);河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2012041).  
作者简介:戎贤(1965-),男,河北定州人,河北工业大学教授,博士,博士生导师,主要从事结构抗震研究.

表 2 钢筋力学性能指标  
Tab.2 Property indexes of steel MPa

钢筋种类	屈服强度	极限强度	弹性模量
HPB300 级 10 mm	352	543	$1.95 \times 10^5$
HRB500 级 10 mm	585	750	$1.92 \times 10^5$
HRB335 级 16 mm	383	546	$1.95 \times 10^5$
HRB500 级 16 mm	600	756	$1.92 \times 10^5$

1.2 试验加载方案

本试验加载采用力 - 位移混合控制制度进行. 在墩柱顶端使用液压千斤顶施加 190 kN 和 380 kN 两种竖向荷载,在加载头上用液压千斤顶施加水平荷载,并加装荷载传感器,由 DH3815 静态联机系统采集柱顶荷载 - 位移曲线,具体加载步骤主要分为两个阶段:第一个阶段为荷载控制阶段,在试件发生屈服前,通过控制对试件施加的荷载的大小来进行每级的加载,每个荷载控制等级循环一次. 第二个阶段为位移控制阶段,即在试件发生屈服后,通过控制试件加载位置处位移的大小来划分各荷载等级,每级位移荷载循环 3 次,直至荷载下降至极限荷载的 85% 后,认为试件破坏,停止加载. 具体加载装置如图 2.

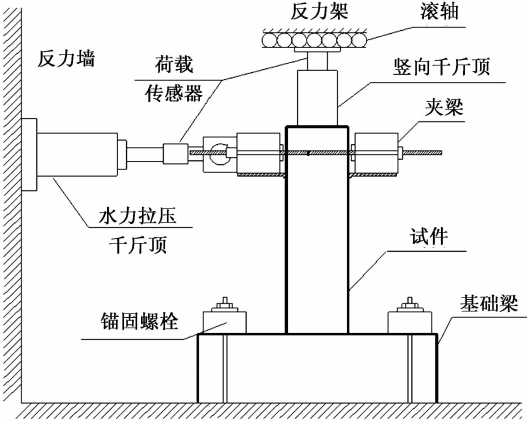


图 2 试验装置简图  
Fig.2 Test device

2 破坏特征

4 根试件破坏时均呈现弯曲剪压破坏,试验破坏形态如图 3 所示. 试件在低周反复荷载作用下,开始阶段受拉侧墩底首先出现水平裂缝,随着荷载的增加,原有裂缝逐渐扩展,沿墩高方向出现新的裂缝,墩柱侧面开始出现斜向裂缝,墩角处混凝土出现剥落;当钢筋屈服时,试件进入弹塑性阶段,试件出现经典 X 形裂缝. 随着位移的不断增大,受压侧混凝土被压碎,试件承载力也大幅下降,试件破坏.

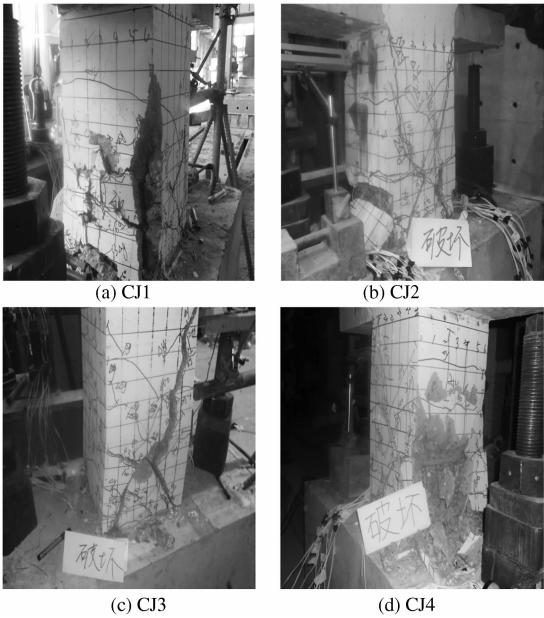


图 3 试件破坏形态  
Fig.3 Failure pattern of specimens

3 试验结果分析

3.1 滞回特性

滞回曲线是研究结构试件抗震性能的主要指标,它综合反映了试件在加载中任意时刻的承载及变形能力、耗能能力及刚度退化现象<sup>[7]</sup>. 4 种试件的滞回曲线如图 4 所示.

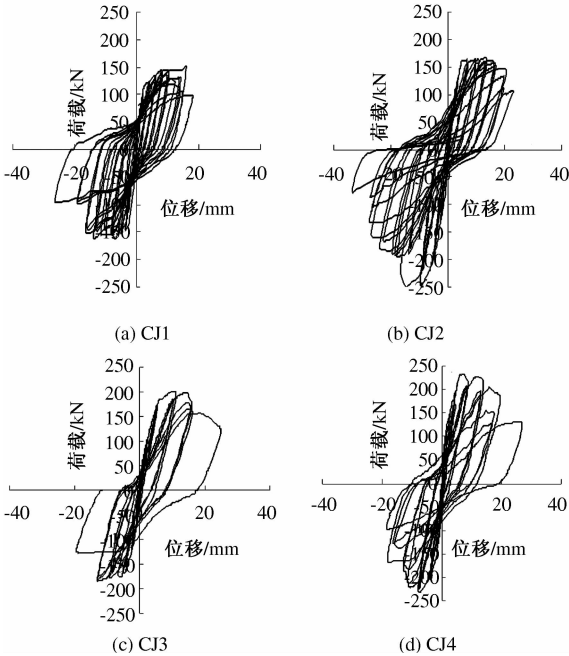


图 4 滞回曲线  
Fig.4 Hysteretic curves of load-displacement

(1)比较 CJ1 试件和 CJ2 试件的滞回曲线可知: CJ1 试件滞回环呈弓形,包围面积较小,极限

承载能力较低,CJ2 试件滞回环明显更加饱满,包围面积明显增大,极限承载力和最大位移都有相应提高,说明提高钢筋强度可以显著提高试件的承载能力和耗能能力,使试件的抗震性能得到提高.

(2)比较 CJ2 试件和 CJ3 试件的滞回曲线可知:CJ2 试件的滞回曲线的形态较为饱满,滞回环的面积明显较大,耗能能力明显增强,并且其破坏前经历的变形量也大幅增加,使其延性性能增强,但其极限承载能力未有明显提高,表明增大配箍特征值可使构件的抗震性能得到极大改善,但对试件极限承载能力影响不大.

(3)比较 CJ3 试件和 CJ4 试件的滞回曲线可知:CJ3 试件虽然滞回环较饱满但其承载力偏低,说明轴压比小的构件比轴压比大的构件滞回曲线更加饱满,后期变形能力更大,抗震性能更好.提高轴压比可以提高试件极限承载能力但不利于结构抗震能力的提高.

3.2 骨架曲线

骨架曲线是滞回曲线上同向(拉或压)各次加载的荷载极值点依次相连得到的包络线<sup>[8]</sup>.它是每次循环的荷载位移曲线达到的最大峰点的轨迹,是反应结构抗震性能的重要依据.4 种试件骨架曲线如图 5 所示.

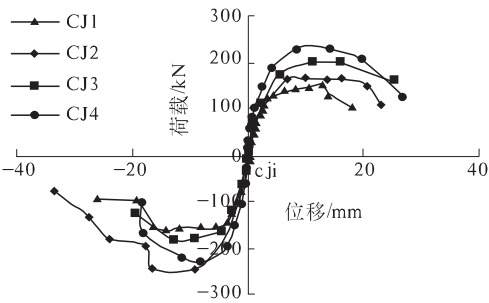


图 5 骨架曲线  
Fig.5 Skeleton curves

通过对比 CJ1 和 CJ2 试件骨架曲线可知,纵筋和箍筋均配置高强钢筋的 CJ2 试件的正向极限承载力和反向极限承载力分别增加了 15% 和 53%,极限位移分别增加了 28% 和 28.4%.通过对比 CJ2 和 CJ3 试件骨架曲线可知,两试件正反向的极限位移与极限荷载有不同程度变化,但从总体来看,增大箍筋间距的 CJ3 试件的极限承载能力和极限位移没有明显下降,造成正反向变化不一致的原因为试件浇筑时出现偏差或是加载时出现偏心.通过对比 CJ3 和 CJ4 试件骨架曲线可知,增大轴压比的 CJ4 试件的正反向的极限承载

能力分别增加了 16.5% 和 26.2%,但极限位移却变化不大.综上情况表明:钢筋强度的增加可以提高构件的承载能力和位移延性,配箍率的改变对承载能力和位移延性的影响不大,轴压比的增大可以显著提高构件承载能力,但对位移延性没有提高作用.

3.3 刚度退化

等效刚度是指本次循环的荷载最大值点(即骨架点)与坐标原点连线的斜率,故等效刚度又称为割线刚度,通常将其作为刚度退化的量化指标.在构件加载过程中,构件位移持续增大,刚度也逐渐降低,这种现象称为刚度退化<sup>[9]</sup>.各试件刚度退化曲线如图 6 所示

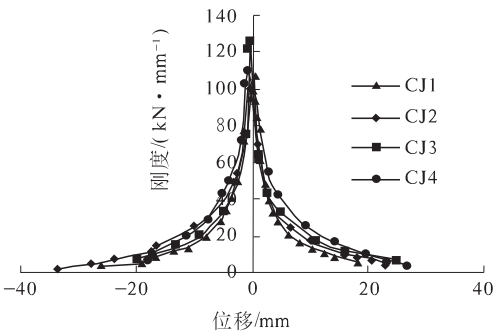


图 6 刚度退化曲线  
Fig.6 Curves of stiffness degradation

由 4 种试件刚度退化曲线对比可知,各试件加载过程中刚度退化趋势大致相同,在加载初期,刚度退化迅速;在加载后期,各试件刚度退化趋于平缓.通过对比 CJ1 和 CJ2 试件刚度退化曲线可知,配置高强钢筋的 CJ2 试件的初始刚度增加了 77%,且在加载后期,其刚度退化较 CJ1 试件明显放缓.通过对比 CJ2 和 CJ3 试件刚度退化曲线可知,加大箍筋间距的 CJ3 试件的初始刚度减小了 50.4%,但两试件在加载后期的刚度退化没有明显区别.通过对比 CJ3 和 CJ4 试件刚度退化曲线可知,增大轴压比的 CJ4 试件虽然初始刚度增加了 140%,但其后期刚度退化也较快.

4 结论

(1)高强钢筋的配置可以明显改善构件的滞回性能,使构件的承载能力和耗能能力以及初始刚度显著提高,从而极大地提高了构件的抗震性能.

(2)配箍特征值的增大使构件的滞回曲线更加饱满,耗能能力明显增强,极大地改善了构件的抗震性能,但会使其初始刚度出现一定程度的降

低,对构件的极限承载能力影响不大.

(3)轴压比的增大虽然可以显著提高构件的初始刚度和极限承载能力,但其耗能能力和位移延性明显减弱.

参考文献:

[1] SUMPTER M S,SANI H,RIZKALLA P Z. Behavior of gigh-performance steel as shear reinforcement for concrete beams [ J]. ACI Structural Journal, 2009, 106 (2):171 - 177.

[2] BJORHOVDE R. Development and use of high performance steel [ J]. Journal of Constructional Steel Research,2004,60(3 - 5):393 - 400.

[3] 阎石,肖潇,阐立新,等. 高强钢筋高强混凝土柱恢复力模型[ J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2005,21(2):51 - 55.

[4] 王晓锋,傅剑平,朱爱萍,等. 配置 HRB500 级钢筋

混凝土柱抗震性能模拟分析[ J]. 建筑结构学报, 2011,32(8):12 - 18.

[5] 周勇. 公路桥梁桥墩延性性能初步研究[ D]. 重庆:重庆交通大学土木建筑学院,2006.

[6] 孙卓,李建中,阎贵平,等. 钢筋混凝土单柱式桥墩抗震性能试验研究[ J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(2):160 - 164.

[7] 张勤,贡金鑫. 弯剪破坏钢筋混凝土柱的荷载—变形关系[ J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(3):78 - 84.

[8] 刘金升,苏小卒,赵勇. 配 500MPa 细晶钢筋混凝土柱低周反复荷载试验[ J]. 结构工程师,2009,25(3):135 - 141.

[9] 戎贤,巩雪娇,李艳艳. 配置 HRB500 钢筋的混凝土 L 形柱滞回性能试验研究[ J]. 河北工业大学学报, 2012,41(5):84 - 87.

Experimental Research on Hysteretic Behavior of  
HRB500 Reinforced Concrete Piers

RONG Xian<sup>1,2</sup>, SONG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Jian-xin<sup>1</sup>, LIU Ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Based on the quasi-static test study of seismic performance of HRB500 reinforced concrete piers , influence law about steel strength, the spacing, the axial compression ratio on seismic behavior was obtained according to the analysis of its failure characteristics, hysteresis curves, skeleton curves, stiffness degradation under low cyclic loads. The results show that increasing steel strength can improve components’ bearing capacity and deformation capacity obviously, stirrup ratio can not influence members’ bearing capacity and deformation capacity, axial compression ratio can improve components’ bearing capacity, but on the other hand, it is useless to improve components’ deformation capacity.

**Key words:** HRB500 rebar; bridge pier; axial compression ratio; spacing; seismic performance

文章编号:1671-6833(2014)06-0078-04

# 混凝土桥面铺装用环氧沥青的制备与性能研究

丛培良<sup>1,2</sup>, 刘建飞<sup>1,2</sup>, 赵志强<sup>1,2</sup>, 陈拴发<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 针对环氧沥青在混凝土桥面铺装材料中的应用, 制备了环氧沥青, 研究了不同树脂掺量对环氧沥青结合料黏度特性、高低温性能及环氧沥青混合料力学性能、低温抗裂性和高温稳定性的影响. 结果表明, 环氧树脂的掺入可以改善沥青混合料的路用性能和力学性能, 随着掺量的增加, 环氧沥青的固化反应进程加快, 高温性能和抗疲劳性能增强, 劲度模量变大, 蠕变速率减小, 低温抗裂性降低, 沥青混合料的抗疲劳性能和高温稳定性提高; 综合分析, 30% 为环氧树脂的最佳掺量.

**关键词:** 环氧沥青; 桥面铺装材料; 路用性能; 树脂掺量; 力学性能

**中图分类号:** U416.217 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.019

## 0 引言

桥面铺装层作为桥面板与行车直接接触的表面层, 与桥梁结构协同变形, 保护桥面板不受车辆轮胎的直接磨耗, 防止主梁遭受雨水的侵蚀<sup>[1]</sup>, 并且具有行车平稳、舒适、便于维修等特点, 同时能够有效地缓和行车荷载对桥面的冲击作用, 因此, 在桥面铺装中应用越来越广泛. 桥面铺装质量的好坏和使用耐久性将直接影响到车辆的行驶质量和路面的使用寿命. 沥青铺装层直接承受行车荷载的垂直和水平作用, 同时又受到环境温度、湿度变化、雨雪和日照等因素的综合影响, 因此, 沥青铺装层是桥梁整体结构中容易产生衰变和损坏的薄弱部位<sup>[2]</sup>, 所以要求桥面铺装层要具有抗车辙性能好、行车舒适感强、表面抗滑、封层不透水且刚度好等特点<sup>[3]</sup>. 目前已有的环氧沥青混合料铺装层具有铺装强度高, 整体性好, 高温时抗塑流和永久变形能力强, 低温抗裂性能和抗疲劳性能好的特点, 但是环氧沥青价格较高, 关键技术难掌握, 配制工艺复杂<sup>[4]</sup>, 影响因素多. 笔者旨在针对环氧沥青的制备工艺, 结合目前我国混凝土桥面常见的车辙、开裂等破坏类型, 制备环氧沥青并探究不同环氧树脂掺量对环氧沥青混合料路用性能和力学性能的影响规律.

## 1 材料制备与实验方法

### 1.1 原材料及制备

沥青: 针入度等级为 90 号道路沥青, 15℃下延度大于 150 cm, 软化点为 45.1℃, 相对密度为 1.033. 环氧树脂: 双酚 A 型环氧树脂(E-51), 环氧值为 0.52 mol/100 g, 有机氯含量小于 0.02 mol/100 g, 无机氯含量小于 0.001 mol/100 g, 挥发分小于 1.8%, 黏度 $\leq 2.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (25℃). 相容剂与固化剂: 实验室自制. 环氧树脂和固化剂先按照 62:38 的质量比例混合, 然后再与基质沥青按一定的比例混合, 在一定的温度条件下固化成型, 形成环氧沥青.

### 1.2 实验方法

通过黏度试验测试不同环氧树脂掺量和老化时间对沥青结合料性能的影响; 通过动态剪切模量来评价不同环氧树脂掺量的沥青结合料抗车辙、抗疲劳开裂<sup>[5-6]</sup>和高温稳定性等性能; 利用 12℃和 18℃的 BBR 试验来衡量环氧沥青结合料的低温性能; 测试沥青混合料的稳定度、动稳定度、劈裂强度, 并选择 -10℃和 -15℃的抗弯拉试验来评价不同掺量的环氧树脂对沥青混合料路用性能的影响.

收稿日期: 2014-06-07; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208050); 交通运输部应用基础研究项目(2013319812020)

作者简介: 丛培良(1978-), 男, 内蒙古赤峰人, 长安大学副教授, 博士, 主要研究沥青基道路建筑材料、固体废弃物再生利用及道路养护材料与技术等, E-mail: congpl@chd.edu.cn.

2 实验结果与分析

2.1 环氧沥青结合料性能的研究

2.1.1 不同树脂掺量下环氧沥青的黏度

试验采用布鲁克菲尔德(brookfield)黏度仪,测试 10%~40% (质量分数,下同)树脂掺量的环氧沥青结合料在 160℃ 条件下的黏度随时间变化的规律.在黏度试验中转子 28#,转速 100 r/min.结果如图 1 所示.

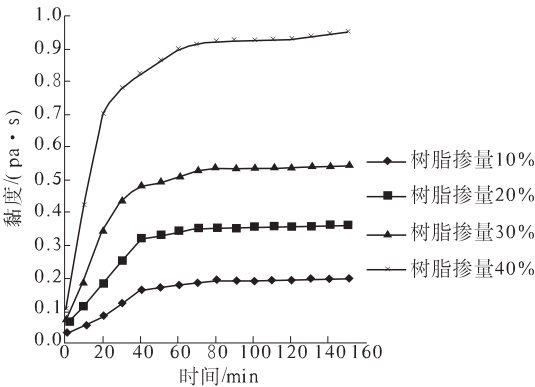


图 1 不同树脂掺量下环氧沥青 160 °C黏时曲线

Fig.1 Viscosity and time relation curve of epoxy asphalt which has different dosage of resin viscosity at 160 °C

从图 1 可知,在 10%~40% 的树脂掺量范围内,40 min 之前,4 种掺量下环氧沥青的黏度都随时间的增加而增大,但是在不同的时间段增长速率不同.可以发现,在 0~40 min 内曲线斜率增大,说明黏度快速增长,随着环氧树脂掺量的提高,其黏度增长幅度也在逐渐提高,在 60 min 以后,黏度增长缓慢.当掺量为 40% 时,在 0~40 min 这一时间段内环氧沥青黏度<sup>[7]</sup>的增长速度明显大于另外 3 种掺量.在 160 °C 试验温度下,环氧沥青 2.5 h 后的黏度值是随树脂掺量的增加而增大的.可以看出,在一定的反应温度和一定的树脂掺量范围内,环氧树脂数量的增加会加速环氧沥青的固化反应进程.

2.1.2 40% 树脂掺量不同温度下的黏时曲线

试验测试了环氧树脂掺量为 40% (质量分数)的环氧沥青,在 140 °C、160 °C 和 180 °C 下黏度随时间变化的规律,分析了环氧沥青结合料对温度和时间的敏感性,试验结果如图 2 所示.由图 2 可以看出,3 个温度下,温度越高黏度值越小,但随时间的增加而增长,在 50 min 后黏度值基本不再变化.

2.2 不同树脂掺量下环氧沥青的动态剪切模量

采用动态剪切流变仪(DSR)测试不同环氧树脂掺量下沥青的动剪切模量.首先将不同树脂掺

量的环氧沥青在 150 °C 烘箱中养护 2.5 h 后,再在 60 °C 条件下养护 1 d 后进行试验.DSR 的试验温度范围设定为 60~90 °C.环氧树脂的掺量对沥青相位角的影响如表 1 所示.

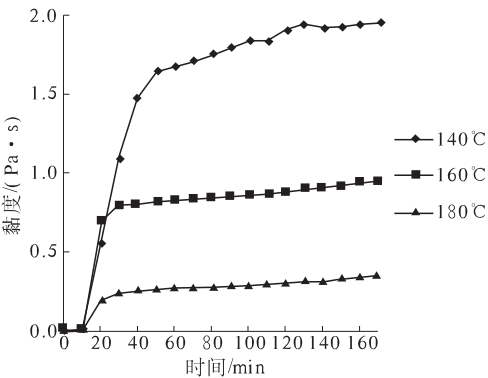


图 2 40% 树脂掺量不同温度下的黏时曲线

Fig.2 Viscosity and time relation curve of epoxy asphalt which the dosage of resin is 40%

表 1 环氧树脂的掺量对沥青相位角的影响

Tab.1 The influence of the dosage of epoxy resin for asphalt phase angle (°)

温度/ ℃	环氧树脂掺量				
	0%	10%	20%	30%	40%
64	88.47	87.19	83.19	77.92	69.13
70	88.72	87.98	84.84	81.07	70.15
76	—	88.27	85.80	83.20	70.07
82	—	—	86.43	84.71	69.53
88	—	—	—	85.78	70.08

在复数劲度模量相同情况下,相位角越小,沥青的高温稳定性就越好,同时抗疲劳开裂能力也越强.由表 1 可知,在同一温度下,相位角随着树脂掺量的增加而变小.这表明随着环氧树脂的增加,沥青由原来的黏弹性材料逐渐向弹性材料转变,高温性能和抗疲劳性能也逐渐增强.在同一试验温度下,随着环氧树脂掺量的增大,相位角逐渐变小,但下降幅度并不稳定,掺量由 10% 到 30% 时,相位角变化并不是很大,但当掺量为 40% 时,相位角降低许多.在同一树脂掺量下,不同温度的相位角的变化趋势不明显,尤其是在树脂掺量为 40% 时,相位角变化幅度很小.这说明在树脂掺量为 40% 时,环氧沥青对高温变化的敏感性很低,其高温稳定性优良.

环氧树脂对车辙因子的影响如表 2 所示.从表 2 可以看出,相同试验温度下,随着环氧树脂掺量的增加,车辙因子变大,抗车辙能力逐渐增强;同一树脂掺量下,随着温度的上升,抗车辙能力逐渐降低;与基质沥青相比,环氧沥青的车辙因子较



基质沥青有较大幅度的提高.

表 2 环氧树脂的掺量对车辙因子的影响

Tab.2 The influence of the dosage of the epoxy resin for rut factor

温度/ ℃	环氧树脂掺量				
	0%	10%	20%	30%	40%
64	1.09	2.17	3.80	7.26	10.74
70	0.54	1.04	1.88	3.72	6.22
76	—	0.61	1.04	1.96	4.06
82	—	—	0.63	1.09	2.88
88	—	—	—	0.66	2.06

2.3 环氧沥青结合料的低温性能

采用 BBR 小梁试验研究环氧沥青在 -12 ℃ 和 -18 ℃ 下的低温抗裂性能,如表 3 所示. 试验时先将环氧树脂和自制固化剂在 60 ℃ 下充分混合,然后把基质沥青加热到 145 ℃ 时,两者混合后在搅拌器中匀速搅拌 5 min 后,浇入 BBR 试验试模中,然后在 150 ℃ 烘箱中养护 2.5 h,60 ℃ 烘箱中养护 4 d,当小梁充分固化后脱模进行试验.

表 3 不同树脂掺量环氧沥青 -18 ℃ 和 -12 ℃ BBR 试验结果

Tab.3 The test results of BBR at -18 ℃ and -12 ℃ for epoxy asphalt of different dosages of resin

环氧沥青掺量/ %	试验温度 -18 ℃			试验温度 -12 ℃		
	劲度模量/MPa	蠕变速率 $m$	挠度/mm	劲度模量/MPa	蠕变速率 $m$	挠度/mm
10	379	0.301	0.198	163	0.384	0.460
20	454	0.279	0.173	189	0.400	0.395
30	487	0.219	0.163	218	0.353	0.350
40	498	0.184	0.156	347	0.171	0.214
0	345	0.306	0.231	116	0.385	0.659

从表 3 的 -18 ℃ BBR 试验可以看出,随着树脂掺量的增加,结合料的劲度模量逐渐变大,蠕变速率逐渐减小,低温抗裂性降低. BBR 试验结果显示, -18 ℃ 时基质沥青和树脂掺量 10% 的环氧沥青的劲度模量和蠕变速率相差不大,这表明少量环氧树脂对沥青的改性效果不明显. 当树脂含量在 20% ~ 30% 时,劲度模量增长很快,表明环氧树脂对沥青性能的影响明显,但树脂掺量 40% 时劲度模量变化不是很大. 所以,环氧树脂掺量对沥青的改性效果有较大影响,但并不是树脂掺量越大性能越好.

另外, -12 ℃ 的 BBR 试验结果表明,环氧树脂掺量为 40% 的沥青的劲度模量和蠕变速率不能满足规范  $s \leq 300$  MPa 且  $m \leq 0.3$  的要求. 在 0% ~ 40% 的掺量范围内,劲度模量随着掺量的增加而增大;与掺量 30% 相比,掺量为 40% 时环氧

沥青各指标的变化幅度很大.

对比表 3 数据可知,试验温度从 -18 ℃ 变化到 -12 ℃,掺量从 10% 到 40%,环氧沥青的蠕变速率和劲度模量上升的幅度均小于基质沥青. 因此可以认为,环氧沥青在实际使用过程中,温度敏感性小于基质沥青.

2.4 环氧沥青混合料的性能研究

依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20—2011)<sup>[8]</sup>,通过马歇尔稳定度试验和 25℃ 劈裂试验,测试环氧沥青混合料的强度. 结果如图 3 和图 4 所示.

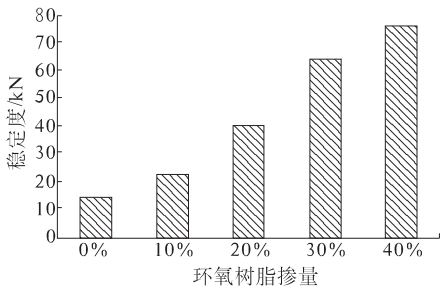


图 3 环氧树脂掺量对沥青混合料稳定度的影响

Fig.3 The effect of Epoxy resin dosage on the stability of the asphalt mixture

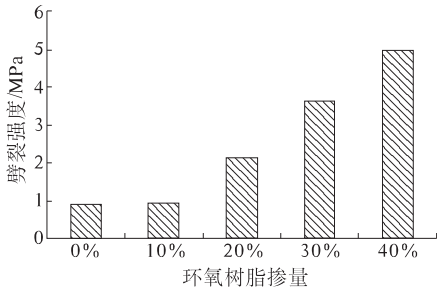


图 4 环氧树脂掺量对沥青混合料劈裂强度影响

Fig.4 The effect of epoxy resin dosage on the cleavage strength of the asphalt mixture

通过图 3 和图 4 可以看出,环氧沥青混合料的强度随树脂掺量的增加而增大,与基质沥青混合料相比,劈裂强度和稳定度有了大幅提高,其中掺量为 10% 时,较基质沥青混合料劈裂强度变化不大,但当掺量达到 40% 时,混合料的稳定度和劈裂强度增长非常明显. 说明,环氧树脂的掺加可以使沥青混合料的相关性能得到大幅度提高.

通过 -10 ℃ 和 -15 ℃ 的小梁低温弯曲试验<sup>[9]</sup>来评测环氧沥青混合料低温抗裂性能. 试验结果如表 4 所示.

通过表 4 可知,环氧沥青混合料在 -10 ℃ 和 -15 ℃ 的低温弯曲试验中,环氧树脂的掺入使混合料的抗弯拉强度和最大弯拉应变得提高,而劲度模量在树脂掺量为 10% 时出现了拐点,之后掺量越大,劲度越大. 综合分析在低温环境下,环

氧沥青混凝土的变形能力比较好. 在同一树脂掺量下,沥青混合料从  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,其最大弯拉应变和抗弯拉强度有所降低,劲度模量有所提高,表明温度越低脆性越大. 但当在树脂掺量为

10% 时,环氧沥青混合料的性能与基质沥青相差不多,在其余掺量条件下环氧沥青混合料的抗弯拉强度都优于基质沥青. 表明环氧沥青混合料具有刚度大、强度高的特点.

表 4  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下小梁低温弯曲试验结果

Tab. 4 The test results of low temperature bending for asphalt mixture at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$

沥青掺量/%	树脂掺量/%	试验温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$			试验温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$		
		抗弯拉强度/MPa	劲度模量/MPa	最大弯拉应变	抗弯拉强度/MPa	劲度模量/MPa	最大弯拉应变
100	0	7.74	5 097	1 425	8.68	6 703	1 169
90	10	8.70	4 265	2 038	7.24	4 429	1 642
80	20	14.84	5 986	2 119	10.34	6 467	1 729
70	30	17.95	6 907	2 582	15.98	7 740	2 213
60	40	21.21	8 597	2 472	18.59	9 508	2 001

采用车辙试验来评价环氧沥青混合料的高温稳定性,如图 5 所示. 由图 5 可以看出,随着环氧树脂掺量的增加,混合料的动稳定度值不断增大,当掺量为 10% 时,环氧沥青混合料的动稳定度值达到 13 000 次/mm,当掺量为 40% 时,动稳定度将近 60 000 次/mm,大大超过沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求的 3 000 次/mm. 通过折线走势可以明显看出,随着环氧树脂的掺量的增加,混合料的动稳定度几乎成线性增长,这就表明环氧树脂的掺量对沥青混合料的高温稳定性影响很大,掺量越大高温稳定性能好.

料,且混合料的强度和动稳定度随树脂掺量的增加而增大.

(4) 在 10% ~ 40% 树脂掺量范围内,除掺量 10% 外,环氧沥青混合料的抗弯拉强度都优于基质沥青,且随着环氧树脂含量的提高,沥青混合料抗疲劳性能迅速提高,但当环氧树脂含量超过 30% 时,沥青混合料抗疲劳性能提升趋缓.

(5) 综合分析当环氧树脂掺量为 30% 时,环氧沥青性能最好.

参考文献:

[1] 刘澍. 高模量沥青混凝土桥面铺装材料性能研究及在甘肃高速公路中的应用[D]. 重庆:重庆交通大学土木建筑学院,2012.

[2] 赵志强. 水泥混凝土桥面铺装用环氧沥青及其混合料性能研究[D]. 西安:长安大学材料科学与工程学院,2012.

[3] 王少华. 连续梁桥混凝土桥面铺装层的结构设计研究[D]. 济南:山东大学土建与水利学院,2008.

[4] 刘郁贞. 沥青混凝土桥面铺装材料与技术研究[D]. 太原:太原理工大学建筑与土木工程学院,2009.

[5] 罗桑,钱振东. 环氧沥青混凝土铺装材料低温性能研究[J]. 公路,2010;156-160.

[6] 徐敏,李宇峙,张平. 环氧树脂混凝土的疲劳试验研究[J]. 中外公路,2009(2):200-203.

[7] 闵召辉,黄卫. 环氧沥青的黏度与施工性能研究[J]. 公路交通科技,2006,23(8):5-8.

[8] 中华人民共和国交通部. JTJ E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[9] 于天来,唐涛,吴思刚. 改性沥青伸缩结合料与混合料低温性能研究[J]. 中国公路学报,2005,18(2):18-231.

(下转第 99 页)

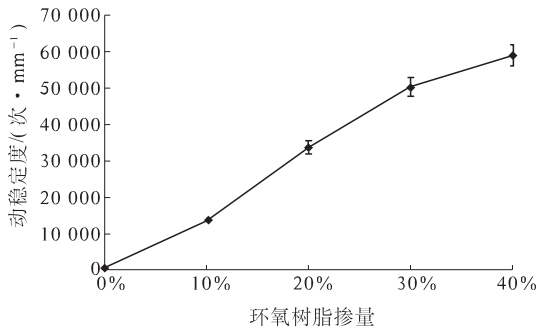


图 5 不同树脂掺量对环氧沥青混合料动稳定度影响  
Fig. 5 The effect of epoxy resin dosage on the dynamic stability of the asphalt mixture

3 结论

(1) 黏度试验表明,环氧沥青对温度的敏感程度要大于时间,在一定的反应温度和一定的树脂掺量范围内,环氧树脂数量的增加会加速环氧沥青的固化反应进程.

(2) DSR 和 BBR 试验表明,随着环氧树脂的增加,环氧沥青的高温性能和抗疲劳性能也逐渐增强,劲度模量变大,蠕变速率减小,低温抗裂性降低.

(3) 环氧沥青混合料的高温性能和低温性能优异,稳定度和劈裂强度都远大于普通沥青混合

台风-波浪耦合作用下钢管桩施工平台力学行为分析

李胜利, 胡亚楠, 王东炜

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对阳江核电跨明渠大桥施工钢栈桥和支架平台在台风和波浪力等荷载作用下的安全问题, 利用通用有限元分析软件 ANSYS, 建立栈桥和平台的有限元模型, 对栈桥和平台结构进行力学行为计算. 结果表明: 三种荷载组合作用下平台板稳定性和钢管桩的强度都满足要求, 在极端风荷载和波浪力共同作用下, 平台的变形也不是太大, 但灌注桩两侧钢管桩支撑较少, 稳定性较差.

关键词: 钢管桩; 贝雷梁; 台风; 波浪荷载; 有限元

中图分类号: U445.4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.020

0 引言

施工平台为施工临时结构且处于深水区, 设计受到可行性、水位变化、周期、施工工艺以及经济效益等众多因素的制约, 修建于近海的还要考虑海潮、波浪、台风、海水腐蚀等环境因素, 施工平台事故造成了大量的经济损失<sup>[1-3]</sup>. 钢管桩施工平台结构简单, 相对固定, 承载力大, 抗弯抗剪性能好, 在成孔过程中对成孔质量有保证, 便于施工和拆除, 所以良好的结构性能和明显的经济效益使得钢管桩施工平台在大型水上桥梁施工中经常用到. 但是, 施工平台构架均在施工水位以上, 桩的自由长度较长, 刚度较差, 当平台受到较大水平力, 如风力、水流冲击力等或是冲刷较大时, 平台容易失稳<sup>[4-6]</sup>, 所以施工平台在水平力作用下的安全问题尤其重要. 笔者结合当地的水文环境资料、规范、文献, 利用通用有限元分析软件 ANSYS 建立分析模型, 对阳江核电跨明渠大桥施工钢栈桥和支架平台在台风和波浪力等荷载作用下的安全问题进行分析, 为工程的安全施工提供理论依据.

1 工程概况

阳江核电跨明渠大桥钢栈桥桥面净宽 4 m, 施工平台全宽 18 m, 水深约 17~18 m, 拟采用排间距为 1 m 的两排  $\phi 610$  mm 壁厚  $\delta = 10$  mm 钢管

桩连成整体承台作为承重基础, 每排 8 根, 桩净间距 2 m. 桩顶用  $\delta = 10$  mm 的钢板封口后, 在其上用 I 32b 工字钢做分配梁, 工字钢上纵向安装贝雷纵梁作为主承重结构. 纵桥向考虑挠度不能过大, 两排钢管桩纵向间距采用 1.0 m, 连成整体, 形成独立承台; 该平台的纵、横断面如图 1~2 所示. 根据现场情况, 支架现浇平台与施工钢栈桥综合考虑同时搭设<sup>[7]</sup>, 栈桥施工工艺如图 3 所示.

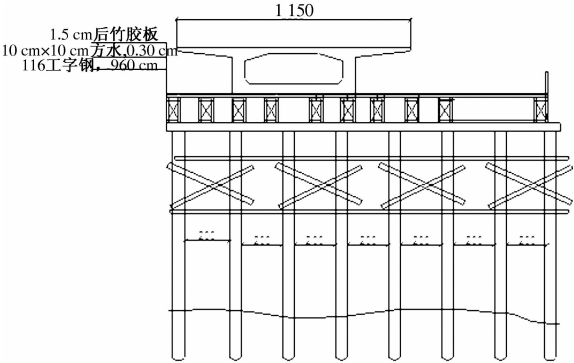


图 1 钢栈桥和平台横断面

Fig. 1 Steel trestle and platform cross-section

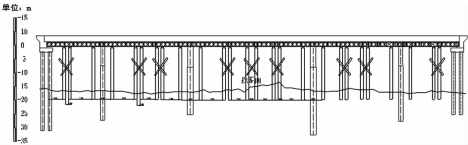


图 2 钢栈桥和平台纵断面

Fig. 2 Steel trestle and platform vertical section

收稿日期: 2014-06-30; 修订日期: 2014-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208471); 河南省科技攻关计划项目(142102210486); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114101120008); 郑州大学优秀青年教师发展基金(1421322059).

作者简介: 李胜利(1979-), 男, 河南辉县人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事土木工程灾变分析与监测研究, E-mail: lsl2009@126.com.

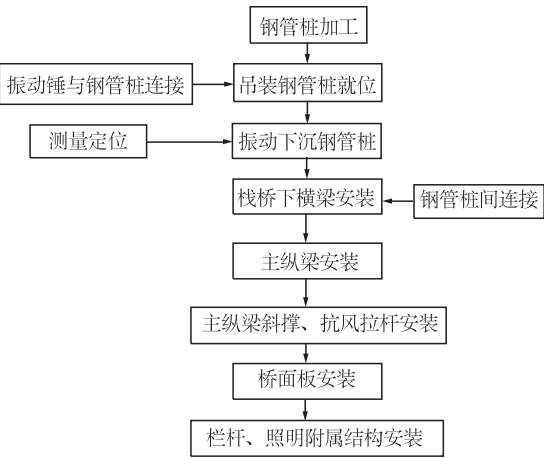


图 3 栈桥施工工艺  
Fig. 3 Trestle construction proces

2 有限元建模

2.1 有限元模型

本平台结构的分析采用 ANSYS 进行. 钢管桩采用管单元 pipe16, 桥面板采用壳单元 shell63, 其他构件采用梁单元 beam44. 钢材弹性模量取  $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ , 泊松比取 0.3. 在保证足够计算精度和运算速度的情况下, 合理划分单元, 整个模型共划分了 4 272 个单元<sup>[8-9]</sup>, 平台结构有限元模型如图 4 所示.

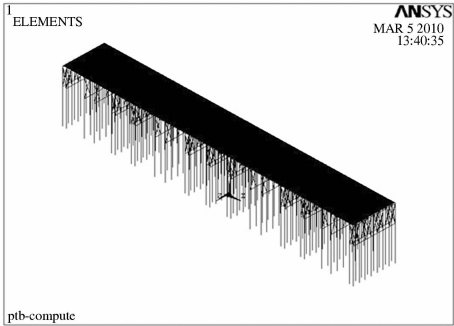


图 4 平台结构有限元模型  
Fig. 4 Finite element model of the platform

2.2 钢管桩及钢护筒长度的确定

钢管桩长度根据规范提供的弹性长桩嵌固点的计算办法确定. 受弯嵌固点距泥面深度  $z = \eta T$ ,  $\eta$  为系数, 通常取 1.8 ~ 2.2, 桩顶铰接或桩的自由长度较大时取较小值, 桩顶嵌固或桩的自由长度较小时取较大值; 经计算, 受弯嵌固点距泥面深度  $z = 3.845 \text{ m}$ . 受弯嵌固点处为固定端约束.

2.3 施工荷载的确定

施工荷载主要包括: 混凝土及模板自重、施工人员 和 料 具 等 行 走 运 输 或 堆 放 荷 载、风 荷 载 和 波 浪 荷 载. 其中, 混凝土及模板自重按照实际几何尺

寸确定, 施工人员和料具等行走运输或堆放荷载按《桥涵手册》取  $150 \text{ kg/m}^2$  计算<sup>[10]</sup>. 50 t 履带车两条履带中, 每条履带单位压力为  $56 \text{ kN/m}$ , 长 4.5 m, 履带轴心间距 2.5 m. 根据最不利布载原则, 履带车荷载采用隔跨布载的方式.

风荷载计算参考《公路桥梁抗风设计规范》偏安全地布于露出水面的钢管桩和平台横桥向节点上<sup>[11]</sup>. 规范中风荷载的公式为

$$F_H = 0.5 \rho V_g^2 C_H A_n.$$

式中:  $\rho$  是空气密度;  $V_g$  是静阵风风速;  $C_H$  是阻力系数;  $A_n$  是投影面积; 该工程图纸设计采用的是 1949 ~ 1995 年以工程海区为中心, 100 km 内出现的台风极大风速, 采用 Gumbel、Person 分布方法, 计算出海区 10 m 高度处的 2 min 平均风速和多年一遇风速统计值. 该工程海区 10 km 范围内海域的极值参数估计 100 年重现期, 最大风速值是  $57.44 \text{ m/s}$ . 则每根钢管桩水面以上 4.83 m 处的风荷载为

$$F_H = 0.5 \rho V_g^2 C_H A_n = 0.5 \times 1.25 \text{ kg/m}^3 \times 67.92 \text{ m}^2/\text{s}^2 \times 0.6 \times 4.53 \text{ m}^2 = 7\,832 \text{ (N)}.$$

横桥向作用下贝雷纵梁单位长度上的横向阵风荷载为

$$F_H = 0.5 \rho V_g^2 C_H H = 0.5 \times 1.25 \text{ kg/m}^3 \times 71.52 \text{ m}^2/\text{s}^2 \times 1.9 \times 3 \text{ m} = 18\,212 \text{ (N/m)}.$$

波浪力按《海港水文规范》进行计算<sup>[12]</sup>, 并等值均布于处于水中的钢管桩节点上. 阳江核电站 WSW 方向百年一遇波浪波高  $H = 0.7 \text{ m}$ , 周期  $T = 10.2 \text{ s}$ , 波浪波长  $l_0 = 87 \text{ m}$ , 海水容重  $\gamma = 10.25 \text{ kN/m}^3$ . 由规范可知, 作用在钢管桩上的波浪总力为:  $P = 18\,299 \text{ N}$ ; 计算得作用点离水底面的高度为 16.26 m.

2.4 计算工况

根据最不利荷载原则, 进行布载如下:

- (1) 钢栈桥受力计算工况: 平台板荷载 + 风荷载 + 波浪力 + 50 t 履带车 (加在栈桥上);
- (2) 灌注桩施工平台受力计算工况: 平台板荷载 + 风荷载 + 波浪力 + 50 t 履带车 (加在施工灌注桩平台上);
- (3) 支架平台受力计算工况: 平台板荷载 + 混凝土箱梁及施工模板等自重 + 风荷载 + 波浪力.

2.5 稳定性分析方法

结构的失稳可简单表述为: 结构在某一荷载作用下处于一种不稳定的平衡状态, 荷载增量为微量, 但位移增量很大. 令参考荷载  $F_0$ , 对应的几何刚度矩阵为  $K_s^0$ , 设屈曲极值荷载为  $F_c$ , 且与参考荷载存在关系:  $F_c = \lambda_c F_0$ ,  $\lambda_c$  为临界荷载比

例因子.并假设材料的本构关系为线弹性.这样得到这一类稳定问题的特征方程: $|K_L + \lambda_c K_S| = 0$ ,求解广义特征值方程,解出最小特征根 $\lambda_c$ ,即为稳定系数.

3 结果与讨论

3.1 钢栈桥力学行为分析

计算荷载:平台板荷载+风荷载+波浪力+50 t履带车(加在栈桥上).先计算50 t履带车加在栈桥上,贝雷梁的支座反力为205 468 N,满足要求.稳定性计算结果见图5和表1.结果表明:在所加荷载作用下,该栈桥整体一阶稳定性系数为7.011,满足规范要求(规范要求为4.0).

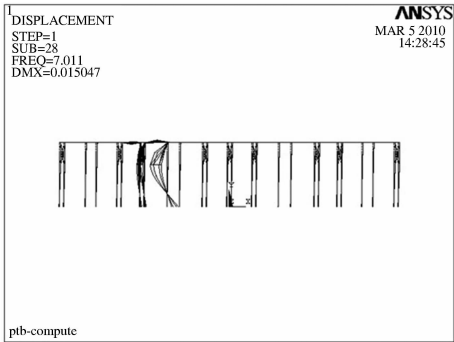


图5 一阶失稳立面图  
Fig.5 First-order instability elevation

表1 钢栈桥前三阶稳定系数

Tab.1 Former steel trestle third-order stability facto		
稳定阶数	稳定系数	失稳特征
1	7.011	桥墩外侧钢管桩纵桥向失稳
2	7.085	桥墩外侧钢管桩纵桥向失稳
3	7.099	桥墩内侧钢管桩纵桥向失稳

根据《桥规》<sup>[13]</sup>考虑荷载的最不利组合,然后计算该工况下钢管桩的最大应力.钢管桩施工平台的应力为管桩绝对值最大轴向应力,其值是20.8 MPa,钢管桩外边缘最大弯曲应力绝对值是194 MPa,钢管桩剪应力绝对值最大值是8.76 MPa,根据中国工程建设标准化协会标准《钢管混凝土结构与施工规程》中16Mn钢(厚度 $t < 16$  mm)的抗压、抗拉强度设计值为315 MPa,可见,轴向应力、钢管桩外边缘最大弯曲应力和钢管桩剪应力满足规范设计要求.

根据《桥规》考虑荷载的最不利组合,然后计算该工况下钢管桩的最大变形量,钢管桩变形最大值发生在桩顶面处,横向变形最大值是0.956 m,变形值较小.

3.2 灌注桩施工平台力学行为分析

计算荷载为:平台板荷载+风荷载+波浪力+50 t履带车(加在施工灌注桩平台上).

稳定性计算结果见图6,结果表明:不会发生稳定性失稳问题.

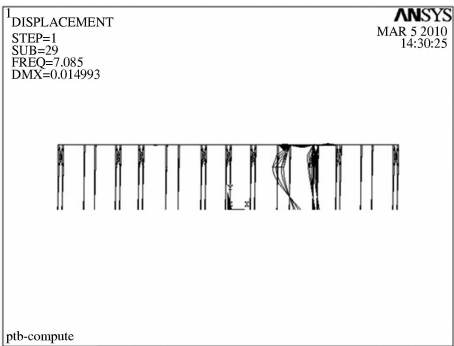


图6 二阶失稳立面图  
Fig.6 Second-order instability elevation

根据《桥规》<sup>[13]</sup>考虑荷载的最不利组合,然后计算该工况下钢管桩的最大应力.钢管桩施工平台的应力为钢管桩绝对值最大轴向应力,其值是29.5 MPa,钢管桩外边缘最大弯曲应力最大值是193 MPa,钢管桩绝对值最大的剪应力发生在钢管桩顶部,最大值是8.7 MPa,根据中国工程建设标准化协会标准《钢管混凝土结构与施工规程》中16 Mn钢(厚度 $t < 16$  mm)的抗压、抗拉强度设计值为315 MPa,可见,轴向应力、钢管桩外边缘最大弯曲应力和钢管桩剪应力满足规范设计要求.

根据《桥规》<sup>[13]</sup>考虑荷载的最不利组合,然后计算该工况下钢管桩的最大变形量,它发生在桩顶面处,横向变形最大值是0.096 m,变形值较小.

3.3 现浇支架平台力学行为分析

计算荷载为:平台板荷载+混凝土箱梁及施工模板等自重+风荷载+波浪力.

稳定性计算结果见图7.结果表明:在所加荷载作用下,该栈桥发生了整体失稳现象.主要原因可能是钢管桩横向支撑约束不够造成的.

根据《桥规》<sup>[13]</sup>考虑荷载的最不利组合,然后计算该工况下钢管桩的最大应力.钢管桩施工平台的应力为钢管桩绝对值最大轴向应力,其最大值是64 MPa,钢管桩外边缘最大弯曲应力绝对值发生在靠近跨中灌注桩外侧钢管桩中部,最大值是313 MPa,钢管桩绝对值最大的剪应力发生在所示钢管桩顶部,最大值是32.2 MPa.根据中国工程建设标准化协会标准《钢管混凝土结构与施工规程》中16 Mn钢(厚度 $t < 16$  mm)的抗



压、抗拉强度设计值为 315 MPa,因此,轴向应力、钢管桩外边缘最大弯曲应力及钢管桩剪应力满足规范设计要求。

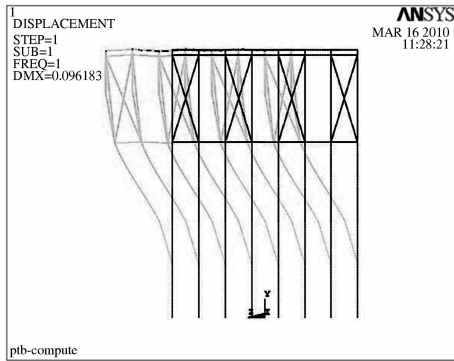


图7 侧向变形图

Fig.7 Lateral deformation maps

根据《桥规》<sup>[13]</sup>考虑荷载的最不利组合,然后计算该工况下钢管桩的最大变形量。钢管桩变形最大值发生在桩顶面处,横向变形最大值是 0.104 m,变形值较大。

#### 4 结论

(1)3种最不利荷载组合作用下平台板稳定性均满足要求,但灌注桩两侧钢管桩支撑较少,稳定性较差,需引起重视;

(2)钢管桩的强度满足要求;

(3)在极端风荷载和波浪力共同作用下,平台的变形较小,刚度满足要求。

#### 参考文献:

- [1] 罗晓刚.南坡坪黄河特大桥钢栈桥工程施工技术[J].铁道建筑,2010(10):33-34.
- [2] 刘涛,艾晓东.杭州湾跨海大桥南岸栈桥设计及施工方案[J].石家庄铁道学院学报,2004(5):66-69.
- [3] 李宗长,唐宏路,蔡勇.巴东长江公路大桥北岸栈桥方案设计与施工[J].世界桥梁,2004(4):76-78.
- [4] 赵明华,黄利雄,刘思思.横向荷载对基桩竖向承载力的影响分析[J].公路交通科技,2009,26(07):44-49.
- [5] 汪宏,李志明,王林,等.大直径钢管桩承载力的非线性分析[J].岩土力学,2005(S1):213-217.
- [6] 居艮国,吕风梧.波浪力作用下钢管桩施工平台随机动力响应分析[J].铁道科学与工程学报,2006(5):70-74.
- [7] 田学林,王立辉.深水激流钢栈桥施工技术[J].铁道建筑技术,2009(12):36-38.
- [8] 李学民,伍军,李国亮,等.开口钢管桩竖向承载力机理及计算探讨[J].桥梁建设,2005(4):38-40.
- [9] 刘荣浩.跨海大桥施工平台计算机仿真分析[J].石家庄铁道学院学报,2005(18):49-53.
- [10] 交通部第一公路工程总公司.桥涵手册(下册)[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [11] 中华人民共和国交通部.JTG/TD 60—01—2000,公路桥梁抗风设计规范[S].北京:人民交通出版社,2000.
- [12] 中华人民共和国交通部.JTJ 213—1998,海港水文规范[S].北京:人民交通出版社,1998.
- [13] 中华人民共和国交通部.JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社,2004.

### Mechanical Behavior Analysis of Steel Pipe Pile Construction Platform Under the Coupling Action of the Typhoon and Wave Loads

LI Sheng-li, HU Ya-nan, WANG Dong-wei

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The security issues of construction steel trestle and scaffold platforms for the cross channel bridge of Yangjiang nuclear power under the coupling action of the typhoon and wave loads are researched. The finite element model about construction steel trestle and scaffold platforms is built with ANSYS software and the mechanical behavior is calculated. The results show that the stability of the platform and the strength of the steel pipe pile meet the requirements under three kinds of loading combinations. Under the combined effect of the extreme wind and wave forces, the deformation of the platform is not too much, but the support of both sides of the steel pipe pile is not enough and the stability is worse.

**Key words:** steel pipe pile; Beilei beam; typhoon; wave load; finite element



文章编号:1671-6833(2014)06-0086-05

# 基于运行模式分布的平面交叉口汽车排放评估

邱兆文<sup>1</sup>, 张广昕<sup>2</sup>, 郝艳召<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 聊城职业技术学院 汽车学院, 山东 聊城 252000)

**摘要:** 为了高分辨率地评估微观交通区域汽车污染物的排放清单, 引入了美国新一代交通排放模型 MOVES, 并分析了 3 种交通运行参数的敏感性; 以典型平面信号交叉口为研究对象, 通过实测及统计分析得到了反映汽车交叉口运行特征的运行模式分布; 考虑交叉口信号灯不同方向的配时权重, 运用 MOVES 模型评估了典型平面交叉口的  $PM_{2.5}$  和 CO 排放清单; 最后模拟了压缩天然气 (CNG) 替代常规燃料后交叉口  $PM_{2.5}$ 、CO 的量化减排效益. 研究结果表明, 基于运行模式分布的排放评估更能反映交叉口汽车运行特征, 计算结果更精确; CNG 在公交车上推广后, 案例中交叉口区域的  $PM_{2.5}$  和 CO 排放清单分别降低 66% 和 5%.

**关键词:** 交通工程; 平面交叉口; 汽车排放评估; 运行模式分布; MOVES 模型

**中图分类号:** U491.9      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.021

## 0 引言

作为城市道路交通系统中的重要部分, 平面交叉口不仅是人、车密集活动的区域, 也是交通污染的热点 (Hot-spot) 之一<sup>[1]</sup>. 交通源细粒子  $PM_{2.5}$  (直径小于或等于  $2.5\ \mu m$  的颗粒物) 主要源于汽车尾气、刹车片磨损和轮胎路面磨损及扬尘<sup>[2]</sup>, 其对呼吸系统和心血管系统健康有直接的危害, 长期处于  $PM_{2.5}$  的暴露下甚至会缩短人的寿命<sup>[3]</sup>. 一氧化碳 (CO) 是一种汽车发动机含碳燃料不完全燃烧产生的污染物. CO 浓度的上升, 尤其在交通微环境 (城市道路交叉口、公交车站、拥堵路段两侧等局部区域) 内, 将会增加公众死亡率, 加剧心血管疾病发生以及诱发其他健康问题<sup>[4-5]</sup>. 环境评估可以促进交通污染控制技术进步, 但是当前基于固定监测点的环境评估是从宏观上反馈交通污染控制效果, 而不适用于道路交叉口这类微观交通环境下空气质量评估的需要<sup>[6-7]</sup>. 因此, 有必要开展微观交通环境空气质量评估的研究. 精确量化交通污染物排放清单是微观交通空气质量评估的关键环节, 将为建立空气质量模型提供可靠的排放源强数据.

交通排放模型是量化交通污染物排放的工具, 目前较为成熟地应用于微观交通环境评估的模型主要有美国的 CMEM (综合模式排放模型)、IVE (国际排放模型)、MOVES 模型, 欧洲的 COPERT 系列模型、ARTEMIS (交通排放模型清单评估系统) 等. 我国学者主要依托国外模型, 通过对其重要参数修正进行模拟研究<sup>[8]</sup>. 由于 MOVES 模型拥有一个系统完整的机动车排放数据库, 这就给我们在当前中国机动车排放数据库尚未建立的前提下评估交通污染物排放清单提供了借鉴. 为此, 引入美国新一代交通排放模型 MOVES, 对 3 种交通运行参数方法进行了对比分析, 运用基于运行模式分布的排放评估方法测算了典型平面交叉口的  $PM_{2.5}$  和 CO 排放清单, 并模拟了公交车用 CNG 替代常规燃料后的减排效果. 研究成果对微观交通环境评估具有重要的理论意义和实用价值.

## 1 MOVES 排放模型及其 3 种交通运行输入参数

### 1.1 MOVES 模型

MOVES (MOTOR Vehicle Emission Simulator) 模

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-09-18

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2013M532006); 陕西省博士后科研资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (0009-2014G1221022)

作者简介: 邱兆文 (1975-), 男, 江苏徐州人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事汽车排放与交通环境研究, E-mail: qzw@chd.edu.cn.

型是由美国 EPA 的 OTAQ (Office of Transportation and Air Quality) 组织开发,用于多尺度评估道路移动源排放清单的评估. MOVES 模型是基于机动车比功率 ( $VSP$ , Vehicle-specific power) 原理开发的,  $VSP$  参数量化了与各种机动车和运行工况特征相关的汽车排放和油耗<sup>[9]</sup>.  $VSP$  (单位:吨功率) 定义为单位质量机动车的瞬时功率,它表示发动机克服车轮旋转阻力、空气动力学阻力做功以及机动车的动能和势能所需要输出的功率和因内摩擦阻力造成的传动系统的机械损失功率. 其数值与速度和减速度有关,如式(1)所示.

$$VSP = \frac{A_r + BV^2 + CV^3 + MV(a + g\sin\theta)}{M} \quad (1)$$

式中:  $V$  为车速,  $m/s$ ;  $a$  为车辆加速度,  $m/s^2$ ;  $A_r$  为滚动阻力系数,  $kW/(m \cdot s^{-1})$ ;  $B$  为滚动阻力系数的速度调整系数,  $kW/(m \cdot s^{-2})$ ;  $C$  为空气阻力系数,  $kW/(m \cdot s^{-3})$ ;  $M$  为车辆质量,  $t$ ;  $g$  为重力加速度常数,  $9.81 m \cdot s^{-2}$ ;  $\theta$  为道路坡度,  $(^\circ)$ .

基于  $VSP$  公式(1)可以计算出机动车的运行模式分布. MOVES 模型正是基于运行模式与排放率之间的模态函数关系评估排放的. 这些模态函数是基于  $VSP$  bin (区间) 的方法建立. MOVES 模型根据  $VSP$  和速度的对应关系将机动车所有的  $VSP$  分成了 23 个 Bin, 即 23 个运行工况区间<sup>[10]</sup>. 根据排放过程和排放污染物的不同影响因素, 将机动车活动信息分布到不同的运行模式区间上. MOVES 给每一个唯一的排放源和运行模式组合分配一个排放率, 以计算该运行模式下的排放. 最后通过温度、空调状况、燃油等因子的修正, 得到总排放率, 如式(2)所示. 与上一代排放模型 MOBILE 相比, MOVES 具有以下特点: 基于 MySQL 关系数据库构建、具有替代燃料和车辆类型、计算总排放清单和排放因子、评估温室气体和能源消耗、多种污染物和各种排放过程的模拟计算功能.

$$TE_{process, sourcetype} = (\sum ER_{process, bin} \times Ac_{bin}) \times Aj_{process} \quad (2)$$

式中:  $TE$  为总排放量;  $process$  为排放过程;  $sourcetype$  为排放源类型;  $bin$  为排放源和工况区间;  $ER$  为排放速率;  $Ac$  为行驶特征;  $Aj$  为调整因子.

### 1.2 3 种交通运行参数

根据评估路段的已有车辆交通数据信息, 对于微观交通排放评估, MOVES 提供了 3 种交通运行参数输入方式来描述速度、加速度和车辆模拟功率, 即平均速度、驾驶循环行程和运行模式分布. MOVES 使用导则<sup>[10]</sup>中建议, 对于给定路段,

当有多种方式均可输入时, 将优先使用运行模式分布数据, 驾驶循环行程次之, 路段平均速度在没有其他可用数据的情况下也可以用于评估.

MOVES 定义了 16 个速度区间, 分别定义了不同道路类型或路段/不同时段的车平均行驶速度. 模型以输入的平均速度为基础, 运用内置的驾驶循环和插值算法得到一个缺省的运行模式分布, 然后在基于上述原理计算排放. 由于输入的平均速度与默认数据库中的驾驶循环不能精确反映机动车的实际路段行驶状况, 因此, 平均速度作为 MOVES 交通参数的计算结果在三者中准确性最差.

运行模式是指具有特定排放率的机动车活动模式, 即用式(1)表征的  $VSP$  区间分布特征. 如行驶活动模式是以  $VSP$  和瞬时速度为特征的, 启动活动模式是以车辆静置时间 (即浸时, soak time) 为特征. 对于给定的排放源类型、道路路段和污染物/产生过程, 运行模式分布值之和必须为 1. MOVES 内置排放率是  $VSP$  的直接函数, 测试已表明  $VSP0$  与排放率之间比平均速度有更好的相关性<sup>[11]</sup> (USEPA, 2002). 因此, 基于运行模式运用 MOVES 评估微观交通排放充分发挥了 MOVES “高分辨率”的优势, 可以通过直接测试逐秒车速得到当地的  $VSP$  区间分布, 使得评估预测结果准确.

驾驶循环行程是指在特定路段上, 可以定义精确的速度和坡度作为时间 (单位:  $s$ ) 的函数, 可以通过实测车速分布解析得到. 由于 MOVES 系统中内置了用于微观层面评估用的一个缺省驾驶循环行程库, 而且对应着不同的交通拥堵水平和各种道路类型, 这样建立的特定路段驾驶循环与平均速度相比, 能够较准确地匹配到内置缺省驾驶循环, 但是这种预先研究设定的驾驶循环行程仍然不能反映真实的机动车运行状况, 因此评估精度介于平均速度和运行模式分布之间.

## 2 平面交叉口机动车运行模式分布

以上分析表明, 基于运行模式分布的 MOVES 模型评估精度是最高的. 下面以城市典型平面交叉口——西安市小寨十字平面交叉口 (如图 1 所示) 为调查对象, 通过实测及统计分析得到了反映汽车交叉口非高峰时段运行特征的运行模式分布. 为了精细化地评估交叉口的排放清单, 根据机动车运行工况将交叉口路段划分为 20 个路段 (link). 然后用 GPS 跟车测试了交叉口各个路段

的车速分布情况,进行了多次试验,能够反映遇到红灯和遇到绿灯两种情况下的运行工况. 计算小时排放清单时,考虑交叉口信号灯不同方向的配时权重. 最后根据式(1)计算各个路段的  $VSP$ ,按照运行模式分布表<sup>[10]</sup>中的  $VSP$  以及瞬时速度区间的划分分别统计各路段  $OpModeID$  的数量,得到各个路段不同  $OpModeID$  所占的比例,该比例就是交叉口各路段运行模式分布. 由于直行车辆和左转车辆会受到红灯的影响,在计算轻型车和重型车的运行模式分布比例时,分为红灯和绿灯两种交通条件下的运行模式分布. 以 link1(直行路段)、link13(右转路段)、link17(左转路段)为例,图2给出了车流遇到红灯情况下的运行模式分布,其他路段的运行模式分布以及绿灯情况数据处理方法相同,不再赘述.

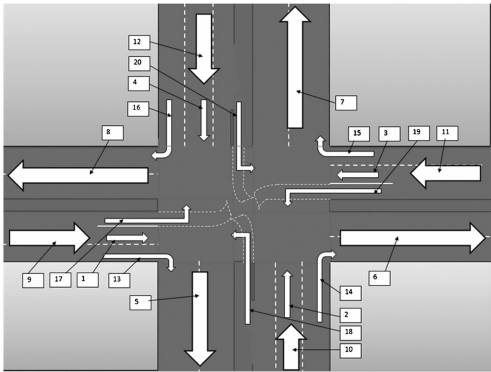
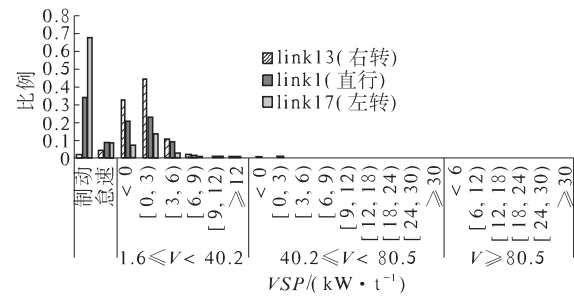


图1 小寨十字平面交叉口示意图

Fig.1 Sketch map of Xiaozhai at-grade intersection



续表 2				
路段 编号	路段 长度/m	车道总 宽度/m	排放清单/(g·h <sup>-1</sup> )	
			CO	PM <sub>2.5</sub>
6	440	11	1 991	33.431 8
7	293	15	3 374	30.245 9
8	400	11	2 641	37.991 7
9	330	11	1 730	20.354 5
10	400	15	4 963	53.157 0
11	370	11	2 407	32.664 5
12	223	15	2 967	27.475 0
13	70	3	58	0.757 8
14	70	3	71	1.274 1
15	70	3	105	1.821 4
16	70	3	146	2.711 6
17	87	3	271	2.357 7
18	82	2	217	3.342 5
19	87	3	168	2.482 3
20	82	2	233	4.492 2

4 CNG 在公交车上减排效益量化分析

天然气是一种应用较为广泛的替代燃料,目前在我国城市公交车和出租车上已经得到广泛的应用. 尽管从理论上和相关试验研究上可知,应用天然气替代传统燃料会带来一定的环境效益<sup>[12-14]</sup>,但未见其在微观交通区域的减排量化效果的报道. 由于 MOVES 模型中提供了燃料车型匹配功能,可以在不改变其他参数的基础上,仅改变车型燃料匹配就可以评估燃料的量化影响. 因此,基于运行模式分布的 MOVES 模型方法可以为精确地评估天然气减排效益、明晰其减排潜力提供量化评估工具,为管理部门提供决策依据.

以小寨十字平面交叉口为研究案例,以上述评估场景为基本场景,由于基本场景中 CNG 已经应用于公共汽车上,为了评估天然气的减排效益,特将模拟场景中公共汽车燃料改为柴油,其他条件不变,这样运用基于运行模式分布的 MOVES 模型,按照以上建模步骤和数据处理方法就可以对燃料改变前后的场景进行评估模拟,模拟结果见表 3,表明在柴油公交车上全面推广 CNG 后,小寨交叉口区域的 PM<sub>2.5</sub> 和 CO 排放将分别降低 66% 和 5%.

5 结论

(1)在 MOVES 模型原理的基础上,探讨了平均速度、驾驶循环行程及运行模式分布等 3 种交通运行参数的敏感性;为充分发挥 MOVES 模型“高分辨率”评估的特点,应尽量采用运行模式分

布的方法.

表 3 8:00-9:00 时段评估场景及结果  
Tab.3 Evaluation scenarios and results at 8:00-9:00

场景	车型燃料 匹配	排放评估结 果/(g·h <sup>-1</sup> )	
		CO	PM <sub>2.5</sub>
基本场景	公共汽车 - CNG		
	轻型车 - 汽油	32 256	335
	轻型卡车 - 柴油		
	垃圾车 - 柴油		
模拟场景	公共汽车 - 柴油	33 955	989
	其他同上		

(2)通过实际案例研究,描述了建立平面交叉口机动车运行模式分布和排放清单的评估方法,可以看出,MOVES 模型可以评估交叉口区域的排放清单及其时空分布特征.

(3)运用基于运行模式分布的 MOVES 模型,评估了替代燃料的量化减排潜力. 案例评估结果表明,在柴油公交车上全面推广 CNG 后,小寨交叉口区域的 PM<sub>2.5</sub> 和 CO 排放将分别降低 66% 和 5%.

参考文献:

[1] TOMLIN A S, SMALLEY R J, TATE J E, et al. A field study of factors influencing the concentrations of a traffic-related pollutant in the vicinity of a complex urban junction [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(32): 5027-5037.

[2] GILLIES J A, GERTLER A W, SAGEBIEL J C, et al. On-road particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) emissions in the sepulveda tunnel, los angeles, california [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(6): 1054-1063.

[3] VINZENTS P, MQLLER P, SQRENSEN M, et al. Personal exposure to ultrafine particles and oxidative DNA damage [J]. Environmental Health Perspectives, 2005, 113(11), 1485-1490.

[4] MIN J Y, PAEK D, CHO S, et al. Exposure to environment carbon monoxide may have a greater negative effect on cardiac autonomic function in people with metabolic syndrome [J]. Science of The Total Environment, 2009,407(17): 4807-4811.

[5] MOTT J, WOLFE M, ALVERSON C, et al. National vehicle emissions policies and practices and declining US carbon monoxide - related mortality [J]. Journal of the American Medical Association, 2002,288(8):

- 988-995.
- [6] GULLIVER J, BRIGGS D. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(1): 1-8.
- [7] HANNA B, FRANK B, JAAP K, et al. Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 dutch cities [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(27): 4234-4242.
- [8] 王歧东. 机动车排放因子识别技术[J]. *中国基础科学*, 2007(6): 18-21.
- [9] SONG G, YU L. Estimation of fuel efficiency of road traffic by characterization of vehicle-specific power and speed based on floating car data [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2139: 11-20.
- [10] Environmental Protection Agency, US. Motor vehicle emission simulator (MOVES) user guide for MOVES2010b report: EPA-420-B-12-001b [R]. Washington DC: Office of Transportation and Air Quality, 2012.
- [11] Environmental Protection Agency, US. Methodology for developing modal emission rates for EPA's multi-scale motor vehicle and equipment emission system: EPA-420-R-02-027 [R]. Washington DC: Office of Transportation and Air Quality, 2002.
- [12] 郑建军, 周志恩, 张丹, 等. 城市在用 CNG 汽车排放研究 [J]. *城市环境与城市生态*, 2011, 24(4): 38-42.
- [13] 胡京南, 郝吉明, 傅立新, 等. 应用燃气汽车对北京市机动车排放的影响 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(3): 350-354.
- [14] 郑晨, 郑长江. 公交车车速诱导研究与应用 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2013, 34(1): 19-22.

## Estimation for Vehicles Emissions of At-grade Intersections Based on Operating Mode

QIU Zhao-wen<sup>1</sup>, ZHANG Guang-xin<sup>2</sup>, HAO Yan-zhao<sup>1</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Automobile, Liaocheng Institute of Technology, Liaocheng 252000, China)

**Abstract:** In order to estimate vehicles inventory in high resolution at a microscopic scale region, the MOVES model of US new version was introduced and the sensitivity of three traffic conditions parameters was analyzed. Taking a typical signal intersection as research object, the operation modes reflecting vehicles running characteristics in intersection were gained through field measurement and statistical analysis. In consideration of timing weight in the different directions, the  $PM_{2.5}$  and CO inventories of typical intersection were calculated by MOVES model. Lastly, the efficiency of compressed natural gas (CNG) in the reduction of  $PM_{2.5}$  and CO was modeled when the buses conventional fuel was replaced by the alternative fuel (CNG). The results show that, the traffic emission evaluation based on operating mode can better reflect the realistic vehicles' operation nature more, and calculate out more precise values. In the case study, the emission inventories of  $PM_{2.5}$  and CO in the intersection region were reduced by 66% and 5% respectively after the bus fuel of CNG was put into use.

**Key words:** traffic engineering; at-grade intersection; vehicles emissions estimation; operating model profile; MOVES model

# 土钉墙-桩锚联合支护结构设计参数分析

宋建学<sup>1</sup>, 庞宏飞<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 泰宏建设发展有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 结合实例工程, 建立土钉墙-桩锚联合支护结构数值分析模型, 通过与现场实测变形成果对比, 验证了数值分析模型及参数. 在此基础上, 通过虚拟设计分析了土钉墙高度、锚索锁定值及排桩刚度等参数对支护结构变形性状的影响. 结果表明: 该支护形式中土钉墙高度不宜超过 6 m; 锚索锁定值增大对坡顶变形控制效果不明显; 排桩刚度增大对坡顶变形控制效果较显著.

**关键词:** 地基基础工程; 土钉支护; 桩锚支护; 数值模拟; 联合支护

**中图分类号:** TU470<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.022

## 0 引言

近年来, 土钉墙-桩锚联合支护结构在基坑工程中得到大量推广应用. 土钉墙支护使基坑侧壁滑裂面向后、向下推移, 使支护结构受力更合理<sup>[1]</sup>. 图 1 即为土钉墙-桩锚联合支护结构示意图.

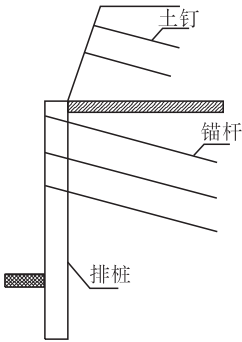


图 1 土钉墙-桩锚联合支护结构示意图

Fig. 1 The sketch of compound soil retaining structure

为了推动土钉墙-桩锚联合支护结构的推广应用, 国内学者已有一些探索和总结. 郭院成等<sup>[2]</sup> (2004) 认为土钉墙支护结构的最佳支护高度和土质特性、放坡情况有关. 相对于单纯桩锚支护结构, 该结构中的支护桩弯矩分布不均匀, 最大弯矩也有比较大的增加. 吴忠诚、汤连生等<sup>[3]</sup> (2007) 以及朱彦鹏等<sup>[4]</sup> (2009) 通过实际测量得出了支护结构后面的土体沉降呈现出勺状分布, 沉降值的最大点发生在滑裂面附近. 张丽丽等<sup>[5]</sup> (2011) 通过试验研究表明土钉与桩锚联合支护

结构中土钉的受力略小于同样条件下单一土钉墙中土钉的受力.

笔者通过典型案例现场实测和数值模拟相结合, 研究土钉墙-桩锚联合支护结构的整体工作机理, 分析土钉墙高度、锚索锁定值及排桩刚度等设计参数对支护结构变形性状的影响.

## 1 工程实例及现场试验

### 1.1 工程概况

河南省出版产业基地 3 期地块项目基坑深度为 15.8 m, 平面尺寸 165 m × 140 m. 基坑典型支护剖面 (南侧壁) 见图 2.

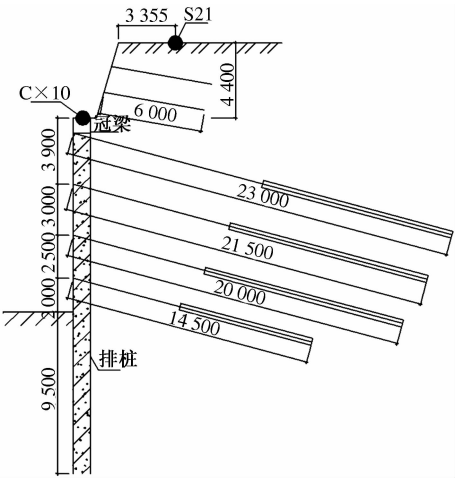


图 2 典型支护剖面图

Fig. 2 Typical Soil Retaining Structure

收稿日期: 2014-06-20; 修订日期: 2014-09-09

基金项目: 郑州市科技领军人才计划项目 (112PLJRC353)

作者简介: 宋建学 (1967-), 男, 河南洛阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事结构安全监测方面的研究, E-mail:

13633843010@126.com.



1.2 现场试验及成果

本工程与典型支护剖面对应位置处坡顶沉降监测成果如图 3 所示. 支护结构深层水平位移监测成果见图 4.

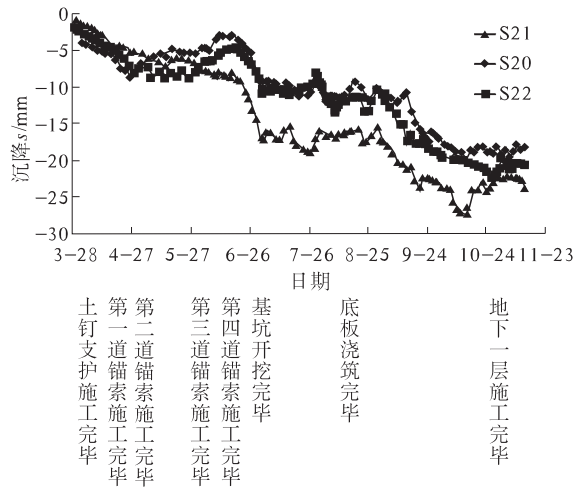


图 3 坡顶沉降图

Fig. 3 The settlement on top of soil nail wall

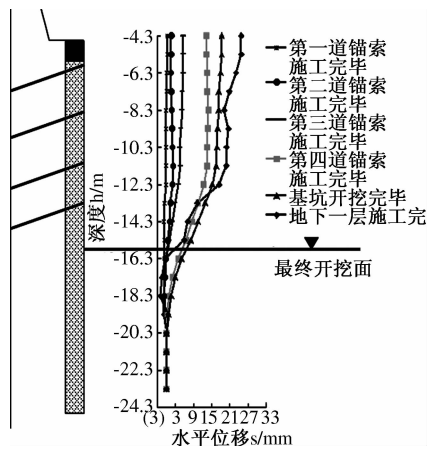


图 4 各工况下深层水平位移图

Fig. 4 The deep horizontal displacement in excavation stages

2 工程模型化及验证

笔者以 ABAQUS 软件为平台, 构建数值模型进行计算分析.

(1) 模型尺寸. 考虑到基坑的对称性, 模拟采用了二维对称的基坑模型, 宽度方向取 220 m, 深度方向取 60 m, 整个区域为 220 m × 60 m.

(2) 模型边界条件、网格划分. 模型左右两边采用水平方向约束, 底部采用水平和竖向约束. 为了提高分析精度, 在受力集中部位划分网格比较细. 土体单元采用平面应变减缩积分单元 CPE4R, 锚索、土钉采用 T2D2 二节点杆单元, 支护桩采用二维梁单元 B21.

(3) 模型参数、接触类型. 土钉与土体按嵌入方式连接; 桩和土体采用接触关系, 摩擦系数为 0.3, 法线方向为刚性; 锚索锚固段与土体建立绑定约束, 自由端端部绑定在桩上. 土体采用 M—C 塑性模型, 锚索、土钉采用线弹性模型, 弹性模量为  $3.0 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比为 0.2; 支护桩的弹性模量为  $2.0 \times 10^{10}$  Pa, 泊松比为 0.31. 为了便于分析, 将钻孔灌注桩按照抗弯刚度等效原则转化为地下连续墙进行模拟, 对桩径为  $D$ 、桩中心距为  $d$  的灌注桩, 换算为连续墙后的厚度为

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\pi D^4}{16d}} \quad (1)$$

通过对每个工况进行模拟计算, 得到各个工况条件下的变形结果, 再与实测成果进行比较分析. 图 5 是坡顶沉降模拟结果与实测结果对比. 图 6 是深层水平位移的模拟结果和实测结果对比.

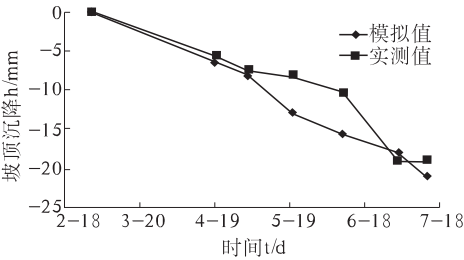


图 5 坡顶沉降对比图

Fig. 5 Compare of settlement on top of Soil Nail Wall

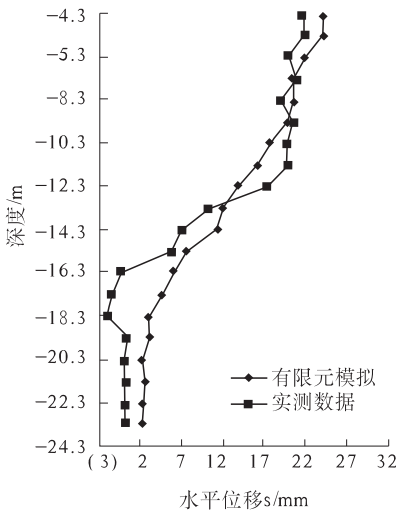


图 6 深层水平位移对比图

Fig. 6 Compare of deep horizontal displacement

从图 5 和图 6 可以看出: ABAQUS 数值分析结果整体上和实测结果基本吻合, 表明所选的模型及参数符合工程实际, 可以以此模型为平台, 进行虚拟设计, 以便分析设计参数对这种支护结构变形性状的影响规律.

3 虚拟设计及参数分析

3.1 土钉墙高度

土钉墙不同高度时的坡顶水平位移如图 7 所示.从图 7 可以看出,随着土钉墙高度的增大,纯土钉墙坡顶水平位移略有增加,而土钉墙-桩锚联合支护结构坡顶水平位移增加较快,当土钉墙高度为 5.8 m 时,坡顶水平位移已经超过规范<sup>[6]</sup>规定的预警值.考虑到此种结构中冠梁起的作用等,建议土钉墙-桩锚联合支护结构中土钉墙高度宜限制在 6 m 以内.

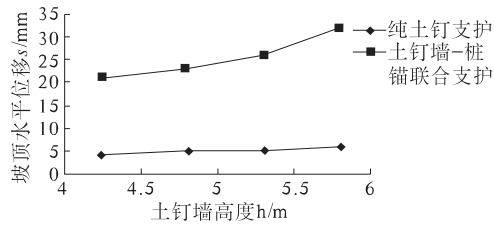


图 7 土钉墙不同高度时的坡顶水平位移  
Fig.7 The top horizontal displacement under different soil nail wall height

3.2 锚索锁定值

虚拟分析所采用的 3 组锚索锁定值如表 1 所示.不同锚索锁定值时支护桩的水平位移如图 8 所示.从图 8 可以看出,随着锚杆锁定值的增大,支护桩桩身水平位移整体变大,但水平位移增量都较小.

表 1 虚拟设计各组锚索锁定值

Tab.1 Each anchor force in the virtual design kN

锚索力	第一组	第二组	第三组
第一排	100	200	300
第二排	100	200	300
第三排	100	200	300
第四排	100	200	300

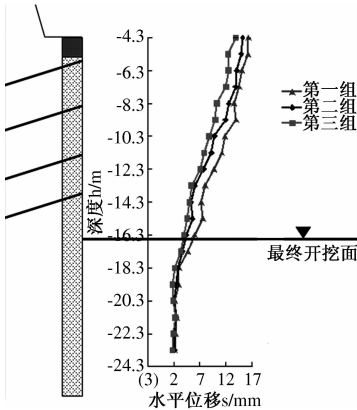


图 8 不同锚索锁定值时支护桩的水平位移  
Fig.8 The horizontal displacement under the different pre-stress value

不同锚索锁定值时排桩的变形值如表 2 所示.从表 2 可以看出,当锚杆锁定值从 100 kN 提高到 300 kN 时,基坑坡顶水平位移和沉降均无明显变化.规范<sup>[7]</sup>规定锚杆锁定值宜取锚杆轴向拉力标准值的 0.75~0.9 倍,因此实际工程中锚杆锁定值的变化范围较小.基于上述认识,针对土钉墙-桩锚联合支护结构中特定的桩、锚刚度比例,锚索锁定值改变对坡顶的水平位移和沉降影响比较小.

表 2 不同锚索锁定值时基坑的变形值  
Tab.2 The deformation of excavation under the different pre-stress value

锚索值/ kN	坡顶水平 位移/mm	冠梁水平 位移/mm	坡顶沉降 位移/mm
100	20.04	16.26	12.55
200	19.13	15.14	11.95
300	18.31	13.86	11.27

3.3 桩径

不同桩径经软件模拟换算厚度如表 3 所示<sup>[8]</sup>.不同桩径下支护桩水平位移如图 9 所示.从图 9 可以看出,随着桩径的增大,支护桩桩身位移整体变小且增量也变小.

不同桩径条件下基坑的变形值如表 4 所示.分析表 4 可知,改变桩径(桩间距不变)对坡顶水平位移、坡顶沉降都有明显影响.考虑到安全和经济的因素,建议在实际支护设计中应保证支护桩具有适当刚度.

表 3 不同桩径换算厚度

Tab.3 The equivalent thickness of wall corresponding to different pile diameter

桩径/m	软件模拟换算厚度/mm
0.8	0.543
1.0	0.732
1.2	0.933

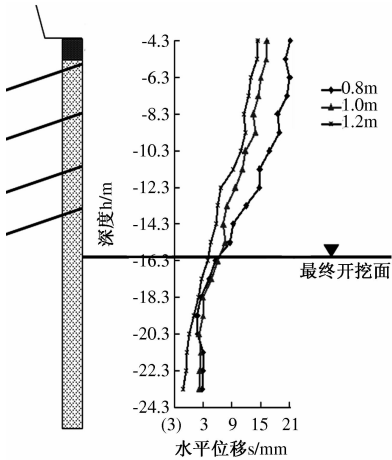


图 9 不同桩径条件下支护桩水平位移  
Fig.9 The horizontal displacement of retaining pile under with different diameters

表 4 不同桩径基坑的变形值  
Tab. 4 The deformation of excavation under  
different pile diameters mm

桩径/ m	坡顶水 平位移	冠梁水 平位移	坡顶沉 降位移
0.8	25.67	21.14	15.83
1.0	20.04	16.26	12.55
1.2	19.31	14.47	11.81

4 结论

对土钉墙－桩锚联合支护结构的现场试验和数值模拟分析表明：

- (1)土钉墙－桩锚联合支护结构中土钉墙高度宜限制在 6 m 以内.
- (2)锚索锁定值改变对坡顶的水平位移和沉降影响较小.
- (3)排桩直径对支护结构变形影响显著. 在实际支护设计时应保证支护桩具有适当的刚度.

参考文献：

[1] 尹骥,李象范. 上部土钉、下部桩锚结构的复合型围护结构计算方法的探讨[J]. 岩土锚固工程,2008,

12(4):26－30.

[2] 郭院成,杨庆,黄广华,等. 桩锚与土钉联合支护结构的优化选型[J]. 河南科学,2004,22(3):363－366.  
[3] 吴忠诚,汤连生,刘晓纲,等. 复合土钉墙大型现场测试及变形性状分析研究[J]. 岩土力学与工程学报,2007,26(z1):2974－2980.  
[4] 朱彦鹏,夏晋华,司亚蔚. 深基坑桩锚与土钉墙联合支护结构的变形监测分析[J]. 甘肃科学学报,2009,21(1):117－120.  
[5] 张丽丽,张钦喜,马庆迅. 桩锚-土钉组合支护中土钉受力规律[J]. 北京工业大学学报,2011,37(9):1338－1342.  
[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50497—2009,建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2009.  
[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
[8] HORVATH R G, KENNEY TC, KOZICK P. Method of improking the performance of drilled in weak rock[J]. Canadian Geotechnical Journal,1983,20:758－722.

Study on Deformation Corresponding to Different Design Parameters of Excavation Retaining Structure with Soil Nail and Pile Anchor

SONG Jian-xue<sup>1</sup>, PANG Hong-fei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Taihong Construction Development Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Based on practical project, the ABAQUS numerical analysis model is established. After the comparing study on numerical analysis results and the field monitoring ones, the model and corresponding parameters are verified. Then, virtual designs are carried out, with different heights of soil nail wall, pre-stress forces of anchorage, and stiffness of pile. The adequate height of soil nail wall is no more than 6 m. It shows that the pre-stress force of anchorage has little effect on deformation control. On the contrary, the stiffness of pile is vital for deformation control in this style of soil retaining structure.

**Key words:** soil and foundation engineering;soil nailing;pile anchor;numerical simulation; combined support

文章编号:1671-6833(2014)06-0095-05

# 交通荷载作用下港区道路受力特性研究

牛力强

(山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室,山西 太原 030006)

**摘 要:** 依托交通荷载作用下港口道路现场试验,采用 FLAC3D 建立数值分析模型,其中铺面结构采用理想弹性模型模拟,地基采用 M-C 模型模拟,对地基中的附加应力与竖向应变等进行了系统的数值分析.结果表明:加载位置下浅层地基中的附加应力有较明显的应力集中现象,随地基深度的增加该应力集中现象逐渐减弱;淤泥质土层中的竖向应变值较大,且沿深度方向减小幅度较小.最后,对港区道路设计计算中荷位、轮压和砂垫层厚度等重要指标进行了参数分析.

**关键词:** 港区;道路;交通荷载;受力特性

**中图分类号:** U416.1<sup>+</sup>6 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.023

## 0 引言

随着经济全球化的进程加快,全球经济总量的 60% 均集中在沿海地区,其中包含大量的重化工和能源等产业,这些产业需要大片的土地.面对人口剧增、城市和工业用地需要加大、土地资源有限的局面,沿海城市通过吹填造陆的方式缓解城市建设用地紧张的问题<sup>[1-3]</sup>.

在软弱地基上修建道路,首先要面临的是地基在车辆荷载作用下的沉降、不均匀沉降,以及由此引起的路面结构病害等问题. Sakai 等<sup>[4]</sup>和 Samang 等<sup>[5]</sup>通过对日本某低路堤高速公路的监测发现,该高速路正式运营 3 年后,由车辆荷载引起的沉降量占其工后沉降总量的 30%. 孙立强等<sup>[6]</sup>通过现场实测发现,天津港内多条道路在投入使用 3 年后道路的沉降量均超过了 30 cm,并出现了严重的“波浪式”不均匀沉降现象.赵亮等<sup>[7]</sup>基于天津港道路“波浪形”不均匀沉降实测数据,采用 PLAXIS 有限元软件建立数值模型,分析了该不均匀沉降产生的原因,并提出采用格栅加固的方式减小路面不均匀沉降.

目前,道路工作特性方面相关研究主要以高等级公路为研究对象,港区道路设计也主要参考公路相关设计规范<sup>[8]</sup>.但是,港区流动机械荷载远较公路大,公路荷载较为确定,车辆荷载对土基

工作区的影响深度也较为确定,因而对土基的压实深度均有明确要求.港区荷载如轮胎吊打支腿作业、集装箱叉车、正面吊荷载已超过 400 kN/轮<sup>[9]</sup>,远大于公路车辆荷载.在重载交通条件下,路基的工作区深度加大,造成通车后较短时间内即出现路面开裂、唧浆等早期病害,从而加速了港区铺面结构病害的发生与发展,造成后期铺面维修费用较大,港口道路工作特性与高等级公路必然相差较大.笔者依托交通荷载作用下港口道路现场试验,采用有限差分软件 FLAC3D 建立数值分析模型,对交通荷载作用下港口道路工作特性进行系统分析.

## 1 现场试验工况

现场试验位于广州南沙港一期工程 2 号路,道路铺面结构为现浇混凝土.如图 1 所示,现场共设置 6 个监测点,分别位于板角、板边和板中位置.现浇混凝土板尺寸为 4.0 m × 4.0 m.现场荷载试验过程中,分别将拖挂车分别放置在试验板块的不同位置,如图 2 所示.试验荷载值分别为拖挂车空载(T1),拖挂车装载 30 t 集装箱(T2)和拖挂车装载 60 t 集装箱(T3)3 种加载工况.

道路铺面结构由上至下名称及通过室内土工试验获得的各层材料物理力学参数详见表 1.

收稿日期:2014-07-05;修订日期:2014-09-06

基金项目:交通运输部建设科技项目(2014318771100);山西省交通建设科技项目(11-2-05)

作者简介:牛力强(1979-),男,山西左权人,山西省交通科学研究院高级工程师,主要从事路基路面工程相关研究,  
E-mail: nlq\_sxjk@163.com.

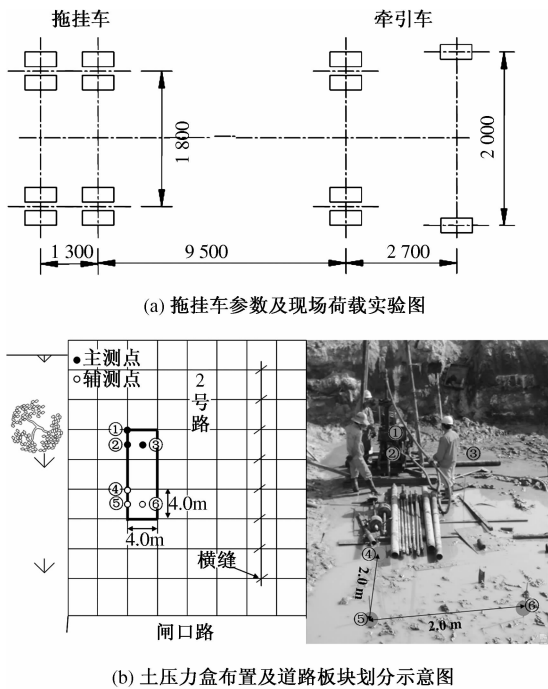


图 1 土压力盒布置及车辆荷载试验  
Fig.1 Arrangement of earth pressure cells and vehicle load tests

表 1 道路结构各层材料物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of materials

结构层名称	层厚 /m	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/^\circ$
现浇混凝土板	0.34	26.0	35 000(真实值) 15 000(折减值)	—	—
6% 水稳层	0.20	25.0	2 500	—	—
碎石层	0.18	24.0	250	—	—
砂垫层	2.00	20.5	50	2	38
土混砂	3.30	20.0	24	2	32
淤泥质土	11.0	17.0	4	20	6
粉质黏土	7.0	20.0	8	40	18

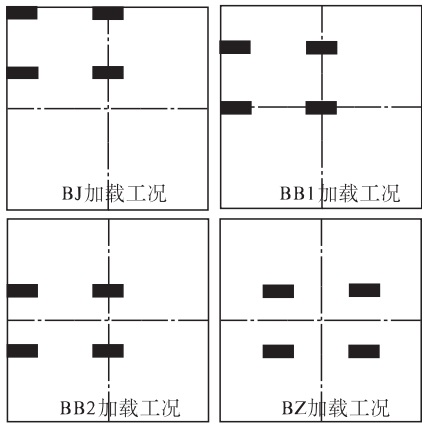


图 2 不同荷位加载工况示意图  
Fig.2 Schematic of loading position

2 数值建模分析

2.1 数值模型的建立与验证

根据现场条件及表 1 各结构层参数,建立  $10.0\text{ m} \times 10.0\text{ m} \times 24.72\text{ m}$  的道路拖挂车加载模型,铺面结构采用理想弹性模型,地基采用 Mohr-Coulomb 模型,模型边界采用固定位移边界,并以 T3 荷载工况进行加载.由于道路的现浇混凝土板并非为一整体,应力在板块与板块间的传递存在折减现象.本文模拟中,加载位置板块现浇混凝土板的回弹模量采用真实值,非加载板块采用折减值,以实现板块间应力传递折减的模拟.考虑到港区道路拖挂车车速较慢( $v < 20\text{ km/h}$ ),数值模拟时将拖挂车荷载模拟为静荷载.另外,以加载板板角位置为坐标原点建立三维空间直角坐标系, $x$  轴以向右为正方向, $y$  轴以垂直纸面向里为正方向, $z$  轴以垂直向上为正方向.

2.2 模拟结果分析

基于板角加载工况,对加载板板角位置下地基中附加应力、附重比、竖向应变及侧向位移进行分析.

2.2.1 附加应力及附重比分析

图 3(a)为加载板板角位置下地基不同深度处附加应力分布曲线.可以看出,附加应力沿深度方向逐渐减小,在浅层地基中附加应力在加载侧有较明显的应力集中现象,随深度的增加该现象逐渐消失.图 3(b)为加载板板角位置下地基不同深度处附重比分布曲线.附重比沿深度方向逐渐减小,在深 2.52 后附重比小于 0.1.

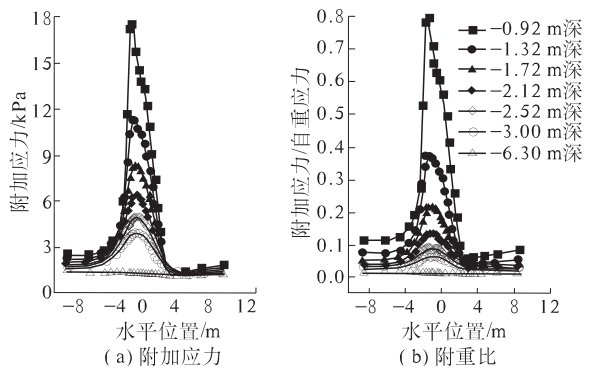


图 3 地基中附加应力及附重比分布曲线  
Fig.3 Distribution of induced stresses and ratio of induced stress to gravity stress at different depths

2.2.2 竖向应变分析

图 4(a)为加载板板角位置下地基中竖向应变沿深度分布曲线.可以看出,竖向应变在地基各土层中均沿深度方向逐渐减小.从中粗砂垫层进

入细砂层时,竖向应变小幅增加,而进入淤泥质黏土层时则大幅增加,且沿深度方向减小幅值很小.图 4(b)为加载板板边位置下地基不同深度处竖向应变沿水平位置分布曲线.整体上,淤泥质黏土层中竖向应变要比其他土层的要大.

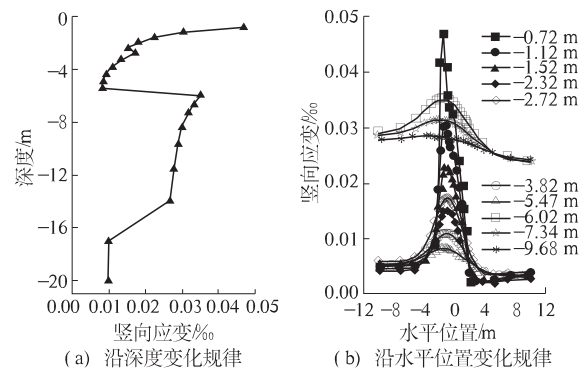


图 4 地基中竖向应变分布曲线  
Fig. 4 Distribution of vertical strains

3 参数分析

3.1 不同荷位分析

对 T3 荷载下 BJ(S1)、BB2(S2)和 BZ(S3)位置加载工况进行参数分析.

3.1.1 附加应力及附重比分析

图 5 为 S1 ~ S3 加载工况附加应力及附重比沿深度分布曲线.如图 5(a)所示,在地基浅层,S1 工况下附加应力值最大,S2 工况次之,S3 工况最小.随深度增加,附加应力值快速减小,S1 工况的减小幅度最大,S2 工况次之,S3 工况最小,在 1.32 m 深处开始 S3 工况附加应力值较 S1 和 S2 工况的要大,2.12 m 深处开始 S1 工况的附加应力值小于 S2 工况的.如图 5(b)所示,附重比沿深度的变化规律与附加应力相似,均约在深度 2.5 m 处附重比减小至 0.1.

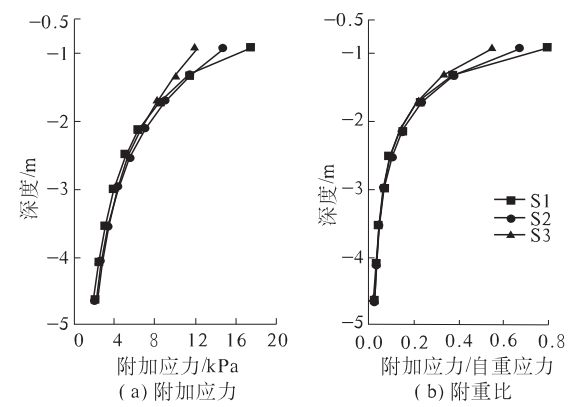


图 5 地基不同深度处附加应力及附重比分布曲线  
Fig. 5 Distribution of induced stresses and ratio of induced stress to gravity stress along depth

3.1.2 竖向应变分析

图 6 为 S1 ~ S3 加载工况竖向应变分布曲线.浅层地基中 S1 工况地基的竖向应变最大,S2 工况次之,S3 工况最小;在深层地基中则相反.

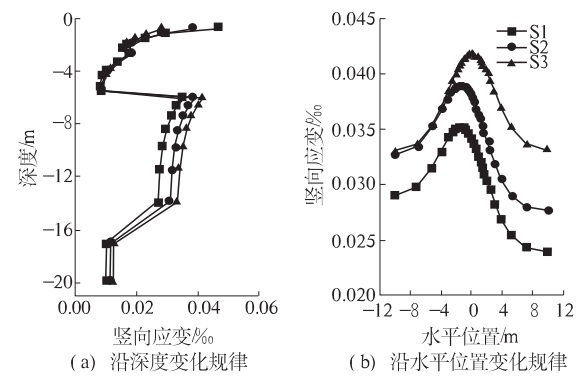


图 6 竖向应变分布曲线  
Fig. 6 Distribution of vertical strains

3.2 不同轮压工况分析

假设拖挂车接地面积不变,增加的荷载只引起轮压的变化.分别选取轮压为 0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 MPa,对不同轮压荷载工况进行参数分析.

3.2.1 附加应力及附重比分析

图 7 为不同轮压工况下附加应力及附重比沿深度分布曲线.可以看出,同一深度处附加应力值随着轮压的增加而增加(图 7(a)).同一深度处附重比随轮压增加而增加,各工况下附重比等于 0.1 的深度分别约为 1.85、2.10、2.30、2.60、3.0 m(图 7(b)).

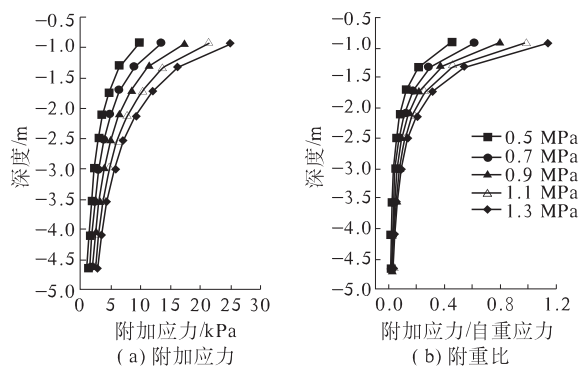


图 7 不同轮压工况下附加应力及附重比沿深度变化曲线  
Fig. 7 Variation of ratio of induced stress to gravity stress with depth under different loading conditions

3.2.2 竖向应变分析

图 8 为不同轮压荷载工况下竖向应变沿深度分布曲线.可以看出,随轮压的增加,同一深度处的竖向应变逐渐增大,且增幅有上升趋势.



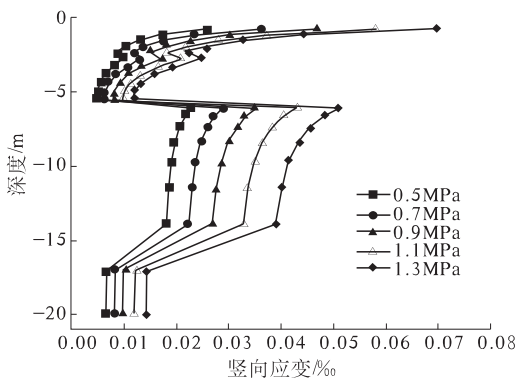


图 8 不同轮压工况下竖向应变分布曲线  
Fig.8 Distributions of vertical strains under different loading conditions

3.3 不同砂垫层工况分析

砂垫层厚度是港口地基设计中的重要参数,下面对不同厚度砂垫层工况进行参数分析.

3.3.1 附加应力及附重比分析

图 9 为不同砂垫层厚度工况下附加应力及附重比沿深度变化曲线.可以看出,在相同深度处附加应力值随着砂垫层厚度增加而减小(图 9(a)).在相同深度处附重比随着砂垫层厚度增加而减小(图 9(b)).各工况附重比等于 0.1 的深度均在 2.5 m 左右.对于 0.8 m 和 1.2 m 工况,该深度已超出砂垫层底部,1.6 m 工况几乎位于砂垫层底部,2.0 m 厚工况则在砂垫层中.

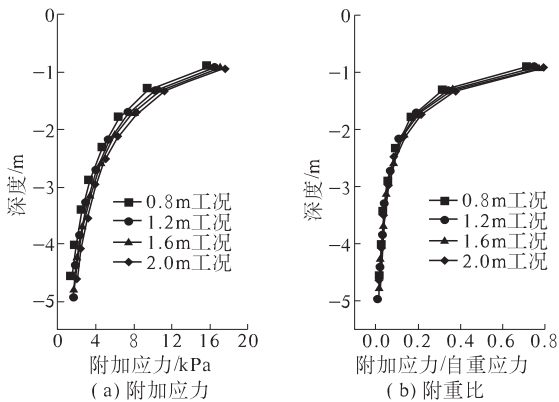


图 9 不同砂垫层厚度工况下  
附加应力及附重比变化曲线

Fig.9 Variation of induced stress and ratio of induced stress to gravity stress under different thickness of sand cushion conditions

3.3.2 竖向应变分析

图 10 为不同砂垫层厚度工况下竖向应变沿深度变化曲线.可以看出,最大竖向应变发生在淤泥质土顶部,相同深度处竖向应变随砂垫层厚度的增加而减小,减小幅度呈减小趋势,从 1.6 m 增

加到 2.0 m 时,淤泥质土顶部竖向应变该变量较未到达 1.6 m 前要小得多.

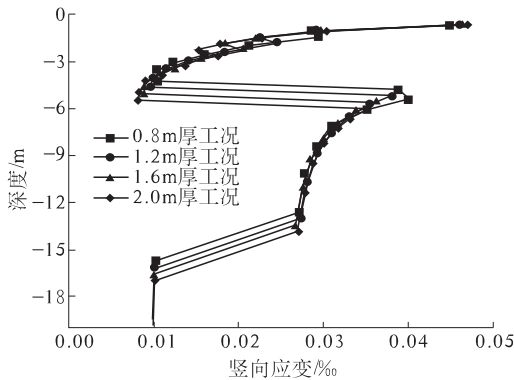


图 10 不同砂垫层厚度工况下竖向应变分布曲线  
Fig.10 Distributions of vertical strains under different thickness of sand cushion conditions

4 结论

以广州南沙港现场拖挂车荷载试验为依托,采用 FLAC3D 建立数值分析模型,通过与现场试验数据对比,验证了模型及参数选择的合理性.随后对地基中的附加应力、竖向应变及侧向位移等进行了系统分析,并对不同加载荷位、轮压和砂垫层厚度工况进行了参数分析,主要得到以下结论:

(1)附加应力在浅层地基中在加载侧有较明显的应力集中现象,随深度的增加该现象逐渐消失.

(2)竖向应变在各土层中均沿深度方向逐渐减小.淤泥质土层中的竖向应变值较大,且沿深度方向减小幅值较小.

(3)侧向位移沿水平方向呈先增大后减小的变化规律,并在加载板一侧达到最大值,沿深度方向呈先增加后减小的变化规律.

(4)板角加载工况为最不利荷位工况.整体上,地基中的附加应力、竖向应变和侧向位移,均随着轮压的增加而增大,随着砂垫层厚度的增加而减小.

参考文献:

[1] YAN S W, CHU J. Soil improvement for a storage yard using the combined vacuum and fill preloading method [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(4): 1094 - 1104.  
[2] 孙立强,闫澍旺,李伟.真空-堆载联合预压加固吹填土地基有限元分析法的研究[J].岩土工程学报,2010,32(4):592-599.  
[3] 梅国雄,徐锴,宰金珉,等.真空预压加固软土地

基变形机理的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (9): 1168 – 1172.

[4] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and application to the settlement of a low embankment road on silty-clay [J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33 – 46.

[5] SAMANG L, MIURA N, SAKAI A. Long-term measurements of traffic load induced settlement of pavement surface in Saga Airport Highway, Japan [J]. Journal Teknik Sipil, 2005, 12(4): 275 – 285.

[6] 孙立强, 闫澍旺, 徐余. 软土路基“波浪形”不均匀沉降及其机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 526 – 531.

[7] 赵亮, 闫澍旺. 吹填土地基道路工后不均匀沉降分析和加固措施研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45 (2): 176 – 173.

[8] 张军, 申俊敏, 甘甜, 等. 重交通荷载作用下港区地基工作区深度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2942 – 2949.

[9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. JTS 1441—2010 港口工程荷载规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

Study on Mechanical Characteristics of Port Road under the Vehicle Load

NIU Li-qiang

(Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Based on the field tests of port road under the vehicle load, a series of numerical simulation was conducted using FLAC3D to analyze the deformation characteristics of port reclamation ground under the vehicle load. The pavement is modelled by the elastic model and the ground is modelled by the M-C model. A detailed analysis of the additional stress and vertical strain of ground is performed. Simulation results show that the additional stress concentrates in shallow ground under the loading position and this phenomenon disappears gradually along the depth. The vertical strain of silt soil is larger than the other soil and it decreases slightly along the depth. Lastly, a series of parameters analysis was carried out, such as loading position, wheel pressure and sand cushion thickness.

**Key words:** port; road; vehicle load; mechanical characteristics

(上接第 81 页)

Preparation and Properties of Epoxy Asphalt Applied for Concrete Bridge Deck

CONG Pei-liang<sup>1,2</sup>, LIU Jian-fei<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, CHEN Shuan-fa<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Engineering Research Center of Transportation Materials of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** For the application of epoxy asphalt in concrete bridge deck materials, a kind of epoxy asphalt was prepared to study and analyze the influence of resin content for the viscosity characteristics, high temperature performance of epoxy asphalt binder, and the strength properties, high temperature stability, fatigue resistance of epoxy asphalt mixture. The results shows that the application of epoxy can improve pavement performance and mechanical properties of asphalt mixture; when dosage of resin is increased, the process of curing reaction of epoxy asphalt happens faster, high temperature performance and fatigue resistance are enhanced, stiffness modulus is increased, creep rate is decreased, low temperature cracking resistance is reduced, asphalt mixture fatigue resistance and high temperature stability are improved. Synthetically, 30% is the best resin content.

**Key words:** epoxy asphalt; bridge deck material; pavement performance; epoxy resin content; mechanical property

文章编号:1671-6833(2014)06-0100-04

# 基于 C#的继电保护整定系统关键技术研究

杨胡萍<sup>1</sup>, 左士伟<sup>1</sup>, 钟耀星<sup>2</sup>, 陈 豪<sup>1</sup>

(1. 南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 国家电网 江西赣西供电公司, 江西 新余 338025)

**摘 要:** 继电保护整定计算对电力系统稳定性和安全性起着非常重要的作用, 为使电力系统继电保护整定计算软件满足通用性、可扩展性和可维护性的要求, 提高整定计算的速度和精度, 开发了一种基于 C#的继电保护整定系统. 系统采用模块化的体系结构设计和数据库设计, 制定了开放式的整定原则, 提出一种基于泛型类型的超流水低阻塞率数据存取技术, 应用无重访的广度优先搜索算法自动生成零序网络图, 且在 5 节点电力系统中验证了所提算法的有效性.

**关键词:** 继电保护; 整定计算; 泛型; 零序

**中图分类号:** TM77 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.024

## 0 引言

继电保护整定计算对电力系统的稳定运行起着极为重要的作用, 对数据的准确性和实时性要求极高<sup>[1]</sup>. 近几年, 整定计算软件成为研究热点<sup>[2-3]</sup>. 文献[4]以人工操作最小为原则, 开发了具有智能性和通用性的发电厂继电保护整定计算系统; 文献[5]在分析了一般整定计算软件功能的基础上, 对它的通用性问题进行了详细探讨, 指出将整定原则的可选性和自定义相结合的思路, 减少了软件维护的工作量, 具有很强的通用性和扩展性; 文献[6]利用数据拼接、数据迁移和图形融合技术解决了整定计算参数交换存在的问题; 文献[7]通过对 Visio、PSCAD 和 Word 软件的综合运用, 实现了一种图形化开放式短路电流计算及继电保护整定一体化平台的研制, 提高了整定计算工作的自动化程度, 具有很强的有效性和实用性; 文献[8]首次提出以模块为单位的继电保护图形数据一体化的设计方法, 将继电保护图形与数据基于模块集成并存入数据库.

笔者以 Microsoft 公司的 VisualStudio2010 为开发平台使用 C#语言开发了可视化电力系统继电保护整定系统, 并且提出了一种基于泛型类型的超流水低堵塞率的数据存取技术和无重访的广度优先搜索算法用于生成零序网络图, 系统具有

良好的通用性、可扩展性和可维护性<sup>[9]</sup>.

## 1 系统体系结构设计

在继电保护整定计算中, 因为计算系统运行方式的多变性、设备类型和定值计算方法的多样性等原因, 使得继电保护整定计算非常繁琐和复杂. 基于以上特点同时兼顾系统的未来需求, 系统体系结构采用模块化的设计, 各个模块间既相互独立又具有内在的紧密联系, 使得系统具有很好的可扩展性和可维护性<sup>[10]</sup>. 系统总体结构如图 1 所示.

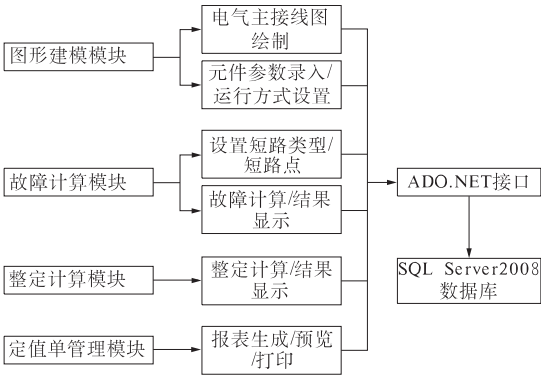


图 1 系统总体结构图

Fig. 1 The whole system structure

(1) 图形建模模块应用 C#语言的自定义控件技术构建了电气元件的图元库, 每一个图元都定

收稿日期:2014-06-06; 修订日期:2014-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51367014)

作者简介:杨胡萍(1964-), 女, 江西九江人, 南昌大学教授, 主要从事电力系统分析及经济运行方面的研究, E-mail: yhp123@163.com.

义了电气属性和非电气属性,同时借助双缓冲技术开发了图形建模的环境。

(2)故障计算模块利用图元的非电气属性确定电气元件的连接关系,进而进行网络拓扑分析,并且自动生成正序和零序网络图,可以设置计算不同短路点、不同短路形式、不同运行方式的短路电流。

(3)整定计算模块可以实现原理级和装置级的整定,并且参考了现场的定值计算方法,支持整定参数的调整、定值计算、灵敏度校验和定值结果显示的功能<sup>[11]</sup>。

(4)定值单管理模块实现报表的设计、预览和打印功能。

整定原则是整定计算软件的核心部分,整定原则的制定是否合理,将直接影响整定计算结果的正确性和整定计算软件的适应性。在整定原则的实现上,以规程为基本原则,同时从实际情况出发,系统可以根据整定计算人员制定的方式组合、配合策略和整定参数完成定值计算<sup>[12-13]</sup>。整定计算流程如图 2 所示。

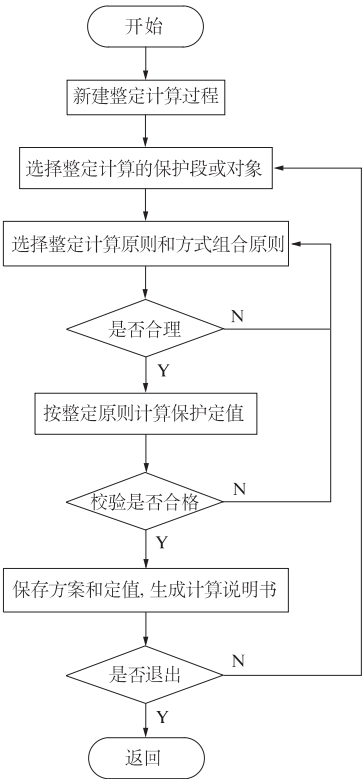


图 2 整定计算流程图

Fig. 2 Setting calculation flowchart

2 超流水低阻塞率数据存取技术

在继电保护整定过程中,需要用到电力系统

各个方面的数据,如电力系统一次系统的结构参数和元件特性参数,二次系统的配置参数和元件参数。合理有效的管理和应用各种数据,直接涉及到整个软件系统的各种性能指标。为了提高数据的存取效率和满足未来需求,系统数据库也采用模块化设计,包括如下子数据库:系统原始参数库、系统图形数据库、基本图元库、故障计算信息库、整定计算信息库和定值计算信息库。数据库结构如图 3 所示。

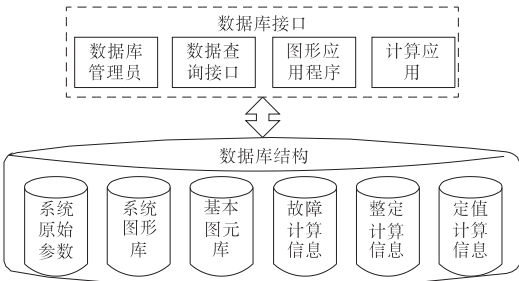


图 3 数据库结构图

Fig. 3 Database structure

为提高系统的响应和计算速度,本系统使用了 C#泛型,泛型是 2.0 版 C#语言和公共语言运行库(CLR)中的一个新功能,泛型最常见的用途就是创建集合类,使用泛型类型可以最大限度地重用代码、保护类型的安全以及提高性能。

借助泛型,本系统在数据存取机制上采用一种新的思路,每次对数据库进行增加、删除和更新数据时,首先把这次数据操作存入相应的泛型内,并且组成一个数据集 Dataset,长度为  $n$ ;然后把数据集 Dataset 分为  $n$  个数据子集合;最后以数据子集合为最小单位以一定的时间间隔存入数据库,这样,极大地减小了数据阻塞的可能性,提高了系统响应速度。笔者把这种存取数据的方法称为超流水低阻塞率数据存取技术。数据导入流程如图 4 所示。

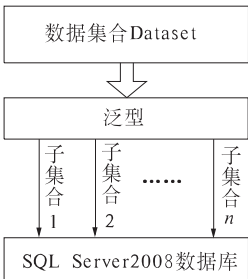


图 4 数据导入流程图

Fig. 4 Data import flowchart

3 无重访的广度优先搜索算法

本系统采用基于节点导纳矩阵的数学模型,通过修改导纳矩阵来处理各种方式变更和故障类型,并应用动态节点优化技术和稀疏技术,提出了无重访的广度优先搜索算法用于生成零序网络图,实现了可视化的故障计算.无重访的广度优先搜索算法计算步骤和算法流程如图 5 所示.

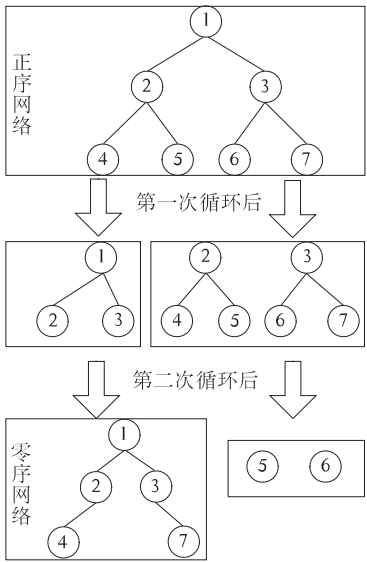


图 5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flowchart

计算步骤:

step1. 以短路点 1 为根节点,向外搜索与短路点 1 直接相连的支路(搜索原则:若是输电线路则记录其另一端节点号和零序阻抗值,若是变压器支路则根据变压器绕组的接线型式(Y,YN,d)判断短路电流能否流通,若能够流通则记录其另一端节点号和零序阻抗值,否则丢弃);

step2. 将根节点和搜索完毕的支路信息丢弃,目的是减少内存占用和防止重复访问;

step3. 以上一轮搜索到的节点号为根节点,继续向下搜索,搜索原则同 step1,执行 step2,重复 step3,直到再没有根节点可以找到支路;

step4. 退出循环,生成零序网络图.

4 算例分析

在 5 节点电力系统上验证所提无重访的广度优先搜索算法的有效性.正序网络结构如图 6 所示,正序网络参数见表 1 所示.发电机支路均接地,假定发电机电势的标幺值等于 1,变压器支路均为 YN-d 型,靠近发电机侧为 d 型绕组接法,靠近交流线侧为 YN 型绕组接法.

正序网络节点数为 5,支路数为 7,设置短路

节点号为 1,短路类型为两相短路接地.

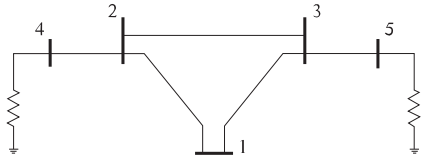


图 6 正序网络结构图

Fig. 6 Positive sequence network structure

表 1 正序网络参数

Tab. 1 Positive sequence network parameters

节点	节点	支路类型	电抗/ $\Omega$
0	4	发电机	0.020
4	2	变压器	0.015
2	3	交流线	0.300
2	1	交流线	0.250
1	3	交流线	0.350
3	5	变压器	0.030
0	5	发电机	0.020

短路节点号为 1,应用所提算法进行第一次循环,搜索到节点 2 和节点 3,第二次循环以节点 2 和节点 3 为根节点继续向下搜索,根据变压器绕组接线型式,得知零序电流无法穿越变压器,而是经接地电抗流向大地,循环终止.零序网络结构如图 7 所示,零序网络参数见表 2.

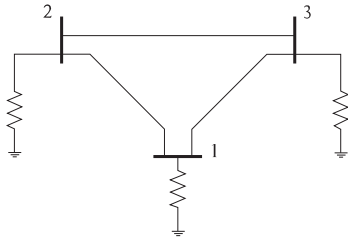


图 7 零序网络结构图

Fig. 7 Zero sequence network structure

零序网络节点数为 3,支路数为 6,对应短路节点号为 1.

表 2 零序网络参数

Tab. 2 Zero sequence network parameters

节点	节点	电抗/ $\Omega$	节点	节点	电抗/ $\Omega$
0	2	0.015	1	3	1.000
2	3	0.750	0	3	0.030
2	1	0.700	0	1	0.050

假定正序网络的节点阻抗矩阵为  $Z_1$ ,零序网络的节点阻抗矩阵为  $Z_0$ ,短路点 1 两相短路接地的正序电流  $I_1$ 、零序电流  $I_0$  和零序电压  $V_0$  可以使用如下公式进行计算.

$$P = Z_1(D, D) \times Z_0(W, W) / (Z_1(D, D) + Z_0(W, W)); \tag{1}$$

$$I_1 = 1 / (Z_1(D, D) + P); \tag{2}$$

$$I_0 = -P \times I_1 / Z_0(W, W); \tag{3}$$

$$V_0 = P \times I_1. \tag{4}$$

式中: $P$  为中间变量; $D$  为正序网络短路节点; $W$  为对应零序网络短路节点.

将表 1 和表 2 所示的网络参数数据带入公式 (1) ~ (4) 中, 计算得到短路点 1 两相短路接地的零序电流标么值为 3.908 9, 零序电压标么值为 0.174 7.

5 结论

(1) 讨论了基于 C# 的继电保护整定系统的关键技术, 系统采用了模块化的体系结构和数据库, 在扩展性和可维护性方面得到了改善, 制定了更具有通用性的整定计算流程.

(2) 提出了一种超流水低阻塞率数据存取技术, 以 C# 的泛型类型为纽带, 通过将数据集 Dataset 细化, 使得程序分批分时将数据操作完成, 用时间换取更多的空间, 很大程度降低了数据阻塞的可能性;

(3) 研制了无重访的广度优先搜索算法用于自动生成零序网络图, 算法占用内存少, 在 5 节点电力系统上验证了所提算法的有效性, 取得了很好的效果.

(4) 基于以上的研究, 为后续在线整定、在线校核计算系统的研制提供了便利.

参考文献:

[1] 李银红, 王星华, 骆新, 等. 电力系统继电保护整定计算软件的研究[J]. 继电器, 2001, 29(12): 5-8.  
[2] 王利赛, 杨小萍, 杨明玉, 等. 继电保护整定系统的

发展[J]. 电气技术, 2011, 3(10): 3-6.  
[3] 陈新, 吕飞鹏, 蒋科, 等. 基于多代理技术的智能电网继电保护在线整定系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 167-173.  
[4] 赵冬梅, 张旭, 刘燕华, 等. 发电厂继电保护整定计算系统的智能化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 100-104.  
[5] 杨增力, 石东源, 杨雄平, 等. 继电保护整定计算软件的通用性研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 89-93.  
[6] 陈朝晖, 周红阳, 石东源, 等. 大型互联电网继电保护整定计算数据一体化管理系统[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 106-110.  
[7] 厉志波, 高鹏, 马建胜, 等. 一种电力系统图形化开放式短路电流计算及继电保护整定一体化平台的研制[J]. 电气应用, 2013, 32(5): 26-32.  
[8] 刘为雄, 蔡泽祥, 邹俊雄. 模块化的电力系统继电保护图形数据一体化设计[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 51-53.  
[9] 邓丰强, 吕飞鹏, 张向亮, 等. 面向对象的电网继电保护整定计算管理系统[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(4): 36-41.  
[10] 张虹, 赵冬梅, 张旭. 电厂继电保护整定计算智能系统图模库一体化工具的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 117-122.  
[11] 徐达艺. 继电保护整定计算危险点分析[J]. 电气应用, 2013, 32(20): 50-52.  
[12] 高红艳, 杨志刚. 可灵活配置整定原则的继电保护整定计算软件的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 175-180.  
[13] 徐敏, 陈全, 张锦文, 等. 基于规则推理的继电保护动作行为评价的新方法研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(1): 116-119.

Research on Key Technology of Protective Relay Setting System Based on C#

YANG Hu-ping<sup>1</sup>, ZUO Shi-wei<sup>1</sup>, ZHONG Yao-xing<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Ganxi Power Supply Company, Xinyu 338025, China)

**Abstract:** Protective relay setting calculation plays a very important role in the stability and security of power system. The paper has developed a protective relay setting calculation software system based on C# language to meet the requirements of versatility, scalability and maintainability, which improves the speed and accuracy of the setting calculation. By using the modular architecture and database, the paper develops open setting principles, proposes a super-pipelining low-blocking rate data access technology based on generic type, applies the non-revisiting breadth first search algorithm to generate zero-sequence network diagram automatically and tests the effectiveness of proposed algorithm on five-bus power system.

**Key words:** protective relay; setting calculation; generics; zero-sequence



文章编号:1671-6833(2014)06-0104-04

# 基于滑模变结构的 IPMC 跟踪控制系统设计

王璠琿, 张 强, 王东云, 刘 萍

(中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 451191)

**摘 要:** 为了使 IPMC 人工肌肉在仿生机器人中得到更好的应用, 其期望的位置必须能够精确地控制. 针对 IPMC 表现出的强非线性以及模型不确定性, 首先采用滑模变结构对其进行控制, 实现了在不确定因素下的系统鲁棒稳定, 然后采用 PI 外环控制器对其进行跟踪, 最后将神经网络应用到 PI 外环跟踪控制器的设计中. 仿真结果表明, 该系统不仅能够实现含有不确定性的 IPMC 人工肌肉精确位置跟踪, 而且能在模型不确定性以及外部因素干扰下依旧保持稳定, 鲁棒性能好.

**关键词:** IPMC; 不确定性; 滑模变结构; 神经网络; 非线性位置控制; 鲁棒稳定

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.025

## 0 引言

离子聚合物金属材料(IPMC, Ionic-exchange Polymer Metal Composite)是一种离子型电致动聚合物, 已经被人们赋予人工肌肉的美名<sup>[1]</sup>. 在低电压驱动下, 能够产生较大的位移变形, 作为一种新型执行器非常适用于仿生机器人的开发与应用<sup>[2-3]</sup>. 为了精确控制 IPMC 人工肌肉的位置, 将传统的 PID 控制应用到高度复杂的非线性以及模型不确定性系统中, 效果是不够理想的, 尽管传统 PID 控制器具有一定的鲁棒性和适应性, 但是对于强非线性、快速时变不确定性、强干扰等特性的对象, 控制效果较差. 由于变结构控制能够克服系统的不确定性, 对干扰和未建模动态具有很强的鲁棒性, 且具有快速响应, 无需系统辨识, 物理实现简单等优点, 尤其是对非线性系统的控制具有良好的控制效果, 已经广泛应用于非线性系统的控制设计中<sup>[4-8]</sup>. 因此, 针对 IPMC 复杂非线性模型以及模型不确定性, 采用滑模变结构对 IPMC 人工肌肉位置进行跟踪控制, 并采用指数趋近律方法来抑制滑模变结构控制过程中产生的抖振现象, 进而设计了基于神经网络的 PI (Proportional-Integral) 外环跟踪控制器, 实现了不确定性因素下参数的自整定, 鲁棒性较好. 最后通过仿真结果验证了所设计系统的有效性.

## 1 IPMC 动态模型

在 IPMC 人工肌肉的精确位置控制中, 主要存在线性和非线性两种模型. 非线性模型相对线性模型而言能够比较详细地解释了 IPMC 人工肌肉的动作原理和工作机理. 一种 IPMC 的非线性模型可以描述为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} \dot{v} = -\frac{v-u}{C_1(v)(R_a+R_e)}; \\ y = \frac{3\alpha_0 K_e \sqrt{2\Gamma(v)}}{Y_e h^2} + \Delta. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v$  是状态变量;  $u$  是控制输入电压;  $y$  是控制输出曲率;  $R_a$  是限流电阻;  $R_e$  是电极电阻;  $K_e$  是介电常数;  $Y_e$  是等效模量;  $h$  是 IPMC 人工肌肉的厚度;  $\Delta$  是有界未知的模型不确定量; 函数  $\Gamma(v)$ 、 $C_1(v)$  分别表述为

$$\begin{cases} \Gamma(v) = \frac{b}{a^2} \left( \frac{ave^{-av}}{1-e^{-av}} - \ln \left( \frac{ave^{-av}}{1-e^{-av}} \right) - 1 \right); \\ C_1(v) = \frac{SK_e}{\sqrt{2\Gamma(v)}} \times \dot{\Gamma}(v). \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $a, b$  的值由以下公式得到:

$$\begin{cases} a = \frac{F}{RT}; \\ b = \frac{F^2 C^{-1}}{RTK_e}. \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期:2014-07-17; 修订日期:2014-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61304115)

作者简介:王璠琿(1978-), 男, 河南信阳人, 中原工学院副教授, 博士, 主要研究领域为非线性控制, 机器人控制, E-mail:wah1978@126.com.

式中:  $F$  是法拉第常数;  $R$  是气体常数;  $T$  是绝对温度;  $C^{-1}$  是负离子浓度. 将式(2)、(3)代入式(1)中并令  $x = av$ , 可得到如下非线性模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{(x - au) \sqrt{2b(\frac{xe^{-x}}{1-e^{-x}} - \ln(\frac{xe^{-x}}{1-e^{-x}}) - 1)}}{SK_e b(R_a + R_c)(1 - \frac{1-e^{-x}}{xe^{-x}}) \frac{e^{-x}(1-x-e^{-x})}{(1-e^{-x})^2}}; \\ y = \frac{3\alpha_0 K_c \sqrt{2b(\frac{xe^{-x}}{1-e^{-x}} - \ln(\frac{xe^{-x}}{1-e^{-x}}) - 1)}}{aY_c h^2} + \Delta. \end{cases} \quad (4)$$

## 2 滑模变结构控制器设计

设计滑模变结构控制器的基本步骤包括:

①设计切换函数  $s(x)$ , 使它所确定的滑动模态渐近稳定且具有良好的动态品质. ②设计滑动模态控制律  $u(x)$ , 使到达条件得到满足, 从而在切换面上形成滑动模态区.

### 2.1 切换函数的设计

滑模函数设计为  $s(t) = ce(t)$ , 其中,  $c > 0$  满足 Hurwitz 条件. 误差及其导数分别为

$$e(t) = x_d(t) - x(t), \dot{e}(t) = \dot{x}_d(t) - \dot{x}(t). \quad (5)$$

其中,  $x_d(t)$  为设定参考值. 则

$$\dot{s}(t) = c \dot{e}(t) = c[\dot{x}_d(t) - \dot{x}(t)]. \quad (6)$$

### 2.2 滑动模态控制律的设计

采用指数趋近律, 不仅可以改善系统的动态品质, 还可以有效地抑制抖振, 其形式为

$$\dot{s} = -\xi \text{sgn}(s) - ks, \xi > 0, k > 0; \quad (7)$$

$$s \dot{s} = -\xi s \text{sgn}(s) - ks^2, \xi > 0, k > 0. \quad (8)$$

从而保证  $s \dot{s} \leq 0$ . 即满足滑模存在性和可达条件. 选取 Lyapunov 函数:

$$v = \frac{1}{2}s^2. \quad (9)$$

对其求导有

$$\dot{v} = s \dot{s} = -\xi s \text{sgn}(s) - ks^2. \quad (10)$$

根据上述分析, 得

$$s \dot{s} \leq 0, \quad \dot{v} \leq 0. \quad (11)$$

则证明基于指数趋近律的滑模控制在李雅普诺夫意义下是渐近稳定的.

由动态方程状态空间方程表达式

$$\dot{x} = \frac{(x - au) \sqrt{2b(\frac{xe^{-x}}{1-e^{-x}} - \ln(\frac{xe^{-x}}{1-e^{-x}}) - 1)}}{SK_e b(R_a + R_c)(1 - \frac{1-e^{-x}}{xe^{-x}}) \frac{e^{-x}(1-x-e^{-x})}{(1-e^{-x})^2}}. \quad (12)$$

分别令  $A, B$  为如下形式:

$$A = \frac{(1 - \frac{e^x - 1}{x}) \times (e^x - 1 - xe^x)}{(e^x - 1)^2}; \quad (13)$$

$$B = \sqrt{\frac{x}{e^x - 1} - \ln(\frac{x}{e^x - 1})} - 1. \quad (14)$$

将辨识得到的模型参数以及  $A, B$  代入式(12)得到等效关系式:

$$\dot{x} = \frac{-0.1114A \times (x - 40.017u)}{B}. \quad (15)$$

由式(7)和式(8)联立, 得

$$c[\dot{x}_d(t) - \dot{x}(t)] = -\xi \text{sgn}(s) - ks. \quad (16)$$

将式(16)代入, 得

$$u = 0.025 \times (\frac{B[\xi \text{sgn}(s) + ks]}{0.5567A \times c} + x). \quad (17)$$

在实际系统中, 假设存在外部干扰的情况下, 控制器的设计如下: 设  $d$  为干扰, 未知但有界. 设计滑模控制律为

$$u = 0.025 \times (\frac{B[\xi \text{sgn}(s) + ks]}{0.5567A \times c} + x - d_c). \quad (18)$$

$d_c$  为设计的与干扰  $d$  的界相关的正实数. 将式(18)代入式(15)、(16), 得

$$\dot{s} = -\xi \text{sgn}(s) - ks + d_c - d. \quad (19)$$

通过选取  $d_c$  来保证控制系统稳定, 即满足滑模到达条件. 假设  $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ ,  $d_c$  选择的原则为:

(1) 当  $s(t) > 0$  时,  $\dot{s} = -\xi - ks + d_c - d$ , 为了保证  $\dot{s} < 0$ , 取

$$d_c = d_{\min}. \quad (20)$$

(2) 当  $s(t) < 0$  时,  $\dot{s} = -\xi - ks + d_c - d$ , 为了保证  $\dot{s} > 0$ , 取

$$d_c = d_{\max}. \quad (21)$$

$$\text{取} \begin{cases} d_1 = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2}; \\ d_2 = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2}. \end{cases} \quad (22)$$

则可设计满足上述两个条件的控制器  $d_c$ .

$$d_c = d_2 - d_1 \text{sgn}(s). \quad (23)$$

为了进而确保 IPMC 的寿命, 其控制电压  $u$  要进行限幅  $Q(t) = \theta(u(t))$ . 其中  $u_{\max} = 3v$ ,  $u_{\min} = -3v$ , 输入受限约束条件如下所示:

$$\theta(v) = \begin{cases} u_{\max}, v > u_{\min}; \\ v, u_{\min} \leq v \leq u_{\max}; \\ u_{\min}, v < u_{\min}. \end{cases} \quad (24)$$

滑模变结构控制系统如图1所示. 采用滑模变结构对含有不确定性的非线性对象 IPMC 人工肌肉进行位置控制. 为了能够跟踪给定输入, 设计

了 PI 外环控制器如图 2 所示. 图中的 $\tilde{p}$ 等效为框图 1 所示系统,此方法的可行性已在文献[10]得到证明. 并采用 BP 算法,应用最速下降法,按照减少目标输出与实际输出之间误差的方向,从输出层反向经过各中间层回到输入层,从而逐层修正各连接权值,对其参数进行自整定,实现跟踪控制. BP 算法实现步骤包括初始化;输入训练样本对,计算各层输出;计算网络输出误差;计算各层误差信号;调整各层权值;检查网络总误差是否达到精度要求;满足则结束,否则继续计算各层输出. 设计的 PI 外环控制器表达式为

$$u(k) = u(k-1) + K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k). \quad (25)$$

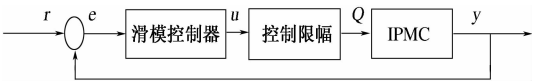


图 1 滑模变结构控制系统结构图

Fig.1 Sliding mode variable structure control system

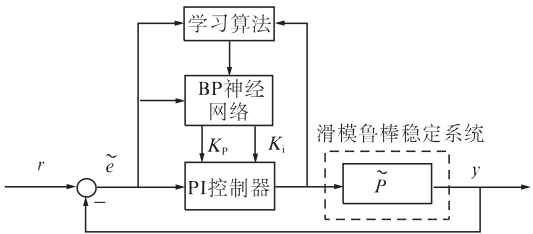


图 2 跟踪控制系统结构图

Fig.2 Tracking control system

3 仿真分析

3.1 仿真参数

辨识的模型参数如表 1 所示.

表 1 辨识的模型参数

Tab.1 Parameters in the model

参数	数值
长度 $L/\text{mm}$	50
厚度 $h/\mu\text{m}$	200
宽度 $W/\text{mm}$	10
绝对温度 $T/\text{K}$	290
限流电阻 $R_a/\Omega$	18
电极电阻 $R_c/\Omega$	60
等效模量 $Y_e/\text{GPa}$	0.56
耦合系数 $\alpha_0/(\text{J} \cdot \text{C}^{-1})$	0.129
负离子浓度 $C^{-1}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	981
法拉第常数 $F/(\text{C} \cdot \text{mol}^{-1})$	96 487
介电常数 $K_e/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	$1.12 \times 10^{-6}$
气体常数 $R/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	8.314 3

滑模变结构控制器 3 个参数分别设置为  $\xi = 10.802\ 6, k = 11, c = 26.601\ 6$ . BP 网络设置时笔者采用  $4 \times 5 \times 2$  网络,即输入层 4 层,隐含层 5 层,输出层 2 层,学习速率  $\eta = 0.2$ ,惯性常数  $\alpha = 0.05$ ,输入层  $O_j = [r(k), y(k), e(k), 1]$ ,输出层  $O_l = [K_p, K_i]$ ,初始权值  $w_i$  和  $w_o$  分别取为:

$$w_i = \begin{bmatrix} 0.474\ 5 & 0.047\ 8 & 0.193\ 4 & 0.454\ 5 \\ -0.349\ 8 & 0.010\ 9 & 0.516\ 5 & 0.742\ 5 \\ -0.061\ 3 & -0.266\ 3 & 0.095\ 7 & 0.420\ 5 \\ 0.554\ 1 & 0.462\ 6 & 0.045\ 7 & 0.423\ 9 \\ 0.146\ 4 & 0.483\ 1 & -0.188\ 0 & 0.628\ 8 \end{bmatrix};$$
$$w_o = \begin{bmatrix} 0.685\ 0 & 0.386\ 4 & 0.315\ 8 & 0.856\ 4 & 0.392\ 7 \\ 0.725\ 0 & 0.760\ 9 & 0.225\ 3 & 0.781\ 6 & 0.579\ 4 \end{bmatrix}.$$

3.2 仿真结果

根据辨识的模型参数,采用滑模变结构分别对含有模型不确定性和不含模型不确定性的非线性对象 IPMC 人工肌肉进行仿真,期望的控制输出曲率  $y$  为  $1\ \text{m}^{-1}$ ,如图 3 所示. 在鲁棒稳定的基础上,加入基于神经网络的 PI 控制器,并将输入电压限幅在 3 V 以内,实现跟踪控制,如图 4 所示.

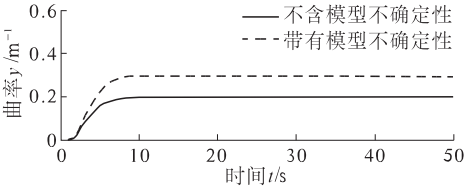


图 3 鲁棒稳定特性仿真结果

Fig.3 Robust stability result

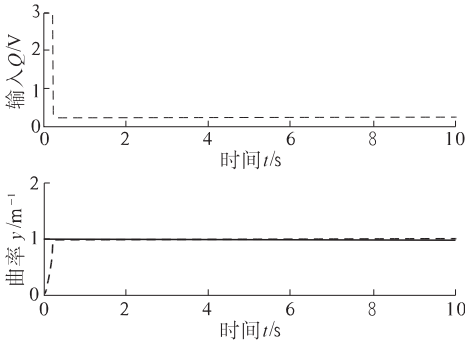


图 4 跟踪特性仿真结果

Fig.4 Tracking result

在实际系统中,不仅有来自模型参数辨识产生的误差,模型结构的不确定性还有系统受到的外部干扰等不确定因素. 为了验证基于神经网络的滑模控制器的鲁棒性能,期望的控制输出曲率为  $y = 0.5\sin(0.25\pi t) + 0.5$ ,并在  $3\ \text{s} < t < 5\ \text{s}$  时给系统加上一个单位阶跃信号的控制器输出干扰,与传统 PID 控制进行了对比,如图 5 所示. 可

以看出,笔者提出的方法相比于传统方法而言,能够较好地跟踪给定,鲁棒性好。

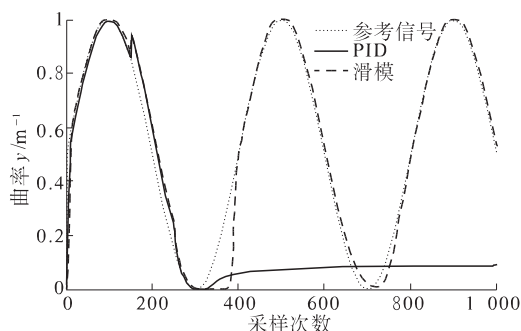


图5 鲁棒性能比较

Fig.5 Robust performance comparison

## 4 结论

针对高度复杂非线性IPMC人工肌肉,建立其精确的数学模型非常困难.采用传统PID控制在模型不确定性以及外部干扰影响下很难达到精确位置控制.本文将近似模型建立过程中产生的模型误差等效为有界的不确定量,采用基于神经网络的PI控制与滑模变结构控制相结合对含有模型不确定性的IPMC人工肌肉进行控制.滑模变结构控制用以实现鲁棒稳定,基于神经网络的PI控制用以实现跟踪,应用所提方法,不仅能够对其精确跟踪,而且抗干扰性能好,鲁棒性强.通过仿真验证了设计系统的可行性.

## 参考文献:

[1] 郝丽娜,周轶然. IPMC的制备研究[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2009, 30(12):1728-1730.

[2] 唐华平,姜永正. 人工肌肉IPMC电致动响应特性及其模型[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2009, 40(1):153-158.

[3] BHAT N, KIM W. Precision force and position control of ionic polymer mental composite[J]. Journal of System and Control Engineering, 2004, 218(6):421-432.

[4] 刘广瑞,刘又午. 柔性臂关节位置滑模变结构控制研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2003, 35(4):58-62.

[5] 晁红敏,胡跃明. 动态滑模控制及其在机器人输出跟踪中的应用[J]. 控制与决策, 2001, 16(5):565-568.

[6] LEVANT A. Chattering analysis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(6):1380-1389.

[7] 李春华,孙约,罗琦. 非线性系统的反演自适应动态滑模控制[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(1):185-187.

[8] FOUAD T, ALHAMMADI K, KARKI H. An optimized chattering free sliding mode controller to suppress torsional vibrations in drilling strings[J]. Conference and Exhibition, 2011:573-576.

[9] WANG Ai-hui, DENG Ming-cong, WANG Dong-yun. Operator-based robust nonlinear control for ionic polymer metal composite with uncertainties and hysteresis[J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence/Computer Science, 2010, 64(24):135-146.

[10] DENG Ming-cong, INOUE A, ISHIKAWA K. Operator-based nonlinear feedback control design using robust right coprime factorization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(4):645-648.

## Position Tracking Control Design for IPMC Based on Sliding Mode Variable Structure

WANG Ai-hui, ZHANG Qiang, WANG Dong-yun, LIU Ping

(Department of Electronic and Information, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** To get better used for the IPMC in biomedical and robotic systems, the position that we expect must be controlled precisely. Against strong nonlinear properties and model uncertainties, as a result, an IPMC artificial muscles position tracking control system based on sliding mode variable structure control and PI control approach is proposed. First, the robust stability is achieved by sliding mode control, furthermore, sliding mode variable structure control and PI control approach which are used to trace the position, finally, the parameters of tracking controller are designed by using neural network. The designed system not only can achieve position tracking, but also guarantee stability in the presence of effect of uncertainties and external perturbation, the effectiveness of the proposed method is confirmed by simulation results.

**Key words:** IPMC; uncertainties; sliding mode variable structure; neural network; nonlinear position control; robust stability

文章编号:1671-6833(2014)06-0108-05

# 喷丸残余应力场 SPH/FEM 耦合建模与仿真

王利平, 王建明, 裴信超, 赵莉莉

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 针对有限元模型难以模拟大量弹丸群集撞击的喷丸过程, 使用光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)耦合有限元法(Finite Element Method, FEM)模拟喷丸强化过程. 工件采用 FEM 建模, 弹丸流采用 SPH 建模, 通过接触算法实现 SPH 和 FEM 的耦合以模拟弹丸对工件的强化作用. 采用随机算法建立了包含丸粒和空气两类 SPH 粒子形成的弹丸流模型, 推导了两者的状态方程. 研究了弹丸速度、喷丸时间等对喷丸残余应力的影响及工件表面各典型位置处的残余应力分布. 结果表明:最大残余压应力值及深度随喷丸速度的增加而增加;达到一定喷丸时间后,继续增加作用时间,则残余应力变化甚微,其变化幅度小于 10%,达到喷丸饱和状态;处于撞击中心处的残余应力值最大.

**关键词:** 喷丸残余应力;光滑粒子流体动力学;耦合有限元法;气体状态方程;丸粒状态方程

**中图分类号:** O242.21;TG668

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.026

## 0 引言

喷丸强化是一种能提高工件表面疲劳寿命的工艺.它通过大量弹丸介质以 20 ~ 100 m/s 的速度反复撞击工件表面,在工件表面形成均匀残余压应力层.该残余压应力层可抵消工件表面的拉应力,从而有效阻止裂纹的萌生和扩展,显著提高工件疲劳寿命<sup>[1-2]</sup>,被广泛应用于航空、军工、汽车等领域.因实验方法耗时耗力,且所用的阿尔门试片不能精确反应残余压应力的分布.随着计算机技术和有限元技术的发展,已出现许多基于有限元法研究喷丸残余应力的数值模型. Mori K 等<sup>[3]</sup>(1992)通过建立 2D 单丸粒对称模型,对塑性变形工件进行了仿真. S. A. Meguid 等<sup>[4-5]</sup>(1999)通过建立 3D 单丸粒动力学模型,研究了弹丸和靶材尺寸对塑性应变及残余应力的影响. S. A. Meguid 等<sup>[5]</sup>和 G. R. Majzoubi 等<sup>[6]</sup>利用 3D 多丸粒对称模型对喷丸强化过程进行了系统的分析. 凌祥等<sup>[7]</sup>(2006)建立了模拟喷丸残余应力场的三维有限元模型. 路会龙等<sup>[8]</sup>(2009)分别建立单、多丸撞击模型,指出弹丸撞击速度存在最优值. 张洪伟等<sup>[9]</sup>(2010)利用 LS-DYNA 有限元软件分别建立单、多丸对称胞元 3D 模型,利用

单丸模型研究弹丸速度、直径、入射角、摩擦系数和重复撞击次数对残余应力及塑性应变的影响;通过分别取 4,6,8,9,13 个弹丸建立对称胞元模型,分析不同覆盖率对残余应力场的影响.上述有限元模型仅涉及单丸或数量有限的多丸,属微观模型,与采用大量弹丸反复撞击工件表面的实际喷丸过程存在明显差异.

笔者采用 SPH 耦合 FEM 方法针对高强度铝合金 A12024-T3 通过显式动力分析软件 LS-DYNA,进行了大量弹丸反复撞击工件表面的喷丸强化过程数值模拟;基于两类不同材料属性的 SPH 粒子模拟弹丸流,研究了弹丸速度、喷丸时间等对喷丸残余应力的影响以及工件表面各典型位置处残余应力的分布规律.

## 1 数值模型的建立

### 1.1 两类 SPH 粒子均匀混合模型

笔者采用两种 SPH 粒子分别表示空气和离散弹丸.其中,空气对应的 SPH 粒子采用常规气体状态方程,弹丸对应的 SPH 粒子采用离散固体的状态方程.两类粒子间的相互作用通过形函数的特殊定义实现,即在表示粒子形函数的相邻粒子支持域中可包含两类不同性质的 SPH 粒子.

收稿日期:2014-06-26;修订日期:2013-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375267)

通讯作者:王建明(1962-),男,山东济南人,山东大学教授,主要从事计算力学、多体动力学、喷丸强化技术方面研究, E-mail: wangjianming@sdu.edu.cn.

在 SPH 法中,问题域的离散是由有限个具有质量并且占有一定空间的粒子组成.粒子的质量可表示为

$$m_i = \Delta V_i \rho_i.$$

(1)

式中: $\Delta V_i$  为粒子  $i$  占有的体积; $\rho_i$  为粒子  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 的密度, $N$  为粒子支持域内的粒子数量.

根据弹丸尺寸及弹丸流中弹丸与空气的体积比,分别确定 SPH 粒子大小和空气粒子与弹丸粒子的数量.为使两类 SPH 粒子均匀混合,使用随机函数产生随机数,通过 MATLAB 编程实现不同属性的两类 SPH 粒子在弹丸流空间范围内随机均匀分布.将得到的两类 SPH 粒子随机分布单元信息写入 LS-DYNA 支持的 K 文件中.图 1 所示为两类 SPH 粒子均匀分布模型,其中左侧粒子代表弹丸,右侧粒子代表空气.

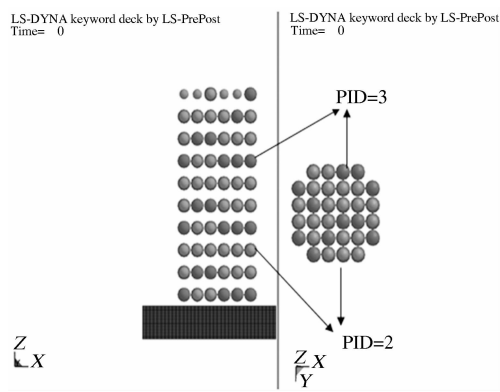


图 1 两类 SPH 粒子混合模型

Fig.1 Hybrid model for two types of SPH particles

1.2 气体状态方程

在 LS-DYNA 中,采用 MAT\_Null 材料建立空气 SPH 粒子,使用状态方程 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 表示压力与密度变化间的关系. EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 为线性多项式形式的状态方程,可表示为

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4\mu^4 + C_5\mu^5 + C_6\mu^6)E.$$

(2)

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ,表示当前密度与参考密度间的比值, $\rho_0$  为初始参考密度,在材料模式 MAT\_Null 中定义; $C_0 \sim C_6$  为各项系数,对于气体状态方程取

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0;$$

(3)

$$C_4 = C_5 = \frac{C_p}{C_v} - 1.$$

(4)

式中: $C_p$  为定压比热; $C_v$  为定容比热.

上述状态方程相关参数使用 AUTODYNA-

Version6.1 材料库中的参数,如表 1 所示.

表 1 气体材料和状态方程相关参数

Tab.1 Relative parameters of the air material and state equation

密度 $\rho_0/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	多项式 系数 $C_4$	多项式 系数 $C_5$	单位体积初始内能 $E/(10^7 \text{N} \cdot \text{cm})$
0.00129	0.4	0.4	$2.5 \times 10^{-6}$

1.3 丸粒状态方程

丸粒 SPH 粒子使用 MAT\_Null 模拟,考虑弹丸流具有离散介质的特性,根据文献[10]推导弹丸 SPH 粒子的状态方程,其为特殊形式的 Gruneisen 方程:

$$P = \begin{cases} C_s^2(\rho - \rho_0), & \rho > \rho_0; \\ 0, & \rho < \rho_0. \end{cases}$$

(5)

式中: $C_s$  为声音在弹丸材料中的传播速度,对于钢丸其值为  $5.2 \text{ km/s}$ ; $\rho_0$  为弹丸材料初始密度.

设  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ,则当  $\rho > \rho_0$  时,式(5)可表示为

$$P = C_s^2 \rho_0 \mu.$$

(6)

故弹丸 SPH 粒子也可以使用线性多项式形式的状态方程 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL,此时有

$$C_0 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0;$$

(7)

$$C_1 = C_s^2 \rho_0.$$

(8)

弹丸材料和状态方程参数如下:密度  $\rho_0 = 7.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;多项式系数  $C_1 = 2.096$ .

1.4 工件材料本构方程

工件材料为 A12024-T3,力学性能参数如下:弹性模量  $E = 71.3 \text{ GPa}$ ;密度  $\rho_0 = 2.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;泊松比  $\gamma = 0.3$ .

由于撞击过程速度较高且高应变率,需要考虑温度对应力流动的影响.工件材料采用 Johnson-Cook 黏塑性本构方程模拟,屈服应力  $\sigma_y$  与等效塑性应变的关系式为

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^{pn}) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}).$$

(9)

式中: $A, B, C, n, m$  是通过实验获得与应变、应变率、温度相关的常数. Dabboussi 等人提出的相关参数使得仿真结果与实验结果具有较高的一致性<sup>[11]</sup>,见表 2; $\bar{\epsilon}^p$  为等效塑性应变; $\bar{\epsilon}^* = \frac{\bar{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}$ , $\dot{\epsilon}_0$  等于  $1 \text{ s}^{-1}$ .

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}.$$

(10)

式中: $T$  为任一时刻的瞬时温度; $T_m$  为溶解温度, $T_r$  为参考温度取  $292 \text{ K}$ .



表 2 Johnson-Cook 相关参数

Tab. 2 Relative parameters of Johnson-Cook

A/MPa	B/MPa	C	n	m
335	85	0.012	0.11	1

1.5 SPH 耦合 FEM 的喷丸模型

采用 LS-DYNA 软件建立喷丸模型如图 1 所示. 其中弹丸流使用两类 SPH 粒子建模, 共包含 320 个 SPH 粒子; 工件使用有限元建模, 为减少计算时间, 工件尺寸取 6 mm×6 mm×4 mm, 由于工件中部区域与弹丸发生接触, 故对其网格进行细化, 由 53 760 个 solid 单元组成. 工件底面采用固定位移边界, 4 个侧面采用非反射边界以避免应力波在其边界发生反射.

通过定义接触算法耦合 FEM 与 SPH 模型. 在 LS-DYNA 中通过关键字 Contact\_Automatic\_Nodes\_to\_Surface 定义有限单元模型上表面与 SPH 粒子间的接触关系, 其中将 FEM 单元节点定义为主节点, SPH 粒子定义为从节点. SPH 耦合 FEM 的过程如图 2 所示.

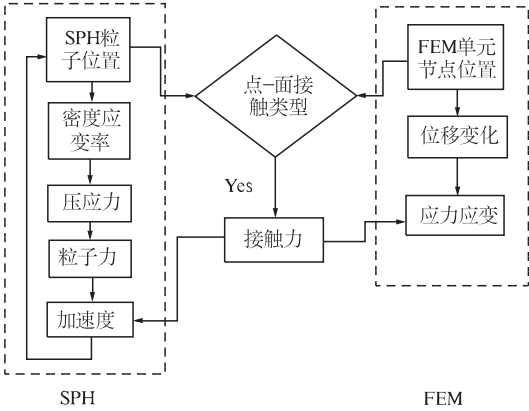


图 2 SPH 耦合 FEM 的过程

Fig. 2 The process of SPH coupled FEM

2 仿真结果分析值模型

图 3 为大量弹丸以速度 50 m/s 撞击工件时不同时刻的撞击效果图. 基于此模型可模拟大量弹丸撞击工件的喷丸过程.

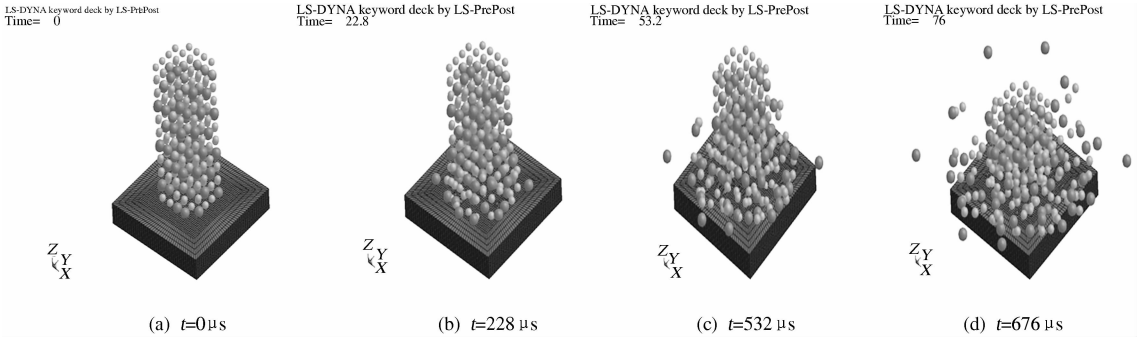


图 3 大量弹丸撞击工件效果图

Fig. 3 The process of shots impacting the target

2.1 弹丸速度对残余应力的影响

由于本文仿真模型中, 弹丸流由大量随机分布的丸粒组成, 可通过弹坑附近的残余压应力研究大量丸粒撞击下的喷丸结果. 图 4 给出弹丸速度分别为 25, 50, 75 和 100 m/s 的大量弹丸经过 120 μs 撞击后, 弹坑底部残余应力分布图. 对应上述 4 种弹丸速度, 其最大残余应力分别为 -632.2, -692.71, -729.0, -738.9 MPa, 发生在距离弹坑表面 0.18~0.24 mm 的次表层. 最大残余压应力值和其深度均随速度的增加而增加. 因此在实际生产中, 应根据最大残余压应力及应力层深度要求合理选择喷丸速度.

2.2 喷丸时间对残余应力的影响

基于本文含大量丸粒的宏观喷丸模型, 可研究残余应力场随喷丸时间的变化. 随着喷丸时间

的增加, 撞击工件表面的弹丸数量、工件表面的有效受喷面积及覆盖率均随之增加. 图 5 所示为速度为 50 m/s 的弹丸分别经过 26.6, 79.8, 102.6, 120 μs 时间后, 弹坑底部残余应力分布图. 图示弹坑处受多个不同粒子撞击, 其中 26.6 μs 对应弹丸首次撞击后的残余应力结果, 而 79.8 μs 则对应弹丸多次撞击同一位置后的残余应力结果. 两者对应的最大残余压应力值分别为 -658.86 MPa 和 -692.17 MPa, 其最大残余压应力值有所提高. 撞击时间继续增加至 102.6 μs 和 120 μs 时, 其对应的残余应力变化甚微, 最大变化幅度小于 10%, 即喷丸残余应力存在饱和状态.

2.3 不同位置点的残余应力分布

图 6 所示为一典型四弹坑分布图. C、E、G、I 分别为 4 个弹坑的中心, B、D、H、F 分别为 4 个弹

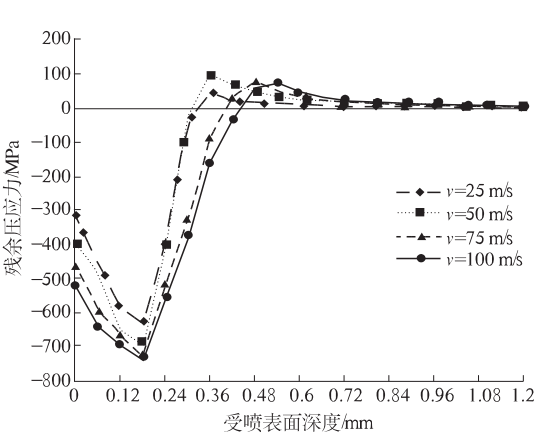


图 4 喷丸速度对残余应力的影响

Fig. 4 Effect of impact velocity on residual stress

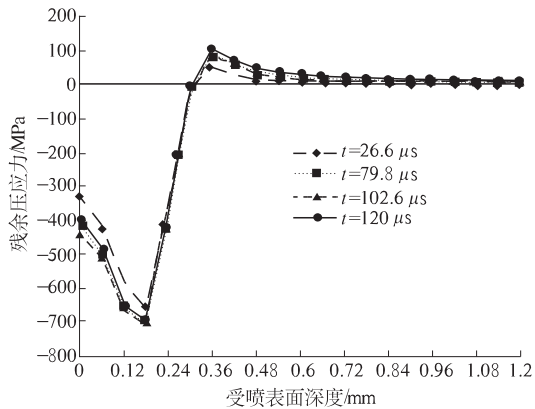


图 5 喷丸时间对残余应力的影响

Fig. 5 Effect of impact time on residual stress

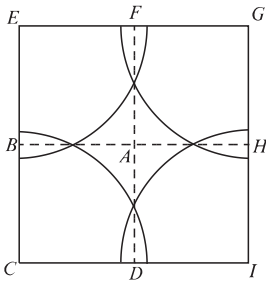


图 6 典型弹坑位置点

Fig. 6 Typical positions of craters

坑两两重叠区域,  $A$  点未受到撞击.  $ABCD$  区域可视为一典型区域. 图 7 分别表示  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  4 个位置点的残余应力分布情况.  $C$  点为粒子撞击中心点, 其最大残余压应力为  $-653.45\text{ MPa}$ , 发生在深度为  $0.20\sim0.22\text{ mm}$  的次表层;  $B$  点和  $D$  点位于两弹坑重叠处, 该处的最大残余压应力值为  $-343.56\text{ MPa}$ , 位于深度为  $0.12\sim0.18\text{ mm}$  的次表层;  $A$  点的最大残余压应力值为  $-450\text{ MPa}$ , 发生在表面处.

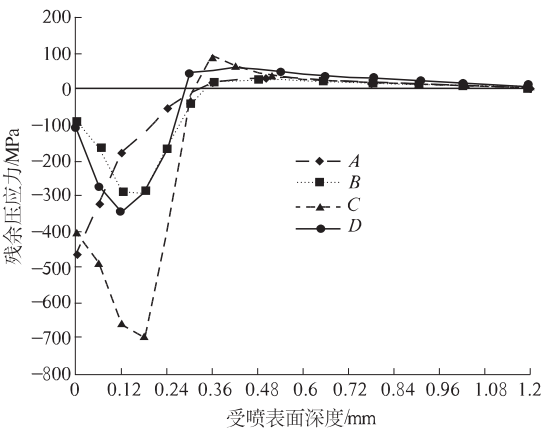


图 7 不同位置残余应力分布

Fig. 7 Distribution of the residual stress vs. depth at different positions

3 结论

针对有限元法难以模拟大量弹丸群集撞击的喷丸过程, 采用 SPH 耦合 FEM 法进行了喷丸过程数值建模与分析. 仿真结果如下:

- (1) 最大残余压应力值及所在次表层深度均随弹丸速度的增加而增加. 故应根据最大残余压应力及应力层的深度要求合理选择喷丸速度.
- (2) 开始时, 随着喷丸时间的增加, 最大残余压应力值增大; 达到一定时间后, 继续增加喷丸时间, 残余应力变化甚微, 最大残余压应力的变化幅度小于 10%, 达到喷丸饱和状态.
- (3) 弹坑中心点处最大残余压应力值较高且位于次表层; 两坑交汇处的最大残余压应力值较中心点低且其次表层深度较浅; 未受撞击点处的最大残余压应力发生在表面上.

参考文献:

[1] KAZUYUKI O. Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening(FPSP) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(8):1395-1399.

[2] 高玉魁. 喷丸强化对 23CO14Ni12Cr3MoE 钢疲劳性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28(6): 75-77.

[3] MORI K, OSAKADA K, MATSUOKA N. Finite element analysis of peening process with plastically deforming shot[J]. Mater Process Technol, 1994, 45(1-4): 607-612.

[4] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. Finite element modelling of shot-peening residual stresses [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92/93:401-404.

- [5] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C, et al. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1999, 31(3): 179–191.
- [6] MAJZOBI G H, AZIZI R, NIA A A. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005: 164/165:1226–1234.
- [7] 凌翔,彭薇薇,倪红芳. 喷丸三维残余应力场的有限元模拟[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(8): 182–189.
- [8] 路会龙,姚平喜,刘海英. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的受控喷丸工艺过程仿真[J]. *机械设计与制造*, 2009(2): 214–216.
- [9] 张洪伟,张以都,吴琼. 喷丸强化残余应力场三维数值分析[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(3): 603–609.
- [10] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, QIAO R, et al. Parameterization of the porous-material model for sand with different levels of water saturation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(1): 20–35.
- [11] DABBOUSSI W, NEMES J A. Modeling of ductile fracture using the dynamic punch test [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(8): 1282–1299.

## Numerical Simulating for Residual Compressive Stress of Shot-peening Based on SPH Coupled FEM

WANG Li-ping, WANG Jian-ming, PEI Xin-chao, ZHAO Li-li

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Because FEM (finite element method) cannot simulate a mass of shots impinging the target, the SPH(smoothed particle hydrodynamics) coupled FEM modeling and simulating for shot peening is presented, in which the shots are modeled by two types of SPH particles and the target is modeled by FEM and the two parts interact through a contact algorithm. Combining with the random algorithm, the random model for shot flow is established and the state equations for shot flow are deduced. The relationships between residual compressive stress and peening velocity, peening time, and the residual compressive stress at typical positions are analyzed. The results show that higher velocity can cause deeper residual compressive stress under target's subsurface. After a certain period of shot-peening, the residual compressive has hardly changed, of which the maximum residual compressive stress changes by less than 10%. The residual stress at the center of impingement reaches the maximum.

**Key words:** residual stress of shot-peening; SPH; FEM; state equation for air; state equation for shots

文章编号:1671-6833(2014)06-0113-05

# 高海拔地区电子设备散热分析

黄延平<sup>1,2</sup>, 曹国华<sup>1</sup>, 王淑坤<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 无锡工艺学院 机电系, 江苏 无锡 214206)

**摘要:** 电子设备机箱散热能力不仅会影响其稳定性, 也会影响各元器件的使用寿命, 特别是在空气稀薄、气压低的高海拔地区, 封闭机箱散热性能更差. 为研究高海拔地区电子设备的散热问题, 基于湍流理论, 建立了机箱冷却流场数学模型; 采用 ICEPAK 电子热设计专用软件, 对不同海拔高度的散热问题进行了仿真分析, 提出了两方程的湍流模型对空气稀薄地区散热计算更为准确的理论, 并通过仿真分析得到了验证, 为高海拔地区电子设备的散热设计提供参考.

**关键词:** 电子设备; 高海拔散热; ICEPAK; 湍流理论; 两方程模型

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.027

## 0 引言

我国 1 000 m 以上高海拔地区面积占全国总面积 65%, 水电、风电、石油、煤炭等资源的 3/4 都在新疆、内蒙等高原地区, 电器设备在高原地区的生产和生活中是必不可少的. 随着海拔高度的增加, 空气的压力、密度、温度逐渐下降, 电脑、手机等电子设备散热能力降低, 工作温度升高, 寿命就会降低, 研究高海拔地区电子设备散热问题, 对保证广大高原地区人们正常的生产和生活具有重要意义.

通常的情况下, 测算高海拔电子芯片封装体的温度是使用温升修正系数并采用对流换热方程推导计算, 这种办法误差约在 10 °C 以上, 精度远不如使用 Icepak 仿真或是在高海拔下实际测量所得到的结果<sup>[1-2]</sup>. 笔者主要研究高海拔空气密度小、气压低的情况下, 采用风扇强制散热对电子器件温升的影响; 提出了在高海拔地区, 通过 Icepak 软件计算出各个电子元器件工作温度, 由于空气稀薄, 应该采用湍流模型的两方程模型, 而不是 Icepak 推荐的零方程模型.

## 1 仿真模型的建立与仿真方案

### 1.1 仿真模型的建立

该模型由 4 个零件组成, 如图 1 所示. 系统级

模型(电脑机箱、机柜等)是在 PCB 板上装有一系列工作的电子芯片. 通常冷却方案有两种, 一是风扇对发热电子元件进行强制对流冷却; 二是铝制散热器和 IC 芯片连接, 进行传导散热. 模型中铝制散热器散热翅片在 Z 方向和 X 方向都是 12 组, PCB 板的厚度是 10 mm, 材料为 FR-4, 导热系数是 0.35 W/(m·K). 铝制散热器的散热效果主要与其表面积大小有关, 不在这里讨论. 风扇选定的是转速恒定, 风扇的流量是非线性的, 流量的大小由自定义的曲线来确定. 在铝制散热器下面有一个 80 W 的热源, 该机箱为一个封闭的机箱.

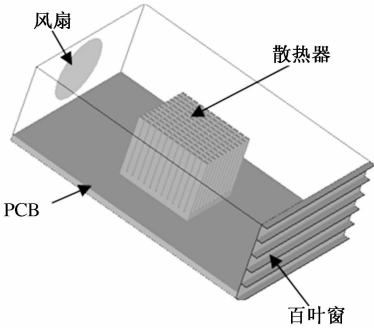


图 1 仿真模型示意图

Fig. 1 schematic model for the simulation

### 1.2 确定边界条件和仿真方案

不同海拔高度空气的密度、黏度、扩散系数等空气性能如表 1 所示. 将这些数据作为边界条件,

收稿日期:2014-07-25; 修订日期:2014-09-26

基金项目: 科技部创新基金资助项目(12C26212201331)

作者简介: 黄延平(1968-), 男, 河南周口人, 长春理工大学教授, 博士, 主要研究方向为电子封装及材料加工, E-mail: hpingan111@163.com.

对电器设备进行热分析.从表 1 可以看到,在海拔 6 000 m 的高度时,空气分子的密度仅仅是海平面的 48%;大气压力是海平面的 46%,这两项指标对热量传导有很大影响.

如图 1 的系统模型所示,在各元器件功率不变的情况下,4 个海拔高度分别为:标准海拔;

3 000 m;6 000 m;10 000 m.为了方便比较,室内工作温度均假定为 20 ℃.采用零方程模型和两方程模型,将分别对系统模型中的 PCB 板和百叶窗进行热计算,比较其热计算结果哪个更接近实际情况.

表 1 不同海拔高度空气性能  
Tab.1 Air performance at different altitude

海拔高	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	传导系数/ ( $\text{W} \cdot \text{M} \cdot \text{K}^{-1}$ )	空气黏度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	扩散系数/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	分子量/ ( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ )	大气压/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )
标准海拔	1.161 4	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	101 325
3 000 m	0.819 7	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	70 093
6 000 m	0.564 3	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	47 160
10 000 m	0.327 9	1 005.0	0.026 1	1.84E-5	1.0	28.966	26 416

2 散热湍流数学模型

系统模型流场的数学模型主要由两部份组成,一部分是在风扇附近的层流场;另一部分是风遇到电子元器件后,风向发生复杂的变化,形成的湍流场,并且在本模型中湍流流动是主要部分.通过计算,该模型的  $Re$  为 28 681,远远大于 2 300,所以选用湍流数学模型计算是合理的.湍流出现在速度变动的地方,这种波动使得流体介质之间相互交换动量、能量和浓度变化,而且引起了数量的波动.

2.1 湍流数学模型

2.1.1 零方程模型

Baldwin-Lomax 模式的具体数学描述如下.

$$\nu_T = \begin{cases} (\nu_T)_{inn}, y \leq y_c; \\ (\nu_T)_{ont}, y > y_c. \end{cases} \tag{1}$$

其中,  $y_c$  是  $(\nu_T)_{inn} = (\nu_T)_{ont}$  的离壁面最小距离.

对于内层,即  $y \leq y_c$ ,有

$$(\nu_T)_{inn} = l^2 \Omega. \tag{2}$$

式中:  $\Omega$  是涡量,  $\Omega = |\epsilon_{ijk} U_{k,j}|$ ;  $l$  是长度尺度:

$$l = ky(1 - \exp(-y/A)). \tag{3}$$

其中,  $k = 0.4$  是 Karman 常数;  $A$  是模化常数,  $y$  是无量纲法向距离:

$$y = U_\tau y / \nu_w.$$

而  $u_\tau$  是摩擦速度,其含义为

$$u_\tau = \sqrt{\nu \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_w},$$

此处下标  $w$  表示壁面.

零方程模型不能反映输运效应,计算量最小,一般适用于边界层型流动,对于来流的湍流流

大,应该考虑历史效应(输运效应).物理量不均匀是发生输运过程的内在原因,当流体内部存在温度梯度,出现密度梯度时,输运过程一定会发生,这就决定了零方程计算精度差的主要原因<sup>[3]</sup>.计算实践表明,零方程模式对于流体受到的阻力和散热量的求解计算误差较大,当流动湍流较大、压力小、密度低时,计算的误差会逐步增加.这是因为零方程模型没有输运项,对湍流应力体现不出来.

2.1.2 标准两方程模型

两方程模型(标准  $k - \epsilon$  模型)远比零方程模型复杂,却是最简单的“复杂湍流模型”.标准  $k - \epsilon$  模型只需求解湍动能及其扩散率的两个相互独立的传输方程即可,由于其较高的鲁棒性、适应性和较好的经济性,在 Icepak 的流动设计中也应用最为广泛.

标准  $k - \epsilon$  模型需要求解湍动能及其耗散率方程.湍动能输运方程是通过精确的方程推导得到,但耗散率方程是通过物理推理,在数学上类比相似各项的方程得出来的结论.通常都是设定模型的湍流流动是完全充分的,流体分子黏性所起的作用不计.在这样的假设前提下,两方程  $k - \epsilon$  模型适用于湍流充分流动时的模拟.

$k$  方程:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M. \tag{4}$$

$\epsilon$  方程:

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \tag{5}$$

式中: $G_k$  代表平均速度梯度产生的湍动能项; $G_b$  是用于浮力作用产生的湍动能项; $Y_M$  可压速湍流脉动膨胀使其对耗散项总的作用;湍流黏性系数  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ .

在 ICEPAK 中,默认值常数  $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09$ ,湍动能  $k$  与耗散率  $\varepsilon$  的湍流普朗特数分别为  $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ .

2.2  $k-\varepsilon$  模型中对流传热的模拟

2.2.1 对流传热的数学模型

在 ICEPAK 中,应用雷诺相似湍流输运的想法对热输运过程进行计算.得到的能量方程是:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] =$$
$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right] + S_h. \quad (6)$$

式中: $E$  是总能量; $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$  是偏应力张量.其中,  $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$  表示黏性加热,耦合求解.

宏观上,各种输运现象的产生都是由于气体内部存在某种物理量的不均匀性,各种物理量的梯度表示了这种不均匀的程度.各种相应的物理量的输运方向都是倾向于消除物理量的不均匀性,直到这种不均匀性消除,即梯度为零,输运过程才停止,系统才由非平衡态到达平衡态.

湍流能量输运方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) = \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon + \varphi_k. \quad (7)$$

能量耗散输运方程:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) =$$
$$c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \varphi_\varepsilon. \quad (8)$$

这里,右端项分别表示生成项 (production term)、耗散项 (dissipation term) 和壁面项 (wall term).

两方程模型和零方程模型比较,其最大特点就是有输运项,能够反映流体的压力、密度对传热的影响.这对高海拔地区电器的热设计极为重要.

2.2.2 稀薄气体中的热传导的微观解释

公式(9)是理想气体的热传导系数表达式,

它是把气体分子认为刚性的,导热率与数密度  $n$  无关,仅与  $T^{1/2}$  有关,并且只适用于温度梯度较小的理想气体.

$$\kappa = \frac{1}{3} \overline{\rho v \lambda} \cdot \frac{C_{v,m}}{M_{\text{mol}}}.$$

(9)

实际上,只有低真空时的输运特性才与式(9)符合,通常把不满足输运规律的理想气体称为克努曾气体,即稀薄气体.稀薄气体中的热传导系数  $\kappa'$ :

$$\kappa' = \frac{1}{6} \overline{nv} L \frac{C_{v,m}}{N_A} = \frac{1}{6} \overline{\rho v} L \frac{C_{v,m}}{M_m} =$$
$$\frac{1}{6} \overline{\rho v \lambda} m - w \frac{C_{v,m}}{M_m}.$$

(10)

3 计算结果与分析

分别采用零方程模型、两方程模型,对海拔高度在海平面、3 000 m、6 000 m、10 000 m 4 种情况下计算温升.表 2 是系统模型中 2 个主要零件 (PCB 板和百叶窗) 的仿真结果.为了方便比较,特别选定了 PCB 板 X 最大端面的最高温度和百叶窗最高温度作为研究对象.从系统模型图上可以看到,PCB 板 X 最大端面和百叶窗是共面的,并有重叠部分.另外,空气的导热系数是  $0.0261 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,PCB 板的材质是 FR-4,它的导热系数是  $0.35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,因此,PCB 板的导热系数比空气大一个数量级,那么,这个共面重叠处应该是 2 个零件温度最高的地方,如图 2(a) 所示,并且它们的温度应该相等.用两方程模型计算,不论在哪一个海拔高度,都恰好满足了这样一个结果.从表 2 可以看出,使用零方程模型进行传热计算,两个零件共面重叠处的最高温度随海拔高度增加,它们的温度差值越来越大,而实际情况下共面重叠处温度应该是相等的.这就说明零方程模型缺少式(7)和式(9)的输运项,在高海拔地区气压低、空气稀薄,空气压力项  $P$  和空气密度项都不能起作用,空气压力和空气密度对传热影响很大,所以出现了计算温度不准确这种情况.同时也说明了高海拔地区进行热设计不能使用零方程模型.

表 2 典型零件温度计算结果

Tab.2 Temperature calculation results of typical parts

零件名称	海平面		3 000 m		6 000 m		10 000 m	
	$T_{0\text{max}}$	$T_{2\text{max}}$	$T_{0\text{max}}$	$T_{2\text{max}}$	$T_{0\text{max}}$	$T_{2\text{max}}$	$T_{0\text{max}}$	$T_{2\text{max}}$
百叶窗	31.45	28.93	37.38	33.14	44.03	39.12	60.76	53.17
PCB 板	26.34	28.93	29.08	33.14	32.46	39.12	41.62	53.17

注: $T_{0\text{max}}, T_{2\text{max}}$  分别为零方程模型、两方程模型的最高温度.



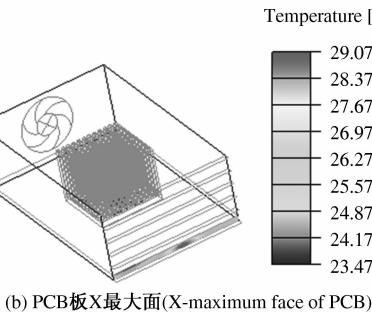
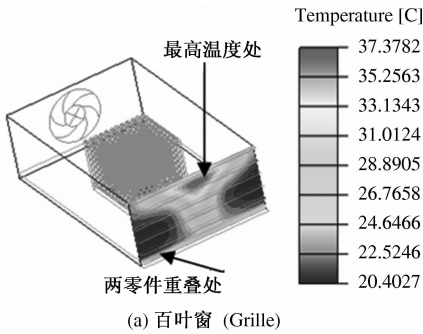


图2 海拔3 000 m 零方程温度云图  
Fig.2 Temperature contour based on zero-equation model at 3 000 m

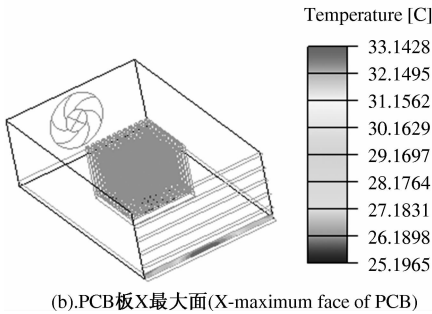
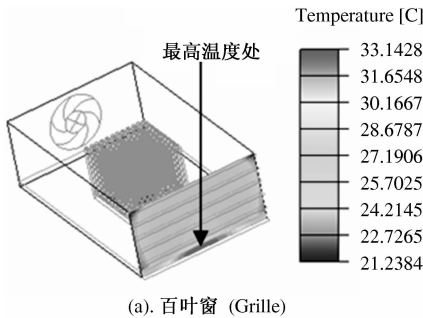


图3 海拔3 000 m 两方程温度云图  
Fig.3 Temperature contour based on two-equation model at 3000 m

采用 Icepak 和 Fluent 软件,分别基于零方程模型和两方程模型<sup>[4-5]</sup>,对百叶窗和 PCB 板 X 最大面进行了仿真,得到了温度云图如图 2 和图 3 所示.从图中可以看出,虽然都是在海拔 3 000 m 下的温度计算结果,图 2 中百叶窗最高温度出现在上部分,显然这是错误的.因为 PCB 板的导热系数是  $0.35 \text{ W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$ ,而空气的导热系数是

$0.0261 \text{ W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$ ,它们的导热能力有 10 倍之差,百叶窗最高温度一定会出现在两个零件共面重叠处,也就是 PCB 板 X 项最大值处.

该仿真模型属于低压电器类,以模型组件 PCB 板为例,温升递增率为海拔每升高 100 m,温升是 0.17%,该数据在 0.1% ~ 0.5%℃ 之间,所以仿真计算结果与国际电工委员标准相符合.这就验证了笔者得出的数据是符合实际的.

图 4 和图 5 分别是海拔 3 000 m 下零方程和两方程模型流场分布图.由于所建的系统模型是一个封闭的机箱,并且采用风扇强迫对流,机箱内的流体(空气)分布应该是均布的<sup>[6-8]</sup>.不会出现图 4 那种情况:机箱局部出现流体过密,另一部分出现流体过疏.

综上所述,温度和流场分布的仿真结果也证明了采用零方程用来计算传热的误差大,和真实的情况不符.

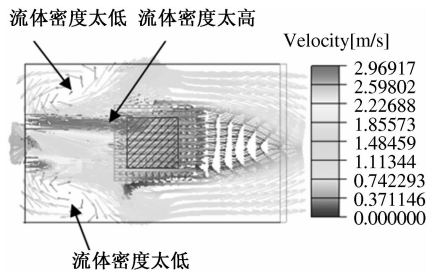


图4 3 000 m 零方程流场分布图  
Fig.4 Flow field distribution of zero-equation model at 3 000 m

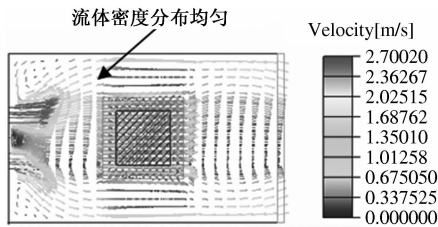


图5 3 000 m 两方程流场分布图  
Fig.5 Flow field distribution of two-equation model at 3 000 m

#### 4 结论

(1)通过对零方程数学模型和两方程数学模型的比较,得出零方程模型不能反映输运效应.对于高海拔地区空气压力小、密度低对输运效果影响显著,应该考虑历史效应(输运效应).

(2)使用 Icepak 和 Fluent 等仿真软件对高海拔地区的芯片、电机等电器进行了仿真分析,分析结果表明:高海拔地区的电子设备热设计,采用两

方程模型更加符合实际工况. 因为两方程模型和零方程模型比较,其最大特点就是两方程模型有输运项,输运项能够反映流体的压力、密度对传热的影响,这也是两种数学模型计算结果出现差异的理论依据. 高海拔地区空气流体的密度、压力变化都很大,所以,使用两方程模型计算高海拔地区电器的温升更准确. ICEPAK 软件所推荐的“大多数电子散热问题使用零方程模型是足够精确的”<sup>[9-11]</sup>,这个推荐意见只对海拔不高的地区有意义,而对高海拔地区来说,不论从数学模型上还是仿真结果上看,使用零方程模型显然是不适合的.

## 参考文献:

- [1] 陈洁茹,朱敏波,齐颖. Icepak 在电子设备热设计中的应用[J]. 电子机械工程,2005(1):14-16.
- [2] INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石,叶宏,译. 北京:化学工业出版社,2011:219-222.
- [3] 张洪才,孙长青. ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2013:24-34.
- [4] 谢龙汉,赵新宇,张炯明. ANSYS CFX 流体分析及仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2012:11-22.
- [5] HAMZA D, PAHLEVANINEZHAD M, JAIN P K. Implementation of a novel digital active EMI technique in a DSP-based DC-DC digital controller used in electric vehicle (EV)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(7):3126-3137.
- [6] MATOLAK D W, KODI A, KAYA S. Wireless networks-on-chips: architecture, wireless channel, and devices[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(5):58-65.
- [7] FIROUZFAR E, ATTARAN M. A review of heat pipe heat exchanger activity in Asia[C]//Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. Hong Kong, 2008,30:1307-6884.
- [8] PARK O, VELOO P S, LIU N, et al. Combustion characteristics of alternative gaseous fuels[J]. Proc Combust Inst, 2011, 33:887-894.
- [9] ORGAN J, FINKELSTEIN T. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010:25-28.
- [10] YIN Yong-gao, LI Shu-hong, ZHANG Xiao-song, et al. Feasibility and performance analysis of a desiccant solution regenerator using hot air[J]. Energy and Buildings,2011, 43(5):1097-1104.
- [11] LASKOWSKI R M, WAWRZYK K. Comparison of two simple mathematical models for feed water heaters[J]. Journal of Power Technologies, 2011, 91(1):14-22.

## Heat Dissipation Analysis of Electronic Equipment in High Altitude Area

HUANG Yan-ping<sup>1,2</sup>, CAO Guo-hua<sup>1</sup>, WANG Shu-kun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Wuxi Institute of Arts & Technology, Wuxi 214206, China)

**Abstract:** Heat dissipation capacity of electronic equipment influences not only its stability, but the service life of the components. Especially in the high-altitude area with thin air and low air pressure, heat dissipation performance is more likely to deteriorate in closed chassis. In order to study heat dissipation problem of electronic equipment at the high altitude, based on the turbulence theory, cooling flow mathematical model of chassis was established. By means of ICEPAK, an electronic thermal design specialized software, the heat dissipation of different altitudes were simulated. The theory that two-equation turbulence model for cooling calculation in thin air area should be more accurate, was put forward and verified through the simulation. This will provide a reference for the thermal design of electronic equipment in high altitude areas.

**Key words:** electronic equipment; high altitude cooling; ICEPAK; turbulence theory; two equation model

# 基于 CAGD 的单层球形网壳构型设计

马泳涛, 李 伟, 陈天跃

(郑州大学 机械工程学院, 河南, 郑州 450001)

**摘 要:** 网壳结构具有构型简单、内力分布均匀、便于制造和装配等优点. 根据网壳的构型原理, 提出一种针对单层球形网壳构型设计的 CAGD 方法, 利用该方法可以有效地避免常规计算建模过程中不必要的舍入误差, 从而实现球面建模的完全对称. 通过对 240 面体网壳构型的研究, 分析长径比和五边形旋转角对杆件长度的影响, 最终得出可以使杆长均匀化的条件.

**关键词:** 球形网壳; 构型设计; 杆长关系; 网壳建模

**中图分类号:** TU311.41

**文献标志码:** A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.028

## 0 引言

网壳结构为新型建筑提供了一种新颖合理的结构形式. 伴随着其跨度不断增大、构型日趋复杂, 结构设计和施工难度也越大<sup>[1]</sup>. 为了保证网壳结构整体的承载性能和局部稳定性, 在构型设计时要尽量减少网壳的杆件长度种类, 使其长度均匀. 与肋环型、施威德勒型网壳相比, 短程线网壳的杆长种类最少, 杆件长度均匀, 受力性能好, 至今为止仍是主要的球形网壳结构形式之一. 短程线网壳常用的划分方式有弦均分法、等弧再分法、边弧等分法, 此后新型网壳采用的是在此基础上改进的三角形随机划分方法<sup>[2-3]</sup>.

非规则网壳进行三角形网格划分时, 多采用解析几何的方法, 建立求解杆长和节点位置的方程组, 再设定相关条件和参数使方程组有唯一解, 最终确定基元内的拓扑关系<sup>[4]</sup>. 但是这种方法需运用大量空间几何知识构建方程组, 并且在求解过程中会因为数据不能整除而引入误差, 最终也只能确定一种杆长关系, 不易保证结构杆长的均匀性. 将计算机辅助几何设计(CAGD)的方法应用于网壳结构的设计, 不仅可以实现网壳结构的精确建模, 也可直接观察网壳结构的杆长变化. 该方法与传统的网壳结构建模方法相比, 具有以下优点: ①在球面上直接进行划分, 操作简单, 工作量较少; ②可直接设定杆件之间的拓扑关系, 避免复杂的解析几何关系推导; ③建模精度高, 避免计

算机处理数据时带来的舍入误差.

笔者在 solidworks 软件中实现网壳结构的建模, 主要采用添加几何约束(如旋转、等分、等长)的方法完成网壳结构的节点和杆件设计. 并以 240 面体单层网壳为例, 研究网壳结构的杆长变化规律, 分析网壳结构杆长均匀化的条件, 为同类型网壳的结构设计提供参考.

## 1 网壳的构型原理

研究的网壳结构如图 1 所示.

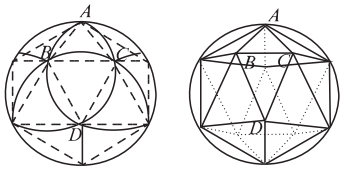


图 1 正二十面体

Fig. 1 Icosahedron

以一个球面三角形 ABC 为基元, 根据球体半径和需求的面体数, 首先确定基元内节点个数及其相关的拓扑关系, 然后采用计算机辅助几何建模的方法, 把节点和杆件之间的几何拓扑关系转化为约束条件, 并操作相关指令完成球面三角形网格的划分. 整体的网壳结构共有 20 个基元, 每个基元内的杆件和节点构型都是相同的, 确定基元构型即可得到完整的球面网壳<sup>[4-5]</sup>.

为便于分析网壳构型随相关参数的变化情况, 基元结构须满足以下特征: ①基元内三角形的

收稿日期:2014-06-25;修订日期:2014-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305136)

作者简介:马泳涛(1975-), 河南郑州人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事先进制造技术与结构仿真, Email:sky\_llwei@163.com.

个数由网壳结构的面数决定,需满足多面体的欧拉拓扑定理,即顶点数 + 面数 - 棱边数 = 2<sup>[6]</sup>;②二十面体的每个顶点处的网格都能组成正五边形,并且可绕顶点与球心的连线旋转一定角度;③基元中心与 3 个五边形形心的距离相等,其位置在球面上的位置是固定的<sup>[7-8]</sup>;④基元具有三分之一旋转对称,网壳整体满足五分之一旋转对称<sup>[9]</sup>.

2 杆长关系分析

根据上述球面网壳的构型原理可知,240 面体的基元内分布有 9 个三角形,五边形三个中心的连线构成一个基元,如图 2 所示.为减少杆件长度种类,设定连接相邻五边形的两个杆长相等,即  $c = e$ . 分析可知,该基元内共有 4 种基本三角形,最多有 6 种杆长.

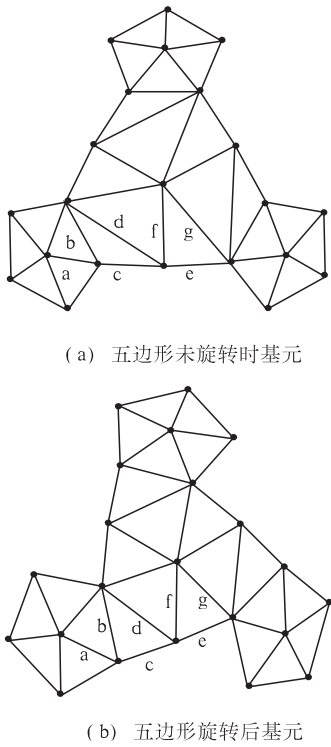


图 2 240 面体网壳基元

网壳结构的三角形杆件长度相差较大时,会 给其设计带来困难,特别是过长杆件的稳定性问题会比较突出<sup>[10]</sup>,所以为研究网壳结构的杆长变化规律,以最长杆与最短杆的长度比值  $\Phi$  为衡量标准.当比值较小时,即表明所有杆件长度都在一定范围内,杆长均匀;当比值较大时,则说明该构型的杆长设计不合理.由于基元具有旋转对称性,在 solidworks 三维草图中,设定对应的几何约束后,可以直观地发现对杆长变化影响较大的是五

边形的外边长和五边形绕其形心与球心连线的旋转角.

确定比值  $\Phi$  的最优取值范围是一个关键问题. 容易发现:球面上空间正五边形的外边长与内边长的比值基本恒定,约为 1.16. 可以控制比值  $\Phi$  的设计目标尽量向 1.16 靠近,如果基元内其余杆件的长度都在五边形内外边长度之间,那么网壳结构整体看起来就比较均匀. 所以,以五边形外边长与球半径的比值(简称长径比)  $L/R$  和旋转角  $\alpha$  为变量,观察比值  $\Phi$  的变化.

3 杆长变化规律

240 面体基元构建过程:①利用正二十面体在球面坐标系下的性质,其中两个顶点在球体的两极,其余在纬度  $\pm \arctan(1/2)$  的位置,将其转换为几何约束,完成球面正二十面体建模;②选取一个三角形为基元,在顶点处构建正五边形;③确定基元中心及其它节点的相对位置,全部采用添加几何关系的方法完成建模.

基元模型确定之后,将五边形旋转一定角度,记录五边形的外边长不同取值时  $\Phi$  的数值,绘制曲线可发现比值  $\Phi$  的变化呈抛物线趋势. 长径比  $L/R$  在 0.34 ~ 0.40 时,网壳结构的杆长较为均匀,约在 0.37 时比值  $\Phi$  最小. 旋转角  $\alpha$  不同时,比值  $\Phi$  随长径比的变化规律,如图 3 所示.

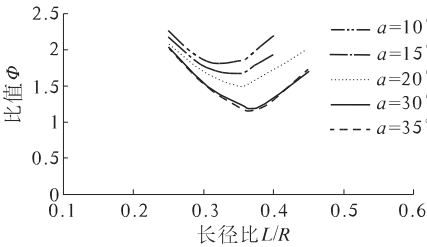


图 3 比值随长径比的变化规律

Fig.3 Variation of the ratio with the length to diameter varying

同样,记录长径比一定时,不同旋转角下比值  $\Phi$  的数值,观察基元构型的变化并绘制曲线. 旋转角  $\alpha$  在 30 ~ 36°时,网壳结构的杆长较为均匀. 由于球面正五边形的 72°旋转对称性,顺时针旋转时,36°即为最大旋转角. 长径比不同时,比值随旋转角  $\alpha$  的变化规律,如图 4 所示.

利用 CAGD 的方法还可以快速完成网壳结构整体建模,保证基元之间的旋转对称特性,图 5 是利用该方法完成的球形网壳的整体模型,该结构杆长均匀,长径比为 0.35,旋转角为 30°.

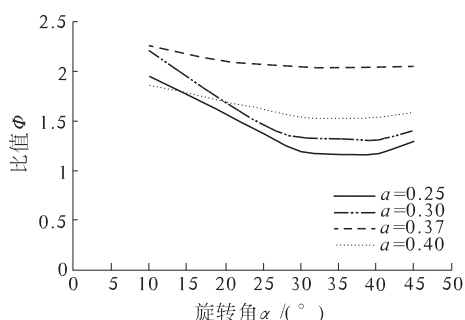
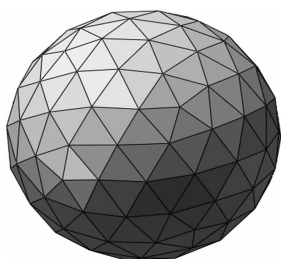
图4 比值随旋转角 $\alpha$ 的变化规律Fig.4 Variation of the ratio with the rotation angle  $\alpha$  varying

图5 240面体的整体模型

Fig.5 The whole model of 240 polyhedron reticulated shell

#### 4 结论

采用计算机辅助几何设计的方法在 solid-works 软件平台上实现单层球形网壳结构的建模和构型设计. 通过添加空间几何约束, 划分球面网壳, 该方法直观、便捷、无误差. 此划分方法没有设定基元内杆长的解析关系, 杆件  $a$  和  $b$  的长度与  $c$ 、 $e$  长度无关, 更具灵活性, 得到的构型网格更为均匀, 杆件长度非常接近. 以长径比和旋转角为变量, 搜索 240 面体杆长均匀时的最优构型, 总结出

旋转角在  $30^\circ \sim 36^\circ$ , 长径比在  $0.34 \sim 0.40$  时, 比值  $\Phi$  基本接近 1.16, 网格结构的杆件长度均匀, 力学承载性能好, 可以为同类型的球形网壳结构设计提供参考.

#### 参考文献:

- [1] 董石麟. 空间结构的发展历史创新形式分类与实践应用[J]. 空间结构, 2009, 15(3): 22-43.
- [2] 陈宝林. 短程线球面网壳参数化建模研究[J]. 钢结构工程研究, 2012(增刊): 696-700.
- [3] SAHR K, WHITE D, KIMBERLING A J. Geodesic discrete global grid systems[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2003, 30(2): 121-134.
- [4] 绍兴, 梁醒培. 球面网壳非规则网格划分方法研究[J]. 空间结构, 2012, 18(4): 36-38.
- [5] 舒畅, 周丰峻, 梁斌, 等. 组合多面体理论及几何构型设计[J]. 河南科技大学学报, 2007, 28(6): 53-56.
- [6] WEAIRE D, PHELAN R. A counter-example to Kevin's conjecture on minimal surfaces[J]. Philosophical Magazine Letters, 1994, 69(2): 107-110.
- [7] 杜泽丽. 单层球面网壳结构的构型优化及稳定性研究[D]. 河南: 河南科技大学学报, 2008.
- [8] 张胜茂. 基于正多面体的球面三角剖分与分析[J]. 计算机工程及应用, 2008, 44(9): 16-19.
- [9] WHITE D, KIMBERLING A J, SAHR K, et al. Comparing area and shape distortion on polyhedralbased recursive partitions of the sphere[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(8): 805-827.
- [10] 李静斌, 葛素娟. 静力弹塑性分析在大跨钢结构设计中的应用[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2005, 26(4): 15-19.

### Single-Layer Spherical Shell Configuration Design Based on CAGD

MA Yong-tao, LI Wei, CHEN Tian-yue

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Reticulated shell structure is characterized by simple configuration, the internal force distribution evenly, easy to manufacture and assembly, and so on. According to the principle of network shell configuration, a method for single spherical shell configuration of network design was proposed based on CAGD, through which the unnecessary rounding errors brought by conventional computational modeling process could be effectively avoided and the complete symmetry of network shell modeling was achieved. Through the research of 240 body surface monolayer shells modeling, we analyzed the impact of rod length ratio with diameter and rotation angle of pentagon on the rod length and eventually obtained the conditions of rod length uniformly.

**Key words:** spherical lattice shell; configuration design; rod length relation; reticulated shell modeling

三轴车辆全轮转向系统方案设计与性能仿真

袁磊,刘西侠,刘维平

(装甲兵工程学院 机械工程系,北京,100072)

摘要:以某三轴车辆底盘为原型,通过对其转向系统的改进,设计了一套液力驱动的全轮转向系统.建立了多轴车辆的三自由度全轮转向数学模型,并阐述了多轴车辆全轮转向最优控制策略.以设计的三轴车辆全轮转向系统为例,对比分析了不同转向工况下,双前桥转向车辆与最优控制全轮转向车辆的质心侧偏角、横摆角速度、车身侧倾角、车身侧倾角速度.分析结果表明:基于最优控制的全轮转向系统,可以较好地提高三轴车辆的低速机动性和高速稳定性.分析结果为全轮转向控制器的开发打下了基础.

关键词:三轴车辆 全轮转向系统 数学模型 最优控制

中图分类号:TH16;U463.4 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.029

0 引言

三轴车辆多采用机械摇臂式双前桥转向机构,该机构稳定、耐用,但低速时车辆转向半径偏大,高速时车辆操纵稳定性欠佳.全轮转向能够提高车辆的快速响应性、低速机动性和高速稳定性<sup>[1-2]</sup>.全轮转向数学模型的建立和转向控制策略的选取是研究全轮转向的两个关键环节.在数字模型方面,大多数研究忽略了车身侧倾对转向性能的影响<sup>[3-5]</sup>.然而,车身侧倾运动对多轴车辆转向运动的影响较为明显.在控制策略方面,目前研究较为成熟的是零侧偏角比例控制,对于基于车辆状态反馈的最优控制研究还不够全面<sup>[6-7]</sup>.

笔者以设计的全轮转向系统方案为基础,通过建立多轴车辆全轮转向数学模型和研究多轴车辆全轮转向最优控制策略,对双前桥转向三轴车辆和全轮转向三轴车辆进行转向性能对比分析,为全轮转向控制策略的开发提供了支撑.

1 全轮转向系统方案设计

以某三轴车辆底盘为原型设计全轮转向系统,系统前轴采用原电控液压助力转向,中后轴采用和前轴相同的转向梯形传动机构,中后轴转向助力系统主要由电动机、液压泵、分流阀、电磁阀、溢流阀、液压油缸等组成.

全轮转向系统方案如图 1 所示.方向盘转角输入后,经转向传动机构及转向助力装置共同作用,使前轮转向.方向盘转角信号和前轮转角信号通过相应的传感器采集后输入到控制单元,控制单元还实时接收车速信号、横摆角速度信号、车辆侧向加速度信号等相应传感器采集的当前车辆状态信息.输入信号通过控制单元计算后,为中、后轴电磁阀提供驱动信号,控制转向油缸供油压力,实现车轮的转角定位.

2 多轴车辆全轮转向数学模型建立

三自由度数学模型在二自由度数学模型的基础上,进一步考虑了簧载质量的侧倾运动,并假定簧载质量绕  $x$  轴只作小侧倾角运动.此时车辆被简化为只有侧向、横摆和车身侧倾运动三自由度模型.三自由度全轮转向多轴车辆示意图如图 2 所示.

$Q$  点为车辆静止时质心垂线与侧倾轴的交点,以其为原点,得到固结于簧载质量和非簧载质量的坐标系  $x'-y'-z'$  和  $x-y-z$ .  $m_s$  为车辆簧载质量;  $m_i$  为第  $i$  轴的非簧载质量;  $h_s$  为簧载质量质心到  $x$  轴的距离;  $l_i$  为车辆质心到第  $i$  轴的距离;  $L_1$  为车辆转向中心到第一轴的距离;  $I_z$ 、 $I_x$  分别为车身绕  $z$ 、 $x$  轴的转动惯量;  $I_{xx}$  为车身绕  $x$  轴和  $z$  轴的惯性积;  $\phi$  为车身侧倾角;  $k_\phi$  为车身侧倾

收稿日期:2014-06-10;修订日期:2014-09-01  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(5130545)  
作者简介:袁磊(1990-),男,云南宣威人,装甲兵工程学院博士研究生,主要从事车辆总体技术研究工作,E-mail: yuanlei - scut@ outlook. com.



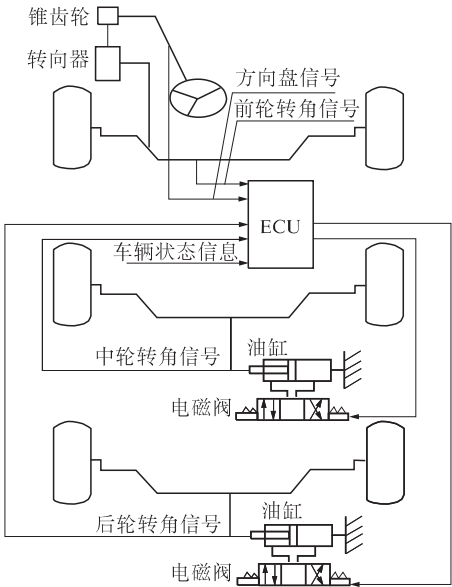


图 1 全轮转向系统方案图

Fig.1 The control principle diagram of all-wheeled steering system

角刚度; $k_i$  为等效车轮刚度; $d_i$  为静止时车身侧倾引起的第  $i$  轴车轮的侧向位移; $C_\phi$  为车身侧倾等效阻尼系数。

根据牛顿法,由整车  $y$  轴的侧向力平衡,绕质心  $z$  轴的横摆力矩平衡与绕  $x$  轴的侧倾力矩平衡,可得整车运动的状态空间方程

$\dot{X} = AX + BU, Y = CX + D.$

式中: $X = [r \ \beta \ p \ \phi]^T; U = [\delta_1 \ \delta_2 \ \cdots \ \delta_n]^T; A = -P^{-1}Q, P = \dot{\phi}, B = -P^{-1}R; C$  为  $4 \times 4$  的单位矩阵; $D$  为零矩阵,其各矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n m_i l_i & mu & -m_s h_s & 4 \\ I_z & u \sum_{i=0}^n m_i l_i & -I_{xz} & 0 \\ -I_{xz} & u(\sum_{i=0}^n m_i d_i - m_s h_s) & I_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$
$$Q = \begin{bmatrix} mu + \sum_{i=0}^n m_i l_i + \sum_{i=0}^n k_i l_i^2 / u & \sum_{i=0}^n k_i & 0 & 0 \\ u \sum_{i=0}^n m_i l_i + \sum_{i=0}^n k_i l_i^2 / u & \sum_{i=0}^n k_i l_i & 0 & 0 \\ -um_s h_s + \sum_{i=0}^n c_i d_i l_i / u + u \sum_{i=0}^n m_i d_i & \sum_{i=0}^n c_i d_i & C_\phi & K_\phi - m_s g h_s \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix};$$
$$R = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & \cdots & k_n \\ k_1 l_1 & k_2 l_2 & \cdots & k_n l_n \\ k_1 d_1 & k_2 d_2 & \cdots & k_n d_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}.$$

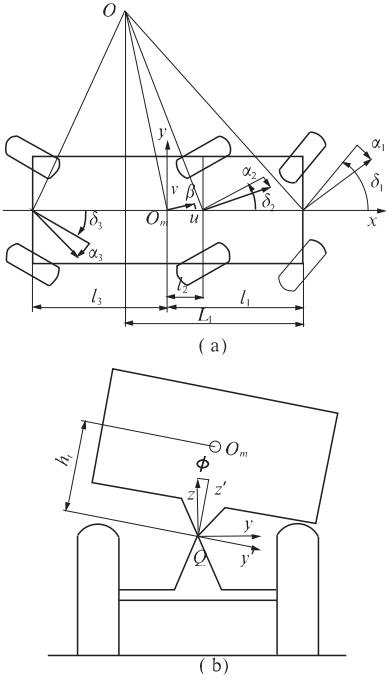


图 2 三自由度全轮转向多轴车辆示意图

Fig.2 The sketch map of three degree of freedom of multi axle vehicle with all-wheeled steering system

3 多轴车辆全轮转向最优控制策略

三轴车辆的全轮转向是通过通过对后两轴车轮转角的控制来实现的<sup>[8]</sup>. 选择质心侧偏角和横摆角速度作为车辆状态参数,通过跟踪两个状态参数的变化,控制车辆后两轴车轮转角. 下面通过转角比例前馈和状态反馈实现车轮转角控制。

3.1 零侧偏角比例前馈

零侧偏角比例控制策略是通过车轮转角比例的变化来实现车辆质心侧偏角为零的控制目标,由车辆数学模型可解得其质心侧偏转角,由质心侧向偏角为零,可得式(1)。

$$v = \frac{(\sum_{i=1}^3 k_i l_i^2 / u) \sum_{i=1}^3 k_i \delta_i + (mu - \sum_{i=1}^3 k_i l_i / u) \sum_{i=1}^3 k_i l_i \delta_i}{\sum_{i=1}^3 k_i \sum_{i=1}^3 k_i l_i^2 / u^2 + (\sum_{i=1}^3 k_i l_i / u)(mu - \sum_{i=1}^3 k_i l_i / u)} \quad (1)$$

由(1)式可得车辆转向中心到前轴的距离  $l_1$ .

$$l_1 = \frac{\sum_{i=1}^3 k_i l_i \sum_{i=1}^3 k_i l_i (l_1 - l_i) - \sum_{i=1}^3 k_i l_i^2 \sum_{i=1}^3 k_i (l_1 - l_i) - mu^2 \sum_{i=1}^3 k_i l_i (l_1 - l_i)}{(\sum_{i=1}^3 k_i l_i)^2 - \sum_{i=1}^3 k_i \sum_{i=1}^3 k_i l_i^2 - mu^2 \sum_{i=1}^3 k_i} \quad (2)$$

由车辆全轮转向阿克曼定理可得车辆各轴转角比例  $K_i$ .

$$K_i = \alpha_i / \alpha_1 = 1 - (l_1 - l_i) / L_1. \quad (3)$$

3.2 最优控制状态反馈

最优控制可使给定系统从初始状态出发到最终状态,性能指标始终具有极小值<sup>[9]</sup>. 对于一个线性二次型问题,可以作出如下描述:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t).$$

给定初始条件  $X(t_0) = x_0$ , 寻求最优控制律  $U(t)$ , 使性能指标如下:

$$J = \frac{1}{2}X(t_f)^T S X(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [X(t)^T Q(t) X(t) + U(t)^T R(t) U(t)] dt.$$

要求  $S$ 、 $Q(t)$ 、 $R(t)$  是对称矩阵, 并且  $S$  和  $Q(t)$  是非负定或正定的,  $R(t)$  应是正定的. 第一项用来衡量系统的实际状态与给定状态之间的综合误差. 第二项是对控制总能量的限制. 对于定常系统, 最优控制反馈矩阵为

$$U^*(t) = -KX(t) = -R^{-1}B^T P X(t).$$

此处, 在求取最优控制矩阵的过程中需要把三自由度状态空间改写为下式.

$$\dot{X} = -G^{-1}TE\delta_1 - G^{-1}QX - G^{-1}TU^*.$$

4 三轴车辆全轮转向性能仿真分析

以设计的三轴全轮转向车辆为例, 其主要结构和性能参数如表 1 所示.

表 1 车辆主要结构和性能参数

Tab.1 the structure and performance parameters of vehicle

参数	数值	参数	数值
$m_1/\text{kg}$	7 800	$m_2/\text{kg}$	4 740
$m_3/\text{kg}$	4 740	$m_4/\text{kg}$	19 340
$d_1/\text{m}$	-0.036	$d_2/\text{m}$	0.004
$d_3/\text{m}$	0.022	$l_1/\text{m}$	2.492
$l_2/\text{m}$	-0.358	$l_3/\text{m}$	-2.083
$h_b/\text{m}$	0.54	$I_{xz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	7 070
$I_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	9 385	$I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	91 970
$k_\phi/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	244.38	$k_1/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-440 000
$k_2/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-474 000	$k_3/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-474 000
$C_\phi/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	79 000		

4.1 最优控制矩阵计算

从质心侧偏角较小和横摆角速度适当两个角度出发设计最优控制器, 同时系统还应使控制能量最小. 通过反复调试, 选取加权矩阵  $Q(t)$  和  $R(t)$  如下:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

通过求解 Riccati 代数方程的解, 可得最优控

制反馈矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} -0.0850 & -0.0170 & 0.00014 & 0.002 \\ -0.385 & -0.1005 & -0.0045 & 0.018 \end{bmatrix}.$$

4.2 仿真结果分析

在车速为 20 km/h 和 60 km/h 时, 给前轮 3° 的转角阶跃信号, 对比分析双前桥转向车辆和最优控制全轮转向车辆的转向性能. 三自由度数学模型质心侧偏角、横摆角速度、车身侧倾角、车身侧倾角速度的时域响应如图 3~6 所示.

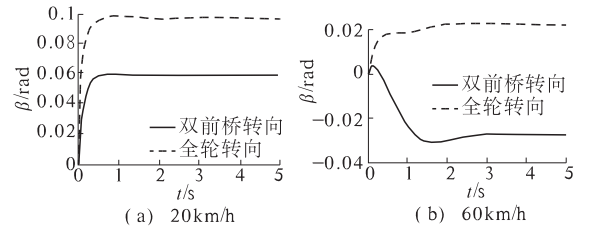


图 3 不同速度下车辆质心侧偏角阶跃响应  
Fig.3 The side-slip step response under different speed

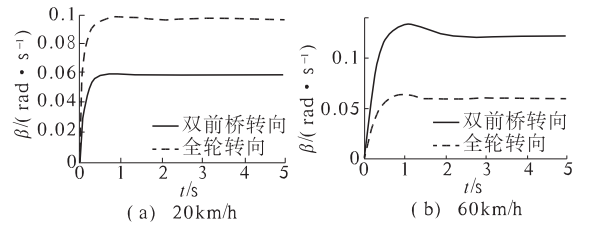


图 4 不同速度下车辆横摆角速度阶跃响应  
Fig.4 The yaw step response under different speed

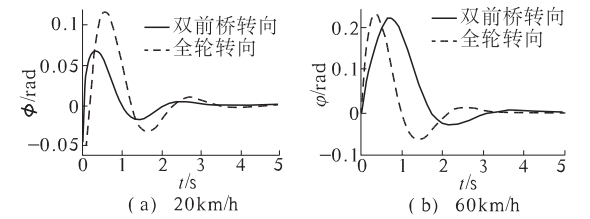


图 5 不同速度下车身侧倾角阶跃响应  
Fig.5 The roll angle step response under different speed

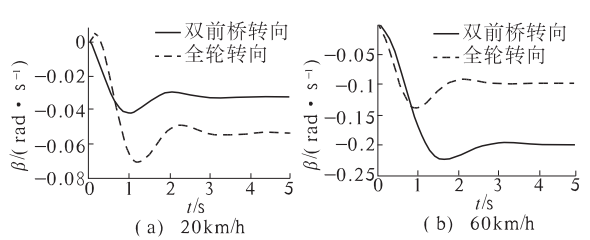


图 6 不同速度下车身侧倾角速度阶跃响应  
Fig.6 The roll speed step response under different speed

(1) 由图 3(a) 可知, 车速为 20 km/h 时, 全轮转向质心侧偏角较大, 说明车辆具有较大侧向速度, 一定程度上有利于车辆低速机动; 由图 3(b) 可知, 车速为 60 km/h 时, 全轮转向质心侧偏

角较小,且为正值,有利于车辆高速轨迹保持.另外,高速时,双前桥转向车辆质心侧偏角出现了负值,说明由于车辆后轴未参与转向,车辆自转运动较为明显.

(2)由图4(a)可知,车速为20 km/h时,全轮转向的横摆角速度较大,约双前桥转向的两倍,说明车辆的转向能力强,一定程度上有利于提高车辆的低速机动性;由图4(b)可知,车速为60 km/h时,全轮转向的横摆角速度较小,说明车辆的高速稳定性好.

(3)由图5(a)可知,车速为20 km/h时,全轮转向侧倾角响应较快,侧倾角超调量较大,这是车辆低速机动性提高导致的后果,一定程度上有利于车辆低速转向.由图5(b)可知,车速为60 km/h时,全轮转向侧倾角响应快,且与双前桥转向同时达到平衡,有利于车辆的高速操纵稳定性.

(4)由图6(a)可知,车速为20 km/h时,全轮转向侧倾角速度较大,一定程度上有利于提高车辆的低速机动性;由图6(b)可知,车速为60 km/h时,全轮转向的侧倾角速度较小,提高了车辆的高速稳定性.

综上,全轮转向最优控制车辆与双前桥转向车辆相比,低速时质心侧偏角、横摆角速度和侧倾角加速度都较大,车身侧倾响应快,增加了车辆的低速机动性;高速时质心侧偏角、横摆角速度和侧倾角加速度都较小,车身侧倾响应较快,提高了车辆的高速操纵稳定性.

## 5 结论

(1)以某三轴车辆为原型,设计了车辆的全轮转向系统方案.建立了多轴车辆三自由度数学模型,基于最优控制理论,设计了多轴车辆全轮转

向零侧偏角比例前馈和状态反馈最优控制器.

(2)以该三轴车辆为例,分别对车辆低速工况和高速工况下的转向性能进行了仿真分析,结果表明:全轮转向最优控制策略能够较好地提高车辆低速机动性和高速操纵稳定性,为轮式三轴车辆全轮转向系统最优控制器的开发奠定了基础.

## 参考文献:

- [1] 袁磊,刘西侠,金毅,等.一种具有不同转向模式的多轴车辆设计[J].机械设计与制造,2012,10:33-35.
- [2] 周富家.多轮转向全路面起重机操纵稳定性控制算法研究[D].长春:吉林大学机械科学与工程学院,2007:1-15.
- [3] 李爽.七轴比例控制转向研究[D].长春:吉林大学机械科学与工程学院,2008:1-5.
- [4] 张春秋,高秀华.三轴车辆全轮转向操纵稳定性仿真分析[J].农业装备与车辆工程,2007(9):9-12.
- [5] 刘芹芹,高秀华.多轴车辆二自由度鲁棒控制[J].农业工程学报,2011(2):136-138.
- [6] 李华师.多轴车辆操纵稳定性控制策略研究[D].济南:山东理工大学交通与车辆工程学院,2010:1-30.
- [7] 王云超.多轴车辆转向性能分析[D].长春:吉林大学机械科学与工程学院,2007:1-15.
- [8] 喻凡,林逸.汽车系统动力学[M].北京:机械工业出版社,2005:235-240.
- [9] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2001:77-87.
- [10] 郭孔辉.汽车操纵动力学[M].长春:吉林科学技术出版社,1991:235-237.

## The Design and Simulation for All-wheel Steering Vehicle with Three Axles

YUAN Lei<sup>1</sup>, LIU Xi-xia<sup>1</sup>, LIU Wei-ping<sup>1</sup>

(Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Based on a certain chassis, an all-wheel steering system is designed by improving its steering system which is drove by hydraulic power. A three-DOF mathematical model is built for the vehicle and an optimal controller is designed for the steering system. The optimal controller is simulated through this model, comparing the side-slip angle, yaw rate, body roll angle and body roll angular velocity of the vehicle with the original steering system. The results showed that all-wheel steering system can improve the maneuverability of vehicle at low speed and maintain the stability of vehicle at high speed. The results laid a foundation for the development of all-wheel steering controller.

**Key words:** three-axle vehicle; all-wheel steering system; mathematic model; optimal control

文章编号:1671-6833(2014)06-0125-04

# 基于 AHP-TOPSIS 的物流园区综合竞争力评价模型研究

李玉民, 郭利利, 刘旻哲

(郑州大学 管理工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 园区综合竞争力体现物流园区生存和发展的能力. 从基础设施、运营管理、区位交通、政策环境以及腹地经济等几个方面建立了物流园区综合竞争力评价指标体系, 运用层次分析法(AHP)和逼近理想点法(TOPSIS)构建了评价模型, 并进行了实例分析.

**关键词:** 物流园区; 综合竞争力; 评价模型; 层次分析法; 逼近理想点法

**中图分类号:** F252      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.030

## 0 引言

现代物流业的发展水平已成为衡量一个国家和地区综合竞争力的重要标志. 物流园区是物流业发展的重要载体平台, 是物流业规模化和集约化发展的客观要求和必然产物. 为适应物流业快速发展的趋势, 各级地方政府积极推进物流园区规划和建设. 据中国物流与采购联合会第三次全国物流园区(基地)调查报告<sup>[1]</sup>, 2012 年全国共有各类物流园区 754 个, 其中已经运营的 348 个, 在建和规划中的分别为 241 个和 165 个. 因此建立合适的物流园区评价指标体系, 对物流园区综合竞争力进行科学分析与评价, 对合理规划建设物流园区、保障物流园区健康发展、增强物流园区的综合竞争力, 进而提升区域物流产业发展竞争力、更好服务当地经济社会发展, 都具有重要意义.

物流园区综合竞争力<sup>[2-3]</sup>是指物流园区的内在资源利用能力、外在资源吸收能力等方面所拥有的水平高低或能力的大小. 这种能力体现在对区域物流资源的优化配置、对园区的运作管理、对外部环境的影响等方面, 既包括物流园区现有物流服务能力、运营管理能力, 还包括园区未来发展、持续竞争的潜力, 即物流园区综合竞争力反映的是物流园区现有物流服务能力、发展潜力以及对外部环境影响力的总和.

当前国内对物流园区的研究主要集中在物流园区选址、园区需求预测、园区发展模式、园区绩

效分析<sup>[4-8]</sup>等方面. 有关物流园区竞争力方面的研究则比较少, 特别是缺乏一套系统性的竞争力评价指标体系及模型. 基于此, 笔者从基础设施、运营管理、区位交通、政策环境以及腹地经济发展水平等方面建立物流园区综合竞争力评价指标体系, 运用层次分析法、逼近理想点法构建了评价模型, 并进行了实例分析.

## 1 评价指标体系

影响物流园区综合竞争力的因素有很多, 笔者在大量文献和物流实践的基础上, 将影响物流园区综合竞争力的关键要素归结如下:

### 1.1 基础设施

物流园区基础设施受到物流园区面积、物流技术与装备的先进性以及园区信息化水平等因素的影响. 物流园区面积的大小决定着物流园区的业务开展程度, 合理利用园区有限面积规划各功能区对物流园区的发展有着重要影响. 物流技术与装备是构成物流系统的重要组成要素, 影响着物流系统的每一环节, 为物流园区的正常运转提供了保障. 信息化是物流园区发展的新生产力, 信息化水平体现一个物流园区获取信息、处理信息的能力, 关系园区的运转效率.

### 1.2 运营管理

物流园区的健康稳定发展, 离不开好的运营管理. 科学规划、合理运营和管理物流园区, 充分发挥物流园区的集聚优势和平台作用, 是提高物

收稿日期:2014-06-25; 修订日期:2014-09-03

基金项目:河南省科技攻关计划项目(122102310399, 132102310310)

作者简介:李玉民(1969-), 男, 河南南阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要研究方向是物流与供应链管理, E-mail:

li.yu.min@163.com

流园区综合竞争能力的客观要求. 园区运营管 理活动涉及园区的规划建设、现有生产管理以及 未来发展的各个环节. 影响物流园区运营管理的 因素包括园区年收益、园区入住率、园区吞吐量、 物流人才比例、物流增值服务占比等.

1.3  区位交通

  区位交通受园区所在地理区位以及周边交通 条件等因素影响. 物流园区作为区域内大量货物 的重要集散地, 必须依靠良好的区位交通条件. 好 的区位交通优势不仅带来服务的便利性, 同时有 利于降低园区企业的物流成本, 提高园区综合竞 争能力. 位于交通干线和交通枢纽附近的物流园 区, 有实现大量货物吞吐、转运、规模运输的条件, 具有较强的竞争能力.

1.4  政策环境

  物流业作为一个高速发展的新兴产业, 受政 策环境的影响较大. 物流园区的发展也受到各种 政策法规如土地规划政策、物流产业政策以及生 态环保政策等的影响. 因此, 物流园区综合竞争力 的评价指标需要分析规划的衔接性、政策法规的 支持性和生态环境可持续性等因素.

1.5  腹地经济

  物流园区的服务需求和物流园区的发展状况 都会受到当地经济发展水平的制约. 影响物流园 区建设发展的腹地经济因素最重要的有地区生产 总值、货运周转量等. 地区生产总值指所在地域所 有常住单位在一定时期内生产活动的最终成果, 其影响园区的业务总量和收入水平; 货运周转量 不仅包括运输货物的数量, 还包括运输距离, 能全 面反映物流规模的大小、物流需求状况以及变化 发展规律, 因此地区货运周转量成为影响物流园 区发展水平的重要指标.

  基于以上分析, 建立物流园区综合竞争力的 评价指标体系<sup>[9-11]</sup>, 如表 1 所示.

2  基于 AHP 和 TOPSIS 的物流园区综合 竞争力评价模型

  物流园区综合竞争力受到多种指标的影响, 一般很难将竞争力与各指标之间的关系用数学解 析式表达, 且选取的影响园区综合竞争力的指标 不仅包括定量指标, 还有定性指标. 层次分析法 (AHP) 是一种定性与定量相结合的决策分析方 法, 逼近理想点法 (TOPSIS) 对指标无特殊要求, 能客观地进行多目标的综合评价. 基于此, 笔者选 用 AHP 和 TOPSIS 相结合, 构建物流园区综合竞

争力评价模型<sup>[12-14]</sup>. 步骤如下:

  (1) 收集决策数据, 建立评价矩阵. 设有  $m$  个 物流园区  $A_1, A_2, \cdots, A_m$ ,  $n$  个评价指标  $F_1, F_2, \cdots, F_n$ , 评价矩阵  $X = [x_{ij}]$ . 其中,  $x_{ij}$  表示第  $i$  个物流 园区的第  $j$  个指标的分值;  $i = 1, 2, \cdots, m$ ;  $j = 1, 2, \cdots, n$ .

表 1  物流园区综合竞争力评价指标体系

Tab. 1  The evaluation index system of comprehensive competitiveness of the logistics park

一级指标	A 层(二级指标)	B 层(三级指标)
物流园区综合竞争力评价指标体系	基础设施	a 园区面积
		b 技术与装备先进性
		c 信息化水平
		a 园区年收益
		b 园区入住率
	运营管理	c 园区吞吐量
		d 物流人才比例
		e 物流增值服务占比
	区位交通	a 地理区位
		b 交通条件
		a 规划衔接性
	政策环境	b 政策法规支持性
		c 生态环境可持续性
	腹地经济	a 地区生产总值
		b 货运周转量

  (2) 对决策矩阵进行标准化处理, 得标准化 矩阵  $Y = [y_{ij}]$ . 其中, 对于效益型指标  $y_{ij} = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij})$ ; 对于成本型指标  $y_{ij} = (\max x_{ij} - x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij})$ .

  (3) 运用 AHP 确定评价指标的权重  $W_{ij}$ .

  (4) 计算加权标准化矩阵  $V = (v_{ij}) m \times n = (w_{ij}y_{ij}) m \times n$ .

  (5) 确定正理想点  $V^+$  和负理想点  $V^-$ . 其中, 正理想点  $V^+ = \max \{v_{ij}\}$ ; 负理想点  $V^- = \min \{v_{ij}\}$ . 由此可得, 正理想点矩阵:  $V^+ = [v_1^+, v_2^+, \cdots, v_j^+]$ ; 负理想点矩阵:  $V^- = [v_1^-, v_2^-, \cdots, v_j^-]$ .

  (6) 计算相对接近度. 首先计算各方案到正 理想点的距离  $S_i^+$  和到负理想点的距离  $S_i^-$ .

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2}; \tag{1}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}. \tag{2}$$

其次, 计算各园区的相对接近度:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}. \tag{3}$$

  最后, 比较  $m$  个物流园区的相对接近度  $C_i$ , 其相对接近度大小的排序, 就是物流园区综合竞

争能力的先后顺序.

3 实例应用

现有同类型的 3 个物流园区,分别是位于新乡市某物流园区 A<sub>1</sub>、洛阳市某物流园区 A<sub>2</sub>、郑州市某物流园区 A<sub>3</sub>.实地考察 3 个物流园区相关情况,并邀请专家对定性指标进行相应评分,专家打分范围为 0~10 分,分数越高代表专家认为表现越好.结果如表 2 所示.

表 2 各指标的原始数据  
Tab.2 The original data of each index

评价指标	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	数据来源
园区面积/亩	600	500	400	调查统计
技术与装备先进性	7.8	7.5	8.0	专家打分
信息化水平	7.5	8.0	8.1	专家打分
园区年收益/亿元	5.8	5.0	4.1	调查统计
园区入住率/%	70	75	80	调查统计
园区吞吐量/万吨	400	350	380	调查统计
物流人才比例/%	68	75	80	调查统计
物流增值服务占比/%	20	22	25	调查统计
地理区位	6.3	5.8	6.5	专家打分
交通条件	7.0	8.0	7.6	专家打分
规划衔接性	7.8	7.5	8.0	专家打分
政策法规支持性	8.0	8.2	8.5	专家打分
生态环境可持续性	8.1	8.5	7.7	专家打分
地区生产总值/亿元	203	114	364	调查统计
货运周转量/亿吨公里	265	416	631	调查统计

注:定量指标数据参考 2013 年河南省统计年鉴.

- (1)对数据收集整理,建立评价矩阵.
- (2)对矩阵进行标准化处理.
- (3)运用 AHP 求出各指标的最终权重,如表 3 所示.
- (4)计算加权标准化矩阵.
- (5)确定正理想点  $V^+$ 、负理想点  $V^-$ .  $V^+ = \{0.026\ 0.04\ 0.063\ 0.093\ 0.052\ 0.133\ 0.056\ 0.032\ 0.064\ 0.1\ 0.019\ 0.046\ 0.051\ 0.092\ 0.113\}$ ;  $V^- = \{0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\}$ .
- (6)计算相对接近度.其中,正理想解  $S_1^+ = 0.181$ ;  $S_2^+ = 0.204$ ;  $S_3^+ = 0.157$ . 负理想解  $S_1^- = 0.185$ ;  $S_2^- = 0.146$ ;  $S_3^- = 0.216$ . 由此可以计算出相似接近度:  $C_1 = 0.505$ ;  $C_2 = 0.418$ ;  $C_3 = 0.578$ .

根据相对接近度的大小对 3 家物流园区的综合竞争力进行优劣排序,即  $A_3 > A_1 > A_2$ ,即位于郑州市某 A<sub>3</sub> 物流园区的综合竞争力最强.

表 3 各指标的最终权重

Tab.3 The weights of each index

A 层	权重	B 层	单层权重	最终权重
基础设施	0.129	a 园区面积	0.198	0.026
		b 技术与装备先进性	0.312	0.040
		c 信息化水平	0.49	0.063
运营管理	0.366	a 园区年收益	0.253	0.093
		b 园区入住率	0.142	0.052
		c 园区吞吐量	0.363	0.133
		d 物流人才比例	0.154	0.056
		e 物流增值服务占比	0.087	0.032
区位交通	0.205	a 地理区位	0.312	0.064
		b 交通条件	0.49	0.100
政策环境	0.097	a 规划衔接性	0.198	0.019
		b 政策法规支持性	0.47	0.046
		c 生态环境可持续性	0.53	0.051
腹地经济	0.205	a 地区经济总值	0.45	0.092
		b 货运周转量	0.55	0.113

由表 3 可知,在物流园区综合竞争力评价指标中园区吞吐量、货运周转量、交通条件、园区年收益和地区经济总值等权重值比较大,说明相对于其他指标,这些指标对园区的综合竞争力影响较大.

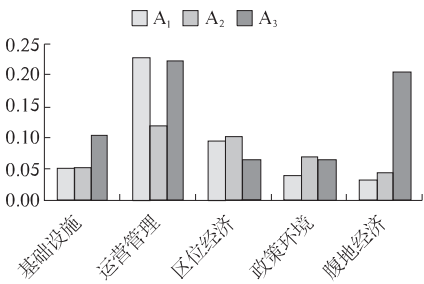


图 1 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 物流园区的加权得分结构图

Fig.1 The structure chart of the logistics parks' score

从图 1 可以看到,A<sub>1</sub> 物流园区在运营管理方面做得比较好,但受到腹地经济的影响较大,且政策支持力度不足;A<sub>2</sub> 物流园区区位交通条件较好,园区得到较好的政策支持,但整体综合竞争能力不高,是受到腹地经济和园区运营管理等因素的限制;A<sub>3</sub> 物流园区基础设施水平较高,运营管理能力较强,在腹地经济等方面也有明显优势.

4 结束语

园区综合竞争能力大小体现物流园区生存和发展的能力.研究表明,政府应更加重视通过完善政策法规,加大支持力度,改善物流投资环境等措施,促进当地物流园区综合竞争能力的提高;



企业应通过提升基础设施水平,优化运营管理机制,吸纳高层次物流人才,拓展增值业务服务,实施信息化管理,从技术、管理、人才、信息等方面提高物流园区的综合竞争能力。

### 参考文献:

- [1] 中国物流与采购联合会,中国物流学会.第三次全国物流园区(基地)调查报告[J].中国物流与采购,2012(18):60-65.
- [2] 向斌,鞠颂东.物流园区竞争力内涵研究[J].物流技术,2010(7):40-43.
- [3] 王福华.物流园区成长及竞争力研究[D].天津:天津大学管理学院,2008.
- [4] 孙淑生,罗宝花.基于 CCRMP/AHP 模型的农产品物流园区选址研究[J].物流工程与管理,2013,35(6):90-93.
- [5] 田田,刘科伟,周潮.物流园区规划建设中的需求分析研究[J].西北大学学报:自然科学版,2010,40(3):515-518.
- [6] 代应,宋寒,林传立.基于 Fuzzy/DEA/AHP 的物流园区建设后评价[J].物流技术,2013(8):193-195.
- [7] 费智,路正南.基于模糊熵的物流园区效益评估及其开发模式选择[J].运筹与管理,2009,18(4):164-167.
- [8] 吉迎东,周红霞.基于 MC 模拟的物流园区建设项目投资风险评价[J].物流工程与管理,2011,33(6):22-25.
- [9] 裴彪.金属物流园区综合竞争力评价体系研究[D].哈尔滨:东北农业大学经济管理学院,2011.
- [10] 潘启龙,刘合光.现代农业科技园区竞争力评价指标体系研究[J].地域研究与开发,2013,32(1):5-11.
- [11] 张英辉.科技园区核心竞争力评价研究[J].统计与决策,2009(18):187-188.
- [12] 乔永辉.一种基于 TOPSIS 的多属性决策方法研究[J].企业技术与开发,2006,25(9):89-91.
- [13] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.
- [14] 常颖.基于 AHP-TOPSIS 的 Z 物流公司核心竞争力评价及提升策略[D].广州:华南理工大学工商管理学院,2012.

## The Research of Evaluation Model on the Comprehensive Competitiveness of Logistics Park Based on AHP and TOPSIS

LI Yu-min, GUO Li-li, LIU Min-zhe

(School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The comprehensive competitiveness of a logistics park reflects its ability to survive and progress. Taking into account several factors about a logistics park, such as the infrastructure, the operation management, the regional transportation, the policy environment and the development of the hinterland economy, this paper establishes evaluation index system of the comprehensive competitiveness. The proposed evaluation model use the AHP and TOPSIS. Finally, the empirical analysis is presented.

**Key words:** logistics park; comprehensive competitiveness; evaluation model; AHP; TOPSIS