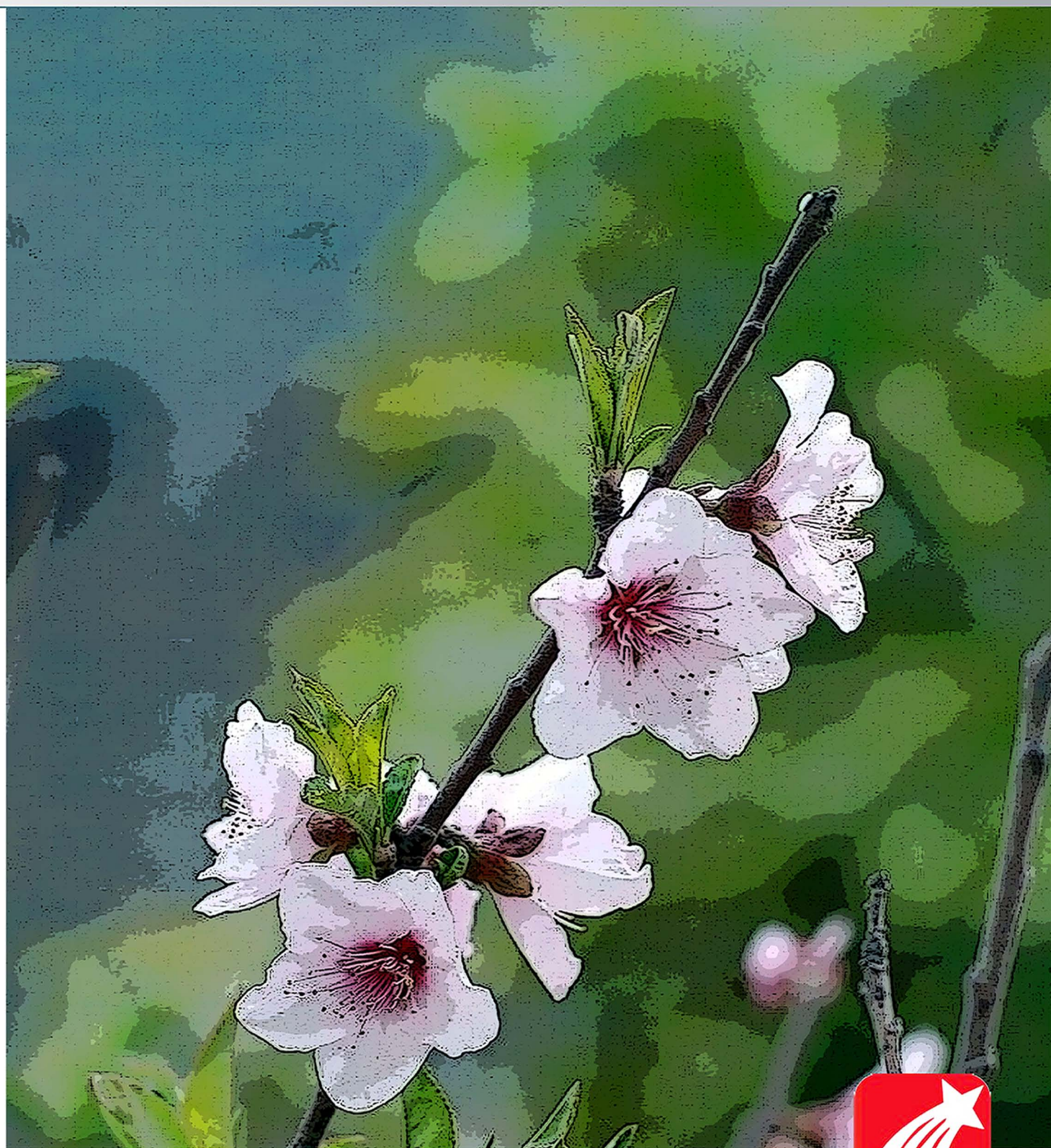


# 郑州大学学报(工学版)

2017年第1期



## 目 次

### 土木与交通工程

- 蝉翼结构静力学仿真和力学性能分析..... 徐 赫, 杨 怡, 雷志鹏( 1 )
- 基于动态特性的固定连接杆形状参数研究..... 曾发林, 曾少波, 李建康( 6 )
- 交通荷载作用下低填道路软土地基的动力响应分析..... 张 浩, 杨 玲, 郭院成( 11 )
- 土压平衡盾构土仓排土引起的干砂地层响应特征分析..... 瞿同明, 王树英, 刘朋飞( 16 )

### 化学工程

- 五层粘接结构的断裂行为模拟研究..... 张 军, 李志宏, 贾 宏( 22 )
- 火源横向位置对隧道火灾烟气分岔流动影响..... 钟 委, 端木维可, 李华琳, 梁天水( 27 )
- 葡萄糖与二价锰离子对磺胺-5-甲氧基嘧啶钠生物降解影响 .....
- ..... 郭夏丽, 张凡英, 陈红坤, 罗亚婷( 32 )
- 梭型凹凸板式换热器相变换热的优化研究..... 王定标, 张喜迎, 韩 勇, 邓 静, 董 桢( 36 )
- 一种强化换热流道的传热特性及流体扩散性分析..... 王永庆, 朱 冰, 赵 頔, 靳遵龙( 41 )
- 350 MW 超临界机组膜式水冷壁壁温计算 .....
- ..... 王为术, 崔 强, 郑梦星, 陈 刚( 46 )

### 电气工程

- 一种双余度无刷直流电机转矩脉动抑制控制策略研究..... 刘卫国, 霍 达, 谭 博, 公 超( 50 )
- 基于区间样本和回声状态网络的风电功率不确定性预测..... 孙晓燕, 时良振, 徐瑞东, 张 勇( 56 )
- 一种多特征提取及融合的虹膜识别方法..... 张 震, 刘 博, 李 龙( 63 )
- 非均衡交通流五岔路口交通信号智能控制研究..... 董海龙, 汤旻安, 程海鹏( 68 )

### 机械与材料工程

- 全矢谱技术在 WTDS 实验台故障诊断中的应用 .....
- ..... 韩 捷, 张钱龙( 74 )
- 基于螺栓联接非线性系统的杆式超声电机建模与分析..... 陶 征, 胡 斌, 刘 旭( 78 )
- 原位聚合 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料制备及其性能研究 .....
- ..... 郑 瑾, 张振亚, 王 龙, 刘文涛, 朱诚身( 83 )
- p-n 型 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体材料的制备与气敏性能研究 .....
- ..... 秦 聪, 王 燕, 陈泽华, 孙 广( 87 )
- 聚乙烯醇分散对 LiFePO<sub>4</sub> 薄膜气敏性的影响 .....
- ..... 帕提曼·尼扎木丁, 阿布力孜·伊米提( 92 )

# JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY

## ( ENGINEERING SCIENCE)

Vol. 38 No. 1

Jan. 2017

### CONTENTS

#### 【Civil Engineering and Construction Engineering】

- Structural Simulation Analysis of the Mechanical Properties of a Cicada's Wings ..... XU He, YANG Yi, LEI Zhipeng ( 1)
- Study on the Shape and Dynamic Parameter Characteristics of the Fixed-point Connecting Rod ..... ZENG Falin, ZENG Shaobo, LI Jiankang ( 6)
- Analysis of Dynamic Response of Soft Soil Foundation Beneath Low Embankment under Traffic Load ..... ZHANG Hao, YANG Ling, GUO Yuancheng ( 11)
- Characteristic Analysis of Response of Dry Sand Stratum Due to Soil Extracting in EPB Shield Chamber ..... QU Tongming, WANG Shuying, LIU Pengfei ( 16)
- Simulation Investigation on Five Adhesive Layers Fracture Characteristic of Adhesively Bonded Joints ..... ZHANG Jun, LI Zhihong, JIA Hong ( 22)

#### 【Chemical Engineering】

- Numerical Investigation into the Influence of Different Transverse Fire Locations on Smoke Bifurcation Flow in Tunnel Fire ... ZHONG Wei, DUANMU Weike, LI Hualin, LIANG Tianshui ( 27)
- Effects of Glucose and Mn ( II ) on Biodegradation of Sulfametoxydiazine Sodium ..... GUO Xiali, ZHANG Fanying, CHEN Hongkun, LUO Yating ( 32)
- Optimization Study on Phase-change Heat Transfer of Plate Heat Exchanger with Fusiform Dimples ..... WANG Dingbiao, ZHANG Xiyang, HAN Yong, DENG Jing, DONG Zhen ( 36)
- Characteristics of Heat Transfer and Fluid Diffusion in a Heat Transfer Enhanced Duct ..... WANG Yongqing, ZHU Bing, ZHAO Di, JIN Zunlong ( 41)
- Numerical Calculation of the Temperature Field of Membrane Water-wall of 350 MW Supercritical Boiler ..... WANG Weishu, CUI Qiang, ZHENG Mengxing, CHEN Gang ( 46)

#### 【Electrical Engineering】

- A Torque Ripple Suppression Method in Dual-redundancy Permanent Magnet Brushless DC Motor ..... LIU Weiguo, HUO Da, TAN Bo, GONG Chao ( 50)
- Forecast of wind power generation with uncertainty based on interval sample and echo state network ..... SUN Xiaoyan, SHI Liangzhen, XU Ruidong, ZHANG Yong ( 56)
- An Iris Recognition Algorithm of Multiple Features Extraction and Fusion ..... ZHANG Zhen, LIU Bo, LI Long ( 63)
- Research on Intelligent Control of Traffic Signal for Five-road Intersection of Unbalanced Traffic Flow ..... DONG Hailong, TANG Minan, CHENG Haipeng ( 68)

#### 【Mechanical Engineering and Material Engineering】

- The Application of Full Vector Spectrum Technology in Fault Diagnosis of WTDS Experimental Platform ..... HAN Jie, ZHANG Qianlong ( 74)
- Modeling and Analysis of the Rod-type Ultrasonic Motor Based on Bolted-joint Nonlinear System ..... TAO Zheng, HU Bin, LIU Xu ( 78)
- Synthesis and Characterization of PA66/SiO<sub>2</sub> Nanocomposites by In-situ Polymerization ..... ZHENG Jin, ZHANG Zhenya, WANG Long, LIU Wentao, ZHU Chengshen ( 83)
- Synthesis and Gas Sensing Properties of p-n Type CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanomaterials ..... QIN Cong, WANG Yan, CHEN Zehua, SUN Guang ( 87)
- The Impact of Polyvinyl Alcohol Dispersion of LiFePO<sub>4</sub> Gas Sensing Properties thin Film ..... PATIMA Nizamidin, ABLIZ Yimit ( 92)



# 蝉翼结构静力学仿真和力学性能分析

徐 赫, 杨 怡, 雷志鹏

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 在分析蝉翼结构特征的基础上, 采用有限元法对主翅结构进行了仿真分析, 研究各部位截面和刚度对结构力学性能的贡献. 基于矢量工具和造型软件, 使用 Beam189 单元和 Shell93 单元构建能反映蝉翼主要特征的有限元模型, 然后对滑翔状态下蝉翼的力学性能进行仿真分析. 发现蝉翼整体呈翘曲状, 最大变形和最大应力均分布在后翅脉附近. 比较各类翅脉的最大变形量可知, 前、中、后 3 种翅脉对蝉翼刚度的贡献呈递减趋势, 其中前翅脉为蝉翼提供主要的刚度. 并改变质量系数对蝉翼进行模态分析, 分析基频的变化, 论证加固尾脉对颤振的抑制效果.

**关键词:** 蝉翼; 结构仿真; 数值分析; 力学性能; 模态分析

**中图分类号:** O33 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.030

## 0 引言

一直以来人们都在观察动植物的结构, 并从中受到启迪. 仿生学的发展对人类社会有着极其重要的推动作用<sup>[1]</sup>. 有翼昆虫等飞行动物有非常良好的飞行机动性能(如苍蝇可在  $10^{-4}$  s 的时间内做  $180^\circ$  的转向, 蜻蜓可以采用各种姿势进行飞行), 而这与有翼昆虫的翅翼结构有着密不可分的关系.

目前, 国内外很多学者研究了昆虫的翅翼结构和飞行性能. Wang 等<sup>[2]</sup>采用梳状条纹投影方法, 首次测得了蜻蜓自由飞行拍翅运动的相关参数; Wu 等<sup>[3]</sup>对昆虫悬停时拍翼的运动参数对气动性能的影响进行了研究; 李忠学<sup>[4]</sup>就蜻蜓的翅膀进行了二维和三维的建模, 分析了在滑翔飞行过程中蜻蜓翅膀的变形和应力特征; Zhang 等<sup>[5]</sup>测定了蜂蝇翅膀的运动学参数; Fry 等<sup>[6]</sup>结合数值计算获得翅膀的气动力; Huang 等<sup>[7]</sup>探究了蝴蝶飞行的机制; Kim 等<sup>[8]</sup>通过实验研究了三维的涡旋结构; 孙茂<sup>[9]</sup>就国内外昆虫飞行气动力学上的研究进行了总结, 对比了多种研究方法和思路. 而在蝉翼的研究方面, Song 等<sup>[10]</sup>测定了蝉翅膜和翅脉的弹性模量, 弯艳玲等<sup>[11]</sup>对典型膜质翅的疏

水性进行了探究, 并使用逆向化技术对翅膀进行建模.

然而, 研究者对蝉翼结构特征的研究还明显不足. 蝉翼的重量仅占蝉总体重的 1% 左右, 却能保证蝉在飞行中具有极好的稳定性和极高的承载能力. 如何建立符合其结构特性的模型是当前研究面临的主要问题. 而基于精确模型对蝉翼结构的力学特性进行研究将有助于分析和解释蝉的优越飞行性能, 并为仿生学设计提供借鉴.

故笔者根据已有的蝉翼结构参数, 通过数值模拟的方法, 探究蝉翼主翅结构的力学特性, 建立符合其结构特征的有限元模型, 分析滑翔状况下蝉翼的变形和应力分布情况, 讨论翅脉截面对面外刚度的影响, 验证加固尾脉的抗振特性.

## 1 有限元建模

不同种类蝉的主翅结构存在共性, 均是由各种尺寸的脉和一定弯曲刚度的膜复合而成. 翅脉通常可以分成 4 部分: 前翅脉、后翅脉、中间支脉和加固尾脉<sup>[12]</sup>. 图 1 为蝉翼的一般结构形式.

蝉翼的脉为基体提供了主要的结构支撑, 而膜是重要的空气动力学结构, 厚度非常薄, 力学上可认为其只承受拉应力的作用.

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11372113)

通信作者: 杨怡(1975—), 男, 广东龙川人, 华南理工大学副教授, 博士, 主要从事结构振动分析方面的研究,

E-mail: yiyang@scut.edu.cn.



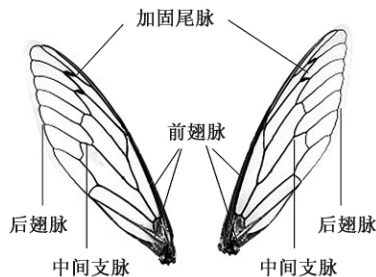


图 1 蝉翼示意图

Fig.1 Structure of cicada's wings

蝉翼结构有 3 个主要的特点: ①数十倍的跨厚比; ②蝉翼在沿翼展方向存在较大刚度, 且比翼弦方向的刚度要高出数个量级; ③尾翼附近的加固尾脉较中间支脉有着更大的质量系数, 影响了结构的动态响应. 然而由于蝉翼结构的复杂性, 重现这个结构的所有细节既不现实也不经济, 故可根据翅膀结构特点进行数值仿真分析.

笔者采用等比的高清蝉翼照片, 使用 Adobe Illustrator CS5 软件对其进行矢量化处理, 获取矢量坐标, 然后将矢量坐标保存成通用格式, 基于造型软件 Pro/E 与 CS5 的数据接口, 对矢量点数据进行输出. 最后在 Pro/E 中利用样条曲线的功能, 构造并修正内、外轮廓线, 进而构建各表面, 生成蝉翼的实体模型.

将实体模型导入 Ansys 程序中, 采用适用于大变形分析的平面协调梁单元 Beam189 来模拟翅脉, 八节点等参曲壳单元 Shell93 来模拟翅膜, 建立能贴合蝉翼结构特性的有限元模型.

Beam189 单元是一种适合分析细长到中等长度梁结构的单元, 基于 Timoshenko 梁理论建立, 并考虑了剪切变形的影响. 对于像蝉翼这样的大跨度结构, Beam189 可较好地模拟翅脉的变形特性.

Shell93 单元则采用 Lagrangian 非线性有限元的方式描述, 具有塑性、应力刚化、大变形以及大应变的特性, 其应力刚化特性可以模拟翼膜在受到横向风载时膜面张力增大和翼展方向刚度增加的特性.

根据测量和观察, 将翅脉的截面定义为环状, 对不同位置的翅脉赋予不一样的横截面积, 具体参数见表 1 (由于较难精确模拟截面的连续变化, 笔者用已测定的数个位置的均值来定义截面).

表 1 翅脉截面参数

Tab.1 Sectional parameters of the wings mm

类别	内径	外径
前翅脉	0.500 0	0.800 0
后翅脉	0.050 0	0.080 0
中间支脉	0.062 5	0.100 0
加固尾脉	0.250 0	0.400 0

根据统计, 蝉翼翼膜厚度的分布在几十至几百微米<sup>[13]</sup>. 笔者所选蝉与文献[14]的蝉同属, 且蝉翼外形尺寸相近, 故借鉴其测定的翅膜厚度分布: 在近翅端赋予膜 0.12 mm 的厚度, 在远翅端赋予膜 0.04 mm 的厚度, 蝉翼近远端示意如图 2 所示.

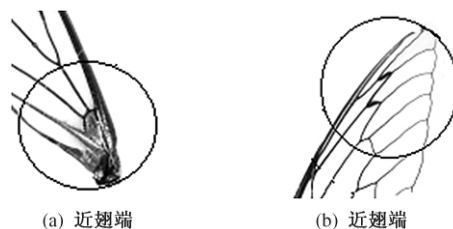


图 2 蝉翼的近远端

Fig.2 Proximal end and far end of cicada's wings

根据上述定义, 对蝉翼模型进行网格划分, 有限元模型如图 3 所示, 共计 2 995 个单元. 参照文献[10]中的实验结果将蝉翼模型参数取为: 翅膜的弹性模量  $E_1 = 3.5$  GPa; 翅脉的弹性模量  $E_2 = 1.9$  GPa; 泊松比  $\gamma = 0.25$ ,  $\gamma = 0.23$ ; 一片蝉翼面积  $S = 12$  mm<sup>2</sup>.

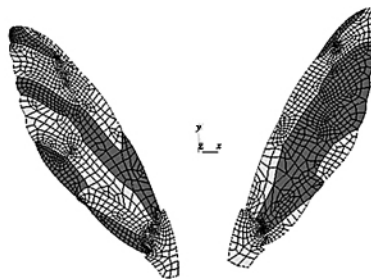


图 3 蝉翼有限元模型

Fig.3 The finite element model of wings

## 2 滑翔状态分析

为计算方便, 采用以下计算量纲: 长度单位为 dmm (丝米); 力的单位为 bN; 质量单位为 mg.

蝉在滑翔状态下, 仅受到重力和升力作用. 当翅翼保持展开状态时, 翅翼表面层流体为层流, 而

气流升力近似为均布荷载<sup>[15]</sup>.

由计算可知荷载大小,在蝉翼根部施加  $x$ 、 $y$ 、

$z$  3 个方向的位移约束,在面外方向施加求得的均布荷载并进行求解,计算结果如图 4 所示.

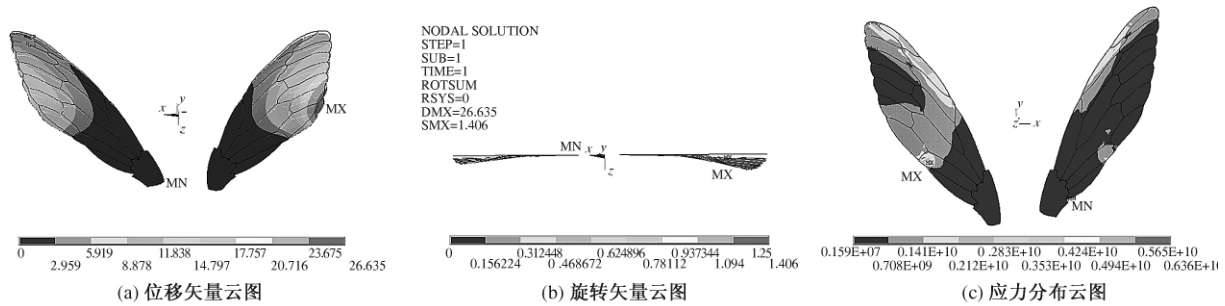


图 4 滑翔状态下的计算结果

Fig. 4 Calculation results in gliding state

由图 4(a) 可知,最大变形发生在后翅脉附近区域,为 26.635 mm,变形主要沿  $z$  方向,而  $x$ 、 $y$  方向的变形可以忽略不计.

由图 4(b) 可知,蝉翼整体呈翘曲状,主要为绕  $x$ 、 $y$  轴的旋转,这一部分的仰旋对升力的贡献巨大,是蝉翼产生高升力的原因之一.

由图 4(c) 可见整个蝉翼上的应力分布.应力最大值为  $0.63 \times 10^{10} \text{ N/mm}^2$ ,位于后翅脉根部;应力最小值为  $0.159 \times 10^7 \text{ N/mm}^2$ ,位于前翅脉附近.由于翅膜的存在,应力在蝉翼上的分布较为均匀.

### 3 翅脉截面对刚度的影响

在蝉短暂的生命中,蝉翼经历了一个快速的成长过程,在这个过程中,翅脉的尺寸不断发生改变,伴随而来的是飞行能力不断改善.文中使用的是成熟蝉的翼翅结构,在其整个生命周期中具有最佳的飞行性能.

翅脉在蝉翼的结构中起着骨架的作用,探究其刚度特性可作为大跨度结构设计的参照,且有助于分析蝉翼的变形特征.

故笔者基于成熟体模型和控制变量法,赋予 3 种翅脉不同的截面尺寸,观察蝉翼的变形,探究各位置翅脉对整个蝉翼刚度的贡献.计算结果如表 2 所示.

由表 2 可知,在 3 种翅脉内径变化时,对蝉翼最大位移影响最明显的是前翅脉.随着内径增大,最大位移增幅为 121.3%;其次是中间支脉,最大位移增幅为 34.8%;影响最小的是后翅脉,最大位移增幅只有 17.4%.

因此,对整个结构的刚度贡献从前翅脉到后翅脉是递减的.前翅脉提供了结构的主要刚度,远大于后翅脉和中间支脉,中间支脉对结构刚度的贡献较后翅脉多.

结合滑翔分析中蝉翼变形可知,蝉翼的刚度也是从前翅脉往后翅脉递减.这样的结构特性在流场中容易形成仰角,产生升力,且能为大跨度结构提供良好的支撑效果.此外,还可以观察到,最大位移的增长方式均可分为两个区间.

前翅脉和后翅脉内径增幅为 7 倍以内时,蝉翼的最大位移增幅不明显;为 7 倍以上时,蝉翼的最大位移增幅逐渐明显.中间支脉内径增幅为 5 倍以内时,蝉翼的最大位移增幅不明显;为 5 倍以上时,蝉翼的最大位移增幅逐渐明显.

### 4 固有频率分析

在自然界中,人们观察到很多飞行昆虫具有防颤振的结构,如蜻蜓前翅沿的翅痣.在蝉翼上,加固尾脉则扮演了类似的角色.加固尾脉相对中间支脉有更大的质量系数,对蝉翼的动态性能有着重要影响,且随着蝉的逐渐进化,某些种属蝉的加固尾脉的质量系数已达到 10 倍以上<sup>[16]</sup>.

表 3 为不同质量系数下蝉翼前三阶频率的计算结果.由表 3 可知,随着质量系数上升,各阶频率均有明显下降.当质量系数为 22 时,左翼的基频降低了约 30%,右翼的基频降低了约 26%,对应的高阶频率也有相应的下降.由此可见,加固翅脉的质量集中效应可有效降低结构的固有频率,从而抑制颤振的发生.

表 2 不同内径的前翅脉、后翅脉、中间支脉对应的蝉翼最大位移

Tab.2 The maximum displacements of wings corresponding to different inner diameter of front, far and middle nervure mm

前翅脉			后翅脉			中间支脉		
外径	内径	最大位移	外径	内径	最大位移	外径	内径	最大位移
0.8	0.050	26.118	0.08	0.005 0	26.035	0.1	0.012 50	25.469
	0.200	26.129		0.020 0	26.051		0.025 00	25.496
	0.300	26.176		0.030 0	26.112		0.037 50	25.612
	0.400	26.310		0.040 0	26.277		0.050 00	25.930
	0.500	26.635		0.050 0	26.635		0.062 50	26.635
	0.600	27.443		0.060 0	27.329		0.075 00	28.061
	0.700	30.235		0.070 0	28.627		0.087 50	30.946
	0.750	36.201		0.075 0	29.686		0.093 75	33.509
	0.765	42.046		0.076 5	30.095		0.112 50	34.213
	0.780	57.810		0.078 0	30.569		0.125 00	34.345

表 3 不同质量系数下蝉翼的频率

Tab.3 Wings' frequencies under different mass coefficients Hz

质量系数	位置	一阶	二阶	三阶
1	左翼	1 089.1	1 640.1	2 831.3
	右翼	1 164.6	1 706.8	2 987.3
3	左翼	1 073.5	1 606.9	2 824.4
	右翼	1 105.3	1 609.5	2 949.7
7	左翼	1 008.2	1 514.5	2 803.9
	右翼	1 047.3	1 566.7	2 822.6
14	左翼	886.81	1 431.1	2 447.1
	右翼	1 007.2	1 514.2	2 744.0
22	左翼	768.43	1 308.7	1 950.7
	右翼	853.74	1 455.7	2 556.0

## 5 结 论

1) 滑翔状态下,由于膜结构的作用,蝉翼上应力分布较为均匀,最大变形发生在后翅脉附近,以致后翅脉尾部产生较大扭转变形,使得整体结构呈流线型。

2) 对蝉翼面外刚度贡献最大的是前翅脉,然后是中间支脉,而后翅脉贡献最小。整个结构在前翅脉到后翅脉间的刚度是递减的,这样的结构在流场中容易形成仰角,产生升力。

3) 加固尾脉降低了蝉翼的各阶固有频率,能有效抑制蝉翼颤振的发生。

## 参考文献:

[1] PARK J B. Biomaterial science and engineering [M]. New York: Pergamum Press, 1984.  
[2] WANG H, ZENG L J, LIU H, et al. Measuring wing kinematics, flight trajectory, and body attitude during

forward flight and turning maneuvers in dragonflies [J]. Journal of experimental biology, 2003, 206( 4) : 57 - 745.  
[3] WU J H, SUN M. Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing [J]. Journal of experimental biology, 2004, 207 ( 7) : 1137 - 1150.  
[4] 李忠学. 结构仿生学与新型有限元计算理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
[5] ZHANG Y L, SUN M. Wing kinematics measurement and aerodynamics of free-flight maneuvers in drone-flies [J]. Acta mechanica sinica, 2010, 26 ( 3) : 371 - 382.  
[6] FRY S N, SAYAMAN R, DICKINSON M H. The aerodynamics of free-flight maneuvers in drosophila [J]. Science, 2003, 300( 5618) : 495 - 498.  
[7] HUANG H, SUN M. Forward flight of a model butterfly: Simulation by equations of motion coupled with the Navier-Stokes equations [J]. Acta mechanica sinica, 2012, 24( 6) : 14 - 209.  
[8] KIM D, GHARIB M. Experimental study of three-dimensional vortex structures in translating and rotating plates [J]. Experiments in fluids, 2010, 49 ( 1) : 329 - 339.  
[9] 孙茂. 昆虫飞行的空气动力学 [J]. 力学进展, 2015, 45( 1) : 1 - 28.  
[10] SONG F, LEE K L, SOH A K, et ali. Experimental studies of the material properties of the forewing of cicada ( Homóptera, Cicádidae) [J]. Journal of experimental biology, 2004, 207( 17) : 3035 - 3042.  
[11] 弯艳玲, 丛茜, 刘诗, 等. 蜜蜂、家蝇前翅微观结构及浸润性能研究 [EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线 [2008 - 01 - 03]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200801-44>.  
[12] TSUYUKI K, SUDO S. The wing structure and flap-



- ping behavior of cicada [C] //JSME annual meeting. the Japan society of mechanical engineers. Tokyo: JSME, 2003: 85 – 86.
- [13] CHEN K F. New genera and species of Chinese cicadas with synonymical and nomenclatorial notes [J]. Journal of the New York entomological society, 1943, 51( 1) : 19 – 53.
- [14] TSUYUKI K, SUDO S. The properties of wing and air-flow of flying insects [C] //24th International congress of the aeronautical sciences. Yokohama: ICAS, 2004: 1 – 10.
- [15] ELLINGTON C. The novel aerodynamics of insect flight: applications to micro-air vehicles [J]. Journal of experimental biology, 1999, 202( 23) : 3439 – 3448.
- [16] ROHDENDORF B B. Evolution and classification of the flight apparatuses of insects [J]. Trudy paleont Inst, 1949, 16: 163 – 176.

## Structural Simulation Analysis of the Mechanical Properties of a Cicada's Wings

XU He, YANG Yi, LEI Zhipeng

( School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on vector tools and modeling software, this paper analyzed and summarized the structure characteristics of cicada's wings. And then the element Beam189 and element Shell93 were used to construct finite element model which could reflect the main characteristics of cicada's wings. The mechanical properties of cicada's wings in gliding state were simulated and analyzed. In that state, the whole structure of cicada's wings was found warping shape, and the maximum deformation and stress were close to the far nervure. With the change of sectional size of all kinds of nervure in same ratio, comparative calculation was done to obtain the maximum deformation of the corresponding cicada's wings. The results showed that the increasing of cicada's wings' deformation corresponding to three kind nervure were 121.3%、34.8%、17.4% respectively, so their contribution to the stiffness decreased. Among them, front nervure provided main stiffness for cicada's wings. With the change of the quality coefficient of reinforcement nervure, modal analysis was done to analyze the fundamental frequency changes which could prove suppression effect of reinforcement nervure on flutter. When the quality coefficient of reinforcement nervure was 22, the fundamental frequency decreases about 30%.

**Key words:** cicada's wing; structural simulation; numerical analysis; mechanical property; modal analysis

# 基于动态特性的固定连接杆形状参数研究

曾发林<sup>1</sup>, 曾少波<sup>2</sup>, 李建康<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 汽车工程研究院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 连接杆件在汽车及机械结构中被广泛使用, 振动破坏是其主要失效形式. 影响连接杆件振动的主要因素是杆件的动态特性. 通过建立连接杆件系统的振动学方程, 并利用有限元软件 MIDAS 对连接杆件进行模态分析. 分析结果表明, 在位置固定、横截面积一定的情况下, 各个振型的径弦比与固有频率、角度与固有频率存在一定的规律, 且此结论在某型号的半挂牵引车上得到了验证, 并为连接杆件的结构设计或者进一步的结构优化提供了理论依据.

**关键词:** 连接杆件; 振动破坏; MIDAS; 模态分析; 结构设计

**中图分类号:** U463.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.029

## 0 引言

连接杆件作为汽车重要组成部件, 其设计的优劣直接关系到车辆使用的舒适性和系统动态特性. 汽车底盘是车辆系统结构的主要部分, 从结构学上说, 车辆的动力总成、轮胎系统、驾驶室、载荷都可以看作是附着在底盘上的附着系统. 许多功能性结构大多附着在底盘上, 而连接形式中杆式连接是常见的, 且杆件的几何形状与被连接部件的动态特性有着直接的关系, 故如何根据需求设计杆件几何形状是车辆动态设计的重要问题.

随着大型有限元软件的出现以及计算机技术的发展, 采用现代设计理论和方法对连接杆件进行动态设计已成为连接杆件整体设计中非常重要的一个部分<sup>[1]</sup>. 运用有限元软件里的模态分析方法可以确定设计结构或部件的振动特性, 即结构的固有频率和振型. 它们是连接杆件结构设计的重要参数. 对连接杆件进行适当的动态设计, 避免连接杆件在工作范围内出现共振, 提高连接杆件的性能, 降低整个汽车振动和噪声是十分必要的. 笔者采用大型有限元软件 MIDAS 对不同的径弦比与不同角度值的连接杆件进行模态分析, 得到了连接杆件的固有频率和振型, 并对连接杆件的

同种振型下的规律曲线进行了详尽的分析, 从而为高性能连接杆件的设计和改进了充分的理论依据.

## 1 连接杆件动态特性的有限元仿真分析

### 1.1 连接杆件有限元模型的求解

为分析杆件几何形状的改变与动态特性, 即固有频率特性变化之间的关系, 建立两固定点之间杆连接的有限元模型. 在连接杆件的振动计算中, 连接杆件的固有频率和模态振型是其固有特性, 只与结构的刚度和质量的分布有关<sup>[2]</sup>.

由弹性力学有限元法可得连接杆件系统振动的运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F_{(t)}\}. \quad (1)$$

式中:  $[M]$  为总体质量矩阵;  $[C]$  为阻尼矩阵;

$[K]$  为刚度矩阵;  $\{\ddot{X}\}$  为结构的加速度向量矩阵;  $\{\dot{X}\}$  为速度向量矩阵;  $\{X\}$  为位移向量矩阵,  $\{X\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ ;  $\{F_{(t)}\}$  为结构的激振力向量矩阵,  $\{F_{(t)}\} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}^T$ .

笔者研究的是连接杆件系统. 以连接杆件的一端为参考基础, 另一端连接质量块的模型进行约束模态下的动态特性研究, 故连接杆件的参考

收稿日期: 2015-09-27; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(11KJA580001)

作者简介: 曾发林(1965—), 男, 江苏镇江人, 江苏大学副教授, 硕士, 主要从事振动与噪声方面的研究, E-mail: 764143365@qq.com.

端固定,质量端自由。

在微分方程中,无外力作用,即 $\{F_{(t)}\} = 0$ 时得到的自由方程。求解结构自由振动的固有频率和振型,发现阻尼对它们影响不大,因此阻尼项可以略去<sup>[3]</sup>,这时无阻尼自由振动的运动方程为

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = \{0\}, \quad (2)$$

其对应的特征方程为

$$([K] - \omega^2 [M])\{X\} = \{0\}, \quad (3)$$

或

$$[K]\{X\} = \lambda_i [M]\{X\}, \quad (4)$$

式中: $\lambda_i$ 为结构系统的第*i*个特征值。

## 1.2 连接杆件的模态分析

在连接杆件静强度满足要求的前提下,随着汽车向着高速化、大功率的方向发展,对连接杆件的设计提出了新的要求:一方面希望提高强度储备和安全系数,以及提高连接杆件的可靠性和使用寿命;另一方面希望减轻质量,减小连接杆件的振动和噪声<sup>[4]</sup>。连接杆件的模态分析正是利用有限元软件提取连接杆件的固有频率,防止连接杆件在工作过程中与激振频率相近产生共振而导致疲劳失效。在对连接杆件进行模态分析时,为了确保计算结果能真实地反映连接杆件的模态特性,故以整根连接杆件为研究对象,固定连接杆件的一端,模拟连杆件的真实工作状态。

模态分析属于线性分析,因此将单元类型和材料参数定义为线性,采取约束模态来提取连接杆件的固有频率<sup>[5]</sup>。根据模态分析理论,对连接杆件进行模态分析时,不要求解出连接杆件所有的固有频率和振型,因为低阶频率对连接杆件动态特性影响最大<sup>[6]</sup>。

在CATIA中建立径弦比为无穷大的三维建模,模型如图1所示。

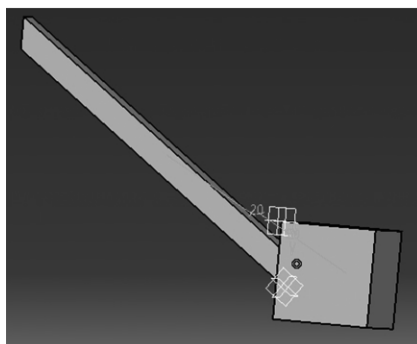


图1 连接杆件与质量块的几何模型

Fig.1 Connecting rod and the mass of the geometric model

连接杆件两个端面间的距离恒为 $\sqrt{180 \times 150}$  mm,杆件与质量块下表面的夹角为 $39.8^\circ$ 。其中,连接杆件的模型所用材料为Q235,连接杆件的横截面为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。其材料性能:质量密度 $\rho = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ ;弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ;泊松比 $\mu = 0.3$ ;质量块 $m = 16.955 \text{ kg}$ 。在边界约束施加过程中,尽可能模拟连接杆件的实际工作状态,即固定非质量块一端。

连接杆件前6阶固有频率及振型见表1及图2,其中以固定端面为基准,平行固定端面且垂直质量块下底端面并指向质量块上端面为 $z$ 轴的正方向,垂直固定端面且指向质量块的方向为 $y$ 轴正方向,垂直于 $z$ 与 $y$ 轴组成的面为 $x$ 轴。

表1 连接杆件的前6阶固有频率振型

Tab.1 The front six order natural frequencies and mode shapes of the connecting rod

振型阶次	固有频率 $f/\text{Hz}$	振型描述
1	20.867	沿 $z$ 轴方向移动
2	25.464	沿 $x$ 轴方向移动
3	115.459	沿 $y$ 轴方向扭转
4	236.591	沿 $x$ 轴方向弯振
5	352.319	沿 $z$ 轴方向弯振
6	800.585	沿两条 $x$ 轴方向弯振

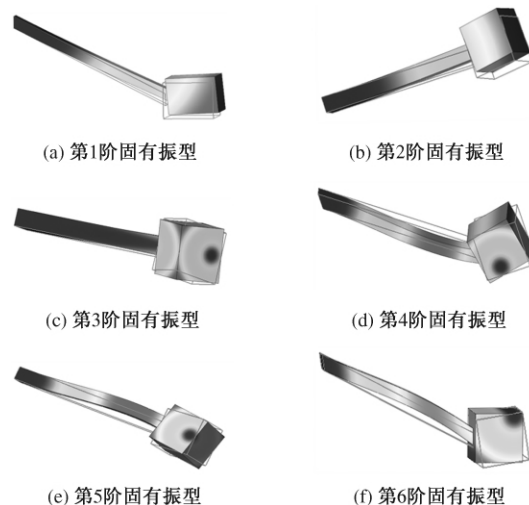


图2 前6阶振型

Fig.2 The front six order vibration modes

从表1可以看出,低阶次模态下相邻两阶的固有频率之差较小,因此容易发生多方向的共振效应,进而引起较大的动应力,从而出现弯曲疲劳裂纹。为此,连接杆件运动时的频率应尽量偏离各阶固有频率,避免发生共振<sup>[7]</sup>。



### 1.3 连接杆件的固有频率与径弦比之间的关系

在已知两固定点距离为  $\sqrt{180 \times 150}$  mm, 连接杆件的横截面积为 20 mm × 20 mm 时, 对不同的径弦比进行模态分析, 得出 6 种振型在第一次出现时的频率曲线, 如图 3 所示。

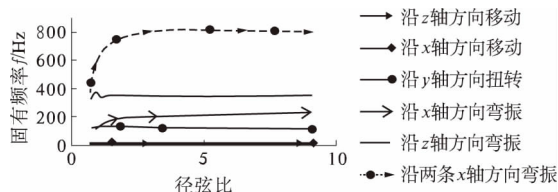


图 3 前 6 阶固有频率规律曲线

Fig. 3 The front six order natural frequencies rule curves

由图 3 可知, 从所有振型中分离出沿  $z$  轴转动振型和沿两条  $x$  轴弯振很容易做到, 但其他振型固有频率的差值较小, 不易分离。因此, 可以把前 6 阶振型规律曲线分成 3 部分, 分别如图 4 ~ 6 所示。

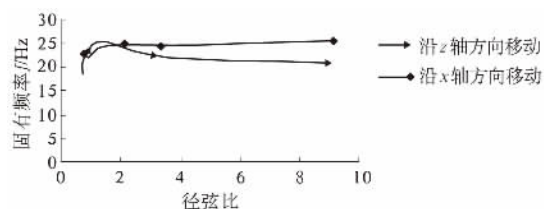


图 4 沿  $x$  轴、 $z$  轴移动振型的固有频率的曲线

Fig. 4 The natural frequency curves of vibration mode moving along the  $x$ -axis, the  $z$ -axis

由图 2 与图 4 可知, 相对于径弦比无穷大, 径弦比较小时, 相邻两阶的固有频率之差更小, 甚至会出现同一频率下沿  $z$  轴方向和沿  $x$  轴方向都发生严重的共振效应。为此, 选取连接杆件时, 各阶固有频率应尽量偏离主频率, 避免发生共振。由图 4 可知, 在仅考虑  $z$  轴方向的振动时, 随着半径的增大, 固有频率先增大后减小, 最后趋于稳定值; 在仅考虑沿  $x$  轴方向的振型时, 随着径弦比的增大, 固有频率先减小后增大, 最后趋于稳定值。

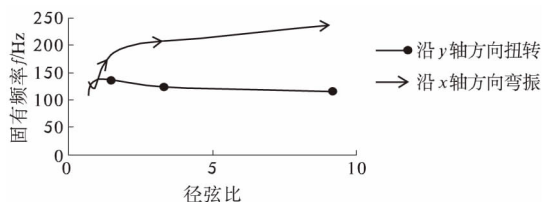


图 5 沿  $y$  轴扭转、 $x$  轴方向弯振的固有频率规律曲线

Fig. 5 The natural frequency rule curves of the torsion along  $y$ -axis and the bending vibration along  $x$ -axis

由图 5 可知, 在仅考虑  $y$  轴方向的扭转振动

时, 随着径弦比的增大, 固有频率先增大后减小, 最后趋于稳定值; 在仅考虑沿  $x$  轴方向的弯振时, 随着径弦比的增大, 固有频率先减小后一直增大。

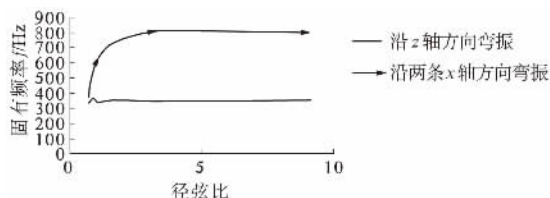


图 6 沿  $z$  轴弯振、两  $x$  轴弯振的固有频率规律曲线

Fig. 6 The natural frequency rule curves of the bending vibration along  $z$ -axis and along two  $x$ -axes

由图 2 与图 6 可知, 高阶次模态下相邻两阶的固有频率之差较大, 在仅考虑沿  $z$  轴方向的转动或者两  $x$  轴方向的弯振时, 选择合适的连接杆件的径弦比可以有效地避免共振。由图 6 可知, 在仅考虑沿  $z$  轴方向的弯振时, 随着半径的增大, 固有频率先增大后减小, 最后趋于稳定值; 在仅考虑沿着两条  $x$  轴方向的弯振时, 随着径弦比的增大, 固有频率逐渐增大最后趋于稳定值。

### 1.4 连接杆件固有频率与角度之间的关系

在已知两固定点距离为  $\sqrt{180 \times 150}$  mm, 连接杆件的横截面积为 20 mm × 20 mm, 连接杆件与  $y$  轴正方向夹角作为变量, 进行不同角度的建模以及模态分析。由结果可知, 其低阶每个振型的固有频率都是随着角度的增大而增大, 其中大部分振型的固有频率相差较大, 不易产生干涉, 如图 7 所示。

其中, 沿  $x$  轴方向移动振型与沿  $z$  轴方向移动的振型规律曲线如图 8 所示。

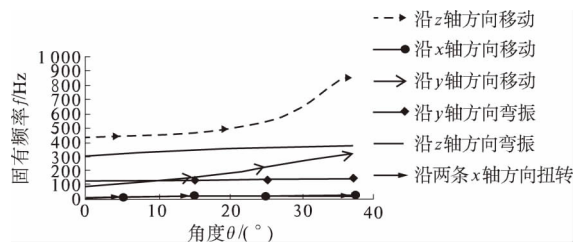


图 7 前 6 阶固有频率规律曲线

Fig. 7 The first six natural frequencies rule curves

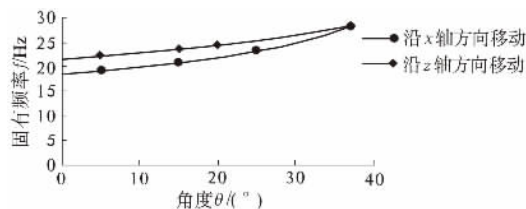


图 8 前 2 阶振型与固有频率之间关系的规律曲线

Fig. 8 The relationship of the front 2 order law curves between model and the natural frequency

由图8可知,随着角度的增加,沿 $x$ 轴移动的振型和沿 $z$ 轴移动的振型的固有频率差值在减小.这两个振型的固有频率差值较小时,主振频接近此固有频率就会产生严重的双向共振现象,损坏现象更为严重<sup>[8]</sup>.因此在只考虑振动因素时,角度的设计应尽量减小.

## 2 变参数的连接杆件建模分析

在横截面为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 时,多次改变连接杆件两端的位置和质量块的质量,利用CATIA对连接杆件进行变径弦比和变角度建模,通过有限元软件MIDAS进行模态分析,绘制不同振型下的径弦比与固有频率、角度与固有频率之间的规律曲线,通过比较可得出,虽然不同的径弦比或者角度在同种振型下的固有频率不相等,但是整体曲线的变化规律是一致的.这说明对单个模型进行模态分析,绘制不同振型的规律曲线具有一定的普遍性.

## 3 连接杆件的实验验证

某型号半挂牵引车在怠速时脚踏板抖动较厉害,极大地影响驾驶员的操纵安全和脚踏板的使用寿命.选取脚踏板作为研究对象,对半挂牵引车进行测试,以 $z$ 轴方向的移动振型为例,测得脚踏板两点间距离为 $310\text{ mm}$ ,半径为 $233\text{ mm}$ ,即径弦比为 $0.75$ 怠速下的频域信号,如图9所示.

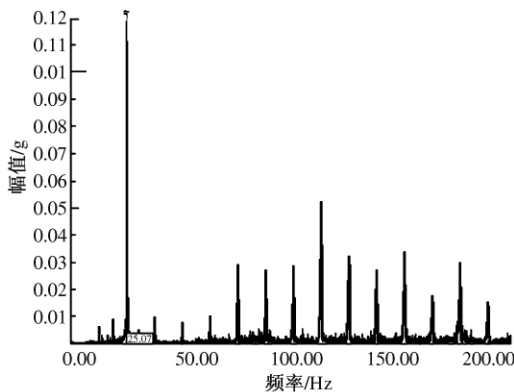


图9 径弦比为0.75的频域信号

Fig. 9 The frequency-domain signals when diameter-chord ratio is 0.75

由图9可知, $z$ 轴方向移动的振型的固有频率为 $25.07\text{ Hz}$ ,根据连接杆件动态特性的有限元分析表明,径弦比在 $1.28$ 时,杆件的 $z$ 轴方向固有频率最大.所以选取半径为 $396.8\text{ mm}$ 的脚踏板进行测试,其频域信号如图10所示.

由图10可知,半径为 $396.8\text{ mm}$ 的杆件, $z$ 轴

方向振动的一阶固有频率为 $30.32\text{ Hz}$ ,明显比半径为 $233\text{ mm}$ 的固有频率大.选取径弦比为 $1.8$ ,即半径为 $558\text{ mm}$ 的脚踏板,测得频域信号如图11所示,由图11可知,沿着 $z$ 轴方向振动的一阶固有频率为 $29.62\text{ Hz}$ ,相较于径弦比为 $1.28$ 的脚踏板,固有频率在减小,且比径弦比小于 $1.28$ 的脚踏板的固有频率衰减更为缓慢,这与上述规律曲线相一致.

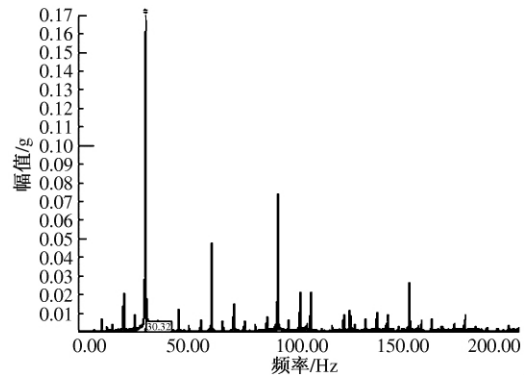


图10 径弦比为1.28的频域信号

Fig. 10 The frequency-domain signals when diameter-chord ratio is 1.28

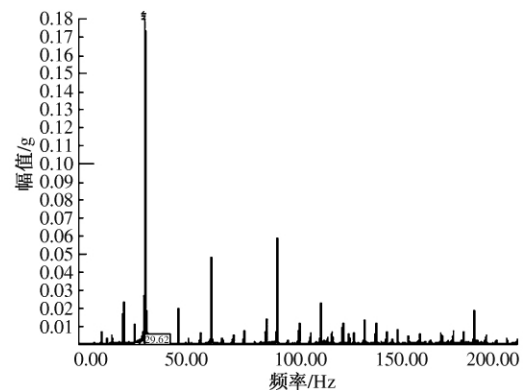


图11 径弦比为1.8的频域信号

Fig. 11 The frequency-domain signals when diameter-chord ratio is 1.8

## 4 结论

1) 通过对连接杆件进行模态分析可知,低阶模态下固有频率差值较小,容易发生共振效应以及出现弯曲疲劳裂纹,这在连接杆件的结构设计和加工工艺上应予以重视.

2) 通过对不同径弦比和不同角度的连接杆件进行模态分析,可以得到各个振型下径弦比和固有频率、角度和固有频率的规律曲线.在考虑单一振型时,设计的连接杆件的固有频率在考虑经济性、安全性、可靠性后尽可能远离连接杆件的主

激振频率.若是连接杆件工作环境较为复杂,不能确定其振型,一般取径弦比较大,或者角度较小的设计模型,这样会有效地解决几种振型的干涉.

3) 更换不同的质量块,或者更改固定点的距离,在此基础上研究其径弦比与固有频率、角度与固有频率之间的规律曲线,其曲线的变化关系一致,这说明连接杆件的尺寸设计存在一定的规律,且这一结论在实际检测中得到了验证.

#### 参考文献:

- [1] 张自明,许春光,郑巍,等. 频率变化对连杆动态应力的影响研究[J]. 车用发动机,2011(6): 71-75.
- [2] 王晓云,罗丹,任耿鑫. 基于 ANSYS 的 485Q 型连杆动态特性分析[J]. 机械传动,2011,35(8): 81-84.
- [3] 沈晓丽,李健,宋述停,等. 液压机械臂连杆有限元分析[J]. 机械制造自动化,2011,33(8): 58-66.
- [4] 刘昌领,罗小兰. 液压机械臂连杆有限元分析[J]. 机械设计与制造,2011,33(11): 34-39.
- [5] 韩清凯,于涛,孙伟. 机械振动系统的现代动态设计与分析[M]. 北京: 科学技术出版社,2010: 17-31.
- [6] 江敏. B3E 汽油机连杆的有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学汽车工程学院,2003.
- [7] 张云侠. 3100QB 柴油机机体结构静力与模态 CAE 分析研究[D]. 昆明: 昆明理工大学交通工程学院,2002.
- [8] 邓晓龙,高虹亮. 柴油机机体有限元建模及模态分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2005,27(5): 426-429.

## Study on the Shape and Dynamic Parameter Characteristics of the Fixed-point Connecting Rod

ZENG Falin<sup>1</sup>, ZENG Shaobo<sup>2</sup>, LI Jiankang<sup>1</sup>

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The connecting rod was widely used in the automotive and mechanical structure of which main failure mode is vibration-damage. Vibration-damage was the main failure mode of connecting rod. The dynamic characteristics of the connecting rod were the main factors which affect the vibration of it. Therefore, by establishing vibration equation and using finite element software MIDAS, the modal analysis was done and the results showed that there was a certain regularity between the diameter ratio and, the natural frequencies, the angle and natural frequencies of the various model shapes at a fixed location and cross-section. This conclusion had been verified on the tractor-trailer. It provided a theoretical basis for the structural design or further structural optimization.

**Key words:** connecting rod; vibration-damage; MIDAS; modal analysis; structural design



# 交通荷载作用下低填道路软土地基的动力响应分析

张 浩<sup>1</sup>, 杨 玲<sup>2</sup>, 郭院成<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州市市政设施维修建设有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘 要:** 为了揭示交通荷载对低填道路下卧软土地基的动力影响规律, 对软土地基的动孔隙水压力进行了现场测试, 分析了不同上部路堤厚度和行车速度工况下地基孔隙水压力的分布规律, 并据此借助数值模拟对长期交通荷载作用下软土地基的附加沉降进行计算分析. 结果表明: 上部路堤结构对交通荷载的动力激励具有消减作用, 填筑厚度越小, 下卧软土地基的动力响应越明显, 且随着深度的增加动孔隙水压力呈衰减趋势, 长期交通荷载作用下软土地基的附加沉降呈近似指数型非线性增长.

**关键词:** 低填路堤; 交通荷载; 动力响应; 动孔隙水压力; 软土地基

**中图分类号:** TU413.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.027

## 0 引言

道路建设中高填方路堤往往存在用地紧张问题, 伴随节能省地型建设政策的不断深化, 我国部分城市和地区已在道路工程中采取低填路堤设计方案, 如江苏连盐高速连云港段即采用了低路堤结构, 路堤填土高度为 1.56 ~ 1.68 m<sup>[1]</sup>. 路堤高度的降低客观上降低了结构自重荷载, 有利于工程建设中对路基稳定与沉降的控制, 但下卧地基中一部分软土层将位于车辆荷载作用的深度范围内, 受车载附加荷载影响将产生新沉降变形, 且伴随运营时间的增长, 势必出现较大工后沉降问题, 造成安全隐患. 例如: 日本道路协会对交通荷载作用下低路堤软土地基的沉降实测分析发现, 开放交通后附加沉降达 10 ~ 15 cm, 约为建设期沉降量的一半<sup>[2]</sup>; 另一条建在灵敏性软土上的高速公路开放交通 4 a 后产生 70 cm 的附加沉降<sup>[3]</sup>. 由此可见, 交通荷载作用下低填路堤软土地基的动力响应与长期累积变形效应显著, 且严重影响交通设施的耐久性和线路的安全运营.

交通循环荷载作用下路基的动力特性, 是引起道路运行条件恶化的关键因素. 因此, 有必要对交通循环荷载作用下路基(尤其是软黏土路基)的动力特性开展研究. 目前, 该方面研究多采用室

内试验<sup>[4-5]</sup>、理论解析计算<sup>[6-7]</sup>、数值模拟<sup>[8-10]</sup>和现场实测<sup>[11-13]</sup>等方法. 其中, 室内试验多采用动三轴或循环剪切试验模拟软土的循环受荷效应, 便于揭示循环荷载作用下软土的变形特性和软化效应, 但仍存在材料相似性和尺寸效应等问题; 理论解析计算则往往需要一定的简化假定, 其表达式亦相对复杂, 求解往往需要专业的计算软件, 故而不利于工程人员应用; 数值模拟可以较全面地考虑各因素的影响, 是工程分析与理论计算的常用方法; 现场实测能直观地反映交通荷载的作用情况, 且较真实地揭示土体动力响应的演化规律<sup>[1,14]</sup>, 但往往受到实验工况与条件限制, 相关的现场监测实例并不多见.

据此, 笔者以江苏某沿江城市道路为背景, 通过对低填路段下卧软土层中动孔隙水压力的现场监测, 揭示行车荷载作用下低填路堤软土地基的动力响应规律. 并在此基础上, 考虑运营期交通荷载的长期作用, 对路基附加沉降变形进行了计算分析, 为工后沉降控制提供依据.

## 1 现场试验分析

### 1.1 工程概况

江苏某沿江城市道路受城区高程整体控制, 局部采用低填路堤结构, 设计时速 60 km/h. 考虑

收稿日期: 2015-09-06; 修订日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272132); 南京市交通科技资助项目(宁交安 2009-22-18)

作者简介: 张浩(1985—), 男, 河南永城人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事地基与基础工程研究, E-mail: tmzhanghao@zzu.edu.cn.

线路区域浅表层有软弱地基土层露出,设计采用 60 cm 碎石土一次抛填的基底处置方案,低填路段在此基础上进行路堤、路床和路面结构层施工,典型断面如图 1 所示。

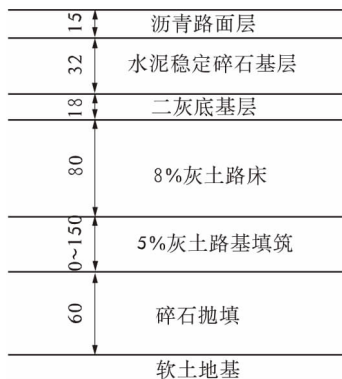


图 1 路堤断面示意图(单位:cm)

Fig.1 Road embankment sectional drawing

考虑到路堤结构的力学性能与稳定性要求,路堤与路床采用 5%~8% 的石灰改良土填筑,路面结构层分别为 15 cm 沥青面层、32 cm 水泥稳定碎石基层和 18 cm 二灰底基层。下部地基土层主要为淤泥质亚黏土层、亚砂土和粉砂,局部呈现淤泥质黏土层与粉砂的交互分布。其中淤泥质亚黏土层上覆较薄硬壳层(0.8~3.2 m),呈流塑状,力学性能较差,为道路沿线主要不良土层,其物理力学指标如表 1 所示。

表 1 淤泥质亚黏土物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical indexes of silt clay

层厚	含水率	孔隙比	塑性指数
$h/m$	$w/\%$	$e$	$I_p$
0.8~8.2	35.1~47.0	0.85~1.33	10.3~19.8
液性指数	压缩系数	压缩模量	标贯击数
$I_L/\%$	$a_{1-2}/MPa^{-1}$	$E_{s1-2}/MPa$	$N$
0.99~19.1	0.4~0.94	2.2~4.76	0.9~1.9

## 1.2 试验方案

为了直观揭示路堤软土地基在交通荷载作用下的动力响应,现场通过埋设动孔隙水压力对 3 个典型断面基底软土地基的动力响应进行了监测。其中,断面 A、断面 B 和断面 C 软基上覆路堤结构整体厚度(路面结构+路床+路基填筑+基底碎石层)分别为 2.05、2.45、3.55 m,其相应动孔隙水压力计埋设如图 2 和表 2 所示,主要分布于路堤基底以下 7 m 范围内软土层中。

为了提高测试精度,地基浅层(<4 m)采用

微型动孔隙水压力计,如图 3 所示。试验采用了 DH-3817 动静应变测试系统进行数据采集,测试行驶车辆采用标准配重车(后轴重 100 kN,宽 1.8 m),测试速度分别为 60、80 km/h,以考虑行车速度对软基动力响应的影响。

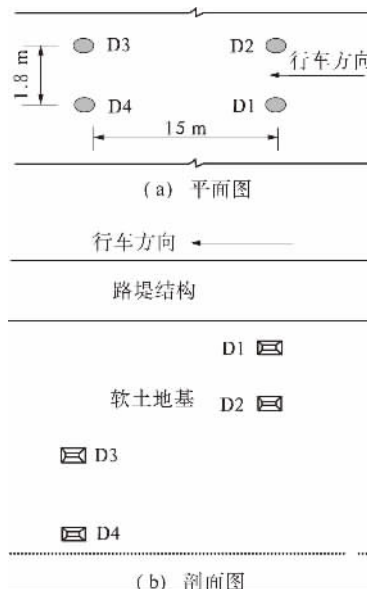


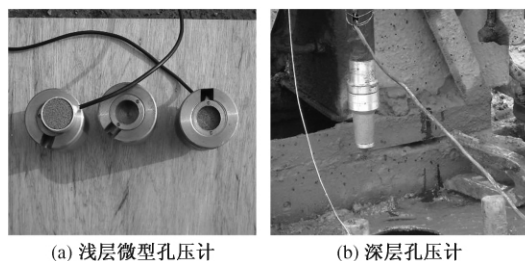
图 2 孔压力计埋设示意图

Fig.2 Burying position of piezometers

表 2 动孔隙水压力计的埋深情况

Tab.2 The depths of piezometers m

编号	断面 A	断面 B	断面 C
D1	3.0	3.0	4.5
D2	5.0	5.0	6.5
D3	7.0	6.5	—
D4	10.0	9.0	—



(a) 浅层微型孔压计 (b) 深层孔压计

图 3 现场动孔隙水压力计

Fig.3 Pictures of piezometers

## 1.3 测试结果分析

行车速度分别为 60 和 80 km/h 时 3 个测试断面的动孔隙水压力滤波时程曲线如图 4 和图 5 所示。其中,断面 A 中 10 m 埋深处的动孔隙水压力计由于导线受施工影响损坏,而无法正常采集数据,其它断面各孔压计测试正常。从测试结果可

以看出,在行车荷载作用下,路堤下卧软土地基浅层处动力响应比较明显,且动孔隙水压力出现双峰值的现象,通过分析认为,这应该是由测试车辆前、后轴逐次通过引起的。

考虑软土地基上部路堤结构整体厚度的影响,从图4和图5可以看出:随着路堤结构整体厚度的增加,动孔隙水压力峰值逐渐减小,且峰值曲

线由较为明显逐渐变得平滑,动孔压的消散速度也逐渐变慢,相对荷载具有一定的滞后性;随着距离路面深度的增加,前轴轴载作用产生的第一峰值逐渐减小,直至与后轴对应的第二峰值共同形成一个平滑峰值曲线,这说明车辆对下卧软土地基产生的动应力随着深度的增加而迅速衰减,且较深处的土体表现出一定的滞后效应。

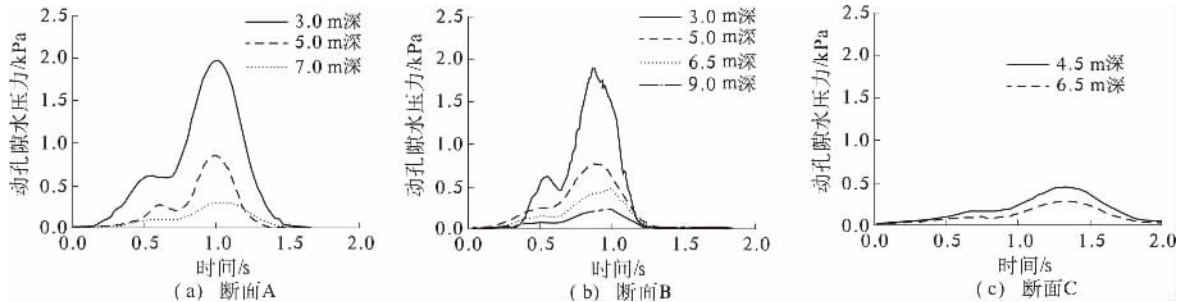


图4 行车速度 60 km/h 时各断面测试结果

Fig. 4 Test results in 60 km/h running speed

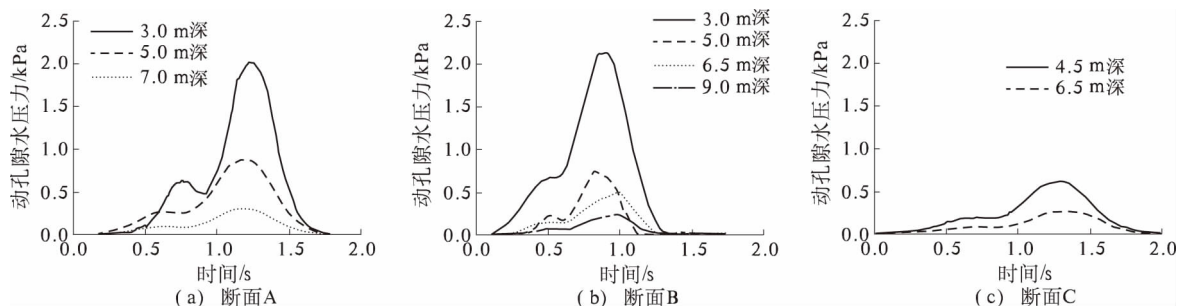


图5 行车速度 80 km/h 时各断面测试结果

Fig. 5 Test results in 80 km/h running speed

考虑不同行车速度的影响,从图4和图5中可以看出:行车速度 60 km/h 时的动孔隙水压力滤波时程曲线与 80 km/h 时的分布特点基本一致,仅动孔压峰值略有降低。这主要是由于路面平整度良好,车速变化对车辆所受动力激励的影响不明显,从而使其施加于路基的动力变化不显著。

## 2 长期附加沉降的计算分析

长期交通循环荷载作用下软土地基的附加沉降是其动力响应的宏观表征,直接影响着道路运营时的舒适度和可靠性。据此,为了进一步揭示长期交通循环荷载对路堤下卧软土地基的动力影响,采用数值分析的方法对地基附加沉降进行计算分析。

以断面B为基础,采用ABAQUS有限元软件建立简化平面计算模型,考虑交通荷载影响,模型

宽度 30 m,深度 15 m;车辆荷载取设计规范中单轴双轮 100 kN,轴长 1.8 m,车速 60 km/h。为更好地反映交通荷载对下卧软土地基的影响,根据上述现场实测结果,采用半正弦波形近似模拟行车荷载作用,即仅考虑行车荷载的时间效应。根据勘察土工试验结果,各结构层计算参数如表3所示。其中,为建模网格划分方便,将沥青混凝土面层、水泥稳定碎石基层和二灰土底基层简化为一层等效弹性材料作为路面结构层。

图6为单次行车荷载作用时路基应力与位移云图,当作用荷载达到最大时,沿深度提取车轴中心对应位置不同深度处的竖向应力如图7所示。综合图6和图7可以看出,交通荷载影响较明显的区域约为 3~5 m。其中,在路面下约 5.25 m 处的竖向应力约为路面顶竖向应力的 5%,且竖向位移的分布亦呈衰减的分布特征。



表 3 各结构层计算参数  
Tab.3 Calculation parameters of each layer

材料类型	厚度/ m	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	回弹模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	阻尼比
路面结构	0.65	2 300	1 270	0.30	—	—	0.9
路基填土	0.80	1 880	50	0.35	88.1	18.4	0.4
碎石层	0.60	2 500	30	0.25	50.0	30.0	0.8
淤泥质亚黏土	3.00	1 810	3.49	0.35	16.0	4.6	0.4
亚砂土	5.00	1 770	3.91	0.35	11.8	19.5	0.4
粉砂	—	1 867	10.92	0.35	4.6	32.0	0.4

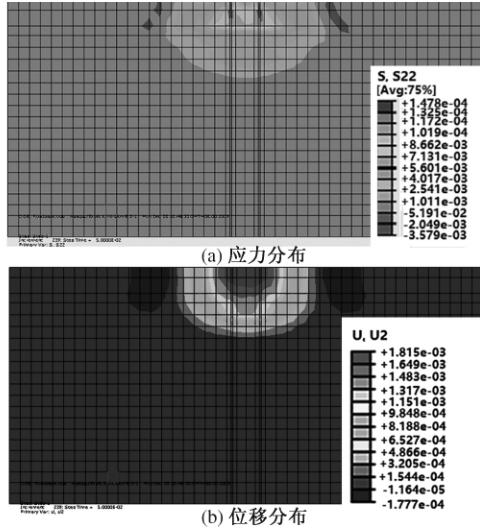


图 6 单次行车作用计算结果  
Fig.6 Calculation results after once traffic load

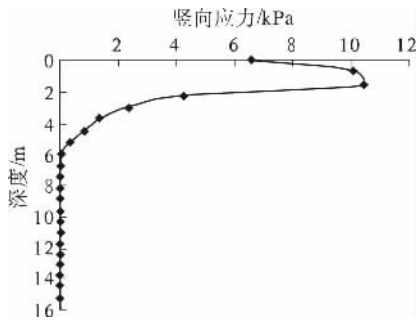


图 7 竖向应力与深度的关系  
Fig.7 Relationship between vertical stress and depth

考虑荷载循环次数对软土地基附加沉降的影响,分别对循环次数为 3 000、300 000、600 000、1 000 000 时的附加沉降变形进行计算,如图 8 所示.从图 8 可以看出,随着循环次数的增加,附加沉降随之增大.交通循环次数不同,沉降量增大的速度不同,即开始阶段累计附加沉降量增大较快,但随着循环作用次数的增加,累计附加沉降量增大幅度趋势逐渐减缓.据此,根据道路设计交通量、车辆组成、交通增长率,结合设计使用年限,通过换算车道累计当量轴次,即可对道路运营期的

附加沉降变形进行估算,从而为工后沉降控制提供依据.

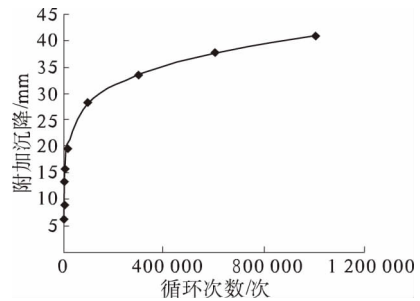


图 8 循环次数与软土地基累积沉降关系  
Fig.8 Relationship between cycle numbers and accumulated settlement

### 3 结论

1) 上部路堤结构对交通荷载动力激励具有一定的消减作用,下卧软土地基动孔隙水压力随路堤结构整体厚度的降低而增大,低填路堤软土地基的交通动力响应不容忽视.

2) 相同路堤结构层工况下,下卧软土地基动孔隙水压力随深度增加呈衰减变化趋势,且动孔隙水压力时程曲线越来越平滑,由双峰曲线逐渐均化为平滑曲线.

3) 长期交通荷载作用下,软土地基附加沉降随行车荷载作用次数的增加呈近似指数型非线性增长.

### 参考文献:

- [1] 赵俊明,刘松玉,石名磊,等. 交通荷载作用下低路堤动力特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007,37(5):921-925.
- [2] 日本道路协会. 道路土工软土地基处理技术指南[M]. 蔡思捷,译. 北京:人民交通出版社,1989.
- [3] TASHIRO M, NODA T, INAGAKI M, et al. Prediction of settlement in natural deposited clay ground with

- risk of large residual settlement due to embankment loading [J]. Soils and foundations, 2011, 51(1): 133 – 149.
- [4] 霍海峰,雷华阳. 静动应力下正常固结黏土循环特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1288 – 1294.
- [5] HSU C C, VUCETIC M. Threshold shear strain for cyclic pore-water pressure in cohesive soils [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2006, 132(10): 1 325 – 1 335.
- [6] JING N, BUDDHIMA I, XUE Y G, et al. Model of soft soils under cyclic loading [J]. International journal of geomechanics, 2015, 15(4): 1 – 10.
- [7] 李兴照,黄茂松. 循环荷载作用下流变性软黏土的界面模型 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 249 – 254.
- [8] 牛力强. 交通荷载作用下港区道路受力特性研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 95 – 99.
- [9] 陈剑,苏跃宏. 交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 44 – 48.
- [10] SUIKER A S J, BORST R D E. A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks [J]. International journal for numerical methods in engineering, 2003, 57(4): 441 – 470.
- [11] 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 – 286.
- [12] FUJIKAWA K, MIURA N, BEPPU I. Field investigation on the settlement of low embankment road due to traffic load and its prediction [J]. Soils and foundations, 1996, 36(4): 147 – 153.
- [13] 崔新壮. 交通荷载作用下黄河三角洲低液限粉土地基累积沉降规律研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 154 – 162.
- [14] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2002, 128(11): 907 – 916.

## Analysis of Dynamic Response of Soft Soil Foundation Beneath Low Embankment under Traffic Load

ZHANG Hao<sup>1</sup>, YANG Ling<sup>2</sup>, GUO Yuancheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Municipal Facilities Maintenance and Construction Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to reveal the dynamic response rules of soft soil foundation beneath low embankment under traffic load, the in-situ tests for the dynamic pore water pressure in soft soil stratum were conducted. The distribution laws of pore water pressure under different embankment thickness and different running speed were analyzed. In addition, the additional settlement of soft soil stratum under long-term traffic load was analyzed by numerical simulation. The results showed that embankment fills could reduce the dynamic effect of traffic load. The dynamic response of underling soft soil foundation increased with the decrease of the embankment thickness, and the dynamic pore water pressure declined with the depth increases. Moreover, the long-term addition settlement of soft soil foundation could be expressed as exponential function of time under traffic load.

**Key words:** low embankment; traffic load; dynamic response; dynamic pore water pressure; soft soil foundation

# 土压平衡盾构土仓排土引起的干砂地层响应特征分析

瞿同明, 王树英, 刘朋飞

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 为阐明土压平衡盾构挤土与排土掘进状态对周围土体的扰动机理, 采用离散元方法建立土仓不排土与排土两组盾构掘进二维数值模型, 比较分析了两种工况下盾构掘进时掌子面及周围地层的细观力学变化特征. 研究表明: 不排土工况下, 盾构对周围土层有明显挤密, 土体竖向位移呈椭圆形、水平位移呈圆形向前方扩散变小; 排土工况下, 刀盘周围土体无明显挤密, 水平位移很小, 竖向位移呈不规则漏斗状向地表延伸变大. 不排土对周围土体应力影响大, 掌子面水平应力分布均匀; 排土工况下盾构前方土体应力与初始地层接近, 土仓的排土, 使掌子面水平应力的分布变化较大.

**关键词:** 无水砂层; 土压平衡盾构; 排土; 地层响应; 离散元

**中图分类号:** U455.4

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.028

## 0 引言

土压平衡盾构掘进必定会对周围地层造成扰动, 产生地层变形. 目前地层变形研究大多假设土仓进排土为均衡的理想状态, 而事实上, 土仓内进排土大多时候都无法控制平衡. 研究盾构土仓进排土状态对周围地层的扰动机理, 既可提升对盾构隧道深层土体扰动机理的认识, 也能提高对深层土体位移场、应力场的预测和控制能力. 盾构掘进引起地层响应的主要研究方法有解析法<sup>[1-2]</sup>、室内模型试验法<sup>[3-4]</sup>、有限元或有限差分法<sup>[5-6]</sup>、离散元方法<sup>[7]</sup>等. 解析法公式推导严格, 但对假设条件过于苛刻. 模型试验得出的结论可靠, 但成本高, 制样复杂. 有限单元法可以盾构隧道施工过程中各个施工参数对地层变形的影响, 是研究盾构施工引起地层响应的常用方法之一, 然而对于砂卵石地层, 土体具有明显的离散特性, 有限单元法将其当作一个连续的弹塑性体, 其本构模型无法准确表达砂卵石土体的离散特性, 更难以描述盾构掘进的动态大变形过程. 离散单元法克服了有限单元法的连续性假定, 深入土体的细观级别. 目前已有一些离散元运用到盾构隧道领域的研究实例, Maynar等<sup>[7]</sup>结合马德里地铁工程, 首次采用

离散元方法对盾构开挖进行模拟, 探讨了盾构推进过程中的推力、扭矩与掌子面稳定问题. Chen等<sup>[8]</sup>利用 PFC3D 研究了盾构隧道掌子面支护压力随掌子面移动变化关系, 研究了掌子面前方土体的破坏区、土体应力、孔隙率随掌子面移动变化规律. Jiang等<sup>[9]</sup>采用 PFC2D 程序研究了渣土改良对于土压平衡盾构的掘进过程中隧道纵向地层变形的影响, 研究了渣土在不同改良程度下盾构掘进时周围土体的变形规律. Jiang等<sup>[10-11]</sup>考虑盾尾空隙条件, 分析了盾构管片周围土体的应力重分布问题, 并研究了不同埋深和土体损失在盾构隧道掘进过程中管片周围土体的压力拱效应. 王俊等<sup>[12]</sup>采用离散元数值模拟与室内模型试验相结合的方法, 研究了砂卵石地层条件下泥水盾构的泥膜形态规律. 江英超等<sup>[13]</sup>采用离散元法对砂卵石地层中盾构隧道滞后沉降的发展形成过程进行模拟, 分析了施工过程中各类因素对地层滞后沉降的影响, 揭示了盾构隧道滞后沉降的原因.

笔者基于离散元法, 从细观角度重点研究了土压平衡盾构施工过程中不排土与排土两种土仓状态对地层的响应, 对比分析了土体深层位移、土体颗粒力链分布状态、掌子面的应力特征.

收稿日期: 2015-09-21; 修订日期: 2015-11-24

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(51208516); 中南大学研究生创新项目(2016zzts414)

通信作者: 王树英(1982—), 男, 安徽黄山人, 中南大学副教授, 博士(后), 主要从事隧道与岩土工程的研究,

E-mail: sywang@csu.edu.cn.

1 盾构隧道颗粒流模型的建立

1.1 初始地层的生成

基于离散元商业软件 PFC2D,首先生成左、右和下 3 面墙体边界,上侧为自由边界,初始地层采用“落雨法”生成,即首先在墙体内生成颗粒,颗粒在重力作用下堆积形成原始地层.由于土体颗粒数目和计算机能力的限制,将实际模型按 20:1 的比例缩小,生成土层 1.7 m × 1.7 m,颗粒数目为 139 414 个,模型参数与文献 [10] 一致,见表 1.

表 1 离散元材料参数

Tab. 1 Material parameters of DEM sample

参数	数值
颗粒粒径 $d/\text{mm}$	3 ~ 6
颗粒密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600
颗粒间摩擦系数 $\mu_1$	0.5
颗粒与墙体间摩擦系数 $\mu_2$	0
颗粒与墙体法向刚度 $k_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.5e8
颗粒与墙体切向刚度 $k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.0e8

原始地层在重力作用下运动直到稳定,模拟自然沉降过程.地层稳定性的判断依据主要为颗粒最终的平均速度、最大速度及特征单元的位移,当平均速度和最大速度值趋近于 0 ( $v < 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ),特征单元的位移达到某一值而基本不再变化时,可认定体系达到稳定<sup>[14]</sup>.地层稳定后对顶面进行削土处理,初始地层应力平衡,位移清零,留下 1.7 m × 1.2 m 土体作为初始地层,最终孔隙率为 0.204.

1.2 盾构模型

采用 PFC 里墙体 (wall) 来模拟盾壳,如图 1 所示,盾构直径  $D$  为 0.3 m,埋深为 0.6 m (2 倍洞径),因研究重点在盾构前方和上方,盾构下方保

留 1 倍洞径,前方保留 4 倍洞径,盾构土仓长 0.09 m,这里不考虑刀盘面板,假定刀盘完全敞开 (即开口率为 100%).盾构的掘进通过赋予墙体一定的速度来实现,在排土区域一定的情况下,盾构掘进速度选定 0.01 m/s.在土仓下部靠近隔板的螺旋输送机位置,设置一定的删土速度以模拟螺旋输送机的排土过程,使用 Fish 语言编制程序,确保删土区域与盾构相对位置保持不变,同时通过控制删土速率来模拟不同的螺旋输送机排土速度,此处平均删土速度约为 0.038 m/s.笔者模拟了螺机不排土与排土两种工况,分析内容包括:

- 1) 地层深层位移变化规律;
- 2) 力链变化;
- 3) 掌子面应力特征.

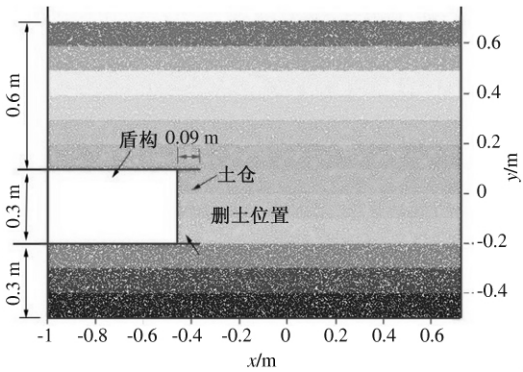


图 1 离散元盾构模型

Fig. 1 DEM model of shield tunnel

2 数值模拟结果分析

2.1 土体深层位移

为研究盾构在两种工况下掘进对周围土体位移的扰动机理,编制程序提取了盾构进尺 0.15 m ( $D/2$ ) 时周围土体的位移,并绘制云图如图 2 ~ 3 所示.

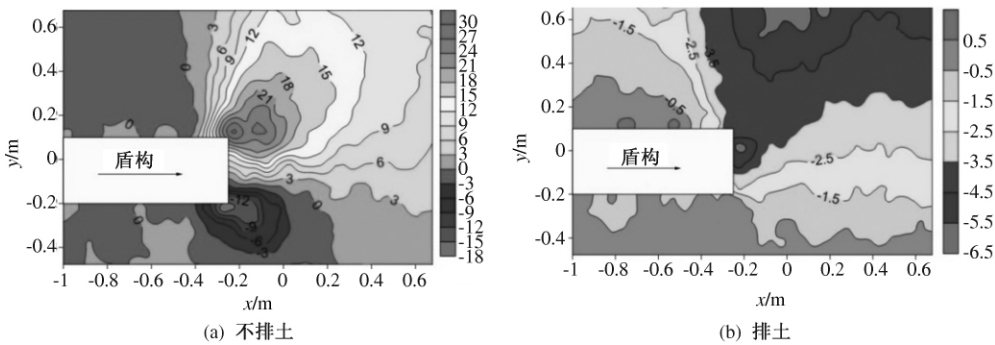
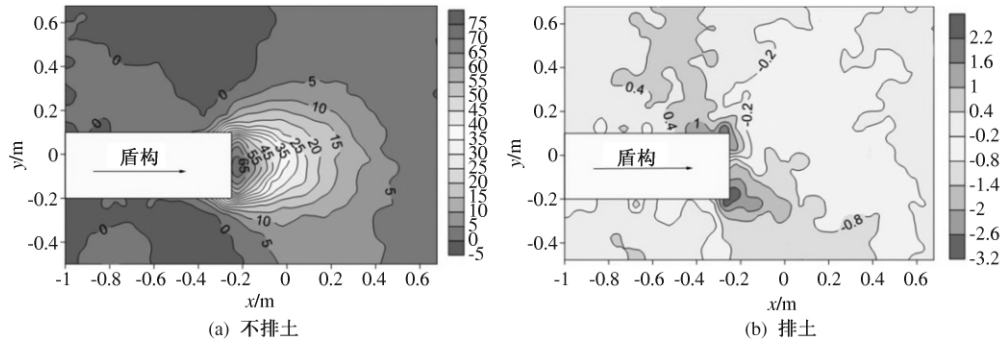


图 2 盾构进尺  $D/2$  时土体竖直位移云图

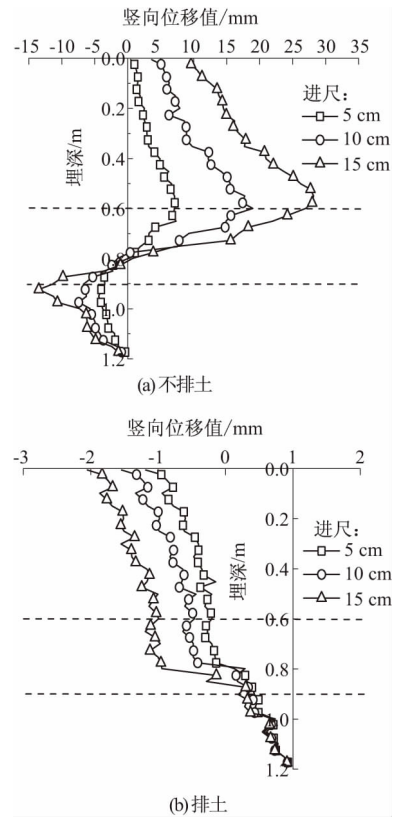
Fig. 2 Contours of vertical ground deformation while shield advances up  $D/2$

图3 盾构进尺  $D/2$  时土体水平位移云图Fig. 3 Contours of horizontal ground deformation while shield advances up  $D/2$ 

如图 2(a), 在不排土工况下, 掌子面前方地表发生不同程度的隆起, 最大隆起区域发生在盾顶到掌子面前方  $D/2$  范围内. 在盾底及以下位置, 土体向下移动, 这主要是由于盾构推进挤压周围土体, 土颗粒被向下挤压所致. 土体竖直位移的扩散不管是向上隆起还是向下沉降均呈椭圆状, 且都是刀盘附近量值大, 距刀盘较远处量值小. 如图 2(b) 所示, 排土工况下, 地表土体均发生沉降, 竖向沉降值等值线呈倾斜不对称漏斗状. 在盾构机身上方, 竖向沉降值较小, 主要由土颗粒自重引起. 在掌子面前方, 沉降值较大, 主要因土体向土仓内移动, 引起盾构前方土体损失所致. 由图 3(a) 可以看出, 在不排土工况下, 刀盘前方明显存在挤土效应, 且挤土范围表现为圆形扩散形态, 掌子面附近水平位移大, 远处水平位移小. 原因是在不排土工况下, 掌子面附近土体所受挤压应力大, 远处所受挤压应力渐渐减小. 如图 3(b) 所示, 在排土工况下, 除刀盘附近土体有一定水平扰动外, 在其他区域土体的水平位移都很小, 这说明土仓排土可有效地控制盾构刀盘前方土体的水平位移.

为分析盾构在掘进过程中两种工况下土体的变形情况, 选定盾构开始掘进前掌子面前方  $1D$  位置作为监测断面, 编制程序提取盾构推进  $5\text{ cm}$  ( $D/6$ )、 $10\text{ cm}$  ( $D/3$ )、 $15\text{ cm}$  ( $D/2$ ) 时此断面的水平和竖向深层位移值并作曲线, 如图 4~5 所示.

由图 4(a) 可以看出, 不排土工况下, 掌子面前方土体隆起最大值发生在盾顶位置(埋深  $0.6\text{ m}$  处), 从盾顶到地表和盾底(埋深  $0.9\text{ m}$ ) 竖向位移逐渐减小, 地表仍向上隆起, 盾底土体变为下沉状态, 盾底为沉降值最大位置. 在盾构下方, 沉降值逐渐变小, 在盾底下方  $1D$  处, 土体几乎无竖向位移. 由图 4(b) 所示, 排土工况下, 由于土仓排土量大于进土量, 引起盾构前方及上方土体损失, 地层会发生沉降. 埋深在  $0 \sim 0.6\text{ m}$  的土体, 沉降量随着距地表深度减小逐渐加大, 即地表沉降量

图4 盾构始发掌子面前方  $1D$  截面竖直位移曲线Fig. 4 Curves of vertical displacements apart away  $1D$  from cutter face launching

大, 土体深部沉降量小, 原因是沉降时上部土体的沉降存在一个叠加效应, 地表沉降为各土层的累积沉降. 而埋深在  $0.9\text{ m}$  以下的土体竖向位移很小, 这是因为在排土工况下, 土体未发生明显挤密.

由图 5(a) 可以看出, 不排土工况下, 监测断面在盾顶之上(埋深  $0 \sim 0.6\text{ m}$ ), 土体发生的水平位移很小; 刀盘前方(埋深  $0.6 \sim 0.9\text{ m}$ ) 土体的水平位移较大; 盾底下方(埋深  $0.9\text{ m}$  以下), 土体水平位移也很小. 分析原因为: 对于开口率较大的盾构, 在挤土的时候, 由于土仓的存在, 会对盾构上部及下部土体水平向的稳定有一个保护作用,



此时土体的水平位移主要发生在盾构刀盘前方.在盾构掘进过程中,土体的水平位移也逐渐增大,挤土效应更加明显.由图 5(b)可以看出,在排土工况下,土体水平方向的位移很小,在刀盘附近,存在一定的扰动,但扰动量值小.在盾构掘进过程中,土体的水平位移几乎不变,这说明盾构土仓排土对刀盘前方土体水平位移控制效果明显.

## 2.2 力链对比

力链是颗粒物质力学概念,指外荷载通过颗粒接触传递力的大小及方向的路径.其中力链的长短代表颗粒间接触力的大小,方向代表接触力

的传递方向,在同一力链图中,力链的长短是相对的.选取初始地层及盾构推进  $D/2$  时土体颗粒的力链分布,如图 6 所示,在不排土与排土情况下,力链的差别很大.不排土工况下,颗粒间接触力在刀盘附近较大,且由刀盘附近向前方、上下方延伸,并逐渐减弱;排土工况下,刀盘附近由于土体进入土仓,会发生接触力的释放,但这个接触力减弱的范围十分有限,在刀盘前方大多数位置,力链的分布与初始地层差别不大,这说明盾构开挖过程中,土仓的排土对刀盘前方土体应力稳定有着至关重要的作用.

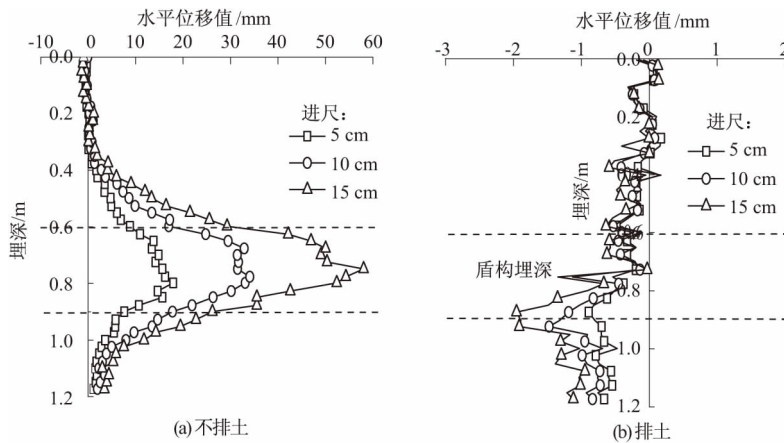


图5 盾构始发掌子面前方  $1D$  截面水平位移曲线

Fig.5 Curves of horizontal displacements apart away  $1D$  from cutter face while shield launching

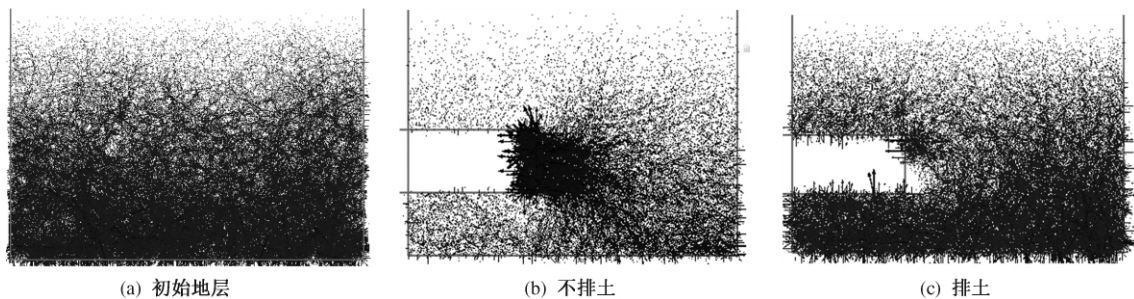


图6 接触力链图

Fig.6 Force chains distribution

## 2.3 掌子面应力分布及平均应力

在盾构掌子面位置设置系列测量圆测量掌子面土体的水平应力,当盾构进尺为  $D/6$ 、 $D/3$ 、 $D/2$  位置时,根据每个测量圆的位置及水平应力值,计算掌子面平均水平应力值,绘制平均水平应力随盾构推进的变化曲线.以掌子面中心为坐标点  $(0,0)$  绘出掌子面土体的水平应力分布曲线.Chen 等<sup>[8]</sup>通过离散元研究了盾构隧道的掌子面支护应力问题,与文献[8]相似,绘制的掌子面土体的水平应力分布曲线如图 7 所示.从图 7 可以看出,在掘进过程中,掌子面的平均水平应力在不

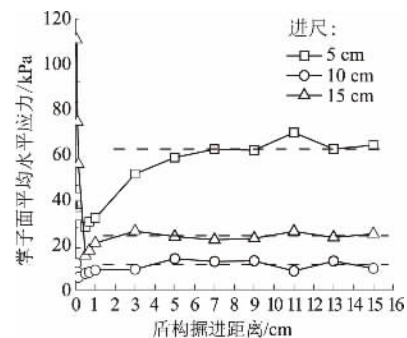


图7 掌子面平均水平应力变化曲线

Fig.7 Changing curve of average horizontal stress at the tunnel face



排土与排土情况下,都经历了一个先迅速降低,到一个最低值后又提升至较稳定水平应力的过程. 不排土工况下,掌子面位置土压力上升明显,掌子面平均应力在盾构推进约 6 cm( $D/5$ ) 位置开始稳定,基本保持在 70 kPa 左右;排土工况下,掌子面平均应力在盾构推进约 5 cm( $D/6$ ) 位置开始稳定,基本维持在 15 kPa 左右.

如图 8 所示,不排土工况下,当盾构掘进分别为  $D/6$ 、 $D/3$ 、 $D/2$  位置时,掌子面平均应力的分布大体相似,掌子面应力值随位置变化的趋势不明显. 在排土工况下,土仓排土使得靠近螺机位置掌子面应力非常小;当远离螺机位置时,掌子面应力逐渐增大,在距离螺机一定距离(约  $D/3$  位置),应力开始保持均匀,这说明实践中将刀盘推力除以刀盘面积得到掌子面平均应力,并把此平均应力当作掌子面应力的方法是值得考量的. 当挤土效应明显时,此方法可行,但在排土情况下,用此方法得到的掌子面应力存在较大误差.

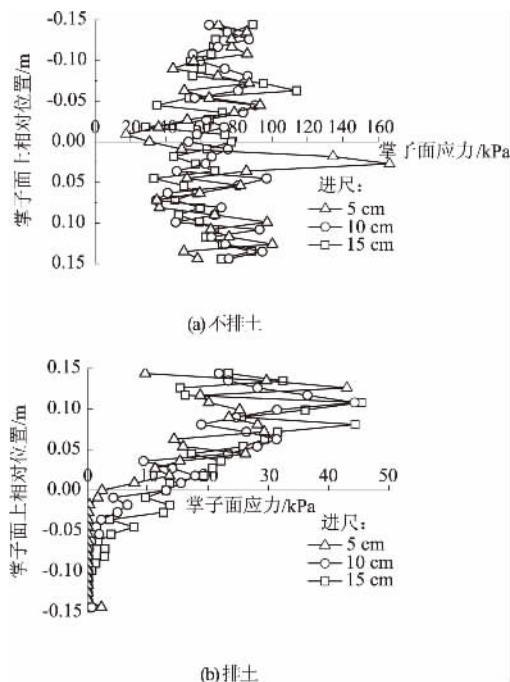


图 8 掌子面上水平应力分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of horizontal stress at the tunnel face

### 3 结论

(1) 在不排土工况下,刀盘对盾构上方、前方和下方均有明显的挤密效应,其中以前方挤密最为严重. 此时竖向和水平位移在刀盘附近达到最大,向地表和刀盘前方逐渐扩散变小;在排土工况下,刀盘周围土体无明显挤密,水平位移很小,竖

向位移在刀盘处较小,向地表延伸逐渐变大,呈现出明显的沉降叠加效应.

(2) 在不排土工况下,刀盘前方因挤土产生的竖向位移呈椭圆形,水平位移呈圆形向距刀盘较远处扩散变小;在排土工况下,整个土层水平位移很小,竖向位移呈不规则漏斗状向地表延伸变大.

(3) 盾构土仓的排土状态对掌子面前方土体的应力影响较大. 在不排土工况下,掌子面前方应力增大明显,在排土工况下,掌子面前方土体应力基本与初始地层一致,这说明地层应力受盾构掘进影响较小.

(4) 在不排土与排土工况下,掌子面平均应力随盾构掘进都经历了一个先降低而后升高至稳定值的过程. 在不排土工况下,土体水平应力在掌子面的分布基本一致;在排土工况下,由于螺机的存在,土体水平应力分布较为不均,螺机附近土压小,盾顶附近土压大. 对于螺机排土情况,实践上以掌子面平均应力来代替整个掌子面应力的方法有待考量.

### 参考文献:

- [1] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 418 - 424.
- [2] 梁荣柱, 夏唐代, 林存刚, 等. 盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 583 - 593.
- [3] LI P, DU S J, MA X F, et al. Centrifuge investigation into the effect of new shield tunneling on an existing underlying large-diameter tunnel [J]. Tunn Undergr Sp Tech, 2014, 32: 59 - 66.
- [4] 徐前卫, 朱合华, 廖少明. 砂土地层盾构法施工的模式试验设计研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 361 - 368.
- [5] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1514 - 1520.
- [6] 姜忻良, 崔奕, 李圆. 天津地铁盾构施工地层变形实测及动态模拟 [J]. 岩石力学, 2005, 26(10): 1612 - 1616.
- [7] MAYNAR M, RODRIGUEZ M. Discrete numerical model for analysis of earth pressure balance tunnel excavation [J]. Geotech Geo Eng, 2005, 131(10): 1234 - 1242.
- [8] CHEN R P, TANG L J, LING D S, et al. Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method [J]. Comput geotech, 2011, 38(2): 187 - 195.

- [9] JIANG M J, YIN Z Y. Influence of soil conditioning on ground deformation during longitudinal tunneling [J]. *Comptes rendus mecanique*, 2014,342: 189 – 197.
- [10] JIANG M J, YIN Z Y. Analysis of stress redistribution in soil and earth pressure on tunnel lining by discrete element method [J]. *Tunn Undergr Sp Tech*, 2012,32: 251 – 259.
- [11] 蒋明镜,王富周,朱合华. 考虑尾隙的盾构隧道土压力离散元数值分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2010,6(1): 29 – 32.
- [12] 王俊,何川,封坤,等. 砂卵石地层中大断面泥水盾构泥膜形态研究 [J]. *现代隧道技术*, 2014,51(6): 108 – 115.
- [13] 江英超,方勇,何川,等. 砂卵石地层盾构施工滞后沉降形成的细观研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2015,11(1): 171 – 177.
- [14] 王明年,魏龙海. 卵石地层中地下铁道施工力学的颗粒离散元法模拟技术及应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010: 33 – 34.

## Characteristic Analysis of Response of Dry Sand Stratum Due to Soil Extracting in EPB Shield Chamber

QU Tongming, WANG Shuying, LIU Pengfei

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** In order to clarify the disturbance mechanism of the soil around the earth pressure balance (EPB) shield affected by the squeezed and exhausted soil situation of tunneling, discrete element method (DEM) was adopted to establish two groups of two-dimensional numerical models of EPB shield tunneling. The comparisons were carried out to analyze the mesomechanical characteristics of soil at the tunnel face and its surrounding strata during the shield tunneling. This research shows that the shield squeezed the surrounding strata obviously when the soil in the chamber was not exhausted. The vertical displacement developed ovally, while the horizontal displacement developed circularly, all of which decreased with an increase in distance along the horizontal direction. When the soil in the chamber was exhausted, the soil ahead of the cutterhead was not densified obviously, the horizontal displacement was low, and the vertical displacement developed to be irregularly funnel-shaped and higher. When the soil in chamber was not exhausted, the influence of shield tunneling on soil stress ahead of the tunnel face was significant, and the distribution of the average horizontal stress at the tunnel face was uniform. However, with the soil being exhausted, the stress of soil ahead of tunnel face was similar to the initial soil condition, and the distribution of the average horizontal stress at the tunnel face varied greatly due to the soil exhausting.

**Key words:** dry sand; earth pressure balance shield; soil exhausting; ground response; discrete element method

## 五层粘接结构的断裂行为模拟研究

张 军, 李志宏, 贾 宏

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 粘接技术已被广泛应用, 断层及开裂失效是粘接结构常见的失效类型. 建立了五层粘接结构模型, 分别是被粘物体、粘接界面和粘接材料. 分别对搭接结构和对接结构的不同断裂形式进行了模拟计算. 结果表明, 粘接界面内聚力强度小于或大于粘接材料强度, 断裂出现在较弱粘接面上; 粘接界面内聚力强度等于粘接材料层强度, 粘接材料层与粘接界面均出现破坏; 搭接结构的断裂方式与对接结构的断裂方式相同. 本研究结果可用于工程实际的粘接强度分析.

**关键词:** 胶黏剂; 粘接界面层; 粘接层; 断裂; 内聚力模型

**中图分类号:** TQ340.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.001

### 0 引言

粘接结构被广泛应用在飞机、汽车、建筑结构、微电子封装等重要领域, 断层及开裂失效是结构型胶黏剂的主要失效形式<sup>[1-2]</sup>. 粘接结构的局部破坏将影响粘接结构整体承载能力, 降低粘接结构的许用强度, 因此, 研究粘接结构由于界面强度和粘接材料层强度不同对其断裂的影响具有重要的理论意义以及实际工程价值.

内聚力模型 (cohesive zone model) 已经被广泛应用于分析粘接结构的断裂过程. 内聚力模型由 Barenblatt 等<sup>[3]</sup> 首先提出, 始于 20 世纪 60 年代. 随后, Needleman 等<sup>[4]</sup> 提出了非线性的多项式和指数形式内聚力模型. Hutchinson 等<sup>[5]</sup> 建立了梯形的界面内聚力模型, 内聚力模型能很好地描述粘接结构断裂的拉力-位移本构关系. Reed 等<sup>[6]</sup> 提出了双线性内聚力模型描述界面的拉力-位移关系, 已被商用有限元软件 ABAQUS 采用, 可利用粘单元对粘接结构进行强度分析. 内聚力模型应用的范围很广泛, 它可以描述金属、陶瓷、聚合物及复合材料的断裂与失效, 粘接结构的界面失效及双材料中界面开裂等<sup>[7]</sup>. 然而, 很少有文献对粘接结构的断裂裂纹的走向及其原因进行深入研究.

笔者对不同粘接结构断裂形式采用用户材料

单元与基于粘接行为的接触界面单元, 建立基于被粘物体、粘接界面和粘接材料的五层粘接结构模型. 为了分析粘接结构断裂与粘接层和界面层强度之间的关系, 界面强度和粘接材料笔者在界面与粘接材料间分别采用 3 种粘接形式, 即界面强度大于粘接材料层强度, 界面强度小于粘接材料层强度, 界面强度等于粘接材料层强度. 对接结构的拉伸及剪切以及搭接结构的拉伸强度进行了数值计算. 通过不同粘接结构和不同的断裂形式的结果分析, 了解不同断裂形式对粘接强度的影响.

### 1 内聚力单元及粘接材料层子程序

#### 1.1 内聚力单元

在有限元商用软件中粘单元提供的内聚力模型张力-位移关系, 如图 1 中所示.

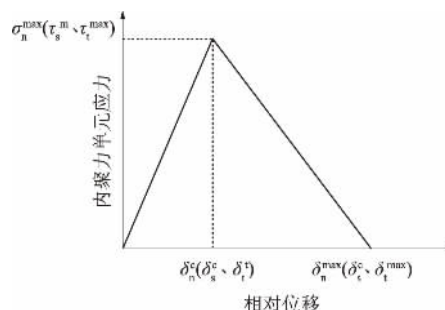


图 1 内聚力模型张力位移法则

Fig. 1 Traction-separation law of the cohesive model

收稿日期: 2016-10-30; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10972200); 河南省国际合作项目 (144300510008)

作者简介: 张军 (1967—), 男, 黑龙江大庆人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事粘接结构力学行为研究, E-mail: zhang\_jun@zzu.edu.cn.

在初始阶段,内聚单元应力随着相对位移的增加而线性增加,当相对法向位移为  $\delta_n^c$  (两个切向位移为  $\delta_s^c$ 、 $\delta_t^c$ ) 时,法向应力(两个切向应力)将分别达到最高点  $\sigma_n^{\max}$  ( $\tau_s^{\max}$ 、 $\tau_t^{\max}$ )。在后阶段,随着开裂位移的扩大,应力线性下降,直至界面开裂。内聚力单元最终失效时法向临界位移为  $\delta_n^{\max}$ ,两个切向临界位移为  $\delta_s^{\max}$  和  $\delta_t^{\max}$ 。内聚力模型的拉伸力-界面张开位移关系的控制方程为:

$$T_n = \begin{cases} \frac{\sigma_n^{\max}}{\delta_n^c} \delta, & (\delta \geq \delta_n^c) \\ \frac{\delta_n^{\max} - \delta}{\delta_n^{\max} - \delta_n^c} \sigma_n^{\max}, & (\delta < \delta_n^c) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_n$  为法向的拉伸力;  $\delta$  为法向张开位移。

粘接单元的损伤变化是基于能量变化,粘接单元失效通过比较断裂能是否达到临界值作为粘接单元达到最终破坏值的判断依据。能量准则:

$$\left( \frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^\alpha + \left( \frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^\alpha + \left( \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} \right)^\alpha = 1. \quad (2)$$

应用内聚力界面接触单元可对粘接界面层赋予粘接断裂行为属性。

## 1.2 粘接材料层的子程序

采用材料子程序对双线性内聚力模型进行程序编辑,由 Abaqus Command 分析步中的命令窗口调用并进行有限元数值分析。子程序中材料属性赋予粘接材料层,断裂裂纹扩展符合给定的子程序内聚力本构关系。子程序中的应力矩阵是  $\text{StressNew}(\ast)$  与  $\text{StressOld}(\ast)$  的更新,状态变量矩阵是  $\text{StateNew}(\ast)$  与  $\text{StateOld}(\ast)$  的更新。其中,前者为应力矩阵与状态变量矩阵的更新量,而后者为上一步计算中得到的应力矩阵与状态矩阵的原始变量。当单元达到更新变量的条件后,该单元将进行不可逆的删除。例如在第  $n$  个增量步中,则有

$$\text{StressOld}(n, i) = \text{StressNew}(n-1, i); \quad (3)$$

$$\text{StateOld}(n, i) = \text{StateNew}(n-1, i). \quad (4)$$

在第  $n$  增量步的计算中,由新的应力矩阵与状态变量矩阵  $\text{StressNew}(n, i)$  和  $\text{StateNew}(n, i)$  得到第  $n+1$  增量,则有

$$\text{StressNew}(n, i) = \text{StressOld}(n+1, i), \quad (5)$$

$$\text{StateNew}(n, i) = \text{StateOld}(n+1, i), \quad (6)$$

子程序通过这个过程更新上下增量的应力及状态变量值。

## 2 拉伸和剪切断裂结果分析

### 2.1 模型建立

粘接界面采用基于粘接行为的界面接触单元,粘接层采用材料子程序单元,被粘物采用弹性材料单元,建立如图 2(a) 所示五层粘接结构的几何模型。界面强度与粘接材料层粘接强度的设置分为 3 种情况,分别对其粘接结构的断裂形式进行分析: ①粘接材料层强度小于界面强度; ②粘接材料层强度大于界面强度; ③粘接层强度等于界面强度。

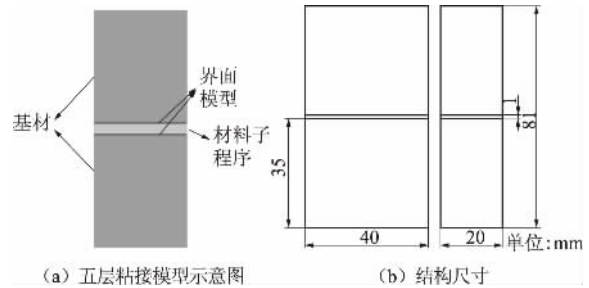


图 2 模型结构

Fig. 2 Model structure

对接结构的尺寸如图 2(b) 所示。上下部分被粘基材为铝,材料的弹性模量为  $E = 7 \times 10^{10}$  Pa,泊松比为 0.3,密度为  $2.5 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。粘接层采用子程序编译的双线性内聚力模型的粘接单元,粘接材料层与基材通过粘接界面单元连接。模拟时主要参数如表 1 所示。其中  $\sigma^{\max}$  为粘接单元的峰值应力,  $\delta^{\text{init}}$  为双线性内聚力模型达到峰值应力时的界面张开位移,  $\delta^{\text{fail}}$  为断裂失效位移,单位均为 mm;  $u, s, t$  分别表示为法向方向与两个切向方向。粘接界面单元参数设置如表 2 所示。其中  $K$  为弹性模量,有限元计算采用动态显式分析方法。分析时采用位移控制,对接结构的加载位置垂直被粘物上下端;粘接材料层采用六面体网格,网格类型为 COH3D8。粘接结构网格总数量为 2 600。

表 1 材料子程序参数设置

Tab. 1 Parameters of material subroutine

$\sigma_u^{\max}$ /MPa	$\delta_u^{\text{init}}$ /mm	$\delta_u^{\text{fail}}$ /mm	$\sigma_s^{\max}$ /MPa	$\delta_s^{\text{init}}$ /mm	$\delta_s^{\text{fail}}$ /mm	$\sigma_t^{\max}$ /MPa	$\delta_t^{\text{init}}$ /mm	$\delta_t^{\text{fail}}$ /mm	$T_0$ /mm
0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	1.0

表 2 界面层参数设置

Tab.2 Parameters of interface layer

不同情况	$K_{uu}$ /MPa	$K_{ss}$ /MPa	$K_{tt}$ /MPa	$\delta_u^{\text{init}}$ /mm	$\delta_s^{\text{init}}$ /mm	$\delta_t^{\text{init}}$ /mm	$\delta^f$ /mm
界面强度小于粘接层强度	2.4	2.4	2.4	0.05	0.05	0.05	0.05
界面强度大于粘接层强度	4.0	4.0	4.0	0.08	0.08	0.08	0.08
界面强度等于粘接层强度	4.0	4.0	4.0	0.05	0.05	0.05	0.05

## 2.2 模拟结果分析

1) 界面强度小于粘接层强度. 界面损伤由裂纹萌生状态来显示, 始值为 0, 当该值达到 1 时, 裂纹并扩展. 在粘接界面强度大于粘接层强度情况下(界面强度为 160 N, 粘接层强度为 200 N), 选取粘接层上 4 个节点的裂纹萌生状态值, 图 3 和图 4 分别表示拉伸和剪切粘接层上不同位置的状态参数与时间的关系. 从图 4 和图 5 中可以发现, 节点 1、23、24、45、116 变化规律近似, 4 个节点的裂纹萌生状态值均未达到 1, 结果显示, 在界

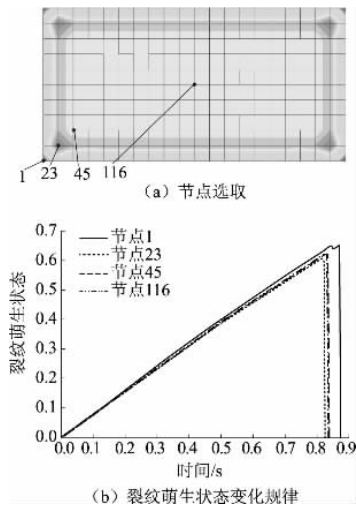


图 3 拉伸加载粘接层模拟结果

Fig.3 Simulated result of cohesive layer

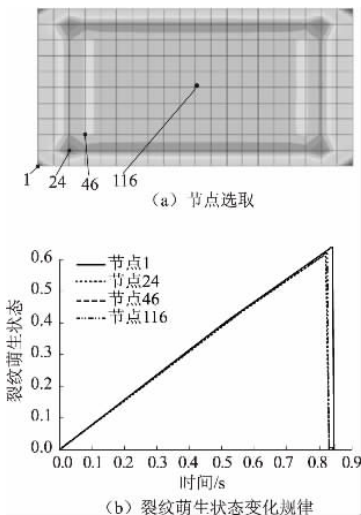


图 4 剪切粘接界面结果分析

Fig.4 The results analysis of cohesive surfaces

面强度大于粘接材料层强度并且在拉伸和剪切情况下, 粘接材料层未达到裂纹萌生, 断裂失效发生在界面层.

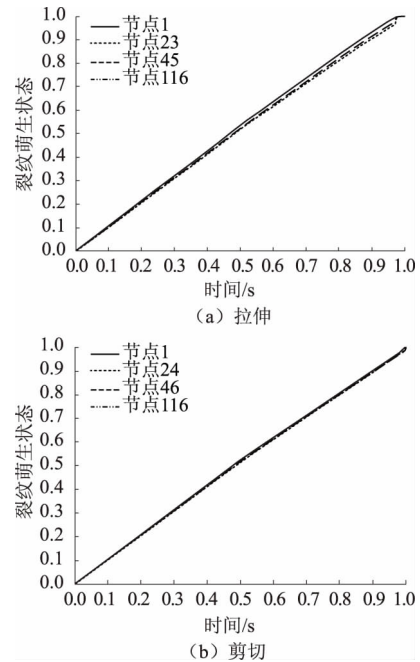


图 5 裂纹萌生状态变化规律

Fig.5 Change rule of crack initiation state

2) 界面强度大于粘接层强度. 在粘接材料层强度小于界面强度情况下(粘接层强度为 160 N, 界面强度为 200 N), 从计算结果获得粘接层节点 1、23、24、45 和 116 的裂纹萌生状态值随时间变化曲线, 节点的裂纹萌生状态值均达到了 1, 如图 5 所示. 结果显示拉伸和剪切断裂时粘接材料层出现损伤, 此结构断裂发生在粘接材料层, 界面层未遭到破坏.

3) 界面强度等于粘接层强度. 界面强度等于粘接层强度情况下(界面强度和粘接层强度都为 160 N), 同样, 拉伸和剪切时, 粘接层上的节点 1、23、24、45 和 116 的裂纹萌生状态值随时间变化曲线, 如图 6 所示. 从图 6 可以发现, 节点 24 与节点 45 的裂纹萌生状态值达到了 1, 说明节点 24 与节点 45 处粘接层单元发生了失效. 节点 1 与节点 116 均小于 1, 表明粘接材料层没有断裂. 结果说明, 粘接层强度与界面强度相等时, 对接结构失效发生在粘接层以及界面层的部分位置.



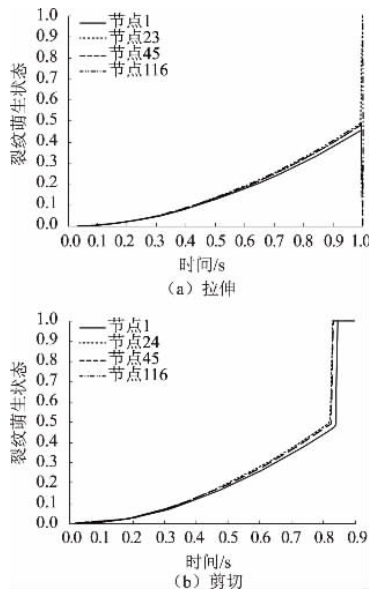


图6 裂纹萌生状态变化规律

Fig. 6 Changing rule of crack initiation state

### 3 搭接结构断裂结果与分析

#### 3.1 几何模型建立

粘接结构的几何模型和几何尺寸,如图7所示.计算时分别采用界面强度大于粘接层强度(界面层强度为36 N,粘接层强度为20 N),界面强度小于粘接层强度(界面层强度为20 N,粘接层强度为36 N)和界面强度等于粘接层强度(界面层强度和粘接层强度都为36 N)3种情况.粘接界面采用基于粘接行为的界面接触单元,粘接层采用 VU-MAT 材料单元,模型上端施加位移控制载荷,下端完全固定,被粘物采用六面体结构化网格,网格类型为 COH3D8,网格数量为2100.

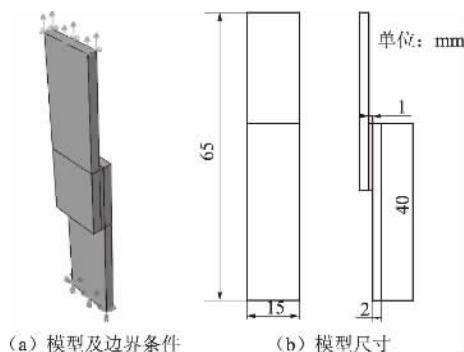


图7 模型建立

Fig. 7 Model building

#### 3.2 模拟结果分析

1) 粘接层强度小于界面强度. 粘接材料层强度小于界面强度时,选取粘接层上3个节点215、241以及306,获得节点裂纹萌生状态值随时间变

化,如图8所示.可以发现,粘接层上的节点215、241以及306的裂纹萌生状态值都达到1,说明断裂出现在粘接层.

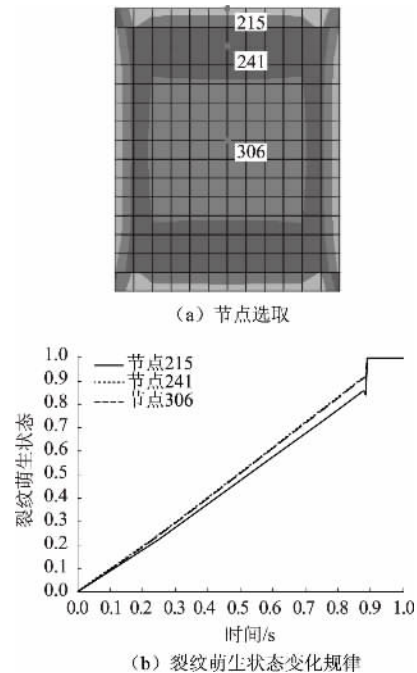


图8 粘接界面结果分析

Fig. 8 Results analysis of cohesive surfaces

2) 界面强度小于粘接层强度. 在界面强度小于粘接层强度情况下,节点215、241以及306的裂纹萌生状态最大分别为0.6813、0.6192以及0.6248,均未达到1,如图9所示.说明此结构的断裂发生在粘接界面层,粘接材料层未受到破坏.

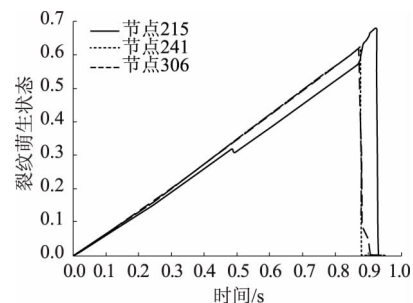


图9 裂纹萌生状态变化规律

Fig. 9 Change rule of crack initiation state

3) 粘接层强度等于界面强度. 界面强度与粘接材料层强度相等,裂纹萌生状态值变化规律,如图10所示.

节点215与节点306的裂纹萌生状态值达到了1,而节点241值未达到1.说明节点241处粘接层单元未达到破坏要求.所以,界面强度与粘接层强度相等时,结构的粘接层以及界面层均发生失效.



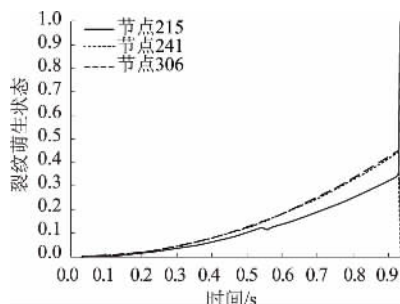


图 10 裂纹萌生状态变化规律

Fig. 10 Change rule of crack initiation state

#### 4 结论

笔者建立了五层粘接结构的几何模型,分别对接结构和搭接结构进行了拉伸以及剪切断裂分析,用来研究材料层的粘接强度与界面层的强度变化对粘接结构的断裂行为的影响.粘接层强度和界面强度变化采用3种粘接情况:界面强度大于粘接层强度;界面强度小于粘接层强度和界面强度等于粘接层强度.结果发现,对于粘接层强度和界面层强度不同的情况,两种结构的断裂都出现在较弱粘接强度层,分别为粘接材料断裂和界面层断裂两种情况.而对于粘接界面强度等于粘接层强度情况,对接结构及搭接结构,粘接材料层与粘接界面均出现了裂纹,表现为混合断裂.此研究结果对粘接结构的断裂和裂纹走向的研究

有一定的意义.

#### 参考文献:

- [1] 郑锐,林建平,吴倩倩,等. 结构胶胶接汽车车身金属接头抗环境腐蚀性能研究进展[J]. 材料工程, 2015, 34(3): 98-105.
- [2] 叶斐,杨世文. 碳纤维复合材料胶接单搭接接头的力学研究[J]. 汽车实用技术, 2015, 33(2): 68-70.
- [3] BARENBLATT G I. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture: general ideas and hypotheses, axially symmetric crack[J]. Applied mathematics and mechanics, 1959, 23: 622-636.
- [4] NEEDLEMAN A. An analysis of decohesion along an imperfect interface[J]. International journal of fracture, 1990, 40: 21-40.
- [5] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids[J]. Journal of mechanics and physics of solids, 1992, 40: 1377-1397.
- [6] REEDY E D, MELLO F J, GUESS TR. Modelling the initiation and growth of delaminations in composite structures[J]. Journal of composite material, 1997, 31: 812-831.
- [7] 刘湘云,陈普会,马维,等. 复合材料-金属毛化接头的失效预测模型[J]. 固体力学学报, 2015, 36(1): 55-62.

### Simulation Investigation on Five Adhesive Layers Fracture Characteristic of Adhesively Bonded Joints

ZHANG Jun, LI Zhihong, JIA Hong

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

**Abstract:** The adhesively bonding technology has been widely used. The delamination and cracking failure is main failure form of adhesive structure. This paper used the VUMAT subroutine and bonding structure models based on the bond behavior of the contact interface to establish the adhesive structure of five layers. The different crack processes of butt joint and lap joint were simulated. The results showed that the adhesive structure failures was consistent with the predicted under the bonding strength of interface less than or greater than the adhesive layer. The fracture occurred on the weak bonding layer. The adhesive layer and the bonding interface occurred failure simultaneously under the bonding strength of interface equal to the adhesive layer. The fracture mechanisms of lap joint are the same with the butt joints. These findings can be useful in practical engineering analysis of the bonding strength.

**Key words:** adhesive; bonding interface; adhesive layer; fracture; cohesive model

## 火源横向位置对隧道火灾烟气分岔流动影响

钟 委<sup>1,2</sup>, 端木维可<sup>1</sup>, 李华琳<sup>1</sup>, 梁天水<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013)

**摘 要:** 当发生隧道火灾时, 纵向通风方式常被用于人员疏散和排烟, 而纵向风速较大时, 烟气将发生分岔流动, 导致烟气层整体性被破坏, 对人员疏散造成威胁. 火源横向位置对隧道火灾烟气流动有显著影响, 通过数值模拟对不同火源横向位置时烟气分岔流动特性进行了研究. 结果表明, 随着火源向侧壁靠近, 烟气由对称型分岔流动转变为不对称分岔流动. 当火灾发生在侧壁附近时, 烟气转变为“S”型流动. 随着火源与侧壁间距的减小, 分岔流动临界风速呈指数型增加.

**关键词:** 隧道火灾; 数值模拟; 分岔流动; 横向位置; 临界风速

**中图分类号:** U458.1

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.023

### 0 引言

随着城市化进程的加快, 各大城市面临着日益严重的交通压力. 为了缓解交通压力, 城市隧道得到快速发展. 隧道是一个狭长受限空间, 一旦发生火灾将给人们的生命及财产带来较大损失. 例如 2003 年韩国大邱地铁隧道火灾造成 198 人死亡<sup>[1]</sup>; 2014 年晋济高速山西晋城段岩后隧道事故, 造成 40 人死亡<sup>[2]</sup>. 统计结果表明, 火灾中超过 85% 的人员伤亡都是由烟气造成的<sup>[3]</sup>. 发生火灾时, 纵向通风技术被广泛应用于人员撤离和隧道排烟<sup>[4]</sup>. 临界风速是纵向通风系统的一个重要参数, 当纵向风速大于临界风速时, 可以保证隧道内不存在烟气逆流, 为人员撤离创造清洁安全的上游环境<sup>[5]</sup>.

但纵向风速并非越大越好. 较大的纵向风速会产生较大的水平惯性力, 对火源下游烟气层稳定性造成影响. Vauquelin 等<sup>[6]</sup>指出当使用纵向风控制烟气逆流时, 应注意保持烟气层稳定性. Richardson 数表示密度分布的稳定作用同因速度剪切引起的失稳作用的比值, 阳东等<sup>[7]</sup>通过小尺寸试验发现, 当 Richardson 数小于 0.3 时, 烟气分层现象将被破坏. 李开源等<sup>[8]</sup>发现, 较大风速下烟气层将无法保持其整体性, 而是形成分岔的烟

气流沿着隧道侧壁流动, 并将此现象定义为烟气分岔流动, 如图 1 所示, 但他并未进一步分析该现象产生的原因. 文献[9]采用数值模拟对分岔现象机理进行了研究, 指出纵向风将加剧烟气与空气之间的掺混, 造成顶棚射流撞击侧壁后反向流动的驱动力减弱, 从而破坏了烟气层的形成过程, 导致了分岔流动现象的产生. 文献[10]和文献[11]发现烟气分岔流动区域上方的隧道竖井无法有效排烟. 因此在隧道防排烟设计中应当避免分岔流动的形成, 或者防止排烟口位于分岔流动区域内.

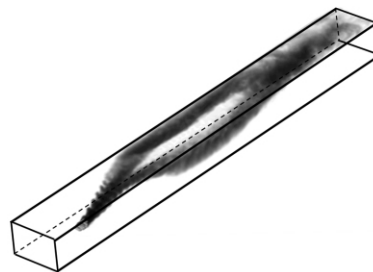


图 1 纵向风作用下烟气分岔流动现象

Fig.1 Phenomenon of smoke bifurcation flow

前人的研究大多假设火灾发生在隧道中部, 但对于实际而言, 隧道火灾的发生位置并不固定. 当这些非隧道中心火灾一旦发生, 火羽流对空气

收稿日期: 2015-12-30; 修订日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404215); 国家博士后基金特别资助项目(2015T80781); 建筑安全与环境国家重点实验室开放课题(BSBE2015-02)

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.

的卷吸过程,以及撞击顶棚后烟气的流动情况均与火灾发生在隧道中心时不同.文献[12]和文献[13]等通过小尺寸试验分别研究了火源横向位置对顶棚下烟气最高温度和抑制烟气逆流临界风速的影响,结果表明,烟气撞击区最高温度与抑制烟气逆流临界风速随火源向侧壁靠近均呈指数型增加.

由于隧道内起火位置的不同对火灾发展有较大影响,笔者利用数值模拟方法,对不同火源横向位置隧道火灾烟气分岔流动流场以及温度分布进行了讨论,并建立了不同火源横向位置分岔流动临界风速预测模型.

## 1 数值模拟

随着计算机能力的显著提高,CFD 模拟在过去数十年得到了快速的发展,并被广泛应用于研究隧道防火安全设计.笔者选用的是 FDS(fire dynamics simulator) 场模拟软件,采用的是 5.5.3 版本. FDS 是由美国国家标准技术局(NIST)开发的一种场模拟软件,由于其准确、方便、费用较省等优点,已得到国际间的广泛认可,并被大量应用于火灾动力学模拟.

模拟所建物理模型长 200 m、宽 10 m、高 5 m,模型图如图 2 所示.纵向风通风口设置在模型左侧开口处,出口位于右侧开口处.火源为长度 1 m 的方形油盘,距纵向风入口水平距离 50 m,燃料为煤油.前期研究结果表明,纵向风速越大,分岔流动现象就越明显.为了研究不同火源横向位置对烟气分岔流动现象的影响,将热释放速率设置为 3 MW,纵向风速设为 4 m/s,对火源中心到侧壁距离  $D$  分别为 0.5、1、2、3、4 和 5 m 时的烟气流动进行分析.另外,对 3 种火源热释放速率(3、4、5 MW) 下不同火源横向位置烟气分岔临界风速进行测量,模拟工况如表 1 所示.环境温度设定为 20 °C,模拟时间为 100 s.

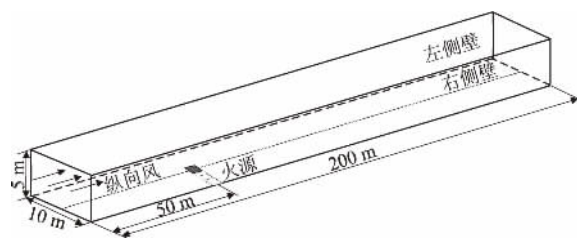


图 2 CFD 模型图

Fig. 2 A schematic diagram of CFD modeling

表 1 数值模拟工况表

Tab. 1 Summary of the CFD tests

模拟 工况	火源热释放 速率/MW	纵向风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	火源中心距左侧壁距离/m									
1	3	4	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0				
	3	—	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
2	4	—	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
	5	—	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

在 FDS 数值模拟中,网格尺寸是一个需要考虑的关键因素.前期工作对网格独立性进行了研究,选取 0.1~0.4 m 之间的 6 个不同网格尺寸对本文场景下隧道中部顶棚纵向温度进行了比较,比较结果如图 3 所示.从图中可以看出,随着网格密度的增大,温度曲线逐渐趋于一致.同时可以发现 0.167、0.125 和 0.100 m 的温度曲线仅有轻微的不同,也就是说,当网格尺寸小于 0.167 m 时,计算精度并没有得到明显的改善,但是要消耗更多的计算时间.因此一个混合网格系统在本文中被使用.如图 4 所示,从火源上游距火源中心 5 m 处至下游距火源中心 35 m 处网格尺寸设置为 0.083 m,其余地方网格尺寸为 0.167 m.

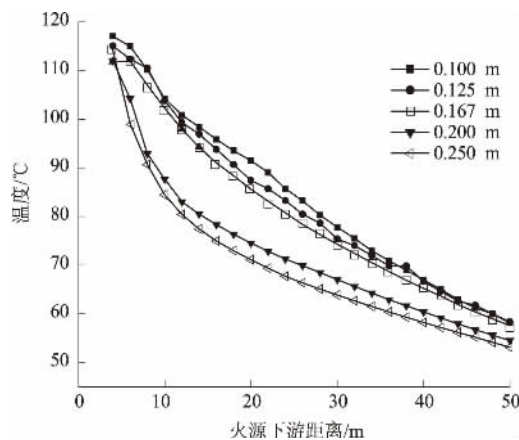


图 3 隧道中部顶棚纵向温度分布

Fig. 3 Longitudinal temperature distribution in the middle of tunnel

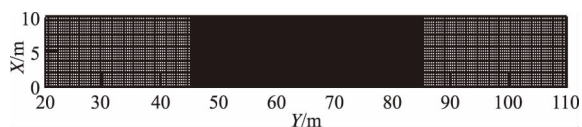


图4 网格划分示意图

Fig. 4 Meshes assigned for numerical simulation

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同火源横向位置分岔流动

#### 2.1.1 烟气分布

图5展示了纵向风速4 m/s下,3 MW火灾不同火源横向位置隧道火灾烟气分布.随着火源远离隧道中部,烟气分岔流动由对称逐渐转变为不对称流动形式.当火源靠近左侧壁时,此时烟气呈“S”型流动,如图5(e)和5(f)所示.当火源紧贴侧壁时,根据“镜像效应”<sup>[14]</sup>,此时烟气流动与火源位于中部时隧道单侧烟气流动现象相似.

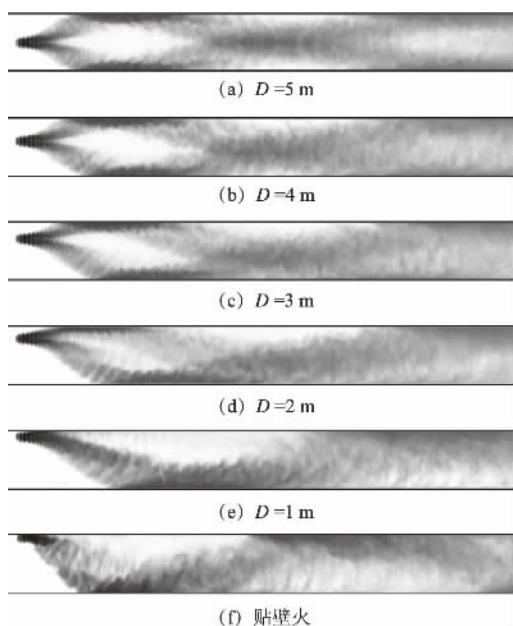


图5 不同火源横向位置烟气流动

Fig. 5 Smoke propagation at different transverse fire location

#### 2.1.2 流场结构

图6给出了不同火源横向位置顶棚下方速度流场结构.随着火源向侧壁靠近,火源与两侧壁间横向距离不再相等,径向蔓延的烟气无法同时在两侧壁处发生反向流动,这造成烟气汇聚区逐渐转向右侧壁.当火源位于左侧壁附近时,如图6(f)和6(e)所示,烟气羽流撞击顶棚后几乎所有烟气均径向流动至右侧,沿侧壁流动并逐渐反向流动至左侧壁.火灾烟气在两侧壁间交替发生反

向流动,导致“S”型的烟气流动现象出现.

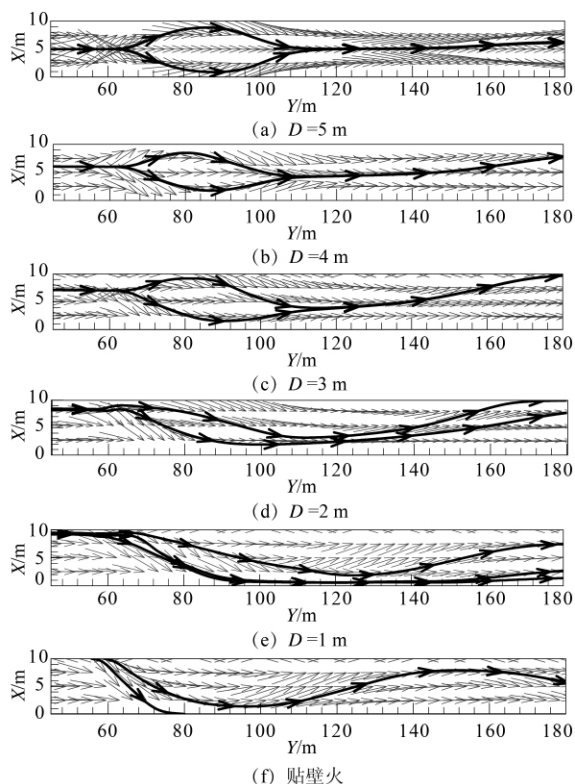


图6 不同火源横向位置的

隧道顶棚下方截面速度矢量图

Fig. 6 Velocity vectors of horizontal cross-section below the ceiling with different transverse fire location

#### 2.1.3 温度分布

4 m/s时3 MW火灾顶棚下方0.167 m烟气温度分布如图7所示.随着火源与侧壁间距离减小,如图7(a)~7(d)所示,烟气分岔流间的低温区发生偏转,烟气汇聚流与近火源一侧侧壁间形成明显低温区.当火源与侧壁距离小于1 m时,如图7(e)和7(f)所示,由于烟气的“S”流动,低温区将在两侧壁处交替出现,且此时低温区的范围要比火源位于隧道中部时大得多.

### 2.2 不同火源横向位置烟气分岔流动临界风速

图8展示了3 MW火灾火源位于隧道中部时,2.0 m/s和2.5 m/s风速下中截面温度分布.前期工作发现隧道火灾烟气分岔流动判据为撞击区上游没有回流烟气存在.火源中心所在横向位置的中截面切片温度分布被用来判断分岔流动是否发生.该场景下,当纵向风速达到2.5 m/s时,与2.0 m/s风速下相比较,此时22℃等温线基本保持竖直,撞击区上游恰好没有右凸的温度线,这表明烟气没有出现在撞击区上游,由此可见该场景分岔流动临界风速为2.5 m/s.



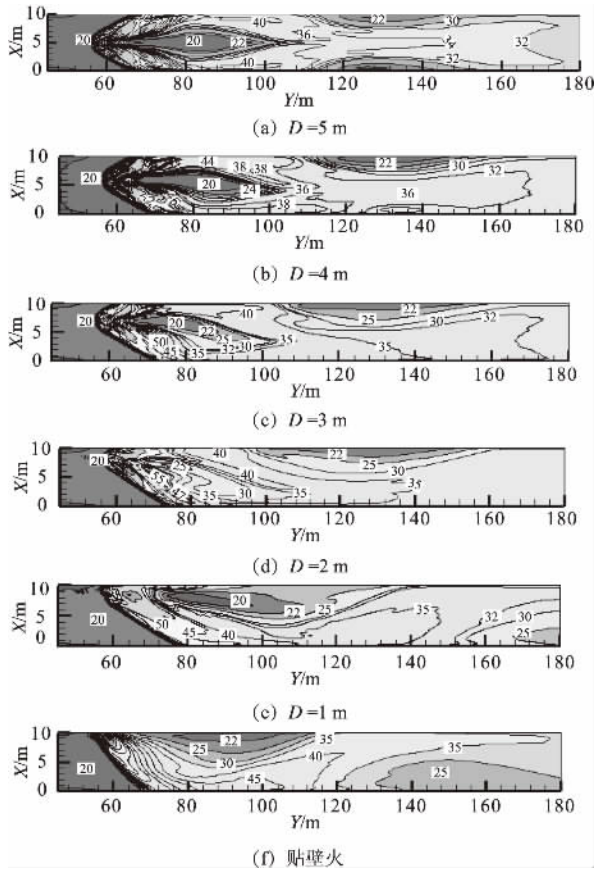


图7 顶棚烟气纵向温度分布

Fig.7 Temperature distribution of horizontal cross-section

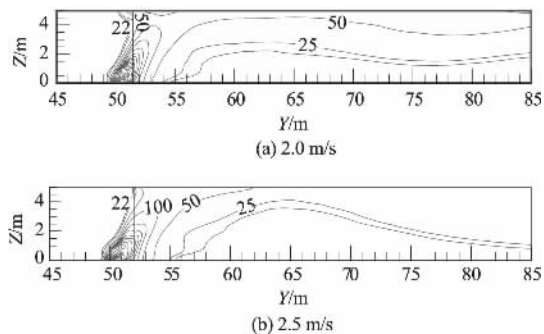


图8 隧道中部纵向截面温度分布

Fig.8 Temperature distribution of the vertical section in the middle of tunnel

为了便于比较不同火源功率的数据,引入无量纲分岔流动临界风速  $v'_{BD}/v'_{BC}$ .  $v'_{BD}$  为不同火源横向位置无量纲分岔流动临界风速;  $v'_{BC}$  为中部火源无量纲分岔流动临界风速. 其中

$$v' = \frac{v}{\sqrt{gH}}, \quad (1)$$

$$\bar{H} = 4S/P, \quad (2)$$

式中:  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\bar{H}$  为水力直径,  $m$ ;  $S$  为隧道横截面面积,  $m^2$ ;  $P$  为隧道横截面周长,  $m$ .

同时引入无量纲火源距离  $D/(w/2)$ , 其中  $D$  代表火源中心距侧壁的距离,  $w$  代表隧道宽度.

烟气分岔流动临界风速随火源横向位置变化规律如图9所示. 从图9可以看出, 当火源距离隧道侧壁较远时, 分岔流动临界风速与火源位于隧道中部时差异不大, 而当火源位于侧壁附近时, 由于受到侧壁限制, 烟气羽流卷吸量减小, 此时羽流撞击顶棚时有更大的温度和速度, 分岔流动临界风速增幅较大. 随着火源与侧壁距离逐渐减小, 无量纲风速的比值与无量纲火源距离满足指数增长规律.

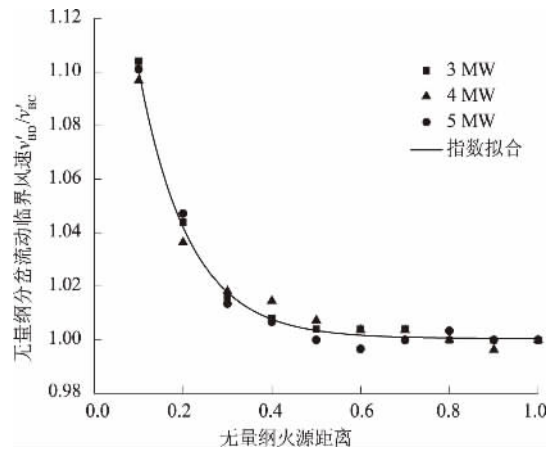


图9 不同火源横向位置分岔流动临界风速

Fig.9 The dimensionless critical velocity of smoke bifurcation flow at different transverse fire locations

相关系数假设符合:

$$\frac{v'_{BD}}{v'_{BC}} = ae^{b \cdot D/(w/2)} + c, \quad (3)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  是常量.

根据实验结果, 公式(3)可表示为:

$$\frac{v'_{BD}}{v'_{BC}} = 0.24087e^{-8.78378 \cdot D/(w/2)} + 1.00052. \quad (4)$$

### 3 结论

笔者通过数值模拟研究了不同火源横向位置对烟气分岔流动现象的影响. 结果表明, 随着火源向侧壁逐渐靠近, 烟气流动由对称分岔流动转变为不对称分岔流动, 当火灾发生在侧壁附近时, 烟气呈“S”型流动.

当火源距离隧道侧壁较远时, 分岔流动临界风速与火源位于隧道中部时差异不大, 而当火源位于侧壁附近时, 临界风速增长的更快. 并且随着火源向侧壁靠近, 分岔流动临界风速呈较好的指数型增加规律.

当隧道火灾发生的位置不同时, 烟气分岔流

动现象也将不同,这将导致隧道内烟气流动,温度分布以及分岔流动临界风速的差异,在隧道排烟设计以及火灾救援的时候应将这种差异考虑在内。

### 参考文献:

- [1] JEON G, HONG W. Characteristic features of the behavior and perception of evacuees from the Daegu subway fire and safety measures in an underground fire [J]. *Journal of Asian architecture and building engineering*, 2009, 8(2): 415–422.
- [2] 邢小崇. 晋济高速“3·1”特别重大责任事故原因调查 [J]. *消防科学与技术*, 2014, 33(8): 969–971.
- [3] JI J, LI M, LI Y, et al. Transport characteristics of thermal plume driven by turbulent mixing in stairwell [J]. *International journal of thermal sciences*, 2015, 89: 264–271.
- [4] BRAHIM K, MOURAD B, AFIF E C, et al. Control of smoke flow in a tunnel [J]. *Journal of applied fluid mechanics*, 2013, 6(1): 49–60.
- [5] VAUQUELIN O, WU Y. Influence of tunnel width on longitudinal smoke control [J]. *Fire safety journal*, 2006, 41(6): 420–426.
- [6] VAUQUELIN O, TELLE D. Definition and experimental evaluation of the smoke “confinement velocity” in tunnel fires [J]. *Fire safety journal*, 2005, 40(4): 320–330.
- [7] YANG D, HU L H, HUO R, et al. Experimental study on buoyant flow stratification induced by a fire in a horizontal channel [J]. *Applied thermal engineering*, 2010, 30(8): 872–878.
- [8] 李开源, 霍然, 刘洋. 隧道火灾纵向通风下羽流触顶区温度变化研究 [J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(3): 38–41.
- [9] ZHONG W, LV J J, LI Z Z, et al. A study of bifurcation flow of fire smoke in tunnel with longitudinal ventilation [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2013, 67: 829–835.
- [10] ZHONG W, FAN C G, JI J, et al. Influence of longitudinal wind on natural ventilation with vertical shaft in a road tunnel fire [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2013, 57(2): 671–678.
- [11] FAN C G, JI J, WANG W, et al. Effects of vertical shaft arrangement on natural ventilation performance during tunnel fires [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2014, 73(6): 158–169.
- [12] JI J, ZHONG W, LI K Y, et al. A simplified calculation method on maximum smoke temperature under the ceiling in subway station fires [J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2011, 26(3): 490–496.
- [13] ZHONG W, LI Z Z, WANG T, et al. Experimental study on the influence of different transverse fire locations on the critical longitudinal ventilation velocity in tunnel fires [J]. *Fire technology*, 2015, 51(5): 1217–1230.
- [14] HU L H, PENG W, HUO R. Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel [J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 150(1): 68–75.

## Numerical Investigation into the Influence of Different Transverse Fire Locations on Smoke Bifurcation Flow in Tunnel Fire

ZHONG Wei<sup>1,2</sup>, DUANMU Weike<sup>1</sup>, LI Hualin<sup>1</sup>, LIANG Tianshui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

**Abstract:** When a fire occurred in tunnel, the longitudinal ventilation was used for personnel evacuation and smoke extraction. The stratification of smoke layer would be destroyed under high ventilation velocity, and would lead to smoke bifurcation flow, which was harmful to evacuation. The numerical simulations were conducted to investigate the influence of transverse fire locations on smoke bifurcation flow. The phenomena of smoke bifurcation flow with different transverse fire locations were studied. The results showed that the bifurcation flow was symmetric when fire located in the central line of tunnel; and a S-shaped flow occurred in a near wall fire situation. The critical velocity of smoke bifurcation flow increased exponentially when fire source moved to the sidewall.

**Key words:** tunnel fire; numerical simulation; bifurcation flow; transverse fire locations; critical velocity



文章编号: 1671-6833(2017)01-0032-04

# 葡萄糖与二价锰离子对磺胺-5-甲氧基嘧啶钠生物降解影响

郭夏丽<sup>1</sup>, 张凡英<sup>1</sup>, 陈红坤<sup>2</sup>, 罗亚婷<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 濮阳市南乐县环保局, 河南 濮阳 457400)

**摘 要:** 通过分批试验研究了葡萄糖与二价锰离子在黄孢原毛平革菌降解磺胺-5-甲氧基嘧啶钠(SMD-Na)中的作用. 结果表明: 未添加葡萄糖时, SMD-Na 的去除率和生物量极低, 当葡萄糖质量浓度在 3~10 g/L 时, 两者随之增加, 同时, SMD-Na 的去除率与锰过氧化物酶活(MnP)和木质素过氧化物酶活(LiP)变化具有正相关性. 当二价锰离子初始浓度为 0.01~0.1 mmol/L 时, SMD-Na 的去除率和 MnP 酶活随着锰离子浓度增加而增大, 锰离子浓度对 LiP 酶活没有显著影响.

**关键词:** 黄孢原毛平革菌; 磺胺-5-甲氧基嘧啶钠; 生物降解; 锰过氧化物酶; 木质素过氧化物酶

**中图分类号:** X703.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.021

## 0 引言

黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*)能产生木素过氧化物酶(Lignin peroxidase, LiP)和锰过氧化物酶(Mn-dependent peroxidase, MnP)<sup>[1]</sup>. Kirk 等<sup>[2]</sup>发现限氮条件有利于 LiP 和 MnP 的产生. LiP 和 MnP 催化反应是高度非特异性和无立体选择性的, 所以黄孢原毛平革菌能有效降解多种难降解有机污染物, 如多氯联苯、多环芳烃等<sup>[3]</sup>.

由于废水中磺胺类药物很难有效去除, 探索其有效去除方法显得尤为重要. 目前黄孢原毛平革菌降解磺胺类药物的相关研究报道较少<sup>[4-5]</sup>, 本研究选择磺胺-5-甲氧基嘧啶钠(SMD-Na)作为目标物, 通过摇瓶试验探究添加不同浓度的葡萄糖和不同浓度的锰离子对 SMD-Na 生物降解的影响, 为磺胺类药物的生物降解技术的建立提供理论依据.

## 1 材料和方法

### 1.1 试剂和菌种

SMD-Na(99%)购自 Sigma 有限公司, 色谱甲醇(99.9%)购自天津四友有限公司, 双蒸水由实验室蒸馏获得, 其它化学试剂为分析纯.

菌体来自实验室 4℃ 保存的黄孢原毛平革菌

种土豆琼脂斜面. 基本培养基<sup>[6]</sup>: 酒石酸铵 0.2 g,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  2 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.75 g,  $\text{CaCl}_2$  0.1 g, 维生素 B<sub>1</sub> 2 mg, 微量元素溶液 20 mL, 吐温 801 g, 蒸馏水 1 L, 20 mmol/L 酒石酸缓冲液调 pH 为 5.0. 微量元素溶液组成:  $\text{MgSO}_4$  3 g,  $\text{MnSO}_4$  0.5 g,  $\text{NaCl}$  1.0 g,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.1 g,  $\text{CoCl}_2$  0.1 g,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.1 g,  $\text{CuSO}_4$  0.1 g,  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  10 mg,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  10 mg,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  10 mg, 蒸馏水 1 L.

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 葡萄糖质量浓度对 SMD-Na 生物降解的影响

在 250 mL 的锥形瓶里装入 50 mL 含 10 mg/L SMD-Na 的基本培养基, 其中葡萄糖的浓度分别为 0、3、5、10 g/L, 121℃ 灭菌 30 min, 然后接种 4% 孢子悬液( $1 \times 10^5$  孢子/mL), 于 30℃ 摇床里培养 10 d, 转速是 150 r/min.

每个处理 3 个重复, 每天测定培养基中 SMD-Na 的残余浓度、LiP 酶活、MnP 酶活、葡萄糖的剩余量、生物量等.

#### 1.2.2 二价锰离子浓度对 SMD-Na 降解的影响

在 250 mL 的锥形瓶里装入 50 mL 含 10 mg/L 的 SMD-Na、不含锰离子的基本培养基, 其中葡萄糖质量浓度为 10 g/L. 锰离子以  $\text{MnSO}_4$  形式添加, 浓度分别为 0、0.01、0.1 和 5 mmol/L. 然后每

收稿日期: 2016-04-25; 修订日期: 2016-06-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-002)

作者简介: 郭夏丽(1966—), 女, 河南新乡人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事环境生物技术与固废资源化等研究,

E-mail: guoxl@zzu.edu.cn.

瓶接入 1.2.1 中同样的孢子悬液,放入 30 ℃ 的摇床中培养 10 d,转速是 150 r/min. 每天测定 SMD-Na 的残余浓度、LiP 酶活、MnP 酶活.

### 1.3 方法

#### 1.3.1 SMD-Na 的测定

培养基中的 SMD-Na 使用高效液相色谱分析,紫外检测器检测. 色谱柱: Agilent 5 TC-C18 250 mm × 4.6 mm; 流动相采用甲醇溶液(甲醇和二次水的体积比为 30:70),用 1% 的乙酸调节 pH 为  $3.4 \pm 0.1$ ; 流速为 1.0 mL/min; 进样量 20  $\mu$ L; 柱温 30 ℃; 测定波长为 278 nm<sup>[7]</sup>. 利用标准曲线法对 SMD-Na 进行分析测定.

#### 1.3.2 酶的测定

粗酶液提取: 培养液过滤后取滤液在转速 12 000 r/min 下离心 20 min,取上清液即为粗酶液,在 4 ℃ 冰箱中保存备用.

LiP<sup>[6]</sup>: 反应混合物(4 mL)含 2 mmol/L 藜芦醇、0.4 mmol/L 过氧化氢和 50 mmol/L 酒石酸-酒石酸钠缓冲溶液(pH 2.5)以及 1 mL 粗酶液,在恒温水浴锅中维持 30 ℃ 条件下反应,用紫外分光光度计检测 310 nm 处 2 min 内吸光度值的变化. 定义每分钟氧化 1  $\mu$ mol 藜芦醇成藜芦醛所需的酶量为 1 个酶活力单位.

MnP<sup>[8]</sup>: 反应混合物(4 mL)含 0.1 mmol/L 硫酸锰、0.1 mmol/L 过氧化氢和 100 mmol/L 酒石酸-酒石酸钠缓冲溶液(pH 5.0)以及 1 mL 粗酶液,在恒温水浴锅中维持 30 ℃ 条件下反应,用紫外分光光度计检测 238 nm 处 10 s 内吸光度值的变化. 定义每分钟氧化 1  $\mu$ mol  $Mn^{2+}$  为  $Mn^{3+}$  所需的酶量为 1 个酶活力单位.

#### 1.3.3 其它测定

菌体生物量: 干重法测定<sup>[9]</sup>; 还原糖: 3,5-二硝基水杨酸法测定<sup>[10]</sup>.

## 2 结果和讨论

### 2.1 不同葡萄糖质量浓度对 SMD-Na 生物降解的影响

在限氮条件下研究不同质量浓度的葡萄糖对 SMD-Na 生物降解的影响,结果如图 1 所示. 在葡萄糖存在下,SMD-Na 的浓度随着时间的延长不断减小,而未添加葡萄糖的对照中 SMD-Na 浓度下降幅度极小,说明黄孢原毛平革菌在葡萄糖存在下可以降解 SMD-Na. 随着葡萄糖初始质量浓度的增大,第 10 d SMD-Na 的剩余浓度分别为 7.21、5.00 和 2.55 mg/L,说明在一定范围内葡萄

糖质量浓度的增加促进了 SMD-Na 的生物降解.

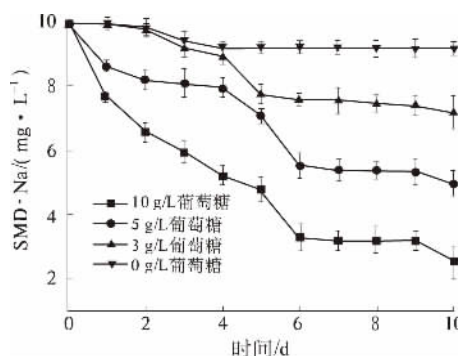


图 1 不同质量浓度葡萄糖对 SMD-Na 降解的影响

Fig.1 Effects of different glucose concentrations on degradation of SMD-Na

图 2 为各物质随时间的变化曲线,从图 2(c) 和图 2(d) 中可以看出,随着培养时间的延长,不同水平的葡萄糖质量浓度在不断下降,黄孢原毛平革菌的生物量在逐渐增加,表明黄孢原毛平革菌以葡萄糖为碳源和能源进行生长. 随着葡萄糖质量浓度的增加,黄孢原毛平革菌生长速率逐渐增加,在第 6 d,各生物量均达到最大,随之生长进入稳定期. 未添加葡萄糖的对照中磺胺-5-甲氧基嘧啶钠的去除率很低,并且黄孢原毛平革菌生物量增加幅度很小,表明黄孢原毛平革菌难以利用磺胺-5-甲氧基嘧啶钠为唯一碳源和能源进行生长代谢. 而当生长基质葡萄糖存在时,黄孢原毛平革菌以共代谢的方式降解了 SMD-Na.

微生物体内某些关键酶是共代谢过程发生的关键因素<sup>[11]</sup>. 从图 2(a) 中可以看出,在不同葡萄糖质量浓度下,MnP 活性变化规律大致相同,即第 4 d 酶活开始出现,之后增大,于第 6 d 达到最大值,随后开始下降; 同样条件下,LiP 活性于培养的第 1 d 便出现,然后保持稳定,第 6 d 后开始缓慢减小(图 2(b)). 随着葡萄糖质量浓度的加大,两种酶活均有增加,SMD-Na 降解率也随之增加,表明两种过氧化物酶均参与了 SMD-Na 的共代谢. 在未加葡萄糖的对照中,两种酶活均未检出,表明菌体生长是该酶系合成的前提条件. 当葡萄糖质量浓度为 10 g/L 时,MnP 在培养的前 3 d 内未检出,而 LiP 活性又很低,但 SMD-Na 去除率在前 3 d 内较高,推测其它酶有可能参与了 SMD-Na 的降解,在前期,本研究通过添加 P450 酶抑制剂 1-氨基苯并三唑证明在黄孢原毛平革菌降解 SMD-Na 中,P450 酶也参与其中(数据未显示). 由此,葡萄糖在菌株对 SMD-Na 降解过程中起到了共代谢的作用.

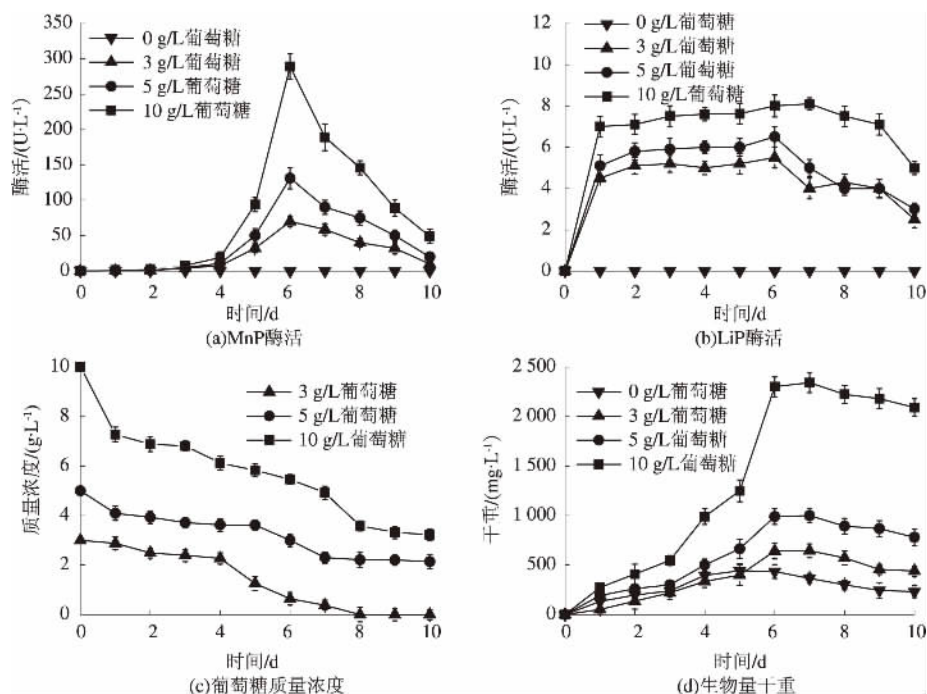


图2 MnP酶活、LiP酶活、葡萄糖剩余浓度及生物量干重随时间的变化曲线

Fig.2 Dynamic curves of the activity of MnP, LiP, residual glucose and dry biomass

## 2.2 不同浓度锰离子对 SMD-Na 生物降解的影响

图3为不同浓度锰离子对SMD-Na降解的影响,从图3中可以看出,当锰离子浓度由0.01 mmol/L增加至0.1 mmol/L时,SMD-Na的降解率由74.5%增加至92%.当锰离子浓度大于0.1 mmol/L时,SMD-Na的降解率变为58%,对照组中SMD-Na的降解率最小.结果表明,一定量的二价锰离子可以促进SMD-Na的生物降解,而较高浓度的锰离子会对微生物产生一定的毒害作用从而抑制SMD-Na的生物降解.

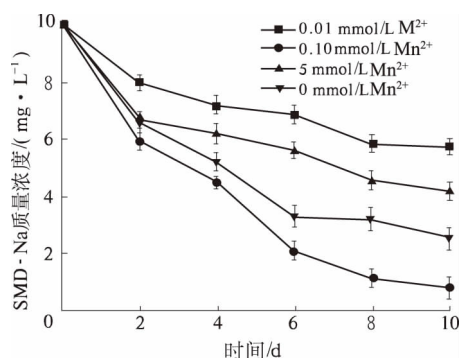


图3 不同浓度锰离子对 SMD-Na 降解的影响

Fig.3 Effects of different Mn( II ) concentrations on degradation of SMD-Na

MnP可以氧化 $Mn^{2+}$ 为 $Mn^{3+}$ ,氧化木质素及/或异生质<sup>[12]</sup>.本研究中含 $Mn^{2+}$ 的对照中,未

检测出MnP,在0.01~0.1 mmol/L浓度范围内,MnP酶活随着 $Mn^{2+}$ 浓度增加而增加,当锰离子浓度继续增加时,MnP酶活却下降,锰离子对MnP和LiP酶活的影响如图4所示.从图4(b)中可以看出,不同锰离子浓度对LiP酶活没有显著影响.依据LiP酶活的大小以及不同 $Mn^{2+}$ 浓度下LiP酶活与SMD-Na降解率变化趋势的对应性,推测LiP在SMD-Na降解中作用较小.

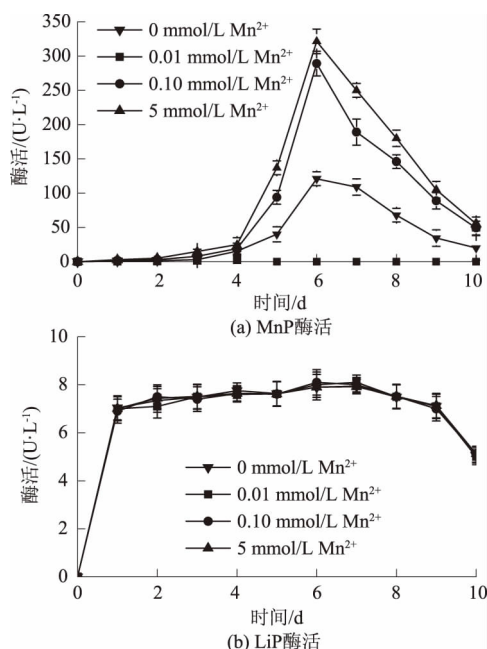


图4 锰离子对 MnP 和 LiP 酶活的影响

Fig.4 Effect of Mn( II ) on the activity of

## MnP and LiP

## 3 结论

(1) 葡萄糖质量浓度的增加提高了 SMD-Na 的生物降解率. MnP 和 LiP 均参与了 SMD-Na 的降解转化,其中 MnP 酶作用大于 LiP 酶.

(2)  $Mn^{2+}$  是 MnP 催化活性所必须的,0.1 mmol/L 的  $Mn^{2+}$  有助于增加 MnP 酶活,从而提高 SMD-Na 降解率. 另外,不同浓度  $Mn^{2+}$  对 LiP 没有显著影响.

## 参考文献:

- [1] ZHAO M H, ZHANG C S, ZENG G M, et al. Growth, metabolism of *phanerochaete chrysosporium* and route of lignin degradation in response to cadmium stress in solid-state fermentation [J]. Chemosphere, 2015, 138: 560–567.
- [2] KIRK T K, CROAN S, MING T. Production of multiple ligninases by *phanerochaete chrysosporium* and use of a mutant strain [J]. Enzyme microbial technology, 1986, 8(1): 27–32.
- [3] WU F, OZAKI H, TERASHIMA Y, et al. Activities of ligninolytic enzymes of the white rot fungus, *phanerochaete chrysosporium* and its recalcitrant substance degradability [J]. Water science and technology, 2015, 34(7/8): 69–78.
- [4] CARACCILO A B, TOPP E, GRENNI P. Pharmaceuticals in the environment: Biodegradation and effects on natural microbial communities [J]. Journal of pharmaceutical and biomedical analysis, 2014, 106: 25–36.
- [5] GUO X L, ZHU Z W, LI H L. Biodegradation of sulfamethoxazole by *phanerochaete chrysosporium* [J]. Journal of molecular liquids, 2014, 198(1): 169–172.
- [6] KIRK T K, MING T, KERSTEN P J, et al. Lignin peroxidase from fungi: *phanerochaete chrysosporium* [J]. Methods in enzymology, 1990, 188: 159–171.
- [7] LI T, SHI Z G, ZHENG M M, et al. Multiresidue determination of sulfonamides in chicken meat by polymer monolith microextraction and capillary zone electrophoresis with field-amplified sample stacking [J]. Journal of chromatography A, 2008, 1205(1/2): 163–170.
- [8] PASZCZYNSKI A, CRAWFORD L R, HUYNH V B. Manganese peroxidase of *phanerochaete chrysosporium*: purification [J]. Methods in enzymology, 1988, 161(1): 264–270.
- [9] 李翠珍,文湘华. 白腐真菌 F2 的生长及产木质素降解酶特性的研究 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 226–231.
- [10] ADNEY B, BAKER J. Measurement of cellulase activities [R]. U. S. [s. n. ], 1996.
- [11] 徐冰洁. 不同碳源条件下功能菌共代谢降解典型 PPCPs 的效能与机理 [D]. 东华大学环境科学与工程学院, 2014.
- [12] 胡明,卢雪梅,高培基. 锰过氧化物酶的结构与功能 [J]. 中国生物工程杂志, 2003, 23(3): 30–34.

## Effects of Glucose and Mn( II ) on Biodegradation of Sulfametoxydiazine Sodium

GUO Xiali<sup>1</sup>, ZHANG Fanying<sup>1</sup>, CHEN Hongkun<sup>2</sup>, LUO Yating<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Nanle County Environmental Protection Bureau, Puyang 457400, China)

**Abstract:** The effects of various concentrations of glucose and Mn( II ) on degradation of sulfametoxydiazine sodium ( SMD-Na ) by *Phanerochaete chrysosporium* were investigated through batch experiments. The results showed that the degradation efficiency of SMD-Na and the fungal biomass were very low without glucose and increased with the rise glucose concentration from 3 g/L to 10 g/L. At the same time, the SMD-Na biodegradation had the positive relevance of manganese peroxidase ( MnP ) and lignin peroxidase ( LiP ). The removal efficiency of SMD-Na and MnP activity increased with the rise Mn( II ) concentration from 0.01 mmol/L to 0.1 mmol/L. However, the Mn( II ) concentration had no significant effect on LiP.

**Key words:** *Phanerochaete chrysosporium*; SMD-Na biodegradation; Mn-dependent peroxidase; lignin peroxidase

# 梭型凹凸板式换热器相变换热的优化研究

王定标, 张喜迎, 韩 勇, 邓 静, 董 桢

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对梭型凹坑凸胞板式换热器的凹坑流道, 采用 ANSYS Workbench 进行了相变换热优化研究. 以综合传热性能因子  $PEC$ 、 $Nu$ 、 $f$  为共同的目标函数, 研究了梭型凹坑半径  $R$ 、梭型凹坑长度  $L$ 、凹坑分布间距  $P$  等结构参数对梭型凹坑凸胞板式换热器相变换热的性能影响. 研究表明: 梭型凹坑处水蒸气的体积分数明显高于平板处的水蒸气体积分数, 说明梭型凹坑凸胞板对相变换热有着很好的强化作用, 并且梭型凹坑流道的换热性能优于相应参数下圆形凹坑的换热性能. 本研究得到的最优结构  $R = 3$  mm、 $L = 5$  mm、 $P = 24$  mm, 此时对应的  $PEC = 2.16$ 、 $Nu = 137.15$ 、 $f = 0.1874$ .

**关键词:** 相变换热; 优化设计; 梭型; 板式换热器

**中图分类号:** TQ051.5; TK172 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.022

## 0 引言

复合相变换热技术<sup>[1-2]</sup>是中低温热源利用的一次突破, 广泛适用于各种燃煤、燃油、燃气锅炉以及冶金、石化等行业. 在复合相变换热技术中, 常用板式换热器作为复合相变换热装置. 板式换热器是由一系列具有一定形状的金属片叠装而成的一种新型高效换热器, 其板片表面形状是影响换热过程能量和动量交换的重要因素<sup>[3]</sup>. 在这方面, 国内外研究人员已对其进行了大量研究, 出现了各种形式的强化换热表面, 如人字形波纹板<sup>[4-5]</sup>、肋片板<sup>[6]</sup>、凹坑凸胞板等<sup>[7]</sup>. 无论表面形状如何变化, 其机理都在于在流体流动的同时增加其扰动性, 同时诱发垂直于主流方向上的二次流以增加其换热. 其中凹坑凸胞板表面多以圆形为主, 有研究表明, 其前侧的换热能力要强于后侧, 在此基础上, 出现一种梭型凹坑凸胞结构<sup>[8]</sup>. 笔者以相变换热应用为背景, 在复合相变换热中, 板式换热器一侧为烟气, 另一侧为水, 通过换热, 将烟气能量有效利用, 以水为介质, 以梭型凹坑流道为对象, 以综合传热性能因子  $PEC$ 、 $Nu$  和  $f$  为目标函数对该流道的相变换热过程进行优化

研究.

## 1 模型建立

### 1.1 几何模型

在复合相变换热中, 将梭形凹凸板式换热器几何模型进行简化, 以梭型凹坑流道为对象, 其三维计算模型和流体流动方向如图 1 所示. 梭形凹坑流道结构参数如图 2 所示, 其长度  $A = 300$  mm, 宽度  $B = 120$  mm, 流道高度  $H = 12$  mm. 梭形凹坑按照正三角形分布, 间距为  $P$ ,  $S = \sqrt{3}P$ , 笔者研究了梭型凹坑结构参数凹坑半径  $R$ 、梭形长度  $L$ 、分布间距  $P$  对流道换热性能的影响.

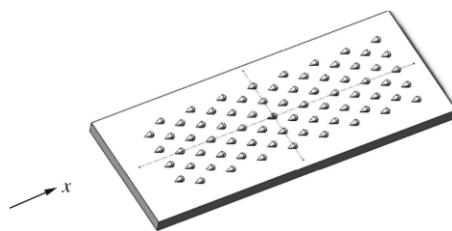


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation model

### 1.2 数学模型

质量、动量及能量守恒定律是一切换热流动必须遵守的三大物理定律, 对于笔者所研究的物

收稿日期: 2016-01-26; 修订日期: 2016-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21576245)

作者简介: 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方面的研究, E-mail: wangdb@zzu.edu.cn.



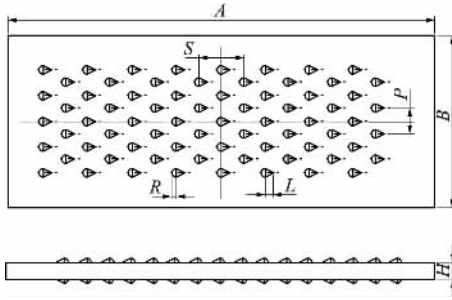


图 2 梭型凹坑流道结构参数

Fig. 2 Schematic view of fluid passageway with dimples

理问题,在流动换热的基础上做出合理假设后,方程可描述为连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = \\ \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = \\ \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = \\ \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z, \end{aligned} \quad (4)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(u U_i)}{\partial x} + \frac{\partial(v U_i)}{\partial y} + \frac{\partial(w U_i)}{\partial z} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + v \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $i$  为  $x, y, z$  方向。

湍流模型采用 RNG  $k-\epsilon$  模型,分别求解连续方程、动量方程和能量方程,方程均采用二阶迎风格式,多相流模型采用 Mixture<sup>[9]</sup>,通过对各物理量的进一步确定,可以使连续方程、动量方程、能量方程更加具体化,将液体水设置为第一相,水蒸气设置为第二相。沸腾换热过程质量与能量传递源项由 UDF 定义,在软件正确编译后,便可利用 UDF 中定义的函数对 Mixture 模型中各个求解方程所对应的质量和能量源项进行设置,以解决实际工程中多相流的问题。

在通常使用中,凸胞流道多布置为烟气流道,将水布置在凹坑流道侧。因此,边界条件定义如下:介质为水,入口为速度入口,入口速度为

0.8 m/s,温度为 358 K;出口为压力出口;两侧壁面为绝热壁面,上下壁面为恒温壁面,温度为 393 K。

### 1.3 优化模型

基于 Design of Explorer 模块的系统响应面方法,以  $PEC, Nu, f$  为目标函数,以  $R, L, P$  为设计变量进行参数优化模拟,设计参数范围如表 1 所示。

表 1 设计变量范围

Tab. 1 Scope of input parameters

项目	$R/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$P/\text{mm}$
初始值	4	8	24
上限值	6	16	30
下限值	2	4	18

对换热器进行评价时,要考虑诸多因素,在保证换热设备可靠的同时,还应该具备良好的传热和流动阻力性能。用到的评价参数有表征换热情况的无量纲数  $Nu$ 、表征压力损失的摩擦因子  $f$  和综合传热性能因子  $PEC$ 。通常情况下,  $Nu$  值越大,其换热性能就越优异;  $f$  值越小,其流动阻力越小,流动性能就越好;  $PEC$  值综合了传热与流阻两方面的影响因素,以此比值是否大于 1 来评价换热器的综合传热性能,若此比值大于 1,说明其综合传热性能优于基准结构,比值越大,其综合传热性能越好<sup>[10]</sup>。有关公式定义为:

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda}, \quad (6)$$

$$f = \frac{2 \Delta p D_h}{L \rho v^2}, \quad (7)$$

$$PEC = (Nu/Nu_0) / (f/f_0)^{1/3}, \quad (8)$$

式中:  $h$  为表面换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $D_h$  为流道的当量直径,  $\text{mm}$ ;  $\lambda$  为流体导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\Delta p$  为长为  $L$  的流道上的压降,  $\text{Pa}$ ;  $v$  为流道截面的平均速度,  $\text{m/s}$ ;  $Nu_0$  为基准结构的努赛尔数;  $f_0$  为基准结构的达西阻力系数。

### 1.4 网格独立性考核与模型准确性验证

为消除网格数量对计算结果的影响,笔者以  $A = 300 \text{ mm}$ 、 $B = 120 \text{ mm}$ 、 $H = 12 \text{ mm}$ 、 $R = 4 \text{ mm}$ 、 $L = 8 \text{ mm}$ 、 $P = 24 \text{ mm}$  的凹坑流道为模型,进行网格独立性考核。入口速度值为 0.07 m/s,其计算结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,随着网格加密,  $Nu$  的变化趋于平缓;当网格数增加到 76 万以后,  $Nu$  变化较小,其最大偏差分别为 0.5% 和 1.2%,说明此时网格密度已经能够满足计算精度要求,对应网格步长为 0.5 mm。



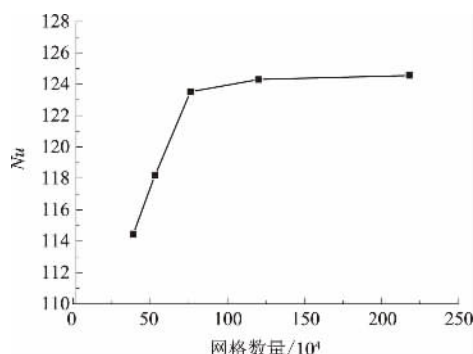


图3 网格独立性考核

Fig. 3 Grid independent analysis

笔者以光滑平板为基准结构,对模型准确性进行验证.对长度  $A = 300$  mm,宽度  $B = 120$  mm,流道高度  $H = 12$  mm 的光滑平板按前述设置进行模拟计算,并与广泛采用的 Gnielinski 经验公式计算结果进行对照,其结果显示,  $Nu$  的最大偏差为 16.4%,偏差值保持在合理范围内,因此,笔者所用方法具有一定的可靠性.

## 2 计算结果及讨论

### 2.1 场态分析

限于篇幅,在此仅列出初始状态(即  $v = 0.09$  m/s,  $R = 4$  mm,  $L = 8$  mm,  $P = 24$  mm)输入参数下其加热壁面上含气率的分布云图,如图4所示.从图4可以看出,在入口段,工质沿流动方向不同截面上的平均含气率增加较为平缓,这是因为加热壁面首先要将处于过冷状态的工质加热到饱和状态,同时也是过冷沸腾过程区别于饱和沸腾过程的特点之一.

图4中颜色较深的区域表明含气率较低,颜色较浅的区域表明含气率较高,可以看到,凹坑处水蒸气体积分数明显高于附近同一水平位置平板处的水蒸气体积分数,这说明该梭型凹坑凸胞结

构对过冷沸腾换热强化作用较为明显.计算结果表明,平板流道在初始流动状态与相应结构参数下,其出口处平均含气率为 0.113,而梭形凹坑凸胞结构出口处的平均含气率为 0.149,比平板结构高出 31.86%;与对应参数结构下的圆形凹坑流道相比<sup>[10]</sup>,要高出 9.6%.

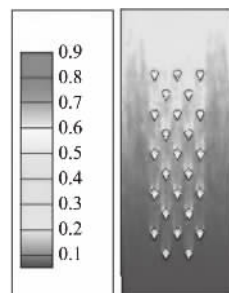


图4 含气率分布云图

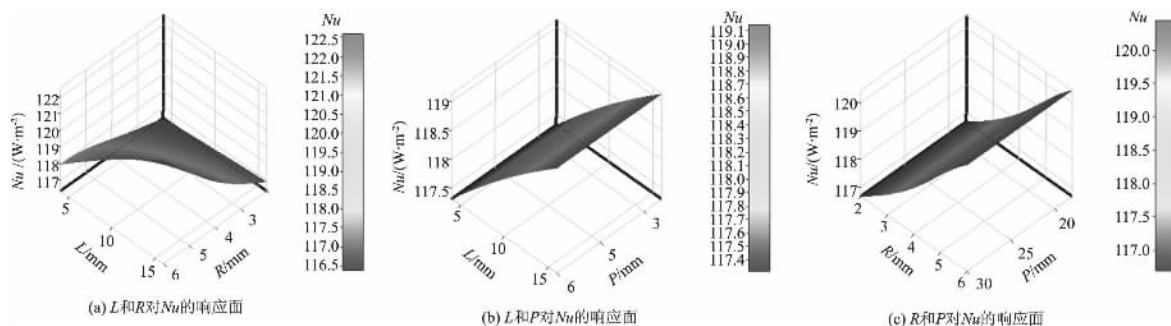
Fig. 4 Volume fraction of water vapor

### 2.2 响应面分析

三维响应面可以全面、直观地反映两个输入参数协同作用时输出参数的变化情况,在本文的优化研究中,根据标准响应面方法生成各输入、输出参数间的响应面情况.由于同一流速下,对应平板的  $Nu_0/f_0^{1/3}$  为一定值,所以  $Nu_0/f_0^{1/3}$  和  $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$  的响应面有相同的变化趋势,因此在响应面中以  $Nu/f^{1/3}$  的响应面分析替代  $PEC$  的响应面分析.当  $v = 0.09$  m/s 时,  $Nu$ 、 $f$  和  $Nu/f^{1/3}$  的响应面情况如图5~7所示.

从图5(a)中可以看出,固定  $P$  值,  $Nu$  随着  $R$  的变化较为明显;在图5(b)中,在  $R$  值固定的情况下,  $Nu$  随着  $L$  的变化较为明显;在图5(c)中,固定  $f$  值,  $Nu$  随着  $R$  的变化较为明显.在相同的  $R$  之下,随着  $P$  的变化  $Nu$  几乎不变,说明  $P$  值对  $Nu$  的影响相比于其他两个参数  $R$  和  $L$  而言要更弱一些.

观察  $f$  的响应面,与上文规律类似,同样显示

图5  $Nu$  的响应面情况Fig. 5 Response surface of  $Nu$

$P$  值对  $f$  的影响相比于其他两个参数  $R$  和  $L$  而言更弱. 从  $Nu/f^{1/3}$  的响应面可以看到, 在  $R = 2.8$  mm 处存在明显高于其他位置的  $Nu/f^{1/3}$  的值, 但  $L$  和  $P$  对  $Nu/f^{1/3}$  的影响并不明显. 将  $PEC$ 、 $Nu$ 、 $f$  进行综合对比分析, 根据  $Nu/f^{1/3}$  的响应面分析,

可将  $R = 3$  mm 作为最佳参数, 而  $L$  和  $P$  可根据具体的响应面分析情况而定. 通过对  $Nu$ 、 $f$  和  $Nu/f^{1/3}$  的响应面情况分析得到的最佳结构参考值是对最佳结构参数的定性分析, 而最终的最优结构参数仍然由系统优化产生.

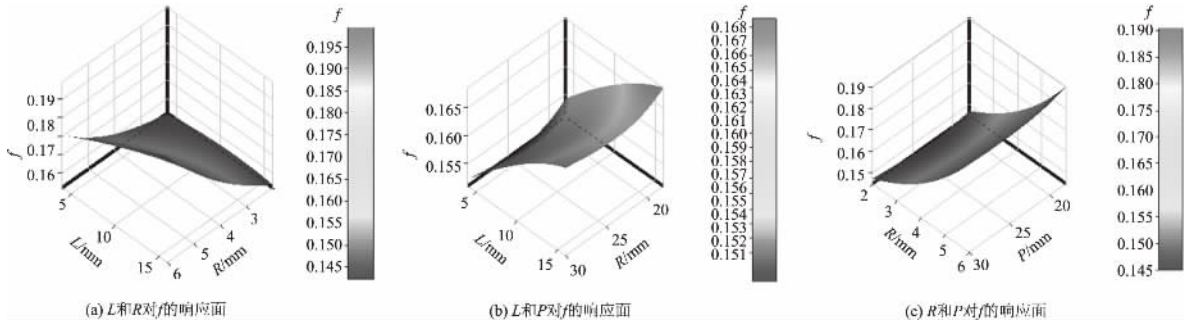


图 6  $f$  的响应面情况

Fig. 6 Response surface of  $f$

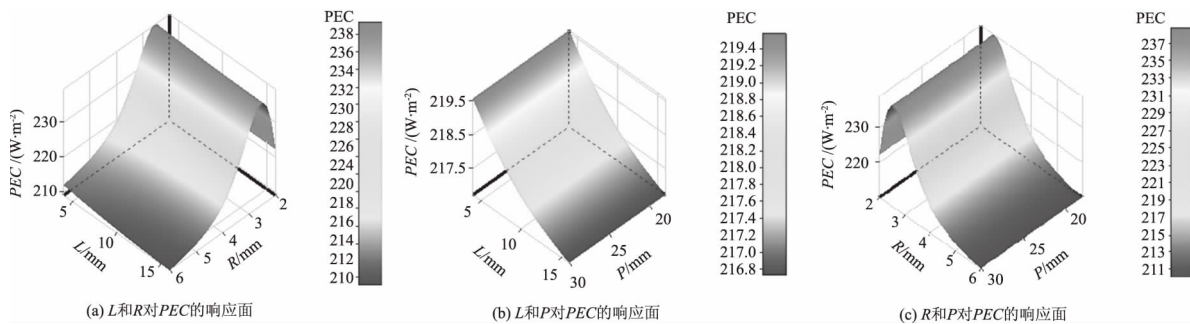


图 7  $Nu/f^{1/3}$  的响应面情况

Fig. 7 Response surface of  $Nu/f^{1/3}$

### 2.3 最优解分析

在优化系统中,  $Nu$  和  $PEC$  的 Objective 设为 Higher,  $f$  的重要程度设为 Lower, 系统会根据响应面生成 1 000 个样本点, 最终基于 MOGA 的优化设计方法从 1 000 个样本点中给出最好的 3 个候选结果.

通过对优化结果的分析表明, 以  $PEC$ 、 $Nu$  和  $f$  作为多目标函数时, 得到的符合目标函数的参数组合, 其  $R$  分布在 2.5 mm 附近区域,  $L$  分布在 4.5 mm 附近,  $P$  在 23 ~ 26 mm 内分布较为密集且在 24 mm 处分布最为密集, 因此根据评价方法以及优化结构的特点, 将优化结果进行圆整, 把  $R = 3$  mm、 $L = 5$  mm、 $P = 24$  mm 作为本工况下的最佳结构, 该结构对应的  $PEC = 2.16$ ,  $Nu = 137.15$ ,  $f = 0.1874$ .

## 3 结论

1) 梭型凹坑处水蒸气的体积分数明显高于平板处的水蒸气体积分数, 并且梭型凹坑流道的

含气率要高于圆形凹坑流道, 优于同结构参数下圆形凹坑的换热性能.

2) 在研究范围内, 综合  $PEC$ 、 $Nu$  和  $f$  的多目标优化, 其最优结构  $R = 3$  mm、 $L = 5$  mm、 $P = 24$  mm, 该结构对应的  $PEC = 2.16$ 、 $Nu = 137.15$ 、 $f = 0.1874$ .

### 参考文献:

- [1] 杨本洛. 复合相变换热器: CN1078033A [P]. 1993 - 11 - 03.
- [2] 王焱. 复合相变换热器技术与装置 [J]. 上海节能, 2008(2): 21 - 22.
- [3] 赵晓文, 苏俊林. 板式换热器的研究现状及进展 [J]. 冶金能源, 2011(1): 53 - 54.
- [4] LEE J, LEE K S. Friction and colburn factor correlations and shape optimization of chevron-type plate heat exchangers [J]. Applied thermal engineering, 2015, 89: 62 - 63.
- [5] 蔡毅, 贾志刚, 周文学, 等. 人字形波纹板式换热器性能数值模拟的研究 [J]. 计算机与应用化学,

- 2009, 26(1): 105 – 108.
- [6] PAZ C, SUAREZ E, CONCEIRO M, et al. Experimental study of soot particle fouling on ribbed plates: applicability of the critical local wall shear stress criterion [J]. *Experimental thermal and fluid science*, 2013, 44: 366 – 368.
- [7] MAHMOOD G I, LIGRANI P M. Heat transfer in a dimpled channel: Combined influences of aspect ratio, temperature ratio, reynolds number, and flow structure [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2002, 45: 2011 – 2020.
- [8] 董永申. 凹凸板式换热器过冷沸腾换热性能研究 [D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2015.
- [9] 王定标, 董永申, 向飒, 等. 凹坑凸胞板式换热器相变换热优化研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35(3): 10 – 13.
- [10] 姜逢章. 蜂窝板传热元件的性能研究 [D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2010.

## Optimization Study on Phase-change Heat Transfer of Plate Heat Exchanger with Fusiform Dimples

WANG Dingbiao, ZHANG Xiying, HAN Yong, DENG Jing, DONG Zhen

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

**Abstract:** ANSYS Workbench is widely used for multiobjective optimization, by which we made an optimization study on phase-change heat transfer of the plate heat exchanger with the fusiform dimples. And the influence of  $R, L, D$  on the thermal-hydraulic performance was explored with  $Nu, f$  and  $PEC$  serving as the objective function. The results showed that the volume fraction of water vapor around the fusiform dimples was significantly higher than the smooth plate which was far away from fusiform dimples. It proved that the plate with the fusiform dimples has a very good strengthening effect on phase-change heat transfer. And that with the corresponding parameter setting the thermal-hydraulic performance of the fusiform dimples was higher than the circular dimples. Within the scope of the study, the optimal structure parameters was  $R = 3 \text{ mm}, L = 5 \text{ mm}, P = 24 \text{ mm}$ , and the objective function was  $PEC = 2.16, Nu = 137.15, f = 0.1874$ .

**Key words:** phase-change heat transfer; optimization design; fusiform dimples; plate heat exchanger

# 一种强化换热流道的传热特性及流体扩散性分析

王永庆<sup>1</sup>, 朱冰<sup>2</sup>, 赵颀<sup>1</sup>, 靳遵龙<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450001; 2. 河南化工职业学院 化工系, 河南 郑州 450042)

**摘要:** 以一种正交波纹流道为研究对象, 应用 CFD 软件 Fluent 对其在低雷诺数下的特性进行了数值研究, 并对数值结果进行了实验验证. 研究表明, 流体在较小的流速下, 获得较好的传热效果. 受流道的影响和流体黏性力的作用, 随流体在流道中几何位置变化, 流线间的相对位置与速度大小分布变化明显, 在截面上形成了比较明显的二次流. 流体受到了较大程度的拉伸与折叠作用, 横截面内具有较大的横向速度分量且变化明显, 流体在不同的几何位置处速度的大小与方向各不相同, 不同位置处的流体质点受到不同的拉伸与折叠强度, 形成复杂三维速度场, 流道内形成较强的对流, 增大了流体间的混合与传热. 所得结论与研究方法可以为低雷诺数下流道内的传热、混合强化机理分析与结构优化提供参考.

**关键词:** 层流; 传热强化; 扩散性; 对流传热

**中图分类号:** TK172 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.002

## 0 引言

换热设备是工业中常用的一种装备, 提高换热设备的传热效率有着重要的意义<sup>[1-2]</sup>. 管道作为众多换热设备的换热流道, 其结构形式、流体流动与传热特性一直受到人们的重视. 管道内的传热强化技术, 常见的有添加管内插入物<sup>[3]</sup>、粗糙表面<sup>[4]</sup>、结构形式的优化<sup>[5]</sup>、复合强化<sup>[6]</sup>等.

随着制造技术以及工艺的发展, 流体在低雷诺数下管道内的强化传热也越来越受到重视. Paitil 等<sup>[7]</sup>研究了层流情况下, 具有螺旋结构的方管内的传热与流动特性; Yong 等<sup>[8]</sup>对含有缩放微槽道内层流情况下的混合与传热特性进行了研究. 在对管道内的强化传热分析过程中, 多为基于得到的流体流动速度场和温度场的分布, 应用边界层理论进行定性分析. 近年来的研究表明: 流体流线或流动面被剧烈的拉伸与折叠、流体对初始位置条件敏感、在某些区域内流体间的拉伸程度成指数增长<sup>[9-10]</sup>, 这种扩散特性是流体对流中可以强化混合与传热的主要原因<sup>[11]</sup>. 对强化流道中的扩散特性进行分析与研究, 对于强化传热机理与新技术的应用具有重要的理论研究意义与工程应

用价值.

笔者以一种具有正交波纹流道的强化换热管为研究对象, 应用 CFD 软件 Fluent 对其在低雷诺数下的流动与传热特性进行数值研究, 并对计算结果进行实验验证. 结合数值计算得到的流体流线、流速以及温度场的分布, 分析流道的强化传热机理; 并采用拉格朗日跟踪技术计算流道中流体物质线的变形情况, 分析流道内流体扩散性对强化传热的影响.

## 1 研究模型与数值计算

以具有正交波纹作为基本单元组成的一种传热流道作为研究对象. 流道基本单元的前半部分中, 上下面为相同的两个波纹面, 左右两个面为平面; 后半部分中, 左右两个面为相同的两个波纹面, 上下两个面为平面, 前后两部分中的波纹为具有相同参数的余弦形式. 结构如图 1 所示. 流体在流道中周期性地重复流过正交波纹单元, 在低雷诺数下可以形成较强的对流, 从而获得更好的传热效果.

参照紧凑式换热器流道的几何参数, 选用波高  $2a$  为 3 mm, 波长  $l$  为 12 mm, 流道截面  $w$ 、 $h$  均

收稿日期: 2016-10-18; 修订日期: 2016-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21676257); 河南省高等学校重点科研项目(17A530006); 中国博士后科学基金资助项目(2014M552011, 2016T90678).

通信作者: 靳遵龙(1973—), 男, 河南淮阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事强化传热方面的研究工作, E-mail: zljn@zzu.edu.cn.

为 5 mm 的流道作为研究对象. 由于结构在流动方向上具有周期性, 在模拟过程中采用周期性模型进行计算. 划分网格时, 靠近壁面时网格适当加密, 确保数值计算能恰当反映靠近壁面的速度与温度梯度. 划分后的网格如图 2 所示.

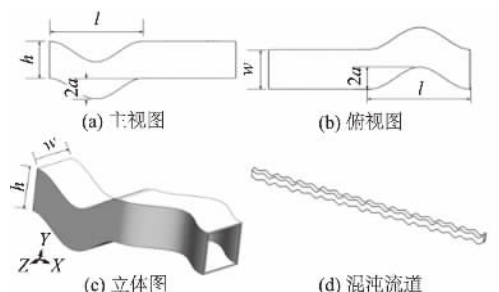


图 1 具有正交波纹的传热单元

Fig. 1 Chaotic structure with orthogonal waves

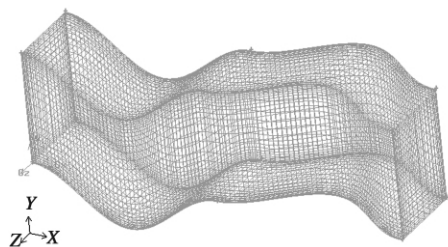


图 2 周期性模型网格

Fig. 2 Mesh for periodic model

对所采用的网格进行加密和对波纹处进行局部加密后, 对计算的传热与压降结果影响小于 1.5%, 确保计算结果是网格独立的解<sup>[12]</sup>. 在对网格进行考核后, 选用离散求解器和层流流动模型, 包含能量方程. 流体介质为水, 在计算过程中为常物性 ( $Pr = 6.99$ ), 管壁温度为 360 K, 这种情况相当于另一侧流体为等温冷凝传热. 流体介质的入口温度为 300 K, 操作条件为标准大气压, 边界条件中壁面为标准无滑移壁面, 流体进出口两个端面为周期性边界条件, 压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法, 动量和能量离散采用二阶迎风格式. 在求解过程中, 当连续性方程、动量方程中的变量残差小于  $10^{-4}$ , 能量方程中的变量残差小于  $10^{-7}$  时认为计算收敛.

为验证数值模拟的准确性, 建立传热实验装置, 本实验采用一套单管传热实验装置. 整套装置由供料系统、数据采集和实物模型 3 部分组成, 实验流程见图 3. 实验装置中饱和蒸汽流经管外, 在传热过程中冷凝放热; 水流经管内, 在传热过程中被加热. 实验测量结果及整理结果与数值计算值进行对比, 所得结果列于表 1. 由对比结果可以看

出, 在不同的流量下, 虽然数值模拟计算结果与实验结果存在一定的偏差, 但其值较小, 误差约在 6% 以内, 说明笔者采用的数值计算方法是正确、可靠的.

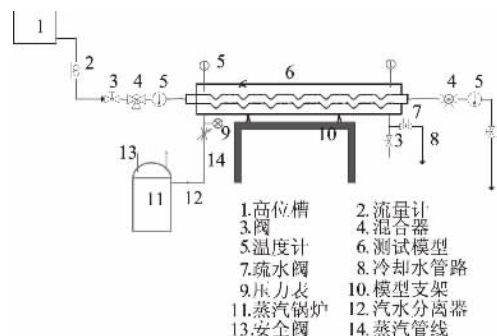


图 3 传热实验测量流程图

Fig. 3 Experimental diagram of heat transfer

表 1 实验测量与数值计算结果

Tab. 1 Heat transfer results of experimental and numerical calculation

当量雷诺数 $Re$	传热系数 $h / (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	实验 $Nu$	模拟计算 $Nu$	误差 / %
225.2	795	13.25	12.85	3.14
341.9	1 133	18.88	17.97	5.07
388.2	1 127	18.80	19.81	-5.15

## 2 流道内流动与传热特性分析

在流道内流体的  $Re$  为 300 时, 正交波纹流道中的  $Nu$  为 16.93, 而在没有波纹的直流道中, 对应的  $Nu$  为 3.61<sup>[13]</sup>, 表明研究的结构具有明显的强化传热作用. 流道中的流线形式如图 4 所示, 受流道的影响和流体黏性力的作用, 波纹的几何形状与流体的黏性力均对流体的流动产生影响, 流体流线随流体在流道中几何位置变化而变化的同时, 流线间的相对位置变化也比较显著.

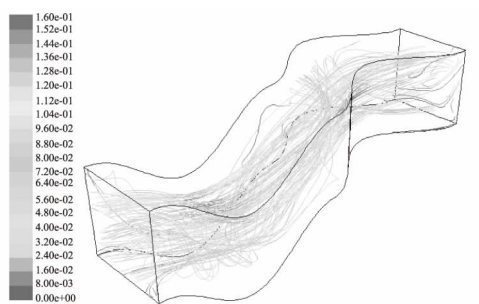


图 4 流道中的流线形式

Fig. 4 Fluid streamlines in the duct

由图 4 中流体流线代表的速度可以看出, 在流道内, 流体在沿流动方向的横截面上的速度分



布随其几何位置的不同发生着明显的变化. 流体流线在随流道几何变化、流线间的相对位置变化也比较显著的同时,其最大速度的分布区域在横截面中的位置也会发生明显的变化.

周期性结构的出口截面上的温度场和流函数分布如图5所示. 流体在截面上形成了比较明显的二次流,且二次流流速相对较大,结构内的传热边界层得到了减薄. 因此,其传热得到了明显的强化. 由流体流动状态与流体温度分布的分析可以看出,流体的速度场与传热之间有着较强的联系.

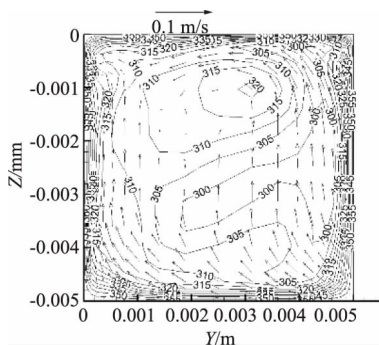


图5 出口截面上的速度矢量与等温线的分布

Fig.5 Temperature contours and velocity vector

流道内产生的对流增加了近壁面的速度梯度,使流体可以从靠近壁面区域流向中间低温主流区域,增大了主流区低温流体与近壁处高温流体的混合,热量可以以对流的方式传递到中间温度较低的区域. 整个流道内流体湍动程度增加,从主流区内流向传热壁面的流体减薄或破坏边界层,这种流动方式大大地增强了传热. 而在普通方形流道内,层流时,流体为分层流动,各流体质点严格地按直线运动,各层之间几乎没有径向速度,且  $Nu$  为一定值. 相较普通流道,在本研究的结构中,流体可以在较小的流速时,获得较好的传热效果.

### 3 流道内流体的扩散性分析

采用拉格朗日跟踪技术<sup>[11]</sup>来描述对流特性,对流道中流体拉伸与折叠形成的扩散性进行分析.

笔者结合 Fluent 软件后处理功能和编程计算的方法,计算流体粒子在流道中的运动轨迹. 为验证计算机程序和所采用方法的正确性和计算精度,分别采用 CFD 后处理软件 TECPLOT 和所编写的计算机程序,对在流动中轨迹具有较大转折的进口面上同一初始点进行计算,所得到的轨迹如图6所示. 图中两种曲线的重合程度表明:编写

的轨迹计算程序可以用来计算流体粒子在流道内的运动轨迹,且具有较高的计算精度.



图6 两种方法所得轨迹比较

Fig.6 Comparison of pathlines created by using two means

流体在混合过程中存在3种运动形式,其中流体的平动会因对流作用而产生大范围的传输现象,流体的纯变形运动则能使流体介质的界面形状发生变化,这两种运动都有利于流体混合的分割与重组. 而流体的旋转运动产生的流体质点自身的旋转运动,则对应着流体的折叠,折叠使得流体能够保持在一个给定的区域内运动,使得流体之间的对流和流体拉伸作用能够持续<sup>[14]</sup>. 在  $Re$  为300时,在10个周期研究结构内,流道入口面上相邻两点在流道中形成的流线如图7所示. 从图7可以看出,流体在进入流道内时,受到较大程度的拉伸与折叠作用.

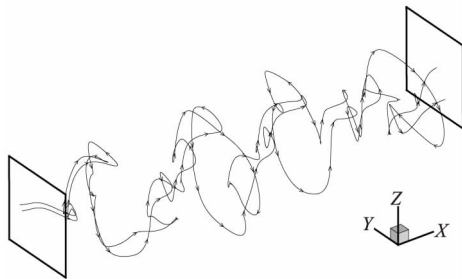


图7 10个周期结构内的两条流体流线

Fig.7 Two streamlines in the channel with 10 periodic units

在周期性单元入口面上,由多个空间固定点组成物质线,通过这些空间点的脉线经过一些几何周期单元后的分布(或映射)来定性分析对流中物质线与物质面的变形情况. 物质线取为流道进口面上的截面中心线. 在计算过程中,物质线采用沿中心线均布的5000个离散点来研究流体物质线的变形情况,所有经过该截面中心线的流体粒子脉线变形情况,均用从这些离散点出发的迹线来模拟. 这种分布的物质线用于分析结构内流体物质线的变形情况. 经过数个周期后的映射如图8所示.

由于流道内边界的几何布置的影响,流体在沿主流方向运动的过程中,在横截面内产生的横

向速度分量较大,从第一个几何单元入口面中心线上出发的所有脉线被迅速分离,在经过多个对流单元的作用后,在横截面上的映射被迅速拉伸,各相邻点间长度增加,然后被折叠在一起.从不同几何周期出口面上的粒子分布可以看出,原中心线上各流体物质点之间的相对速度较大,且在不同的几何位置处速度的大小与方向各不相同,使得相邻位置的流体质点可以被迅速地分离开,从而使得它们之间原本有序、相关的排放位置变得杂乱无章.经过5个周期后,这些空间点的映射几乎均匀地遍布流道的整个横截面.

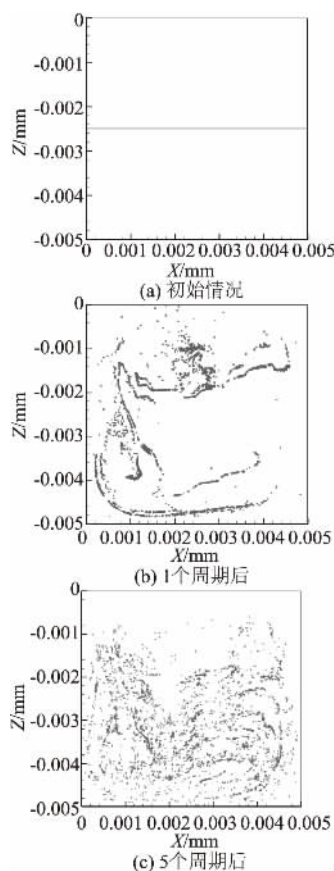


图8 入口面中心线上均布粒子的映射

Fig. 8 Mappings of uniformly distributed particles on the centerline of inlet

由图8可以得出,对流中粒子运动的轨迹和其最终的位置对其初始位置是非常敏感的.这是由于在对流结构内,不同位置处的流体质点受到的拉伸与折叠强度是不同的,对流所形成的复杂三维速度场对流体粒子产生的对流作用亦是非常复杂的.这表明在此流道内,在较低雷诺数下,流体的流动具有较强的对流运动特征.

#### 4 结论

笔者以一种正交波纹流道为研究对象,应用

CFD软件Fluent对其在低雷诺数下流体流动与传热性能进行数值研究,并对数值结果进行了实验验证.

分析表明,受流道的影响和流体黏性力的作用,波纹的几何形状与流体的黏性力均对流体的流动产生影响,流体流线随流体在流道中几何位置变化而变化的同时,流线间的相对位置与速度大小分布变化明显.流体在截面上形成了比较明显的二次流,增大了流体在流道横截面中的速度分量,增大了主流区流体与近壁处流体的混合,整个流道内流体湍动程度增加,这种流动方式大大地增强了传热.流体可以在较小的流速时,获得较好的传热效果.

采用拉格朗日跟踪技术研究粒子迹线,结果表明,流体在进入流道内时,受到了较大程度的拉伸与折叠作用.横截面内具有较大的横向速度分量,各流体物质点间的相对速度较大,且在不同的几何位置处速度的大小与方向各不相同,使得相邻位置的流体质点可以被迅速地分离开,不同位置处的流体质点受到的拉伸与折叠强度是不同的,从而使得它们之间原本有序、相关的排放位置变得杂乱无章,所形成的复杂三维速度场对流体粒子产生较强的对流作用.对流中粒子运动的轨迹和其最终的位置对其初始位置是非常敏感的,在较低雷诺数下,流道内流体流动具有较强的对流运动特征.

#### 参考文献:

- [1] SINHA A, CHATTOPADHYAY H, IYENGAR A K, et al. Enhancement of heat transfer in a fin-tube heat exchanger using rectangular winglet type vortex generators [J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 101: 667 - 681.
- [2] 刘敏珊,许伟峰,王永庆,等. 变角度连续螺旋折流板换热器优化结构的数值研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(5): 39 - 43.
- [3] LIU C P, LIN Z M, WANG L B. Thermal boundary conditions on the cross sections normal to the main flow of a fully developed convection in a tube with tape insert [J]. Numerical heat transfer part A-applications, 2014, 65(12): 1230 - 1253.
- [4] AHARWAL K R, PAWAR C B, CHAUBE A. Heat transfer and fluid flow analysis of artificially roughened ducts having rib and groove roughness [J]. Heat and mass transfer, 2014, 50(6): 835 - 847.
- [5] MILLS Z G, WAREY A, ALEXEEV A. Heat transfer enhancement and thermal-hydraulic performance in

- laminar flows through asymmetric wavy walled channels [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2016, 97: 450 – 460.
- [6] 杨侠, 刘丰良, 熊卉, 等. EHD/脉动流混合强化传热换热器的传热与阻力特性实验研究 [J]. *热能动力工程*, 2014, 29(3): 256 – 261.
- [7] PATIL S V, BABU P V V. Heat transfer and pressure drop studies through a square duct fitted with increasing and decreasing order of twisted tape [J]. *Heat-transfer engineering*, 2014, 35(14/15): 1380 – 1387.
- [8] YONG J Q, TEO C J. Mixing and heat transfer enhancement in microchannels containing converging-diverging passages [J]. *Journal of heat transfer-transactions of the ASME*, 2014, 136(4): 11.
- [9] CASTELAIN C, MOKRANI A, LEGUER Y, et al. Experimental study of chaotic advection regime in a twisted duct flow [J]. *European journal of mechanics-B/fluids*, 2001, 20: 205 – 232.
- [10] LASBET Y, AUVITY B, CASTELAIN C, et al. A chaotic heat-exchanger for pemfc cooling applications [J]. *Journal of power sources*, 2006, 156: 114 – 118.
- [11] LEFÈVRE A, MOTA J P B, RODRIGO A J S, et al. Chaotic advection and heat transfer enhancement in stokes flows [J]. *International journal of heat and fluid flow*, 2003, 24: 310 – 321.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 王林翔. 扭转弯管的混沌混合机理及其可视化研究 [D]: 浙江大学机械工程学院, 1999.
- [14] OTTINO J M. Mixing, chaotic advection and turbulence [J]. *Annual review of fluid mechanics*, 1990, 22: 207 – 253.

## Characteristics of Heat Transfer and Fluid Diffusion in a Heat Transfer Enhanced Duct

WANG Yongqing<sup>1</sup>, ZHU Bing<sup>2</sup>, ZHAO Di<sup>1</sup>, JIN Zunlong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Chemical Engineering, Henan Vocational College of Chemical Technology, Zhengzhou 450042, China)

**Abstract:** The characteristics of a flow duct with orthogonal waves were numerical studied by using CFD code Fluent with a lower Reynolds number. The numerical simulations were verified by experimental results. The result indicated that heat transfer was enhanced in the duct with a lower fluid velocity. With the impact of duct geometry and fluid vicious force, the relative positions between streamlines and distribution of fluid velocity varied greatly with the fluid locations. Second flow came into being on cross sections along the duct. Fluid continually received strong function of stretching and folding, bearing varied bigger transverse velocity component. The magnitude and direction of fluid changed with the locations, and the intensity of stretching and folding changed as well. A complex 3D flow field was formed in the duct, which enhanced fluid mixing and heat transfer. The results and method could provide references for mechanism analysis and structure development.

**Key words:** laminar; heat transfer enhancement; diffusion character; convective heat transfer

## 350 MW 超临界机组膜式水冷壁壁温计算

王为术, 崔 强, 郑梦星, 陈 刚

(华北水利水电大学 热能工程研究中心, 河南 郑州 450011)

**摘 要:** 针对 350 MW 超临界锅炉半周受热膜式水冷壁的温度特性, 编制螺旋管圈膜式水冷壁壁温计算程序, 利用程序计算分析在不同负荷下螺旋管圈的温度分布特性. 研究表明: 炉膛热负荷分布不均匀导致水冷壁吸热不均匀, 水冷壁向火侧壁温及鳍片温度均有小幅度波动, 同时受热面向火侧呈中间高两侧低的分布趋势, 随着炉膛高度增加, 水冷壁管壁温度升高且有一定的波动, 在 75% BMCR 负荷下向火侧鳍端温度达到最高, 最低温度出现在水冷壁下母线内壁处.

**关键词:** 超临界锅炉; 膜式水冷壁; 壁温分布; 温度场

**中图分类号:** TK223.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.026

### 0 引言

超临界发电作为成熟的发电技术, 具有可靠、高效、清洁等性能<sup>[1]</sup>, 其中水冷壁温度一直是锅炉安全运行的重要限制. 大量试验研究表明, 高负荷区水冷壁过热是导致水冷壁横向裂纹失效的关键因素<sup>[2-3]</sup>, 水冷壁周向温差及其变化将产生波动较大的轴向应力, 且管内压力变化和水冷壁管内产生横向裂纹不可避免<sup>[4]</sup>. 超临界锅炉有垂直管圈和螺旋管圈两种水冷壁形式, 研究人员对于垂直管圈水冷壁温度场计算已开展了大量研究<sup>[5-7]</sup>. 在大容量直流锅炉中, 螺旋管圈式水冷壁结构也得到普遍应用, 但由于螺旋管圈水冷壁结构复杂, 研究难度大, 相关研究较少<sup>[8]</sup>.

笔者针对 350 MW 超临界机组螺旋管圈膜式水冷壁温度特性开展数值研究, 研究结果可以为锅炉设计及安全运行提供参考.

### 1 锅炉及水冷壁系统简介

图 1 为大唐林州电厂 350 MW 超临界锅炉水冷壁系统简图. 该锅炉为超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉, 单炉膛  $\pi$  型露天布置, 固态排渣, 采用四角切圆燃烧一次中间再热. 锅炉采用定-滑-定的变压运行方式, 其运行曲线如图 2 所示. 锅炉主要参数见表 1.

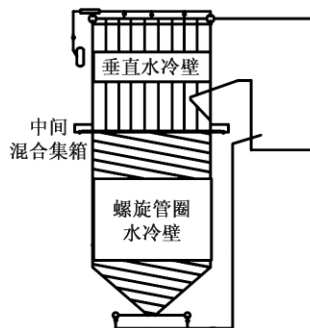


图 1 锅炉水冷壁系统简图

Fig. 1 Arrangement diagram of boiler water wall

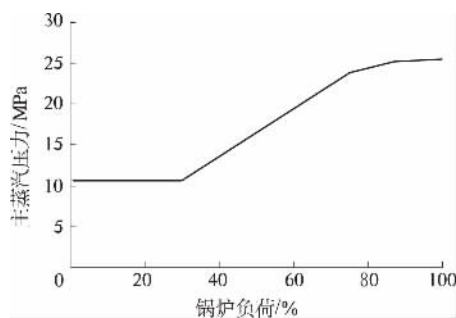


图 2 锅炉压力负荷曲线

Fig. 2 Boiler pressure under different loads

锅炉炉膛宽度 13.608 m, 炉膛深度 12.798 m, 其中锅炉水冷壁分为两部分, 下部炉膛由冷灰斗及下部螺旋管组成, 中间经过标高 41.089 m 处混

收稿日期: 2016-06-18; 修订日期: 2016-07-10

基金项目: 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(16IRTSTHN017)

通信作者: 王为术(1972—), 男, 重庆开县人, 华北水利水电大学教授, 博士, 主要从事多相流动和传热方面的研究,  
E-mail: wangweishu@ncwu.edu.cn.

合集箱过渡到垂直管屏。从炉膛冷灰斗进口到中间混合集箱为螺旋管圈水冷壁,管子规格为  $\phi 32 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ ,节距为  $48 \text{ mm}$ ,倾角为  $17.235^\circ$ ,材质为  $15\text{CrMoG}$ ,共 326 根,从锅炉下炉膛开始,依次经过前墙、右墙、后墙和左墙进行编号,第 154 号和 192 号螺旋管分别位于锅炉右墙和后墙。其膜式水冷壁截面示意图如图 3 所示。表 1 列出了该锅炉螺旋管圈在不同负荷下设计的工况参数。表 1 中 BMCR 为锅炉最大连续蒸发量,BRL 为锅炉额定负荷。

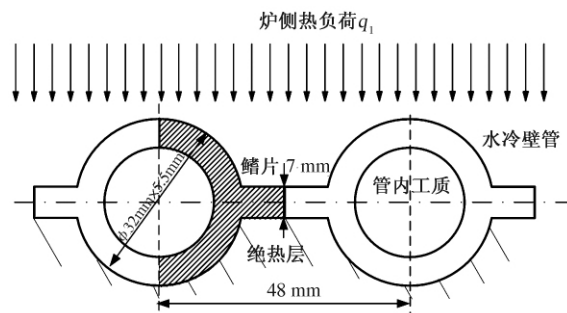


图 3 膜式水冷壁截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the cross-section of boiler water wall

表 1 350 MW 锅炉工况运行参数

Tab. 1 Main operation parameters of the boiler water wall

参数	BMCR	BRL	75% BMCR	50% BMCR	30% BMCR
螺旋管质量流速 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	2 690	2 562	1 731	1 149	807
垂直管质量流速 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1 133	1 079	729	484	340
水冷壁入口压力 / MPa	23.55	23.16	21.97	14.94	10.61
水冷壁入口温度 / $^\circ\text{C}$	339	335	318	299	275
燃料消耗量 / ( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	159.75	153.63	110.72	77.55	55.37
未完全燃烧损失 / %	1.70	1.70	2.20	2.70	2.70
锅炉效率 / %	92.14	92.22	92.10	92.12	92.38

## 2 数学模型

### 2.1 物理模型

对于垂直管,水冷壁截面上沿管壁左右两边完全对称;对于螺旋管,近似认为热负荷在沿管壁经线是对称的,假设对流传热系数沿管径周向均匀,即可以近似认为螺旋管水冷壁温度分布是沿管壁经线对称的。因此选取图 3 中阴影部分为研究对象。在锅炉稳定运行时,将水冷壁看作一个不规则区域的稳态导热过程,因水冷壁较长,上下温度变化率非常小,其纵向导热可以忽略,将问题简化为无内热源的二维稳态导热问题。

### 2.2 膜式水冷凝角系数确定

膜式水冷壁边界条件要获得精确的解析解,就需要精确地求解膜式水冷壁的角系数,笔者在周一工<sup>[9]</sup>给出的带焊角鳍片的膜式水冷壁角系数精确解的基础上求解矩形鳍片膜式水冷壁角系数。水冷壁管及鳍片管上热流密度分布函数分别为

$$q'(\alpha) = \frac{\varphi_{g,r} \cdot r \cdot d\alpha}{r \cdot d\alpha} \cdot q_l \cdot s, \quad (1)$$

$$q'(x) = \frac{\varphi_{g,dx}}{dx} \cdot q_l \cdot s, \quad (2)$$

式中:  $r$  为管半径,  $\text{mm}$ ;  $s$  为水冷壁管节距,  $\text{mm}$ ;

$\varphi_{g,r} \cdot d\alpha$  为管壁的辐射角系数;  $\varphi_{g,dx}$  为鳍片的辐射角系数。

### 2.3 热负荷在水冷壁管及鳍片上的分布

炉膛内水冷壁任一处  $L$  的局部平均热负荷  $q_L$  为:

$$q_L = q_{pj} \cdot \chi \cdot \eta, \quad (3)$$

式中:  $\chi$  为锅炉沿炉膛高度方向上热负荷分布系数;  $\eta$  为热负荷沿炉膛宽度的分配系数。

其中,

$$q_{pj} = B_j \cdot Q_j / H_j, \quad (4)$$

式中:  $B_j$  为计算燃料消耗量,  $\text{t/h}$ ;  $Q_j$  为单位质量燃料在锅炉内的辐射放热量,  $\text{kJ/kg}$ ;  $H_j$  为炉膛内辐射受热面积,  $\text{m}^2$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 炉膛局部热负荷分布

图 4 为在 BRL 负荷下局部平均热负荷最大(标高  $H = 36.41 \text{ m}$ ) 和螺旋水冷壁管出口(标高  $H = 41.089 \text{ m}$ ) 处膜式水冷壁管内工质焓值以及局部平均热负荷在炉膛宽度方向的分布。由图中对比分析可知,在标高  $H = 36.41 \text{ m}$  处的局部平均热负荷比标高  $H = 41.089 \text{ m}$  处高,这是因为标高  $H = 36.41 \text{ m}$  处在燃烧器上方附近,该处燃料燃烧充分,辐射热量高。同时工质吸热比燃料燃烧



需要的时间久,因此焓值的峰值与局部平均热负荷相比有一定的滞后性. BRL 负荷下,在标高  $H=36.41\text{ m}$  处局部平均热负荷的最大值为  $243.4\text{ kW/m}^2$ ,最小值为  $188.1\text{ kW/m}^2$ ,相差  $55.3\text{ kW/m}^2$ ;工质焓的最大值为  $2\,107.12\text{ kJ/kg}$ ,最小值为  $2\,101.20\text{ kJ/kg}$ ,焓值差为  $5.9\text{ kJ/kg}$ .而在标高  $H=41.089\text{ m}$  处,局部平均热负荷的最大值为  $233.5\text{ kW/m}^2$ ,最小值为  $170.3\text{ kW/m}^2$ ,相差  $63.2\text{ kW/m}^2$ ;焓值的最大值为  $2\,277.15\text{ kJ/kg}$ ,最小值为  $2\,270.24\text{ kJ/kg}$ ,焓值相差为  $6.9\text{ kJ/kg}$ .

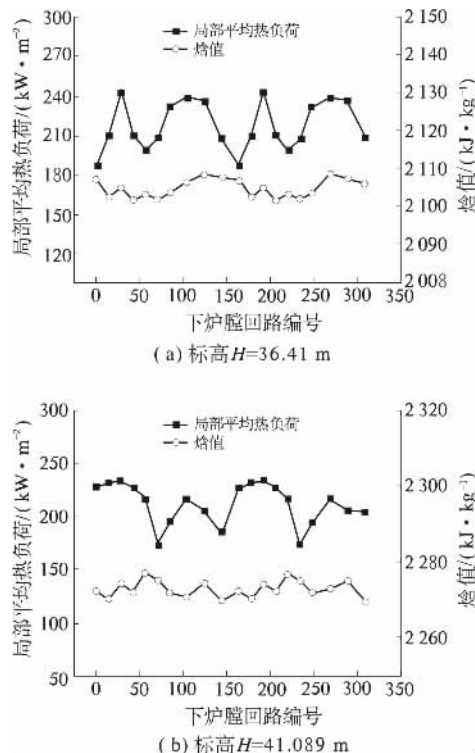


图4 BRL 负荷下局部平均热负荷分布

Fig. 4 Local average heat load under BRL

### 3.2 水冷壁工质出口温度分布

图5为不同负荷下螺旋管圈水冷壁各管出口工质温度、向火侧壁温及鳍端温度的分布.从图5可以看出,在不同负荷下,由于炉膛截面热负荷分布不均,导致水冷壁吸热不均匀,向火侧壁温及鳍片温度都有小幅度波动,同时各个受热面向火侧壁温均呈现中间高、两侧低的弧形分布.这一结果与文献[10]试验结果吻合,同一标高处热负荷在每面墙的中部较高,在角隅部分较低.其中BMCR负荷下各管间最大温度差为  $14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,50% BMCR负荷下各管间向火侧最大温度差为  $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,满足管间温差小于  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的设计要求,管间热偏差较小.

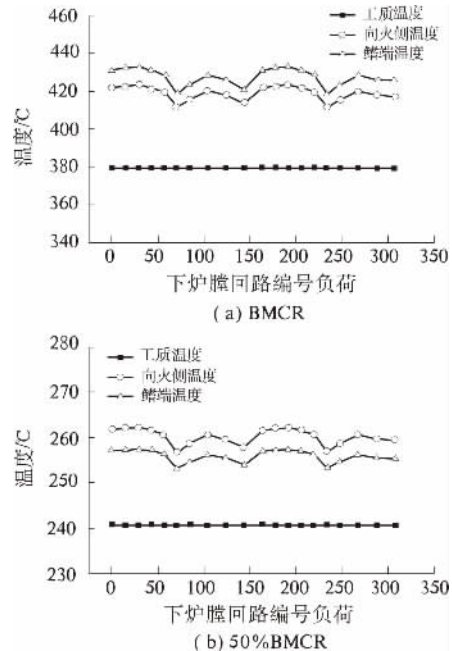


图5 不同负荷下螺旋水冷壁出口温度分布

Fig. 5 Temperature distribution on the outlet section of the spiral water wall under BMCR and 50% BMCR

### 3.3 壁温沿炉膛高度分布

通过计算发现,在位于后墙的192号螺旋管壁温水平最高,位于侧墙的154号螺旋管壁温水平最低,而192号管水平位置经过在热负荷沿炉宽分布曲线峰值对应的位置,与实际情况基本相符.

图6给出了75% BMCR负荷和50% BMCR负荷下154号水冷壁管向火侧顶顶点温度、鳍片端点温度及管内工质温度随高度变化曲线.从图6能够看出,不同负荷下,温度随高度变化呈相同趋势.随着炉膛高度增加,管壁温度逐渐升高,并伴有一定的波动.水冷壁管内的工质在汽化前一段,其外壁温度与流体温度的差值最大,在75% BMCR和50% BMCR负荷下的温差分别达到  $35.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $22.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .待管内工质开始汽化后,管内工质温度为饱和温度,传热系数变大,管壁最大温度与管内工质温度差值减小.在锅炉高度方向上,最高壁温出现在热流密度最大处,在75% BMCR工况下,最大温度位于向火侧鳍片端,为  $408.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;在50% BMCR工况下,最大温度位于向火侧管壁处,为  $365.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ .水冷壁金属材料最大许用温度为  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,电厂设置报警温度为  $466\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大壁温均低于金属许用温度及报警温度,由此证明水冷壁设计的合理性及运行的安全性.

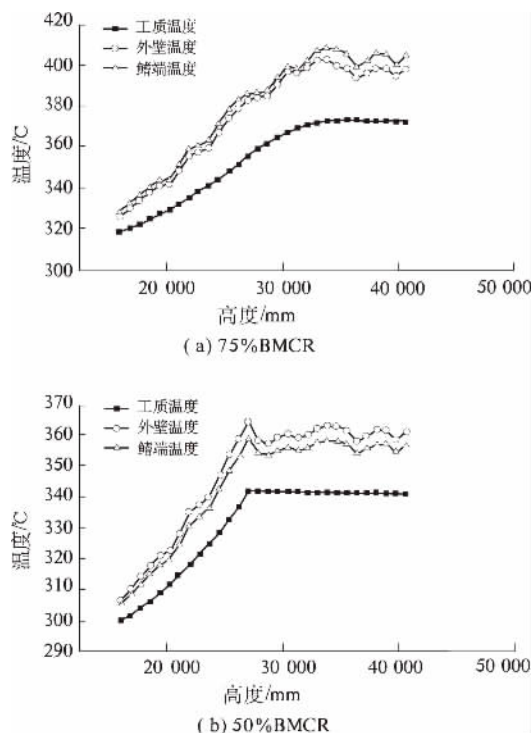
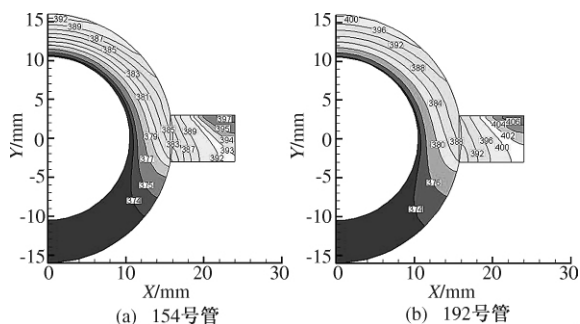


图6 不同负荷下壁温沿炉高分布

Fig.6 Temperature of tube 154 along the height of furnace under 75% BMCR and 50% BMCR

### 3.4 水冷壁截面温度场

在亚临界压力下,水冷壁管内工质温度随着吸热量的增大而逐渐增加,冷却能力减弱,壁面热负荷在标高  $H = 36.41$  m 处达到最大,且工质均为饱和温度.图7给出了75% BMCR 负荷下154号管和192号管在标高  $H = 36.41$  m 处的截面温度场.对比分析可知,水冷壁向火侧和背火侧温度相差较大,向火侧鳍端温度达到最高,154号管和192号管温度分别达到  $397^\circ\text{C}$  和  $406^\circ\text{C}$ .在水冷壁下母线内壁处温度最低,均维持在所在压力下的饱和温度  $374^\circ\text{C}$ ,这是因为膜式水冷壁边界条件不同引起的,水冷壁向火侧为辐射边界,背火侧为绝热边界,管内壁通过流体工质对流传热进行冷却.

图7 75% BMCR 负荷水冷壁管在  $H = 36.41$  m 截面温度场  
Fig.7 Temperature field of tube at 36.41 m under 75% BMCR

## 4 结论

1) 炉膛热负荷分布不均匀导致水冷壁吸热不均匀,向火侧壁温及鳍片温度都有小幅度波动,同时各个受热面向火侧壁温均呈现中间高、两侧低的弧形分布.

2) 随着炉膛高度增加,水冷壁管温度逐渐升高,同时伴有一定波动.水冷壁向火侧和背火侧温度相差大,在75% BMCR 负荷时,向火侧鳍端温度达到最高,最低温度出现在水冷壁下母线内壁处.

## 参考文献:

- [1] 张志正,孙保民,徐鸿,等. 沁北发电厂超临界压力电站锅炉水冷壁截面温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2006, 26(7): 25-28.
- [2] TORDONATO F V, SEBASTIAN, LATOUR, et al. Root cause failure assessment of the waterwall tubing at newington station [J]. ASME pressure vessels and piping conference, 2001, 1(5): 55-64.
- [3] ZHU J R, ZHANG M Y. Safety analysis of the water-wall in one PFBC boiler by dynamic model [J]. ISA transactions, 2003, 42(4): 665-672.
- [4] 余艳芝,唐必光,刘勇,等. 600 MW 锅炉机组膜式水冷壁壁温的试验研究及理论分析[J]. 热能动力工程,1999, 14(6): 434-436.
- [5] 杨冬,于辉,华洪渊,等. 超(超)临界垂直水冷壁流量分配及壁温计算[J]. 中国电机工程学报,2008, 28(17): 32-38.
- [6] 王为术,徐维晖,顾红芳,等. 超超临界锅炉垂直水冷壁温度场的数值计算[J]. 动力工程,2009, 29(8): 707-712.
- [7] 王为术,徐维晖,李帅帅,等. 1000 MW 超超临界锅炉高热负荷区垂直水冷壁温度特性研究[J]. 电站系统工程,2011, 27(6): 9-12.
- [8] 阎维平,李春燕,米翠丽,等. 近临界压力区传热恶化对超临界锅炉水冷壁温度场的影响[J]. 中国电机工程学报,2009, 29(35): 48-53.
- [9] 周一工. 膜式水冷壁表面热流密度分布的精确解[J]. 锅炉技术,1991(1): 1-6.
- [10] 杨勇. 1000MW 超超临界压力直流锅炉螺旋管圈水冷壁的水动力及传热特性试验研究[D]. 上海:上海发电设备成套设计研究院,2010.

(下转第55页)

# 一种双余度无刷直流电机转矩脉动抑制控制策略研究

刘卫国, 霍 达, 谭 博, 公 超

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

**摘 要:** 针对两套并联绕组互差  $30^\circ$  电角度的双余度无刷直流电机换相转矩脉动问题展开研究. 提出一种基于变结构电流前馈的转矩控制方法. 该方法结合对应相绕组轴线互差  $30^\circ$  的特点, 在均流控制的前提下, 使用变结构控制策略独立控制两套绕组的电流以保证电机在换相时刻输出稳定的转矩. 为了增加电流的响应速度, 采用电流前馈控制方法提高电流的变化率. 在 MATLAB/Simulink 环境下搭建模型进行仿真. 结果表明, 与传统的双余度电机均流控制策略相比, 基于变结构电流前馈的转矩控制策略能够有效地降低电机的换相转矩脉动.

**关键词:** 双余度; 变结构电流前馈控制; 转矩脉动; 无刷直流电机

**中图分类号:** TM33 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.031

## 0 引言

目前, 在现代航空航天设备中电力传动系统已经逐步开始取代传统的气动和液压传动系统<sup>[1-5]</sup>, 而电机作为现代航空航天设备的电力传动系统中重要的执行元件, 保证电机在整个系统的高可靠运行格外重要<sup>[2]</sup>. 永磁材料的性能优化也为电机应用于航空航天领域奠定了基础<sup>[3]</sup>. 为了增加系统的可靠性, 双余度无刷直流电机正在被广泛地应用于航空航天等对可靠性要求高的领域<sup>[4-5]</sup>. 根据双余度无刷直流电机在结构上的不同, 可分为两种类型: 并联结构型和串联结构型<sup>[6-7]</sup>. 串联结构电机体积较大且两套绕组同槽放于定子铁心上; 并联结构电机两套独立的电枢绕组互差  $30^\circ$  隔槽嵌放于定子铁心上. 笔者研究的是基于两套绕组隔槽嵌放的电机结构. 双余度无刷直流电动机的转矩脉动是影响其调速性能的因素, 转矩脉动的有效抑制是近年来无刷直流电机领域研究的热点和难点<sup>[7-8]</sup>. 转矩脉动产生的原因主要有: 换相引起的转矩脉动、电磁因素引起的转矩脉动、电枢反应引起的转矩脉动和齿槽效应引起的转矩脉动<sup>[7]</sup>. 笔者从控制角度分析, 对于双余度无刷直流电机换相转矩脉动抑制问题展开探究. 文献[9]从理论上详细分析了换相转矩

脉动产生的原因并推导出转矩脉动公式, 提出了一种基于电流预测控制的换相转矩脉动抑制方法, 并通过实验验证了该算法的有效性; 文献[10]通过研究非换相的相电流在换相时期的变化, 提出了保持非换相电压不变的方法抑制转矩脉动, 实验验证了该算法的可行性. 笔者针对两套并联绕组互差  $30^\circ$  电角度的双余度无刷直流电机转矩脉动问题展开研究.

## 1 双余度无刷直流电动机换相转矩脉动分析

在不考虑任何 PWM 调制的前提下, 对两个余度的换相转矩脉动进行分析.

双余度无刷直流电机功率拓扑结构如图 1 所示, 图中 T1~T6 和 D1~D6 是余度 1 的功率开关器件; T7~T12 和 D7~D12 是余度 2 的功率开关器件; a、b、c 和 a'、b'、c' 分别是余度 1 和余度 2 三相星形联接的集中式整距绕组, a 和 a'、b 和 b'、c 和 c' 的绕组轴线互差  $30^\circ$  电角度隔槽嵌放.

假设余度 1 处在换相阶段, 由 a、b 相换到 a、c 相, 开关状态为 T1、T6 开通切换至 T1、T2 开通. 因 b 相电流无法突变, 要经过二极管进行续流, 其续流回路如图 2 所示. 换相完成后 T1、T2 开通回路如图 3 所示.

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20136102120055)

作者简介: 刘卫国(1960—), 男, 河南正阳人, 西北工业大学教授, 博士生导师, 主要从事运动控制、电气伺服控制以及电机控制技术的应用与研究等, E-mail: lwgll@nwpu.edu.cn.

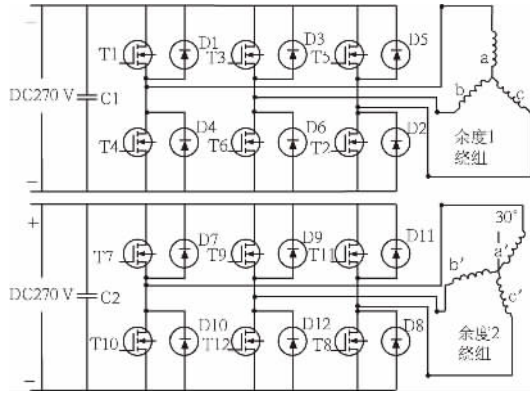


图1 双余度功率拓扑结构示意图

Fig.1 Dual-redundancy power topology

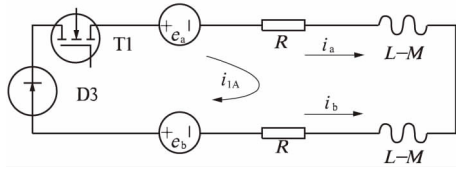


图2 b相续流回路电路

Fig.2 Continuous current loop in phase b

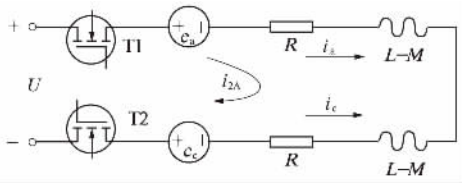


图3 T1和T2导通等效电路

Fig.3 Equivalent circuit when T1 and T2 are on

图2和图3中 $L$ 为电感自感, $M$ 为电感间的互感,由两个等效电路可列出方程组为:

$$\begin{cases} e_a - e_b + i_{1A}R + (L-M)\frac{di_{1A}}{dt} + i_aR + (L-M)\frac{di_a}{dt} = 0; \\ e_a - e_c + i_{2A}R + (L-M)\frac{di_{2A}}{dt} + i_aR + (L-M)\frac{di_a}{dt} = U; \\ i_{1A} + i_{2A} = i_a; \\ i_b = -i_{1A}; \\ i_c = -i_{2A}; \\ e_a = -e_b = -e_c = E. \end{cases} \quad (1)$$

根据无刷直流电机转矩方程,忽略绕组电阻的影响,可推得余度1的转矩为:

$$T_{eA}(t) = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) = \frac{2Ei_a(t)}{\omega} = \frac{2E}{\omega} \left[ \frac{U-4E}{3(L-M)}t + I_1 \right], \quad (2)$$

余度1的换相转矩脉动为:

$$\frac{dT_{eA}(t)}{dt} = \frac{2E}{\omega} \left[ \frac{U-4E}{3(L-M)} \right], \quad (3)$$

式中: $I_1$ 为换相过程中a相电流的初始值。

余度2正常导通,对应 $a'$ 、 $b'$ 相导通, $c'$ 相关断.等效电路如图4所示。

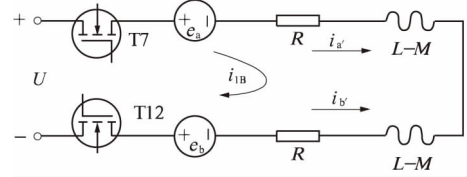


图4 T7和T12导通等效电路

Fig.4 Equivalent circuit when T7 and T12 are on

由等效电路可列出方程组为:

$$\begin{cases} e_{a'} - e_{b'} + i_{1B}R + (L-M)\frac{di_{1B}}{dt} + i_{a'}R + (L-M)\frac{di_{a'}}{dt} = U; \\ i_{a'} = i_{1B}; \\ i_{b'} = -i_{1B}; \\ i_{c'} = 0; \\ e_{a'} = -e_{b'} = -e_{c'} = E. \end{cases} \quad (4)$$

根据无刷直流电机转矩方程可推得余度2转矩为:

$$T_{eB}(t) = \frac{1}{\omega} (e_{a'} i_{a'} + e_{b'} i_{b'} + e_{c'} i_{c'}) = \frac{2Ei_{a'}(t)}{\omega} = \frac{2E}{\omega} \left[ \frac{U-2E}{2(L-M)}t + I_2 \right], \quad (5)$$

余度2的换相转矩脉动为:

$$\frac{dT_{eB}(t)}{dt} = \frac{2E}{\omega} \left[ \frac{U-2E}{2(L-M)} \right], \quad (6)$$

式中: $I_2$ 为 $a'$ 相电流的初始值。

两个余度的合成换相转矩脉动为:

$$\Delta T_{e_h} = \frac{dT_{eA} + dT_{eB}}{dt} = \frac{E}{\omega} \left[ \frac{5U-14E}{3(L-M)} \right]. \quad (7)$$

当反电势 $E < 5U/14$ 时,换相转矩脉动为正;当反电势 $E = 5U/14$ 时,换相转矩脉动为零;当反电势 $E > 5U/14$ 时,换相转矩脉动为负。

## 2 变结构电流前置反馈补偿的转矩控制

### 2.1 双余度无刷直流电机传统控制策略

目前,双余度无刷直流电动机的主要控制方案之一为采用两个余度均流控制<sup>[11-13]</sup>,其控制框架如图5所示。

系统组成包含控制器、驱动器和电动机3部分.其中控制器完成速度闭环,并且实现余度管理,驱动器分别包含两个独立的驱动单元A和B,电机包含两套独立的绕组和一个旋转变压器,旋转变压器作为转子位置和速度传感器。



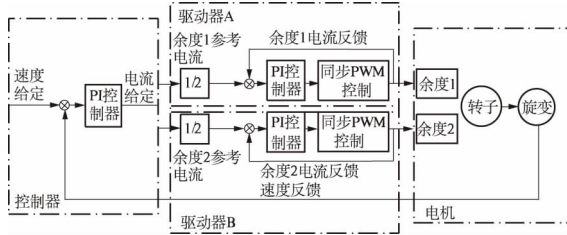


图5 均流控制系统原理框图

Fig. 5 Current-sharing strategy system

均流控制原理为: 两个余度共用一个速度环, 由旋转变压器得到的转速反馈与给定转速进行计算, 输出的差值经过PI调节器后再经1/2均流处理作为两个余度电流环的输入. 电流环的给定与采样余度的电流反馈信号计算产生PWM信号输出到驱动电路模块, 驱动信号控制开关管的导通时序在绕组中产生脉动旋转磁场, 使电机运转.

## 2.2 变结构控制方法

均流控制方法实现了两个余度的均流, 但是没有考虑电机的转矩脉动抑制问题.

根据上述分析, 结合双冗余度绕组并联互差30°电角度的特征, 笔者提出一种变结构的电流前置反馈补偿的转矩控制方法. 切换函数 $S$ 设计为:

$$\begin{cases} S_1 = e_{TA} = T_{eA}^* - T_{eA} = K_T(i_A^* - i_A); \\ S_2 = e_{TB} = T_{eB}^* - T_{eB} = K_T(i_B^* - i_B), \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $K_T$ 为转矩系数常量;  $e_{TA}$ 为余度1的转矩估计误差;  $e_{TB}$ 为余度2的转矩估计误差.

控制器最终输出设为 $u_1$ 和 $u_2$ , 其表达式为:

$$\begin{cases} u_1 = S_1 + k_2 S_2 \text{sign}(t_a); \\ u_2 = S_2 + k_1 S_1 \text{sign}(t_a), \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $k_1$ 、 $k_2$ 为两个加权系数函数. 以 $a$ 相和 $a'$ 相为例构造函数 $\text{sign}(t_a)$ 、 $\text{sign}(t_{a'})$ , 表达式分别为:

$$\text{sign}(t_a) = \begin{cases} 0, & \text{else;} \\ 1, & t_1 \leq t_a \leq t_2, \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{sign}(t_{a'}) = \begin{cases} 0, & \text{else;} \\ 1, & t_1 + \frac{\pi}{6} \leq t_{a'} \leq t_2 + \frac{\pi}{6}, \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $t_1$ 为余度1换相开始时刻;  $t_2$ 为余度1换相结束时刻. 余度1换相时刻延迟 $\pi/6$ 即为余度2的换相时刻.

换相开始时刻 $t_1$ 由转子位置信号获取, 将换相时长 $\Delta t$ 和换相结束时刻 $t_2$ 代入式(4)得到的方程组为:

$$\begin{cases} i_b(t) = \frac{U + 2E}{3(L - M)}t + I_b; \\ t = t_2; \\ i_b(t_2) = 0; \\ I_b = -I_1. \end{cases} \quad (12)$$

由上式可得:

$$\Delta t = \frac{3I_1(L - M)}{U + 2E} - t_1. \quad (13)$$

其他两相 $b$ 、 $c$ 与 $a$ 相似, 分别相差120°和240°电角度.

构造函数的目的是对两个余度的换相阶段与非换相阶段进行判断, 换相脉动阶段函数值置“1”, 其余阶段置“0”, 以区分控制策略中的双绕组对应的3种工作状态:

- 1) 余度1换相, 余度2不换相;
- 2) 余度2换相, 余度1不换相;
- 3) 余度1、余度2均不换相.

提出的变结构控制原理框图如图6所示.

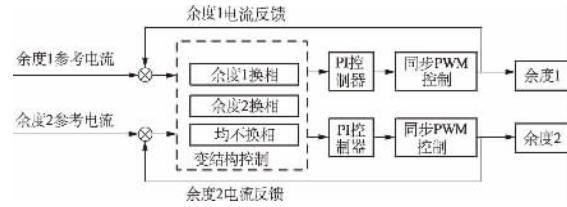


图6 变结构控制原理框图

Fig. 6 Variable structure control method

### 2.2.1 前馈控制

当余度1出现换相转矩脉动时, 变结构控制通过余度2产生转矩补偿. 由于换相过程较短, 如算法的实时性较低, 将导致补偿效果较差, 甚至产生震荡. 通过电流前置反馈的方法提升控制实时性, 实现快速补偿.

以余度1为例, 前馈环节的原理框图如图7所示.

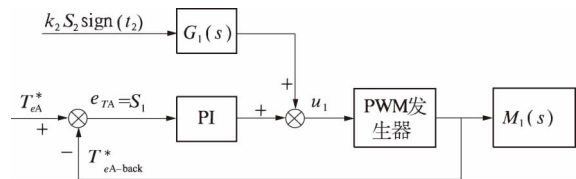


图7 余度1前馈环节原理图

Fig. 7 Feedforward control in 1<sup>st</sup> redundancy

图7中前馈环节的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{1}{M_1(s)}, \quad (14)$$

式中:  $M_1(s)$ 为电机的传递函数. 前馈函数能够使



$S_2$ 在余度1迅速产生补偿波动,来抵消余度2上的换相转矩脉动。

### 2.2.2 变结构电流前置反馈补偿的转矩控制

当余度1处于换相状态,余度2处于非换相状态,此时切换函数 $S_1$ 为余度1的换相转矩脉动, $S_2$ 为余度2的非换相转矩脉动,根据式(10)和式(11), $\text{sign}(t_a)$ 为1, $\text{sign}(t_a^-)$ 为0,最后产生的前馈信号 $u_1$ 、 $u_2$ 为:

$$\begin{cases} u_1 = S_1 = u_1^+; \\ u_2 = S_2 + k_1 S_1 = u_2^- \end{cases} \quad (15)$$

对于余度1, $S_1$ 用来维持自身转矩输出,而 $u_2$ 由 $S_2$ 和 $k_1 S_1$ 两部分组成, $S_2$ 是用来维持自身的转矩输出, $k_1 S_1$ 则是用来抑制余度1的换相转矩脉动,它通过在余度2中产生补偿电流脉动,引起补偿转矩脉动,使两个余度的换相转矩脉动相互抵消,达到抑制合成转矩脉动的目的。 $k_1$ 加权系数函数则是通过绕组电流反馈产生, $k_1$ 变化趋势与换相的相电流变化趋势相关。

当余度2绕组存在换相转矩脉动时,产生的前馈信号 $u_1$ 、 $u_2$ 为:

$$\begin{cases} u_1 = S_1 + k_2 S_2 = u_1^+; \\ u_2 = S_2 = u_2^+ \end{cases} \quad (16)$$

控制器的工作状态分析与上述原理类似,此时余度1快速产生的补偿转矩脉动与余度2的换相转矩脉动相互抵消,对转矩脉动进行抑制。

当两个余度均处在正常非换相状态时,产生的前馈信号 $u_1$ 、 $u_2$ 为:

$$\begin{cases} u_1 = S_1 = u_1^+; \\ u_2 = S_2 = u_2^+ \end{cases} \quad (17)$$

此时两个余度没有换相转矩脉动。

系统控制策略需首先对两个余度的工作状态进行识别,然后针对不同的状态产生电流前馈补偿,削弱两个余度的合成输出转矩脉动,控制原理框图如图8所示。

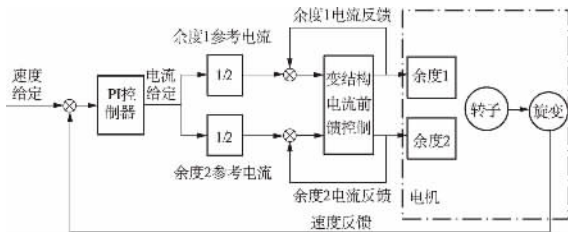


图8 变结构前馈控制原理框图

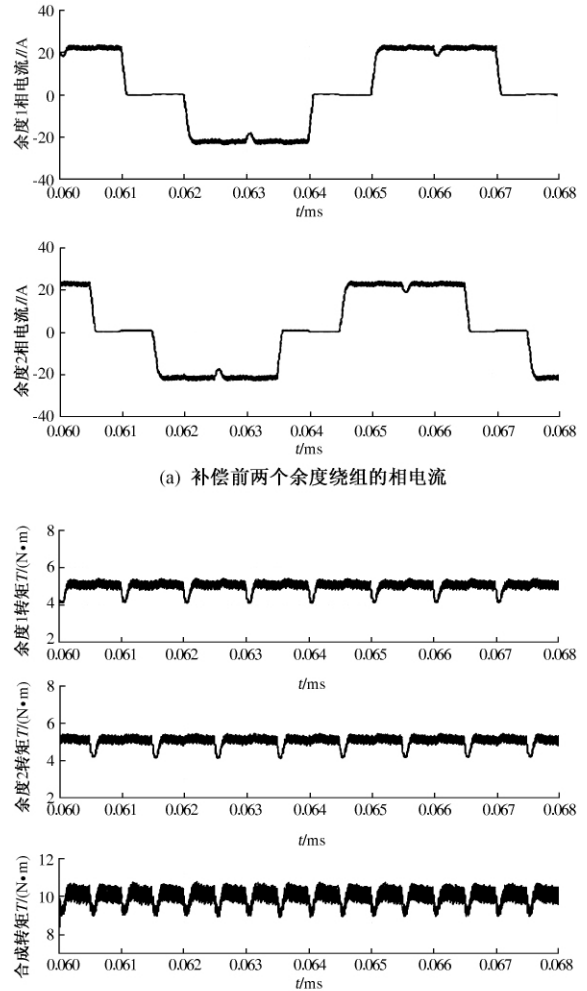
Fig.8 Variable structure control with current feedforward

## 3 仿真结果分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,电机参数:额定电压  $U = 270 \text{ V}$ ,额定功率  $P = 2 \text{ kW}$ ,额定转速  $n = 8000 \text{ r/min}$ ,两个余度绕组的相电阻  $R = 0.02 \Omega$ ,相电感  $L = 0.1 \text{ mH}$ ,给定转速  $n = 5000 \text{ r/min}$ ,负载转矩  $T = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

双余度无刷直流电动机使用均流控制策略的仿真波形如图9所示;采用基于变结构电流前馈转矩控制策略的仿真波形如图10所示。

通过对比图9(a)与图10(a)可见,余度2的相电流在余度1的换相阶段产生了3A的补偿波动;观察图9(b)和图10(b)发现,余度2在换相阶段产生的  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$  转矩脉动由余度1中产生的补偿波动抵消。



(a) 补偿前两个余度绕组的相电流

(b) 补偿前两个余度绕组的电磁转矩

图9 均流控制的仿真曲线

Fig.9 Curve of current-sharing strategy

图9(b)是均流控制策略的合成输出转矩仿真波形,与图10(b)的变结构电流前馈转矩控制策略比较,换相转矩脉动得到明显抑制,合成转矩脉动抑制效果为56.3%.

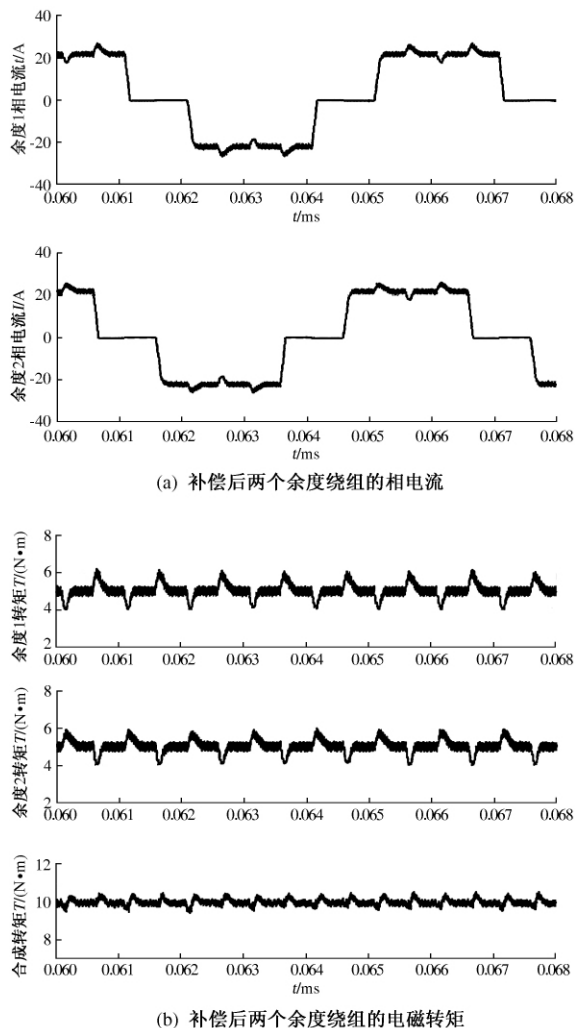


图10 变结构电流前馈控制的仿真曲线

Fig.10 Curve of variable structure control with current feedforward

#### 4 结论

笔者针对双冗余无刷直流电机,提出了一种变结构电流前馈转矩控制策略,在均流环节输出端采用变结构电流前馈控制,在保证电流反馈实时性的基础上,有效地抑制了双冗余绕组的换相转矩脉动.通过仿真研究,该方法在减小换相转矩脉动的基础上,与常规的均流方法相比,具有结构简单、易于实现的优点,具有较广泛的应用价值.

#### 参考文献:

- [1] 周奇勋,李声晋,卢刚,等.双冗余机载永磁无刷直流伺服系统转矩均衡性[J].电工技术学报,2009,24(6):17-23.
- [2] 周元钧.双绕组无刷直流电动机的数学模型与转矩特性[J].电工技术学报,2004,19(4):12-17.
- [3] 李福山,王金磊,董晓源,等. $\text{Nd}_{8.5}\text{Fe}_{84}\text{Nb}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{B}_6\text{Cu}_{0.5}$ 稀土永磁合金磁性能的研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(3):82-86.
- [4] 罗战强,丁文,杨新团,等.双冗余永磁无刷电机系统数学模型与特性分析[J].电机与控制学报,2013,17(3):20-27.
- [5] 闫浩.双绕组无刷直流电机运行策略的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学电气工程学院,2013:1-6.
- [6] 马瑞卿,刘卫国,解恩.双冗余无刷电动机位置伺服系统仿真与试验[J].中国电机工程学报,2008,28(18):98-103.
- [7] 汪光照.直流无刷电机转矩脉动抑制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学电气工程学院,2014:2-5.
- [8] GAO J, HU Y. Direct self-control for BLDC motor drives based on three dimensional coordinate system[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2010, 57(8): 2836-2844.
- [9] 王晓远,傅涛王,晓光基.基于电流预测控制的无刷直流电动机换相转矩脉动抑制[J].电工技术学报,2015,30(11):22-29.
- [10] 宋飞,周波,吴小婧.抑制无刷直流电机换相转矩脉动的新型补偿策略[J].电工技术学报,2008,23(11):28-33.
- [11] 丛新勇,吕永健,李子龙.一种同时抑制 BLDCM 两种转矩脉动的方法研究[J].微电机,2013,46(9):68-84.
- [12] MA R Q, LIU W G, LUO G Z, et al. The balanced current control of dual-redundancy permanent magnetic brushless DC motor[C] //Proceedings of the eighth international conference on electrical machines and systems. Nanjing: IEEE, 2005: 475-479.
- [13] 李榕,刘卫国,马瑞卿,等.双冗余无刷直流电动机伺服系统电流均衡性研究[J].电工技术学报,2005,20(9):77-81.

## A Torque Ripple Suppression Method in Dual-redundancy Permanent Magnet Brushless DC Motor

LIU Weiguo, HUO Da, TAN Bo, GONG Chao

( School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** In view of commutation torque ripple in two sets of parallel winding with difference of 30 electrical degrees in dual-redundancy brushless DC motor, a technique with variable structure and current feed-forward was put forward. Current could be adjusted independently by this strategy, combined with the characteristic of the difference of 30 electrical degrees in the corresponding phase to ensure the stability of commutation torque. In order to increase the response from current, feed-forward control was proposed to improve the current charge rate. The results showed that, compared with traditional method, it could minimize the commutation torque ripple in double-winding permanent brushless DC motor and enhance the stability of the operating system.

**Key words:** dual-redundancy; variable structure with current feed-forward control; torque ripple; brushless dc motor

( 上接第 49 页)

## Numerical Calculation of the Temperature Field of Membrane Water-wall of 350 MW Supercritical Boiler

WANG Weishu, CUI Qiang, ZHENG Mengxing, CHEN Gang

( Institute of Thermal Energy Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** In view of the temperature characteristics of semi circumference heated membrane water-walls in a 350 MW supercritical pressure boiler, a calculation program was built to obtain spiral membrane water-wall temperature distribution under different furnace loads. The results showed that: the uneven distribution of furnace heat load led to uneven heat of water-walls; temperature on the facing flame side of water-walls fluctuated within a narrow range, which was the same as the fin. The distribution of temperature on the facing flame side was low in the middle and higher on other sides. With the increase of height of furnace, temperature of water-wall rose and there was a certain fluctuation. The highest temperature appeared on the facing flame side of the fin, and the lowest temperature appeared on the inner wall of water-wall bus bar when BMCR load was 75%.

**Key words:** supercritical pressure boiler; membrane water-wall; water-wall temperature distribution; temperature field

文章编号: 1671-6833(2017)01-0056-07

# 基于区间样本和回声状态网络的风电功率不确定性预测

孙晓燕, 时良振, 徐瑞东, 张 勇

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 风电功率预测对并网运行的稳定性控制、市场经济调度等具有重要意义. 但受风力波动性等影响, 风电功率具有极大的不确定性, 如何在功率预测中有效反映该不确定性对提高预测可靠性至关重要. 针对当前大多采用点预测方法存在的不足, 提出一种量化不确定性的区间预测模型. 基于区间相似准则和相似日理论, 首先给出反映风电功率不确定性的区间样本选择策略; 针对选择的时序区间样本, 给出基于回声状态网络的区间预测方法; 最后利用区间覆盖率、区间平均宽度等指标评价预测结果. 实验结果表明了所提方法的有效性.

**关键词:** 风电功率预测; 不确定性; 区间样本; 回声状态网络

**中图分类号:** TM614

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.003

## 0 引言

清洁、成本低廉的风能一直是新能源中应用广泛、极具开发前景的可再生能源. 然而, 由于风能的随机性、间歇性、波动性等特点, 风力发电具有很强的不确定性, 大规模的风电并网将会对电力系统的稳定性、电能质量及动态经济调度等造成极大的影响<sup>[1]</sup>, 给风能的有效利用带来了严峻的挑战. 对风电功率进行准确、可靠的预测是解决上述问题可行和有效的方法之一<sup>[2]</sup>. 在不同时间尺度的风电功率预测中, 短期与超短期预测对优化旋转备用容量、机组组合、经济调度等具有重要作用, 进行短期或超短期风电功率预测更具管理和经济价值. 与长期和中长期风电功率预测相比, 短期与超短期预测要求更高的精度和可靠性, 且针对风电功率的不确定性, 进行可靠有效的短期预测成为亟待解决的问题.

目前风电功率短期预测方法主要有物理方法和统计机器学习方法. 物理方法主要基于数值天气预报和风机周围的物理、地理信息计算风电机组轮毂高度的风速风向等信息, 再依据风速-功率曲线预测风电功率. 物理方法因可对每个大气过程进行分析并根据分析结果优化预测模型, 因此预测精度较高. 但物理方法一般需要建立大气或

风速模型, 过程较复杂, 难以适应大规模风场的应用, 且其对初始风场信息非常敏感, 较难适应风电输出功率的不确定特性<sup>[3]</sup>. 统计机器学习方法一般是建立天气信息与风电输出功率历史序列之间的关系模型, 再基于未来时间段的数值天气预报信息预测风电功率<sup>[4]</sup>. 常用的方法主要有卡尔曼滤波、神经网络和支持向量机<sup>[5]</sup>等, 其中以神经网络及其混合方法的应用最为广泛<sup>[6-7]</sup>. 与物理方法相比, 统计机器学习方法无需对大气运动、风速信息进行细致刻画, 在数据充分时可使预测误差尽量达到最小, 实现较准确的预测.

然而, 上述研究较少考虑风电输出功率的不确定性. 针对风电功率预测的不确定性, 有学者提出了区间预测方法, 即给出风电输出功率可能的变化范围. 文献[8]基于模糊区间对微网系统中的可再生能源及用电负荷进行预测, 为电网系统的经济调度提供了可靠参考. 文献[9]提出了基于神经网络的区间上下限预测模型对风电功率时序序列进行预测, 并利用粒子群优化算法(PSO)确定神经网络权值. 文献[10-11]利用极限学习机将风电功率历史数据作为网络输入, 实现了对风电功率区间上下限的预测.

相对于在风电功率预测中广泛应用的前馈神经网络, 回声状态网络(echo state network, ESN)

收稿日期: 2016-10-12; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473298); 江苏省六大人才高峰资助项目(ZNDW-004)

作者简介: 孙晓燕(1978—), 女, 江苏丰县人, 中国矿业大学教授, 博士, 主要从事智能优化与计算, 个性化信息处理和智能电网研究, E-mail: xysun78@126.com.

的训练过程简便迅速,在时序预测中已得到广泛关注和应用<sup>[12]</sup>,但在风电功率预测中的应用却较少. Ronaldo 等<sup>[13]</sup>利用历史功率数据作为回声状态网络的输入,训练多个网络分别预测各子时间段的功率输出,但该研究没有考虑输出功率的不确定性.若能从大量的风电功率历史数据中找出输出功率在对应时刻点上的变化区间,利用该区间作为预测模型的训练样本,并结合预测时段的风速、温度等气象信息,则既在训练过程中直接体现功率变化的不确定性,又为决策者提供了更有实际意义的预测区间.鉴于此,笔者研究基于回声状态网络对风电功率不确定性区间预测.

风电功率预测的实质是对时序数据的回归,当考虑预测模型输入为区间时,则问题转化为对区间时序数据的拟合,此时面临如下关键问题:①基于历史数据的风电输出功率区间时序数据的获取;②用于处理区间时序数据的神经网络模型的选择和设计;③区间预测模型的衡量指标.

本文组织结构如下:第1节给出基于相似日理论的区间时序数据的获取;基于回声状态网络的风电输出功率区间预测模型将在第2节提出;第3节详细说明算法在实际系统中的应用;第4节给出结论.

## 1 风电功率预测区间时序数据的获取

本节给出以区间形式反映风电功率不确定性的样本选择方法,采用相似日理论,考虑季节相似性、天气相似性及风速相似性,给出含不确定性的区间样本选择机制.

### 1.1 相似日的定义

设拟进行风电功率预测的时段为  $M_i$  月  $D_m$  日的  $(t_k, t_k + t)$  时段,则与之相关的相似日定义如下:

1) 季节相似性  $S_1$ : 由气象知识可知,越临近预测日  $D_m$ ,其季节相似性越大,因此以  $D_m$  为起点,分别向两侧顺向和逆向取相似日,共计  $m_2$  天.

2) 天气相似性  $S_2$ : 在季节相似性确定的  $m_2$  天内,进一步考虑具体天气状况的相似性.以温度和气压为例,设预测当天预报温度  $T \in [\underline{T}, \bar{T}]$ ,气压  $p \in [\underline{p}, \bar{p}]$ ,其中  $\bar{T}$ 、 $\underline{T}$ 、 $\bar{p}$ 、 $\underline{p}$  分别为温度和气压的上下限.为找到与上述温度和气压变化区间相似的日期,这里利用式(1)定义的比较区间数  $A = [\underline{a}, \bar{a}]$  和  $B = [\underline{b}, \bar{b}]$  大小的  $\mu^{[14]}$  指标衡量区间的相似性.

$$\mu(A, B) = \begin{cases} m_B - m_A + 2\text{sgn}(m_B - m_A), & r_B + r_A = 0 \\ \frac{m_B - m_A}{r_B + r_A} + \text{sgn}(m_B - m_A), & m_A \neq m_B \text{ and } r_B + r_A \neq 0 \\ \frac{r_B - r_A}{\max(r_B, r_A)}, & m_A = m_B \text{ and } r_B + r_A \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $r_A = \frac{\bar{a} - \underline{a}}{2}$ ;  $m_A = \frac{\bar{a} + \underline{a}}{2}$ ;  $r_B = \frac{\bar{b} - \underline{b}}{2}$ ;  $m_B = \frac{\bar{b} + \underline{b}}{2}$ . 则两区间数的大小关系为:

$$\begin{cases} A = B, & \mu(A, B) = 0 \\ A \approx_\mu B, & 0 < |\mu(A, B)| \leq 1 \\ A \cap B \neq \emptyset, & 1 < |\mu(A, B)| \leq 2 \\ A \cap B = \emptyset, & |\mu(A, B)| > 2 \\ \text{特别地,若 } 1 < |\mu(A, B)| \leq 2 - \frac{2\min\{r_A, r_B\}}{r_A + r_B}, \\ \text{则} \begin{cases} A \subset B, \text{ if } r_B \geq r_A \\ B \subset A, \text{ if } r_B < r_A. \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,  $|\mu(A, B)|$  值越小,区间  $A$  与  $B$  的共同元素越多,即  $A$  和  $B$  的相似度越高,反之亦然.由此分别计算  $|\mu(T, T_c)|$  与  $|\mu(p, p_c)|$ ,剔除与预测时段温度、气压等变化区间差异较大(即  $|\mu(T, T_c)| > 2$  或  $|\mu(p, p_c)| > 2$ ) 的相似日,则剩余相似日个数记为  $m_1$  ( $m_1 \leq m_2$ ).

(3) 风速相似性  $S_3$ : 设预测时段  $(t_k, t_k + t)$  风速的变化范围为  $v \in [\underline{v}, \bar{v}]$ ,基于上述季节和天气相似性共得到的  $m_1$  个相似日记为  $d_1, d_2, \dots, d_{m_1}$ ,第  $d_j$  ( $j \in \{1, 2, \dots, m_1\}$ ) 日  $(t_k, t_k + t)$  时段内风速变化范围为  $v_j \in [\underline{v}_j, \bar{v}_j]$ ,利用式(1)计算  $\mu(v, v_j)$ ,剔除与预测时段风速变化区间差异较大(即  $|\mu(v, v_j)| > 2$ ) 的相似日,则剩余相似日个数记为  $m$  ( $m \leq m_1$ ),从而得到  $m$  个相似风速区间.

### 1.2 含区间不确定性的样本选择

考虑风速的时序性和突变性,给出如下含区间不确定性的时序样本选择方法.

首先考虑时序特性,设预测时段  $(t_k, t_k + t)$  前  $H$  小时共记录风电输出功率时序样本  $C$  组,记为  $T_r(i) = \{(X(i), P(i)) \mid i = 1, 2, \dots, C\}$ . 其中,  $X(i)$  为  $i$  时刻影响风电输出功率的主要影响因素,这里考虑风速  $v(i)$ 、温度  $T(i)$  和桨距角  $w(i)$ <sup>[15]</sup>,  $P(i)$  为上述因素对应的风电输出功率.不失一般性,记  $t_k$  时刻的样本为  $(X(t_k), P(t_k))$ ,设待预测时段  $(t_k, t_k + t)$  前  $H$  小时内,按时序点  $(t_k - h, t_k - h + 1, \dots, t_k - 2, t_k - 1)$  共记录  $h$  组风电数据,将  $h$  组原始样本按时间间隔  $\Delta t$  平均分成  $g_1$  组,每



组含有  $l(l=\frac{h}{g_1})$  个原始时序样本,如  $l=3$  时  $\{(X(t_k-h), P(t_k-h)), (X(t_k-h+1), P(t_k-h+1)), (X(t_k-h+2), P(t_k-h+2))\}$  即为第一组的原始样本,后面每组以此类推. 处理后的原始样本为按  $g_1$  个相关时序点排列,时间间隔为  $\Delta t$  的新时序样本. 为便于表达,设分组后第  $i$  个新时序的样本集合  $S(i) = \{(X(i, j), P(i, j)) \mid i=1, 2, \dots, g_1; j=1, 2, \dots, l\}$ ,  $X$  表示输出功率的影响因素,  $P$  代表输出功率值. 由于短时间  $\Delta t$  内风速、温度等变化较小,因此这里可对  $S(i)$  中的影响因素  $X(i, j)$  进行加权平均,则处理后的影响因素  $X(i)$  为:

$$X(i) = \frac{\sum_{j=1}^l X(i, j)}{l}. \quad (3)$$

接着选出每一分组中的最大、最小功率值作为每个  $\Delta t$  时间段内各影响因素所对应的输出功率的上下限:

$$\begin{cases} \bar{P}(i) = \max_{j=1, 2, \dots, l} (P(i, j)); \\ \underline{P}(i) = \min_{j=1, 2, \dots, l} (P(i, j)). \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可获得如式(5)所示含有不确定性的区间时序样本:

$$T_{N_j} = \{(X(i), [\underline{P}(i), \bar{P}(i)]) \mid i=1, 2, \dots, g_1; \bar{P}(i) = [\underline{P}(i), P(i)]\}, \quad (5)$$

其含义是:当  $i$  时刻影响因素值约为  $X(i)$  时,风电输出功率变化范围为  $[\underline{P}_i, \bar{P}_i]$ ,这反映了当影响因素不确定时风电功率可能的变化范围,特别是待预测时段风速、温度等不能精确可知时,利用该不确定性具有较高的可信度.

当风速突变时,预测时段  $(t_k, t_k+t)$  前  $H$  小时的数据样本显然不能完全刻画  $(t_k, t_k+t)$  时间段内的数据变化信息,即前  $H$  小时的风速变化范围可能与  $(t_k, t_k+t)$  的预报风速变化范围相差较大. 下面进一步考虑风速的突变性,丰富并获取上述含不确定性的区间时序样本. 首先利用上一节中的风速相似性选择方法,选取相似日  $d_j$  天(不含待预测日)中时段  $(t_k, t_k+t)$  记录的风电输出功率时序样本共  $t$  组,按时序点  $(t_k, t_k+1, \dots, t_k+t-1)$  排列,按照处理前  $H$  小时数据样本得到新时序样本的方法,共可得到  $g_2$  组新样本. 由于  $m$  个相似日中共有  $m$  个相似风速区间,则共有  $m \cdot g_2$  组相似风速区间的样本. 综合  $(t_k, t_k+t)$  前  $H$  小时与

$m$  个相似风速区间的样本,共可获得  $T_N = \bigcup_{j=1, 2, \dots, (g_1+m \cdot g_2)} T_{N_j}$  组新时序样本.

## 2 基于回声状态网络的风电功率不确定性区间预测

### 2.1 算法框架

算法框架如图1所示,包括样本选择、模型构建和性能评价. 其中,样本选择采用第1节所述方法. 以下给出基于回声状态网络的风电输出功率不确定性的区间预测模型的设计.

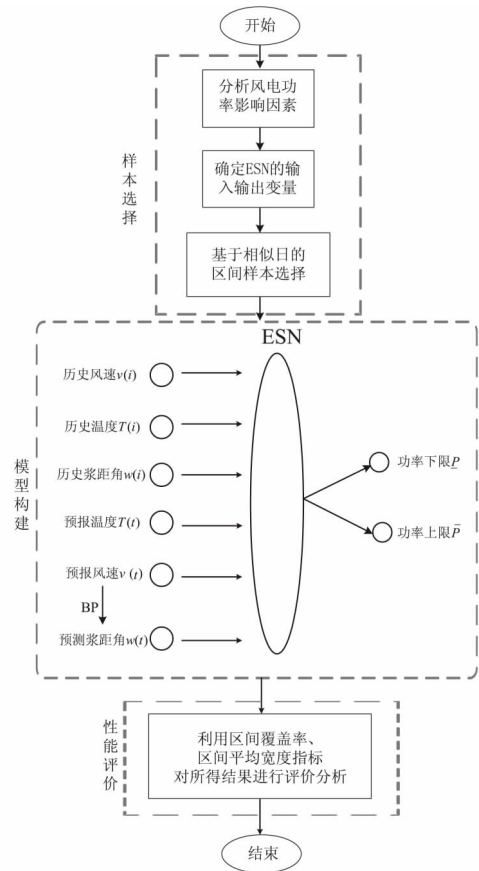


图1 基于回声状态网络的风电功率区间预测模型

Fig.1 Flowchart of interval prediction for wind power based on echo state network

图1“模型构建”部分给出了笔者所提区间预测的策略,具体包括网络输入输出节点的确定和网络连接权值的训练.

首先确定输入输出节点,由前面的分析可知,训练模型的输入为风速  $v$ 、温度  $T$  和桨距角  $w$ <sup>[15]</sup>, 输出为功率  $P$ . 其中训练样本中风速、温度、桨距角记为  $v(i)$ 、 $T(i)$ 、 $w(i)$ , 预测样本中3者分别为  $v(t)$ 、 $T(t)$ 、 $w(t)$ . 因预测时段的风速  $v(t)$  和温度  $T(t)$  可由预报信息获得,而桨距角  $w(t)$  却未知.

为此这里采用 BP 神经网络对  $w(t)$  进行估计,在预测风电功率时直接调用该网络,利用 BP 网络估计值作为预测时段的桨距角输入信息。 $w(t)$  的估计可利用新时序样本集  $T_N$  进行训练,BP 网络输入为  $v(i)$ ,输出为  $w(i)$ 。

由于回声状态网络的输出结果为区间数  $\bar{P}(t) = [P(t), \bar{P}(t)]$ 。为尽可能减少回声状态网络对区间拟合的干扰,这里分别利用  $T_N = \{(X(i), P(i)) \mid i=1, 2, \dots, (g_1 + m \cdot g_2)\}$  和  $\bar{T}_N = \{(X(i), \bar{P}(i)) \mid i=1, 2, \dots, (g_1 + m \cdot g_2)\}$  训练两个回声状态网络,分别拟合功率的上下限。以预测  $P(t)$  为例,回声状态网络的具体结构如图 2 所示。预测  $\bar{P}(t)$  与  $P(t)$  类似,不再赘述。

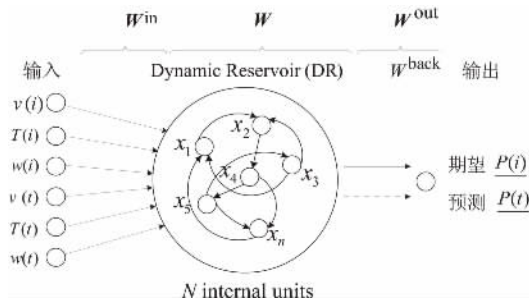


图 2 预测区间下限的 ESN 结构

Fig. 2 ESN model for lower bound of prediction interval generation

回声状态网络的网络联结权由 3 大部分组成,分别为输入层至储备池之间的  $W^{in}$ ,储备池各神经元之间的联结权  $W$ ,储备池和输出层之间的联结权  $W^{out}$  及输出反馈矩阵  $W^{back}$ 。

记  $t$  时刻 ESN 网络的输入、储备池内部状态和输出向量分别为  $u(t)$ 、 $x(t)$ 、 $y(t)$ ,则该网络各状态的变化为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} x(t+1) = f[W^{in}u(t+1) + Wx(t) + W^{back}y(t)]; \\ y(t+1) = f^{out}[W^{out}[u(t+1), x(t+1), y(t+1)] + W_{bias}^{out}]; \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $W_{bias}^{out}$  表示输出偏置项或代表噪声;  $f(\cdot)$ 、 $f^{out}(\cdot)$  分别表示储备池内部单元的激励函数和输出节点的激励函数,在实际运用中一般将  $f(\cdot)$  设为双曲正切函数,  $f^{out}(\cdot)$  取线性函数或符号函数。

利用回声状态网络进行时序预测需确定储备池大小和输出连接权值矩阵。储备池参数包括储备池内部神经元之间联结权的谱半径 (spectral radius, SR)、储备池内部神经元数  $N$ 、输入单元尺度 (input scaling, IS) 和储备池稀疏度 (sparse de-

gree, SD)<sup>[16]</sup>,具体参数设置在仿真实验中给出。

连接权值矩阵  $W^{out}$  的确定本质上可看作是线性回归问题的求解,其优化求解方法众多,如粒子群算法、烟花算法<sup>[17]</sup>等。笔者采用文献[18]递归最小二乘 (recursive least-squares, RLS) 作为确定 ESN 输出权值矩阵的策略,这里不再赘述。

## 2.2 预测结果评价指标

区间预测的结果主要从预测可靠性和区间宽度两个方面考虑,设检验样本共有  $n$  组。引入区间覆盖率 (prediction interval coverage probability, PICP) 表示预测区间的可靠性,定义为:

$$PICP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad (7)$$

$$c_i = \begin{cases} 1, & P_d \subseteq [P(t), \bar{P}(t)] \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

式中:  $P_d$  为功率期望值,  $\bar{P}(t)$ 、 $P(t)$  分别为功率预测值的上、下限。显然,  $PICP$  值越接近于 1,拟合区间覆盖率越高。

平均宽度 (mean prediction interval width, MPIW) 定义为:

$$MPIW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\bar{P}(t) - P(t)]. \quad (8)$$

平均宽度越小,预测区间不确定性越小,实用价值越大。

## 3 仿真实验

为验证笔者所提方法的有效性,以某公开风电数据集中 2013 年风电功率历史时序数据进行实验。其中,风机的切入和额定风速分别为 4 m/s 和 12 m/s,机组额定功率 1 500 kW。数据记录时间间隔为 5 min,选取 3~4 月份的实际记录数据共  $61 \times 24 \times 12 = 17\ 568$  组数据,每组数据记录的信息有风速、风向、温度、桨距角和风电输出功率。与已有风电功率预测算法相比,本文算法主要研究含不确定性的区间样本的选择以及基于所选样本和回声状态网络的输出功率区间预测模型的构建,分 3 组实验说明上述方法的性能:①参数对模型性能的影响;②在不同风速区间条件下,将笔者所提方法与其他方法作对比;③检验不同预测时长下所建模型的预测性能,说明笔者所提模型的鲁棒性。其中,前两组实验预测时长为 6 h,即预测时段  $(t_k, t_k + 6)/h$  的风电功率。回声状态网络参数通过交叉检验设置:  $K = 3$ ,  $N = 100$ ,  $L = 1$ ,谱半径  $SR = 0.8$ ,输入单元尺度  $IS = [0.2; 0.5; 0.1]$ ,递归最小

二乘法(RLS)的遗忘因子 $\lambda = 0.999\ 995$ ,调整参数 $\gamma = 10^{-6}$ .所有实验均在MATLAB7.0环境下通过编程实现,计算机处理器2.8 GHz,运行内存2 GB.

### 3.1 参数对模型性能的影响

#### 3.1.1 相似指标对预测结果的影响

首先基于传统的点预测,依次将每个相似风速区间内的样本(不含预测时段前 $H$ 小时的样本)作为模型输入进行预测,以均方根误差为评价指标,观察相似度 $\mu(v, v_j)$ 的不同取值对输出功率预测精度的影响,结果如图3所示.

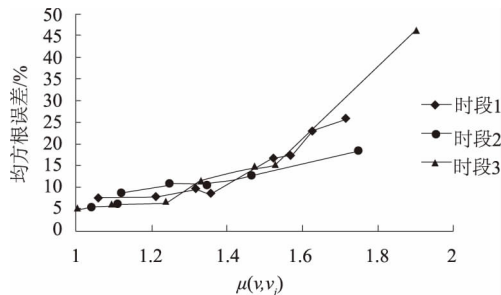


图3 相似风速区间指标 $\mu(v, v_j)$ 与预测精度的关系  
Fig.3 Relationship between the similar wind speed interval indicator  $\mu(v, v_j)$  and the forecast accuracy

由图3可以看出,随着 $\mu(v, v_j)$ 的不断增大,预测误差逐渐增大,即相似风速区间与预测时段风速区间的相似度越大( $\mu(v, v_j)$ 越小),预测精度越高.由此可见,以 $\mu$ 指标判断相似时段风速区间的相似性大小进行样本选择是合理的.

相似风速区间个数 $m$ 直接影响样本数量,将 $m$ 个风速区间按相似度从大到小,逐次增大 $m$ 的取值,即增加样本数量,观察比较不同 $m$ 取值下点预测均方根误差的变化,结果如图4所示.

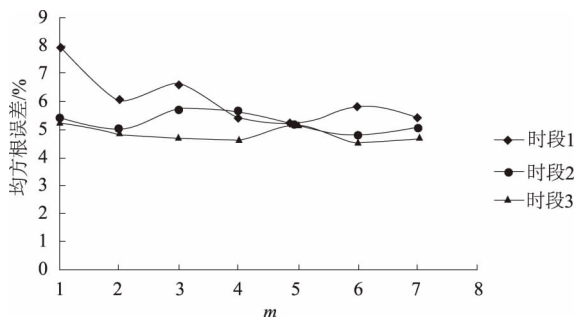


图4 相似风速区间个数 $m$ 对预测精度的影响  
Fig.4 Effect of the number of similar wind speed intervals on the prediction accuracy

由图4可知,随着 $m$ 的增大,预测精度变化不大,其主要原因是按相似度从大到小排列的风速区间,相似度较大的区间包含的样本信息已基

本可反映预测时段内影响因素的变化,过多地引入相似度较低的样本本质上已难以提高预测精度.为保证样本的信息量同时避免引入过多的冗余样本,这里 $m$ 取2.

#### 3.1.2 $H$ 值对预测结果的影响

首先以2个相似度最高的风速区间内的数据作为历史输入样本,逐渐改变 $H$ 的大小,观察比较不同 $H$ 取值下基于点预测的均方根误差变化,结果如图5所示.

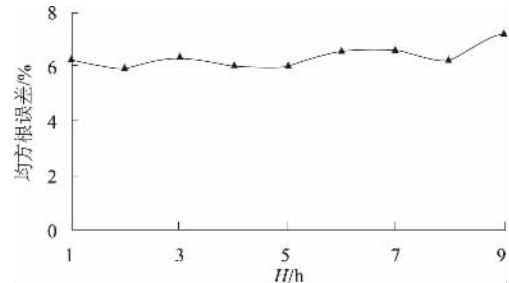


图5 预测时段前 $H$ 小时的样本对预测精度的影响  
Fig.5 The influence on the prediction accuracy of the sample of  $H$  hours of the forecast period

由图5可知,随着 $H$ 值的不断增大,预测误差在一定范围内波动,可见在引入相似风速区间样本的基础上,预测时段 $(t_k, t_k + 6)/h$ 前 $H$ 小时的数据样本对提高预测模型的准确性作用不明显,但从丰富样本信息方面考虑,适当引入前 $H$ 小时的样本数据可提供较多的不确定信息,综合考虑, $H$ 设为6.

### 3.2 算法有效性

#### 3.2.1 与已有算法比较

针对不同风速区间,将笔者所提算法与广泛应用的BP神经网络、广义回归神经网络(general regression neural network, GRNN)和径向基网络(radial basis function, RBF)进行比较.各算法在不同风速区间的预测性能如表1所示.

由表1可以看出,在相同的训练样本和测试样本条件下,4种方法对不同风速区间的预测结果有共同的趋势:随着风速的不断增大,预测区间的平均宽度逐渐增大,说明大风速区间对功率输出产生更大的不确定性影响.在保证预测区间满足一定可靠性的基础上( $PICP > 90\%$ ),与RBF方法相比,ESN具有较小的区间宽度,因此具有更高的可靠性和实用价值.

#### 3.2.2 不同预测时长下模型的预测结果

为进一步说明笔者所建模型的鲁棒性,考虑不

同时长短期风电功率的预测性能,结果如表 2 所示.

表 1 不同方法对风电功率预测的结果  
Tab.1 Results of different methods  
for wind power prediction

风速区间 / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	方法	PICP/%	MPIW/%
3.40 ~ 11.87	ESN	91.67	12.64
	BP	84.72	11.47
	GRNN	87.50	17.41
	RBF	90.28	13.89
4.30 ~ 12.74	ESN	91.67	20.15
	BP	86.11	21.28
	GRNN	76.39	20.77
	RBF	91.67	27.70
6.94 ~ 14.53	ESN	91.67	20.92
	BP	83.33	20.03
	GRNN	80.56	21.50
	RBF	87.50	19.65
8.31 ~ 12.21	ESN	94.44	22.68
	BP	95.83	21.85
	GRNN	86.11	27.06
	RBF	88.89	23.23

表 2 不同预测时长的预测结果  
Table.2 Prediction results of different forecasting  
time scales of the proposed model

预测时长 /h	参数 $l$	PICP/%	MPIW/%
12	3	87.50	13.44
	4	90.28	18.49
24	3	81.25	12.48
	4	84.72	17.34

图 6 和图 7 为表 2 中预测时长 12 h 的预测区间结果,预测时长 24 h 的结果与之类似,这里不再赘述.图中实线表示输出功率预测区间的上下限,圆圈为测试样本的真实输出功率.

从表 2 及图 6~7 中可以看出,预测区间基本覆盖了真实值,较传统的点预测能更好地量化预测的不确定性.

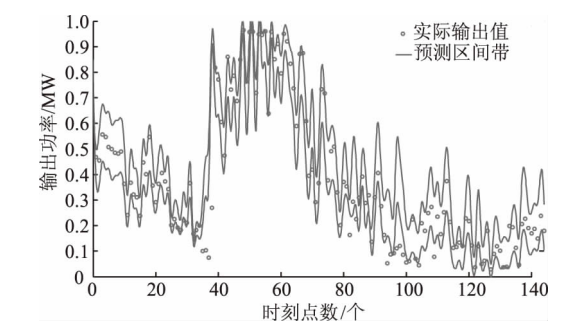


图 6  $l=3$ , 预测时长 12 h  
Fig.6 Prediction interval of 12 hours with  $l=3$

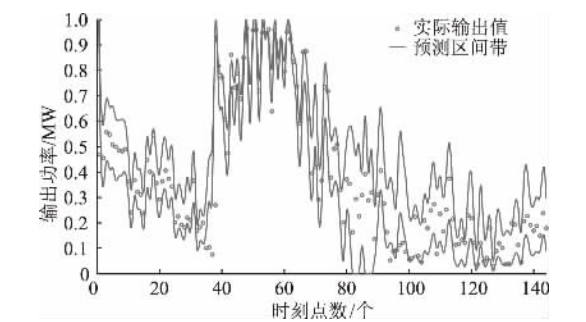


图 7  $l=4$ , 预测时长 12 h  
Fig.7 Prediction interval of 12 hours with  $l=4$

4 结论

针对目前风电功率预测大都基于点预测或在点预测的基础上进行误差分布的研究,笔者提出了一种基于新的区间样本和回声状态网络的风电功率不确定性区间预测模型,给出了一种基于相似日的含不确定性的区间样本选择策略,根据各影响因素选择预测时段前  $H$  小时和相似风速区间的样本.基于回声状态网络构建区间预测模型,计算风电输出功率的上下限;最后通过仿真实验验证了所提方法的有效性.结果表明,预测区间不仅能描述预测时段内风电功率的波动范围,而且可靠性较高的预测区间有利于经济调度,降低系统运行的风险.相比于传统的神经网络,ESN 模型计算量小、训练速度快,利用 ESN 的在线学习算法能有效提高模型输出的稳定性,使预测区间具有更好的性能.

参考文献:

[1] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.

[2] 薛禹胜,郁琛,赵俊华,等.关于短期及超短期风电功率预测的评述[J].电力系统自动化,2015,39(6):141-150.

[3] 冯双磊,王伟胜,刘纯,等.风电场功率预测物理方法研究[J].中国电机工程学报,2010,30(2):1-6.

[4] FOLEY A M, LEAHY P G, MARVUGLIA A, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation [J]. Renewable energy, 2012, 37(1): 1-8.

[5] 徐敏,袁建洲,刘四新,等.基于改进粒子群优化算法的短期风电功率预测[J].郑州大学学报(工学版),2012,33(6):32-35.

[6] CHITSAZ H, AMJADY N,ZAREIPOUR H. Wind power



- forecast using wavelet neural network trained by improved clonal selection algorithm [J]. *Energy conversion and management*, 2015, 89: 588 – 598.
- [7] HUANG D Z, GONG R X, GONG S. Prediction of wind power by chaos and BP artificial neural networks approach based on genetic algorithm [J]. *Journal of electrical engineering & technology*, 2015, 10(1): 41 – 46.
- [8] SAEZ D, AVILA F, OLIVARES D, et al. Fuzzy prediction interval models for forecasting renewable resources and loads in microgrids [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2015, 6(2): 548 – 556.
- [9] HAO D, SRINIVASAN D, KHOSRAVI A. Short-term load and wind power forecasting using neural network-based prediction intervals [J]. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2014, 25(2): 303 – 315.
- [10] WAN C, XU Z, PINSON P, et al. Probabilistic forecasting of wind power generation using extreme learning machine [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2014, 29(3): 1033 – 1044.
- [11] 章国勇, 伍永刚, 张洋, 等. 一种风电功率混沌时间序列概率区间简易预测模型 [J]. *物理学报*, 2014, 63(13): 430 – 438.
- [12] 罗熊, 黎江, 孙增圻. 回声状态网络的研究进展 [J]. *北京科技大学学报*, 2012, 34(2): 217 – 222.
- [13] RONALDO R B, OTONI N N, RAMON B, et al. Investigating the use of echo state networks for prediction of wind power generation [C] // *Computational intelligence for engineering solutions (CIES)*. Orlando: IEEE, 2014: 148 – 154.
- [14] ALOLYANI. Algorithm for interval linear programming involving interval constraints [C] // *World congress on engineering and computer science (WCECS)*. Francisco: CA, 2013: 145 – 149.
- [15] 范高峰, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于人工神经网络的风电功率预测 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(34): 118 – 123.
- [16] MACIEL L, GOMIDE F, SANTOS D, et al. Exchange rate forecasting using echo state networks for trading strategies [C] // *IEEE conference on computational intelligence for financial engineering and economics (CIFER)*. London, England: IEEE, 2014: 40 – 47.
- [17] 王杰, 裴群康, 彭金柱. 极限学习机优化及其拟合性分析 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37(2): 20 – 24.
- [18] ZHANG L, SUGANTHAN P N. A survey of randomized algorithms for training neural networks [J]. *Information sciences*, 2016, 364: 146 – 155.

## Forecast of wind power generation with uncertainty based on interval sample and echo state network

SUN Xiaoyan, SHI Liangzhen, XU Ruidong, ZHANG Yong

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The wind power forecasting was essential to the stability control of the grid connected operation, the economical dispatch, and so on. However, due to the variety of nature of wind, wind power had great uncertainties. Effectively expressing the uncertainties in wind power forecasting is crucial for improving the reliability of the forecast. Most existing methods focused on point forecasting, which can hardly quantify the uncertainties. To overcome the weakness, this paper proposed a novel interval-based forecasting model to quantify the uncertainties. A new interval sample selection method was firstly presented to reflect the uncertainties of wind power based on similar days and interval similar metric. Secondly, the echo state network were designed to predict the interval-based wind power in a short time due to its merits in time series predictions. The outstanding stability of the forecasting model was guaranteed by employing the recursive least squares algorithm to adjust the output weights of the echo state network. The prediction interval coverage probability (PICP) and mean prediction interval width (MPIW) were applied to evaluate the performance of our interval forecast on wind power. The experiments empirically demonstrated the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** wind power forecasting; uncertainty; interval sample; echo state network



# 一种多特征提取及融合的虹膜识别方法

张震, 刘博, 李龙

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 经典虹膜识别算法只提取单一的虹膜特征, 提出一种采用多种特征提取及融合的虹膜识别算法. 该算法首先对采集到的虹膜图像进行预处理, 然后分别采用 Log-Gabor 滤波和 Haar 小波对预处理后图像进行特征提取, 并用 Hamming 距离和加权欧式距离计算得到两个相似度, 通过支持向量机 (support vector machine, SVM) 对相似度进行融合, 得到匹配结果. 实验证明, 该算法有效, 并能取得较高的识别率.

**关键词:** 虹膜识别; 多特征提取; Log-Gabor 滤波; Haar 小波; 特征融合

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.004

## 0 引言

随着信息技术和网络技术的发展, 钥匙、密码等传统的身份认证方法易遗失、易伪造, 已经不能满足现代社会生活的需要, 而有效、可靠的身份认证方法是保证信息系统安全的必要前提. 基于生物特征识别的身份认证中, 虹膜识别作为重要的生物特征识别技术, 具有普遍性、唯一性、稳定性、非侵犯性等优点, 已成为近些年的热点研究课题. 虹膜识别原理为对虹膜采集设备采集到的虹膜图像进行处理、特征编码和模式匹配来实现身份的识别认证, 因此系统可以分为虹膜图像采集、虹膜图像预处理、特征提取及模式匹配 4 个过程.

目前常用的虹膜识别方法主要由以下几种经典的方法发展而来: Daugman<sup>[1]</sup> 首先采用边缘检测和 Hough 变换的方法定位分割虹膜图像, 并提出了基于二维 Gabor 滤波虹膜特征提取方法, 将滤波结果的相位信息进行编码, 并通过 Hamming 距离计算分类. Wildes 等<sup>[2]</sup> 采用微积分算法确定虹膜内外边界, 并采用拉普拉斯金字塔算法获得不同分辨率的虹膜纹理图像, 然后计算相关系数并利用 Fisher 线性变换进行分类. Boles<sup>[3]</sup> 提出了基于小波变换过零点的算法, 检测小波变换的过零点以及相邻过零点之间的小波变换积分后的平

均值作为虹膜特征, 构造相似形函数进行匹配. 此外还有 Lim<sup>[4]</sup> 提出了以 Haar 小波对虹膜进行滤波分解并二值化编码, 以及基于多尺度 Gabor 滤波器的虹膜识别算法, 基于灰度共生矩阵虹膜识别算法, 基于尺度不变特征转换的虹膜识别算法等.

与只提取单一的虹膜特征相比, 笔者提出了一种多特征提取及融合的虹膜识别方法, 与文献<sup>[5]</sup>在提取阶段进行特征融合不同, 笔者分别采用一维 Log-gabor 滤波器和二维 Haar 小波提取虹膜的两种特征, 在匹配阶段进行特征融合, 在通过使用 Hamming 距离和加权欧氏距离与虹膜特征库匹配计算相似度的基础上, 构造支持向量 SVM, 对计算得到的两个相似度进行融合, 实现识别分类, 得出识别结果. 在匹配阶段采用相似度融合的方法, 即在提取阶段兼顾了虹膜局部特征和全局特征, 并且有效地解决了不同算法提取特征的异构问题, 本文算法系统框图如图 1 所示.



图1 虹膜识别方法框图

Fig. 1 Block diagram of iris recognition method

收稿日期: 2016-10-19; 修订日期: 2016-11-13

基金项目: 河南省科技攻关计划项目 (152102210032)

作者简介: 张震 (1966—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事信号处理, 图像处理与模式识别研究,

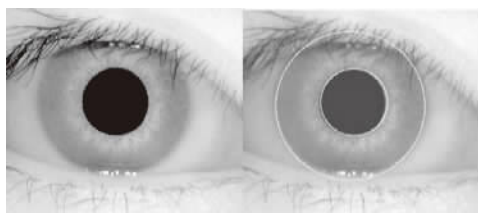
E-mail: zhangzhen66@126.com.

## 1 虹膜图像的采集

虹膜图像的采集环境复杂,高质量的虹膜图像使识别算法能够提取到足够多的虹膜特征,以便在模式匹配阶段有较高的识别率.但是由于虹膜直径约为 11 mm,面积较小,在采集过程中易受到各种因素的干扰,使采集到的虹膜图像有光斑、旋转、偏移、睫毛干扰、眼皮遮盖等现象,影响虹膜特征提取,降低了虹膜的正确识别率,所以虹膜图像采集技术是虹膜识别关键技术之一.由于虹膜采集设备的复杂性,笔者只对虹膜识别算法进行研究,采用中科院自动化研究所提供的 CASIA V1.0 虹膜图像数据库作为实验样本,进行虹膜识别算法的实验.

## 2 虹膜图像预处理

原始和定位后的虹膜图像如图 2 所示.采集得到的虹膜图像中不仅仅有虹膜,还包括了眼睑、睫毛、巩膜、瞳孔等部分,如图 2(a) 所示,因此不能直接用于虹膜图像的特征提取和模式匹配,需要对采集到的虹膜图像进行预处理.虹膜图像预处理包括虹膜定位分割、图像归一化和图像增强 3 个步骤.



(a) 原始虹膜图像 (b) 定位后虹膜图像

图 2 虹膜图像

Fig.2 Iris image

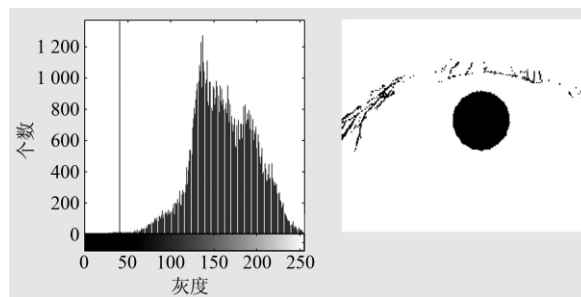
### 2.1 虹膜图像的定位分割

虹膜图像定位分割即通过定位算法在采集到的虹膜图像上确定虹膜与瞳孔边界和虹膜与巩膜边界,即虹膜内、外边界的圆心及半径,根据得到的定位结果进行图像分割,如图 2(b) 所示.笔者首先确定虹膜内边界,然后确定外边界,定位分割算法步骤如下.

1) 建立采集到的虹膜图像的灰度直方图,因为图像中瞳孔像素灰度小于虹膜灰度,虹膜灰度又大于巩膜灰度,所以,根据灰度直方图中灰度的峰谷值计算阈值,并根据确定的阈值对虹膜图像进行二值化操作,如图 3 所示.

2) 应用形态学中闭运算算法对二值化的虹膜

图像进行处理,如图 4 所示,去除睫毛等噪声<sup>[6]</sup>.



(a) 灰度直方图

(b) 二值化虹膜图像

图 3 二值化的虹膜图像

Fig.3 Binarized iris image



(a) 二值化虹膜图像

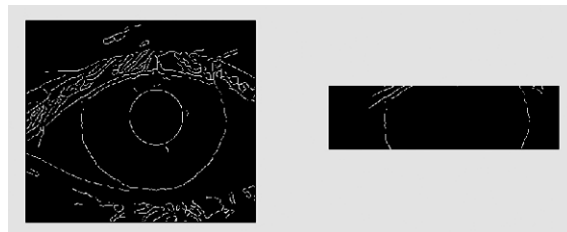
(b) 闭运算后虹膜图像

图 4 闭运算后的虹膜图像

Fig.4 Iris image after closing operation

3) 将闭运算处理后的虹膜图像按行和列进行像素点灰度累加计算,峰值即瞳孔内一点,通过 Canny 边缘检测算法提取边缘,由已知的瞳孔内一点作水平和垂直的两条直线与虹膜内边缘相交,根据已确定的 4 个边缘点和圆形的几何特性<sup>[7]</sup>求取虹膜内边界和圆心.

4) 由确定的内边界在虹膜图像的边缘二值化图像上截取感兴趣区域用于计算虹膜外边缘,如图 5(b) 所示,以最大可能排除睫毛、眼睑等干扰,提高虹膜定位算法的效率,采用最小二乘拟合圆算法求取虹膜外边界及圆心.



(a) 边缘二值化虹膜图像

(b) 感兴趣区域图像

图 5 虹膜边缘检测图像

Fig.5 Iris edge detection image

### 2.2 图像归一化

采用 Rubber Sheet 模型将分割得到的近似环形的虹膜图像由直角坐标转换为极坐标.

$$I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \rightarrow I(r, \theta). \quad (1)$$

如图 6 所示,用 Rubber sheet 模型消除采集虹膜图像时的平移、缩放和旋转等干扰,为虹膜图像的特征提取做准备,提高编码效率.

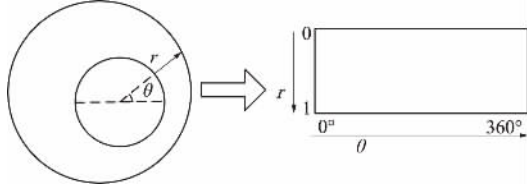


图 6 Rubber Sheet 模型

Fig. 6 The Rubber Sheet model

### 2.3 图像增强

由于归一化后的虹膜图像对比度较低,并不利于直接提取特征纹理,因此需要对归一化的图像进行处理,增强图像对比度,笔者采用直方图均衡化<sup>[8]</sup>的方法,如图 7 所示,增强虹膜纹理的对比度.

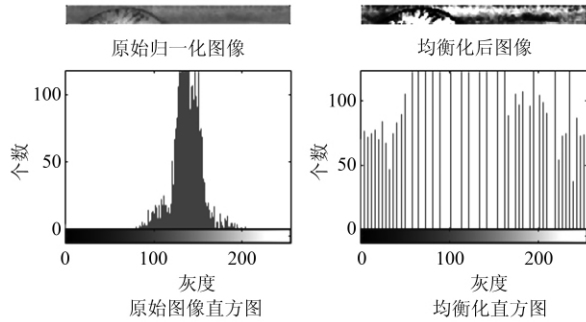


图 7 直方图均衡化

Fig. 7 The histogram equalization schematic

## 3 虹膜特征提取和匹配

### 3.1 Log-Gabor 滤波和 Hamming 距离

Field 提出的 Log-Gabor 滤波器<sup>[6]</sup>:

$$G(f) = \exp\left(\frac{-(\log(f/f_0))^2}{2(\log(\beta/f_0))^2}\right), \quad (2)$$

式中: $f_0$  代表滤波器的中心频率; $\beta/f_0$  为常数,保证了滤波器的形状不改变. Log-Gabor 滤波器除了有良好的多通道和多分辨率特性,并且没有直流分量,是严格的带通滤波器,在高频处弥补了 Gabor 滤波器对高频分量表达不足的缺点.

笔者采用一维 Log-Gabor 滤波器对归一化的虹膜图像进行滤波,将归一化图像中的每一行看作一维的信号,分别于一维 Log-Gabor 滤波器进行卷积,即先将归一化图像进行傅里叶变换,与一维 Log-Gabor 滤波器的频谱表达式在频域相乘,然后再将相乘结果进行傅里叶反变换<sup>[7]</sup>:

$$h_{\{Re, Im\}} = \text{sgn}_{\{Re, Im\}} \text{ifft}(G(f) \cdot \text{fft}(I(n))). \quad (3)$$

根据 Daugman 等人提出的虹膜识别算法<sup>[1]</sup>,对滤波结果进行相位编码,得到虹膜纹理二值化编码,编码规则为:

$$h_{Re} = \begin{cases} 1, & \text{Reifft}(G(f) \cdot \text{fft}(I(n))) \geq 0 \\ 0, & \text{Reifft}(G(f) \cdot \text{fft}(I(n))) < 0 \end{cases}; \quad (4)$$

$$h_{Im} = \begin{cases} 1, & \text{Imifft}(G(f) \cdot \text{fft}(I(n))) \geq 0 \\ 0, & \text{Imifft}(G(f) \cdot \text{fft}(I(n))) < 0 \end{cases}.$$

笔者计算待识别虹膜纹理二值化编码与虹膜特征数据库中二值化编码的 Hamming 距离,即统计两个二值化编码对应位不同的个数占总编码位数的比例,以此作为两个二值化编码的距离,即两个虹膜图像的相似度度量. 设  $A$ 、 $B$  是两个二值化特征模板,模式距离为:

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n A_i \oplus B_i, \quad (5)$$

式中: $\oplus$  为异或操作符; $N$  表示特征维数; $H$  表示模式距离,两个二值化编码对应位编码不同所占比例越大, $H$  值越大,相似度越小, $H$  值越小,则相似度越大,为消除虹膜采集的旋转、偏移,在计算时进行左右各 3 位的循环移位,取最小  $H$  值作为待识别虹膜与特征库虹膜的相似度.

### 3.2 Haar 小波和加权欧式距离

通过小波变换提取图像纹理特征,是图像识别中常用的分析方法. Haar 小波是一种最基本的正交小波、具有紧凑性、构造简单、计算方便等特点,笔者采用 Haar 小波对归一化的虹膜进行 3 层分解,从高尺度向低尺度进行,得到如图 8 所示的小波分解结果,分解出来的子图像称为小波分解通道: LL、HL、LH、HH. 每个通道子图像是原始图像在不同空间频率和方向选择下的信息. 根据原始图像的纹理在不同频率和方向下具有不同的能量特性,采用以下公式计算一系列小波通道的能量和方差作为虹膜图像的特征值.

$$f = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x(i, j), \quad (6)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - EC_n]^2}{MN - 1}}, \quad (7)$$

式中: $MN$  为小波通道的尺寸; $i, j$  分别代表了通道中行和列; $x(i, j)$  是该通道小波分解系数<sup>[5]</sup>.

笔者舍弃包含图像大部分噪声的 HH 通道,对如图 8 所示 LL3、HL3、LH3、HL2、LH2、HL1 和 LH1 通道进行特征值计算,从 7 个小波通道中提取到 14 个特征值作为虹膜特征向量.

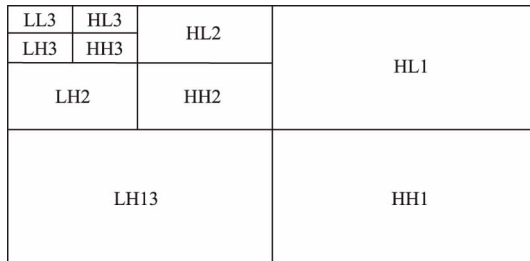


图 8 小波分解示意图

Fig. 8 The sketch map of wavelet transform

欧几里得度量又称作欧式距离,是适用于多维向量的距离定义,公式为:

$$W(k) = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - f_i^{(k)})^2}{(\delta_i^{(k)})^2}, \quad (8)$$

式中:  $f_i$  为未知样本的第  $i$  个特征;  $f_i^{(k)}$ 、 $\delta_i^{(k)}$  表示第  $k$  类虹膜的第  $i$  个特征的均值和方差;  $N$  表示特征总数. 把方差的倒数作为权值,使用加权欧氏距离来计算虹膜相似度<sup>[9]</sup>.

### 3.3 SVM 特征相似度融合及分类

支持向量机是 Cortes 和 Vapnik 于 20 世纪初首先提出的,它是一种二类分类模型,学习策略为特征空间上间隔最大化,最终可以转化为一个凸二次规划问题,在解决小样本非线性及高维模式识别中表现出许多特有的优势,其分类的查全率和查准率几乎超过了现有的所有方法,具有很好的泛化能力及其他机器学习方法不可比拟的优势<sup>[10]</sup>. 虹膜识别系统的特征库作为小样本系统,十分适合采用 SVM 进行模式匹配.

笔者使用多项式核函数实现认证模式下虹膜的两种特征相似度融合识别,将采用 Log-Gabor 滤波器处理和 Hamming 距离计算得到的相似度  $H_i$ ,采用 Haar 小波处理和欧式加权距离计算得到的相似度  $W_i$ ,作为 SVM 的二维输入样本,输入 SVM 分类器进行匹配分类<sup>[10]</sup>.

## 4 实验结果及分析

笔者采用中科院自动化研究所提供的 CASIA V1.0 虹膜数据库图像(108 类虹膜,每类虹膜有 7 幅,共 756 幅虹膜图像)作为本算法实现的实验样本,通过 MATLAB7.0 编程实现文中虹膜识别算法. 以正确识别率(correct recognition rate, CRR)、识别时间作为衡量算法性能的指标. 笔者将数据库中每个类的虹膜图像训练样本数由 1 个开始,增加到 6 个,剩下一个虹膜图像作为待识别实验样本,识别结果如图 9 所示,用于训练的样本数量越多,正确识别率越高,当训练样本数为 6 个

时,已经取得较好的识别效果.

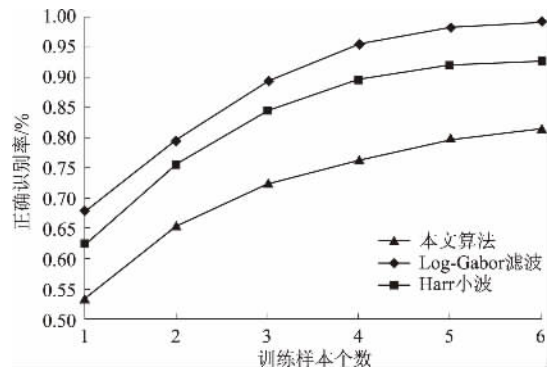


图 9 算法比较折线图

Fig. 9 The broken line graph of algorithm comparison

实验结果如表 1 所示,可以看出笔者提出的多特征提取融合匹配的方法虽然由于算法复杂使识别时间有所增加,但相较于单独特征提取匹配的方法,正确识别率有了大幅度的提高.

表 1 不同识别方法时的识别率和识别时间

Tab. 1 The recognition rate and time of different methods

算法	正确识别率/%	识别时间/ms
Log-Gabor 滤波	92.59	69.7
Haar 小波	81.48	48.3
本文算法	99.17	82.4

与经典算法的对比结果如表 2 所示,可以看出笔者提出的多特征提取融合匹配的算法虽然在正确识别率上与 Daugman 算法相比有所不足,但识别时间大大缩短,系统识别速度更快,与 Boles 算法相比,识别效果更好.

表 2 与经典算法的对比

Tab. 2 The comparison of classical methods

算法	识别率/%	识别时间/ms
Daugman 算法	99.31	365.3
Boles 算法	93.56	150.7
本文算法	99.17	82.4

## 5 结论

笔者分别采用 Log-Gabor 滤波器和 Haar 小波特征提取归一化虹膜图像的纹理特征,使用 Hamming 距离和欧式加权距离计算相似度,并运用生物识别技术中多特征融合的思想,通过 SVM 对相似度进行融合匹配分类. 实验结果证明了该算法的有效性,并能取得较高的识别率.

## 参考文献:

- [1] DAUGMAN J. How iris recognition works [J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2004, 14(1): 21 – 30.
- [2] WILDES R P. Iris recognition: An emerging biometric technology [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 85(9): 1348 – 1363.
- [3] BOLES W, BOASHASH B. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform [J]. IEEE transactions on signal processing, 1998, 46(4): 1185 – 1188.
- [4] LIM S, LEE K, BYEON O, et al. Efficient iris recognition through improvement of feature vector and classifier [J]. Journal of electronics and telecommunication research institute, 2001, 23(2): 61 – 70.
- [5] 周治平, 吴会军. 结合小波变换和 Log – Gabor 滤波的虹膜识别方法 [J]. 计算机应用, 2009, 29(8): 2095 – 2097.
- [6] 许威. 虹膜识别算法的改进与实现 [D]. 合肥: 安徽理工大学电气与信息工程学院, 2013.
- [7] 陈文静, 金华. 基于人脸与虹膜的多生物特征融合识别算法研究 [J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2015, 83(1): 77 – 79.
- [8] 张震, 张英杰. 基于支持向量机与 Hamming 距离的虹膜识别方法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 25 – 29.
- [9] 王蕴红, 朱勇, 谭铁牛. 基于虹膜识别的身份鉴别 [J]. 自动化学报, 2002, 28(1): 1 – 10.
- [10] 唐银凤, 黄志明, 黄荣娟, 等. 基于多特征提取和 SVM 分类器的纹理图像分类 [J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(6): 22 – 25 + 46.

## An Iris Recognition Algorithm of Multiple Features Extraction and Fusion

ZHANG Zhen, LIU Bo, LI Long

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

**Abstract:** In this paper, an iris recognition method of multiple features extraction and fusion was proposed, which was different from the classical iris recognition methods that focused on a single texture feature. Firstly, the collected iris images were preprocessed. Secondly, features of the iris were extracted by using Log-Gabor filter and Haar wavelet respectively, and two similarity values were calculated by adopting Hamming Distance and Weighted Euclidean Distance. Finally, the Support Vector Machine was used to fuse the values of similarity and classify. The experimental results verified that the proposed method is effective and a higher recognition rate was achieved.

**Key words:** iris recognition; multiple feature extraction; Log-Gabor filter; Haar wavelet; feature fusion



# 非均衡交通流五岔路口交通信号智能控制研究

董海龙, 汤旻安, 程海鹏

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为了缓解交通拥堵, 减少车辆在交叉口的等待时间, 针对五岔路口非均衡交通流, 采用基于人工鱼群算法的交通信号控制方法, 实现了五岔路口多相位变相序的智能控制. 该方法首先由红灯相位的车辆排队长度和红灯持续时间得到该红灯相位的通行紧急度, 把通行紧急度最高的相位作为下一绿灯相位; 其次, 将当前绿灯相位车辆排队长度和筛选出的下一绿灯相位车辆排队长度与当前绿灯相位车辆排队长度的差值作为输入, 利用模糊神经网络控制器实现绿灯延时. 为了避免模糊神经网络陷入局部最小值, 利用人工鱼群算法对模糊神经网络参数进行优化. 在不同的车辆到达率情况下进行仿真研究, 结果表明: 该方法比传统的控制方法在自动调节信号周期方面效果更好, 减少车辆平均延误 7.2% 左右.

**关键词:** 五岔路口; 交通信号; 模糊神经网络; 人工鱼群算法; 车辆平均延误

**中图分类号:** U491.51

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.005

## 0 引言

随着我国城镇化步伐的加快, 近年来城市道路上的汽车数量大幅度增加, 而土地资源有限导致城市道路的数量增幅不太明显, 从而造成城市交通拥堵, 给人们的生活带来了很大的困扰. 城市中的交通拥堵主要发生在交叉口, 而交叉口中五岔路口的交通流情况复杂, 一个方向的车流对应五个方向的流向, 合理地控制五岔路口能很好地改善交通拥堵情况. 面对时变的、非线性的、滞后的交通系统, 传统的定时控制已经很难得到满意的效果, 智能交通控制成为该领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>.

模糊控制是目前智能控制最重要的形式, 可以解决不基于精确数学模型的复杂非线性对象的控制难题<sup>[4-6]</sup>. 通过引入模糊逻辑语言变量及它们之间构成的模糊关系进行模糊推理, 从而进入那些精确模型无法控制的禁区, 以便获得基于精确模型控制所无法达到的精确的控制效果, 但模糊控制缺乏在线自学习能力. 神经网络对信息的处理具有自组织和自学习的特点, 便于联想和推广<sup>[7]</sup>. 如果能将模糊控制和神经网络结合起来运用到五岔路口的智能控制中, 将会对交通信号灯

控制带来极大的帮助<sup>[8-11]</sup>.

## 1 多相位变相序五岔路口控制算法

笔者的研究对象为五岔路口, 如图 1 所示, 五岔路口的车流来自 A、B、C、D、E 五个方向. 为了避免交叉口上各方向交通流之间的交叉冲突, 就要考虑合理的相位划分. 针对五岔路口的复杂情况, 经过调查研究, 提出如下的相位划分. 相位 1: A 交通流掉头、A 到 B、A 到 C、A 到 D、A 到 E; 相位 2: B 交通流掉头、B 到 A、B 到 C、B 到 D、B 到 E; 相位 3: C 交通流掉头、C 到 A、C 到 B、C 到 D、C 到 E; 相位 4: D 交通流掉头、D 到 A、D 到 B、D 到 C、D 到 E; 相位 5: E 交通流掉头、E 到 A、E 到 B、E 到 C、E 到 D.

在每个方向安装一个高像素摄像头, 实时提取车流画面, 通过处理画面, 得到每个车道上的车辆排队长度. 在交通信号控制过程中, 每个相位的最小绿灯时间为 15 s, 以免车辆和行人来不及通过路口, 造成交通事故; 最大绿灯时间为 50 s, 如果某相位红灯时间太长, 驾驶员心理上难以接受.

城市交通流的随机性非常强, 尤其五岔路口受交通流分布的影响很大, 对于传统的定时控制这必然会出现某一获得通行权的相位车流量很小甚至

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 甘肃省科技支撑计划资助项目(1304GKCA023); 兰州市科技攻关计划资助项目(2013-4-18)

通信作者: 汤旻安(1973—), 男, 陕西勉县人, 兰州交通大学副教授, 博士, 主要从事智能交通系统、智能控制研究,

E-mail: tma\_1113@163.com.

为零,而其它相位车流量很大并且长时间得不到通行.对于交通状况复杂的五岔路口而言,固定相序控制无法保证信号相序与实际交通流状况的一致性,会影响绿灯时间的利用率.因此,在现实交通中,需要更加灵活且相序可随机选择的控制策略.

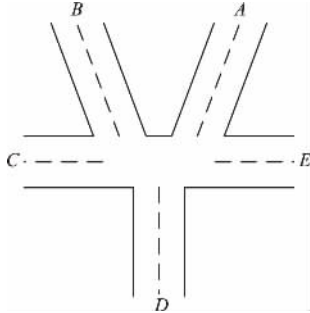


图1 五岔路口交通模型

Fig.1 Traffic model of five-road intersection

变相序控制的基本思想:通过相位选择模块计算出当前各红灯相位的通行紧急度,并选择通行紧急度最高的相位为下一绿灯相位;通过绿灯延时模块确定当前绿灯相位的绿灯延长时间.变相序控制器的结构如图2所示.

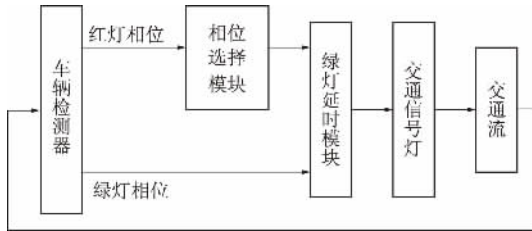


图2 变相序控制器的结构

Fig.2 The structure of variable phase sequence controller

以减小车辆平均延误为目标,笔者给出如下控制算法.

Step1: 从  $i$  相位开始,分别指定各相位的最短绿灯时间  $G_{imin}$  和最长绿灯时间  $G_{imax}$ . 各相位的最短绿灯时间为 15 s,最长绿灯时间为 50 s.

Step2: 给出  $i$  相位的初始绿灯时间  $G_i = G_{imin}$ .

Step3: 绿灯时间结束时,根据 4 个红灯相位的车辆排队长度和红灯持续时间筛选出通行紧急度最高的相位,获取当前绿灯相位的车辆排队长度  $L_i$  和通行紧急度最高相位的车辆排队长度  $L_{i+1}$ .

Step4: 若  $L_i$  为 0,则将绿灯转换到下一相位,转 Step1; 否则继续.

Step5: 根据  $L_i$  和  $\Delta L = L_i - L_{i+1}$  的值来确定当前相位的绿灯延长时间  $\Delta G$ . 若  $\Delta G < 5$ ,则将绿灯转换到下一相位,转 Step1; 否则累计绿灯时间  $G_i = G_i + \Delta G$ . 若  $G_i \geq G_{imax}$ ,则  $\Delta G = G_{imax} - G_i$ ,将绿灯转换到下一相位,转 Step1; 否则转 Step3.

## 2 交通信号模糊控制

本文的变相序控制器包括 2 个子模糊控制器,分别是相序选择模块和绿灯延时模块.模糊控制器由 3 部分核心组成:模糊化模块、近似推理模块和清晰化模块<sup>[12]</sup>.笔者采用 MATLAB 中模糊工具箱提供的图形用户界面,建立交通灯模糊控制系统.

### 2.1 模糊化

绿灯延时模块为双输入单输出,  $L_i$  和  $\Delta L$  代表输入变量,  $\Delta G$  代表输出变量.  $L_i$  为当前绿灯相位的车辆排队长度,其基本论域为  $[0 \ 19]$ ,量化因子为 1,模糊论域范围为  $\{1, 2, \dots, 19\}$ ,7 个语言值为 VS(很短)、S(短)、LS(较短)、M(中等)、LL(较长)、L(长)、VL(很长),隶属度函数如图 3(a)所示.  $\Delta L$  为下一绿灯相位的车辆排队长度与当前绿灯相位的车辆排队长度的差,其基本论域为  $[-18 \ 18]$ ,量化因子为 0.5,模糊论域为  $[-9 \ 9]$ ,模糊论域范围为  $\{-9, -8, \dots, 9\}$ ,7 个语言值为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、0(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大),隶属度函数如图 3(b)所示.  $\Delta G$  为当前绿灯相位的绿灯延时,其基本论域为  $[0 \ 24]$ ,比例因子为 1,模糊论域范围为  $\{0, 1, \dots, 24\}$ ,7 个语言值为 VF(很短)、F(短)、LF(较短)、M(中等)、LR(较长)、R(长)、VR(很长),隶属度函数如图 3(c)所示.

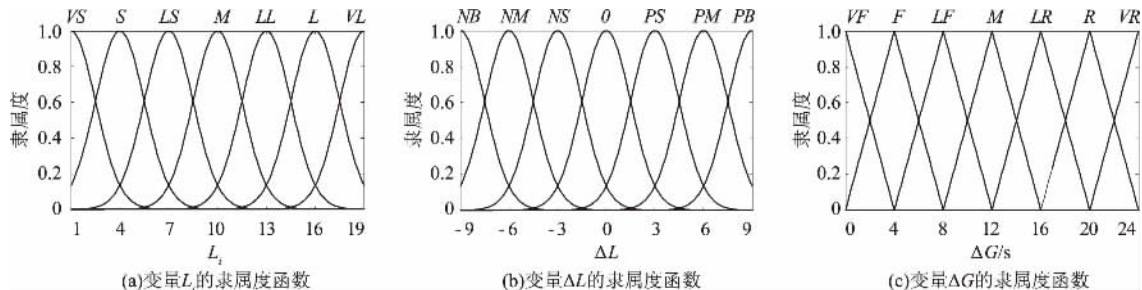


图3 隶属度函数

Fig.3 Membership function

## 2.2 近似推理

模糊规则的建立是非常重要的,它将直接关系到整个控制器的性能好坏.根据交通调查情况以及交警和专家的实际操作经验和知识,归纳总结出能正确反映交通信号的控制规则表,如表1所示.

表1 模糊控制规则  
Tab. 1 Rules of fuzzy control

$\Delta L$	$L_i$						
	VS	S	LS	M	LL	L	VL
NB	VF	F	LF	M	LR	R	VR
NM	VF	F	LF	M	LR	R	VR
NS	VF	F	LF	M	LR	R	VR
O	VF	VF	F	LF	M	LR	R
PS	VF	VF	F	LF	M	LR	R
PM	VF	VF	VF	F	LF	M	LR
PB	VF	VF	VF	F	LF	M	LR

## 2.3 清晰化

常见的清晰化方法:重心法、最大隶属度法和面积平分法.笔者采用重心法,理论上该方法是几种清晰化方法中最直观合理的.在论域 $\Delta G = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ 上, $\mu_j$ 处的隶属度为 $A(\mu_j)$ ,则 $\Delta G$ 的精确值由下式算出:

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j A(\mu_j)}{\sum_{j=1}^n A(\mu_j)}. \quad (1)$$

MATLAB 的仿真结果如图4所示,从光滑的曲面图中可以看出,绿灯延时 $\Delta G$ 随 $L_i$ 值的增加而变大,同时随 $\Delta L$ 值的减小而变大.

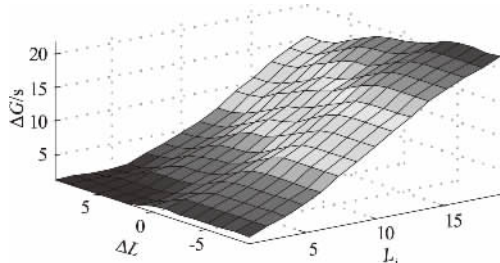


图4 输出量曲面观测窗  
Fig. 4 Output surface viewer

## 3 基于人工鱼群算法的交通信号控制

### 3.1 模糊神经网络(FNN)

两输入单输出的交通信号模糊神经网络模型如图5所示,共有6层.

第1层是输入层,2个节点,对应 $L$ 和 $\Delta L$ 两个输入变量.

第2层和第3层实现输入变量的模糊化.第3层有14个节点,表示14个语言变量值,分别为

$L$ 的7个语言变量值和 $\Delta L$ 的7个语言变量值.在神经网络中,利用2个Sigmoid函数之差,可得到近似高斯形的隶属度函数,如 $\mu(LS) = \frac{1}{1 + \exp(-2x + 10)} - \frac{1}{1 + \exp(-2x + 18)}$ ,所以输入变量的模糊化用了2层网络,第2层是Sigmoid传递函数,第3层是线性传递函数,这2层的初始权值和阈值可以由计算提前得到.

第4层和第5层完成模糊推理.第4层有49个节点,表示49条模糊规则.第5层有7个节点,对应输出 $\Delta G$ 的7个语言值.

第6层是清晰化的过程,只有1个节点,最后的输出为绿灯延时 $\Delta G$ .

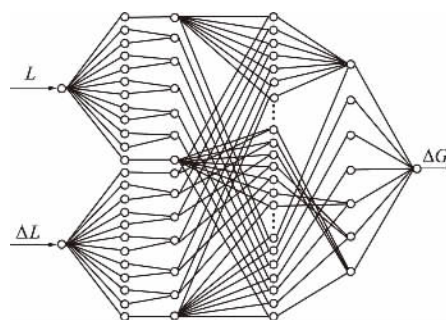


图5 模糊神经网络控制器结构  
Fig. 5 Structure of fuzzy neural network controller

在MATLAB中完成了上述的模糊神经网络模型的搭建,由上述模糊控制得到模糊神经网络的训练样本集如表2所示,100组数据中选择80组数据作为网络训练数据,20组作为测试数据.网络的误差性能达到了期望值0.001.训练数据、验证数据、测试数据和总数据的输出与期望值吻合的很好,相关系数达到了0.9以上.

### 3.2 人工鱼群算法

人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)是受鱼群行为的启发,由李晓磊博士提出的一种基于动物行为的群体智能优化算法<sup>[13]</sup>.

在一片水域中,鱼往往能自行或尾随其他鱼,找到食物源多的地方,因而鱼生存数目最多的地方一般就是本水域中食物源最多的地方.人工鱼群算法根据这一特点,通过构造人工鱼来模仿鱼群的觅食、聚群、追尾及随机行为,从而实现问题的寻优.

人工鱼群算法流程如下:

1) 确定种群规模 $fishnum$ ,在变量可行域内随机生成 $fishnum$ 个个体,迭代次数 $gen$ ,设定人工鱼的可视域 $visual$ ,半径为 $r$ ,步长 $step$ ,拥挤度因子 $\delta$ ,尝试次数 $try\_number$ .

2) 计算初始鱼群各个体适应值,取最优人工

鱼状态及其值赋给公告板。

3) 个体通过觅食、聚群和追尾行为更新自己,生成新鱼群。

4) 评价所有个体.若某个体优于公告板,则将公告板更新为该个体。

5) 当公告板上最优解达到满意误差界内,则算法结束,否则转3。

### 3.3 人工鱼群算法优化模糊神经网络

传统的模糊神经网络方法容易陷入局部最小值,而AFSA具有鲁棒性强、较快的寻优速度和较优的全局收敛能力,利用AFSA对模糊神经网络进行优化,建立一种新的控制模型。

模糊神经网络的训练学习过程主要是第3层与第4层之间的连接权值的修正。AFSA寻优的过程主要是其位置的改变,因此模糊神经网络的权值与人工鱼群的位置相对应。模糊规则层神经元的个数为49个,所以需要训练49个连接权值,49个权值对应一个49维的人工鱼。以车辆平均延误的倒数作为AFSA的食物浓度。在每次迭代

过程中,如果人工鱼当前所在位置的食物浓度优于公告板中的值,则将公告板进行更新,直到达到满意的目标函数值。具体取值如下:人工鱼种群规模100,最大迭代次数60,人工鱼的可视域0.6,移动步长0.1,拥挤度因子0.618,最多试探次数100。

## 4 仿真研究

笔者以西宁市胜利路、黄河路和五四大街所形成的五岔路口为例,根据当地的实际情况对此五岔路口进行仿真研究。编写C++语言仿真程序,利用该仿真程序对五岔路口在各种不同的非均衡交通流情况下进行仿真。假设各相位车辆随机产生,某一秒钟车辆的到达数量在0.0~0.3辆/s之间。交叉口最大通行能力为0.3辆/s,车流从红灯转变为绿灯后以0.5辆/s的速率离开交叉口,每周周期绿灯损失时间为17s。表3给出了10个周期的车辆到达率,根据所给的车辆到达率进行仿真,得到表4所示的10个周期各相位的绿灯时间。

表2 训练样本集

Tab. 2 Training data array

$\Delta L$	$L_i$									
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
-9	2.25	3.84	5.57	8.01	10.6	13.4	16.0	18.4	20.2	21.8
-7	2.25	3.84	5.57	8.00	10.6	13.4	16.0	18.4	20.2	21.7
-5	2.25	3.84	5.57	8.00	10.6	13.4	16.0	18.4	20.1	21.7
-3	2.17	3.84	5.52	7.92	9.87	12.7	15.1	17.7	19.4	20.6
-1	2.25	3.25	4.97	6.24	8.16	11.2	13.6	16.0	17.8	19.6
1	1.57	1.98	3.30	4.89	6.83	9.60	12.2	14.6	17.4	19.3
3	1.26	1.57	3.08	4.63	6.54	8.92	11.1	13.8	16.7	18.3
5	1.31	1.56	3.08	3.91	5.39	7.33	9.63	12.1	15.2	16.9
7	1.31	1.56	1.62	2.57	4.10	5.75	8.23	10.8	13.6	15.5
9	1.26	1.31	1.35	2.18	3.84	5.57	8.01	10.6	13.4	15.3

表3 车辆到达率

Tab. 3 Vehicle arrival rates

(辆/s)

路口	周期序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
东五四大街	0.30	0.29	0.27	0.05	0.03	0.06	0.27	0.28	0.14	0.08
西五四大街	0.28	0.27	0.28	0.27	0.05	0.04	0.25	0.27	0.17	0.05
北黄河路	0.25	0.23	0.06	0.29	0.28	0.28	0.18	0.17	0.13	0.07
南黄河路	0.26	0.05	0.05	0.28	0.26	0.27	0.19	0.15	0.15	0.09
胜利路	0.03	0.04	0.07	0.26	0.28	0.05	0.06	0.16	0.12	0.08

五岔路口车辆延误计算公式如下。

某一相位中红灯方向的车辆总延误:

$$D_R = \sum_{i_2=1}^n \left[ \sum_{i=1}^x (Q_{iR} + \sum_{t_1=1}^{t_2} q_{it_1}) \right], \quad (2)$$

式中: $n$ 表示某一相位持续的时间; $x$ 表示停止方向数,当绿灯相位是五四大街时, $x=13$ ,当绿灯相

位是黄河路或胜利路时, $x=14$ ;  $Q_{iR}$ 表示当前相位开始时第*i*方向未走完的车辆数; $q_{it_1}$ 表示当前相位第*i*方向第*t<sub>1</sub>*秒内的车辆到达数。

某一相位中绿灯方向的车辆总延误:

$$D_G = \sum_{i_2=1}^n \sum_{i=1}^y Z_i \left( Q_{iG} + \sum_{t_1=1}^{t_2} q_{it_1} - 0.5t_2 \right), \quad (3)$$

式中:  $n$  表示某一相位持续的时间;  $y$  表示放行方向数, 当绿灯相位是五四大街时,  $y = 4$ , 当绿灯相位是黄河路或胜利路时,  $y = 3$ ;  $Q_{ig}$  表示当前相位开始时第  $i$  方向未走完的车辆数;  $q_{it_1}$  表示当前相位第  $i$  方向第  $t_1$  秒内的车辆到达数; 0.5 表示车辆离开率. 当  $Q_{ig} + \sum_{t_1=1}^{t_2} q_{it_1} - 0.5t_2 > 0$ ,  $Z_i = 1$ ; 否则,  $Z_i = 0$ .

第  $j$  相位车辆总延误:

$$D_j = D_R + D_G. \quad (4)$$

平均车辆延误:

$$d = \frac{\sum_{j=1}^m D_j}{A}, \quad (5)$$

式中:  $m$  表示总的相位数量;  $A$  表示某个周期的所有方向车辆到达数量的总和.

表 4 AFSA 优化 FNN 的仿真结果

Tab. 4 The simulation results of AFSA optimized FNN

路口	周期序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
东五四大街	50	48	46	15	15	25	43	45	38	23
西五四大街	48	49	50	48	23	23	40	50	42	15
北黄河路	43	45	21	50	50	48	36	33	29	22
南黄河路	42	20	15	45	42	45	33	35	36	26
胜利路	15	15	22	46	43	21	15	32	33	27

笔者分别用定时控制、感应控制、模糊控制、模糊神经网络控制和 AFSA 优化的模糊神经网络控制 5 种方式对西宁市五岔路口进行了仿真, 以每个周期的车辆平均延误时间作为控制指标, 来判断 5 种控制各自的控制性能. 经过多次仿真, 得到的结果如表 5 所示. 从中可以看出, 感应控制比定时控制降低了车辆平均延误时间 3.1%; 模糊

控制比定时控制降低了车辆平均延误时间 3.7%; 模糊神经网络控制比定时控制降低了车辆平均延误时间 5.4%; AFSA 优化的模糊神经网络控制比定时控制降低了车辆平均延误时间 7.2%; AFSA 优化的模糊神经网络控制比感应控制降低了车辆平均延误时间 4.3%.

表 5 车辆平均延误时间仿真结果

Tab. 5 The simulation results of the average delay of vehicles

方法	周期序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
定时控制	8.86	7.93	7.21	8.32	6.78	7.13	4.52	5.86	7.13	6.57
感应控制	8.61	7.69	7.02	7.96	6.63	6.92	4.40	5.73	6.86	6.26
模糊控制	8.64	7.62	6.91	7.98	6.57	6.85	4.42	5.79	6.72	6.14
模糊神经网络	8.46	7.50	6.78	7.76	6.48	6.77	4.29	5.71	6.61	6.05
AFSA 优化 FNN	8.32	7.37	6.62	7.65	6.36	6.64	4.21	5.57	6.53	5.94

## 5 结论

1) 对于时变的和非线性的五岔路口非均衡交通流, 传统的定时控制已经很难满足当前的需要, 智能控制在控制效果上有很大的改善.

2) 将模糊控制与神经网络结合起来运用到五岔路口的智能控制中, 克服了模糊控制缺乏自学习和自调整的缺陷.

3) 人工鱼群算法以较强的鲁棒性和较优的全局收敛能力优化模糊神经网络参数, 避免模糊神经网络陷入局部最小值, 使控制效果进一步提高.

4) 交通信号的智能控制动态地调整绿灯延

长时间, 对交通流进行实时控制, 有效地降低了车辆平均延误, 自适应能力强, 提高了绿灯时间利用率, 弥补了传统控制车道无车辆但信号灯为绿灯的缺陷. 作者后续将考虑干线控制和区域控制, 使设计的交叉口控制系统进一步协调, 以满足复杂和特殊的中国交通情况.

## 参考文献:

- [1] PAPPIS C P, MAMDANI E H. A fuzzy logic controller for a traffic junction [J]. IEEE transactions on systems man and cybernetics, 1977, 7(10): 707-717.
- [2] 臧利林, 贾磊, 林忠琴. 基于模糊逻辑的交通信号控制



- 与仿真研究[J].公路交通科技,2006,23(4):124-127.
- [3] MILANES V, PEREZ J, ONIEVA E, et al. Controller for urban intersections based on wireless communications and fuzzy logic [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2010, 11(1): 243-248.
- [4] 曹洁,苏玉萍,吴国龙,等.城市交通信号灯两级模糊控制及仿真研究[J].交通与计算机,2007,25(1):82-85.
- [5] 李忠勤,范红刚,董金波.单交叉口交通信号的模糊控制[J].黑龙江科技学院学报,2011,21(4):306-311.
- [6] 曹艳玲,梁法明,刘孟楠,等.基于模糊决策的大型客车电动助力转向系统研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(3):64-67.
- [7] 刘红红,杨兆升.基于神经网络的实时交通信号控制与仿真研究[J].交通运输系统工程与信息,2008,8(2):43-47.
- [8] 申时凯,余玉梅.模糊神经网络在信息安全风险评估中的应用[J].计算机仿真,2011,28(10):91-94.
- [9] LIN C J, CHEN C H. Identification and prediction using recurrent compensatory neuro-fuzzy systems [J]. Fuzzy set and systems, 2005, 150(2): 307-330.
- [10] 许伦辉,习利安,袁路生.孤立交叉口多相位自适应模糊控制及其神经网络实现[J].中国公路学报,2005,18(3):90-93.
- [11] 段鹏飞,段兰兰,田琦.ANFIS在供热管网泄漏故障诊断中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(4):56-60.
- [12] 赵国生,董艳艳.变电站电压无功模糊控制器的设计[J].郑州大学学报(工学版),2013,34(4):55-58.
- [13] 李晓磊,邵文江,钱积新.一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J].系统工程理论与实践,2002(11):32-38.

## Research on Intelligent Control of Traffic Signal for Five-road Intersection of Unbalanced Traffic Flow

DONG Hailong, TANG Minan, CHENG Haipeng

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to alleviate traffic congestion and reduce the time of vehicles waiting, of unbalanced intersection, this paper adopted a traffic signal control method based on artificial fish swarm algorithm, which could achieve multi-phase and variable phase sequence intelligent control at five-road intersection. Firstly, the passable urgency of a red light phase was decided according to its vehicle queuing length and the red light duration; and the highest passable urgency phase should be the next green light phase. Secondly, the current vehicle queuing length of green light phase and the difference between vehicle queuing length of the next and current green light phase were taken as the inputs. The fuzzy neural network controller was used to control delays of the green light. In order to avoid fuzzy neural network falling into local minimum, artificial fish swarm algorithm had optimized the parameters of it. After simulation studies in the case of different rates of vehicle arrival, the results showed that this method was better than the traditional control in automatically adjusting the signal cycle, which reduced the average delay of vehicles for about 7.2%.

**Key words:** five-road intersection; traffic signal; fuzzy neural network; artificial fish swarm algorithm; average delay of vehicles

# 全矢谱技术在 WTDS 实验台故障诊断中的应用

韩捷, 张钱龙

(郑州大学 振动工程研究所, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对如何准确地诊断风力发电机齿轮箱故障的问题, 从全矢谱技术理论分析着手, 在处理风力涡轮机动力传动故障诊断综合实验台实验数据的过程中, 全面介绍全矢谱技术的应用方法. 实验结果表明, 基于同源信息融合的全矢谱技术在风力涡轮机动力传动故障诊断综合实验台上, 能正确地找到预设的故障位置, 并准确地判断出故障性质.

**关键词:** 全矢谱; 风力涡轮机; 故障诊断

**中图分类号:** TH17 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.032

## 0 引言

风力发电机可以有效地将风能转化为电能, 近年来逐渐受到人们的关注. 然而, 这些大型设备一旦出现故障, 将会造成巨大的经济损失. 据世界风力发电网数据, 风力发电机系统的失效率 12% 来自齿轮箱的失效<sup>[1]</sup>. 齿轮箱的失效是导致故障时间长、维修费用高和经济效益低的主要原因, 一般其损失要占风电设备总价的 15% ~ 20%<sup>[2]</sup>. 由于工作环境复杂, 风力发电系统齿轮箱主要在轴承和齿轮方面容易出现故障. 因此, 如何通过准确的诊断方法来提高其可靠性, 是我们需要解决的问题.

近年来, 基于信息融合的全矢谱技术在设备故障诊断中逐步显现出优越性. 目前, 郑州恩普特设备诊断工程有限公司在线监测系统用该方法实时分析电厂汽轮机、水泥厂立磨减速机机组振动数据, 大大提高了系统可靠性; 雷文平等<sup>[3]</sup>将其应用到转子动平衡中, 提出转子全矢动平衡法, 提高转子动平衡精度; 王植申等<sup>[1]</sup>将其应用到风力发电系统齿轮箱轴承的故障诊断中, 并取得了较好的结果.

在风力发电机齿轮箱故障诊断中, 王植申等在判断故障所在位置时, 只通过单通道测量值简单对比得出结论, 在处理早期故障的振动数据时, 由于数据差别不大, 采用这样的直接方法是行不

通的; 在判断故障性质时没有通过与单通道数据进行对比, 证明全矢谱技术在判断故障性质时所体现出的先进性, 其主要说明了全矢谱技术能准确提取振动特征. 而笔者主要目的是以风力涡轮机动力传动故障诊断综合实验台 (wind turbine drivetrain diagnostics dimulator, WTDS) 小齿轮缺齿故障为实验对象, 在实验过程中用全矢谱计算方法处理实验数据, 通过各测点间全矢谱的横向对比来验证全矢谱技术能正确找到故障位置; 通过单个测点的全矢谱及其单通道频谱的纵向对比来证明全矢谱技术在判断故障性质上的优越性.

## 1 全矢谱计算方法

全矢谱算法不仅可以在平面上对同源信号进行融合, 同时还可以在三维空间进行推广<sup>[4-5]</sup>.

由于转子涡动现象的存在, 转子在旋转过程中, 其各阶频率轴心轨迹是一个椭圆. 如图 1 所示, 如果用单向传感器测量, 方向不同, 所测的各阶振幅也不同, 所以在频率结构上会产生较大误差, 进而导致故障的误判、错判.

由文献 [4] 可知

$$\begin{cases} X_{ci} = \frac{1}{2} [\text{Re}Z_i + \text{Re}Z_{N-i}]; \\ X_{si} = \frac{1}{2} [\text{Im}Z_i - \text{Im}Z_{N-i}], \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-03-27; 修订日期: 2015-05-10

**基金项目:** 河南省教育厅科学技术研究重点项目指导计划资助(13B603970.0); 河南省高等学校精密制造技术与工程重点学科开放实验室开放基金资助项目(PMTE201302A)

**作者简介:** 韩捷(1957—), 男, 河南安阳人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事设备故障机理及智能诊断技术等方面的研究和产品开发, E-mail: hj\_em@163.com.

$$\begin{cases} Y_{ci} = \frac{1}{2} [\text{Im}Z_i + \text{Im}Z_{N-i}]; \\ Y_{si} = \frac{1}{2} [\text{Re}Z_i - \text{Re}Z_{N-i}], \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $X_{ci} = X_i \cos \phi_{xi}$ ,  $X_i, \phi_{xi}$  分别为离散信号  $\{x_i\}$  的振幅和相位角;  $X_{si} = X_i \sin \phi_{xi}$ ;  $Y_{ci} = Y_i \cos \phi_{yi}$ ,  $Y_i, \phi_{yi}$  分别为离散信号  $\{y_i\}$  的振幅和相位角;  $Y_{si} = Y_i \sin \phi_{yi}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ .

由式 (1) 和 (2) 可得出主振矢为

$$\begin{cases} R_{ak} = \frac{1}{2N} [|Z_k| + |Z_{N-k}|]; \\ R_{bk} = \frac{1}{2N} [|Z_k| - |Z_{N-k}|], \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $k = 1, 2, \dots, N/2 - 1$ . 根据全矢谱运算方法得到的椭圆轨迹主振矢  $R_a$  和副振矢  $R_b$ , 可以准确地知道转子故障信号幅值谱的频谱结构.

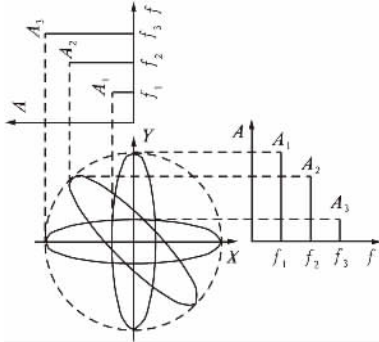


图 1 单向信号测量出不同频率结构

Fig. 1 Different frequency structures of unidirectional signal

## 2 实验部分

### 2.1 实验过程

郑州大学振动工程研究所新引进的 WTDS 实验台是专门诊断风力发电机传动系统各种故障的综合性实验台,如图 2 所示.

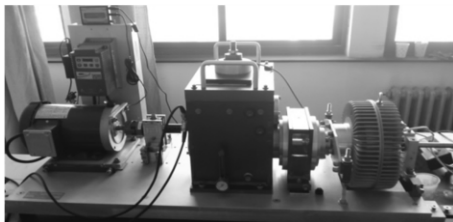


图 2 WTDS 实验台

Fig. 2 The experimental station of WTDS

WTDS 传动系统主要包括一个由套筒轴承支撑的 2 级平行轴齿轮箱、一个齿轮轴径向负载、一个 1 级行星齿轮箱和一个磁力制动器组成. 该实

验台可模拟直齿和斜齿齿轮的齿面磨损、点蚀、轮齿裂纹、断裂以及缺齿等故障,也可模拟滚动轴承内圈、外圈、滚动体故障及其耦合故障. 这些故障的模拟便于故障诊断技术和先进信号处理方法的研究. 为了使实验结果更加清晰,本次实验对象为单一的输入轴小齿轮故障.

本次实验所使用的检测设备为 PDES-E (设备状态监测与安全评价仪). PDES-E 点、巡检系统采用便携式故障诊断仪器客观准确地收集有关设备运行的各类参数,可以由仪器自带传感器直接测量多种参量信息 (如机器的振动、温度、压力、转速、流量等). 对于点、巡检仪上传的各类数据,提供各种分析统计方法,如常规的趋势分析与预测,对于采集的振动数据还可以进行波形分析、频谱分析、相关分析、功率谱分析等. 对于多通道多转子截面还可以提供全矢谱、全息谱等信息融合的方法,从而深入分析设备存在的故障原因<sup>[6]</sup>. 根据故障特点,实验采用加速度传感器进行振动测量.

### 2.2 测量过程

齿轮箱的 3 根轴分别命名为: 与电机端相连接的轴为输入轴; 与行星齿轮箱相连接的轴为输出轴; 余下的传动轴称为中间轴. 输入轴两端分别为测点 1、2, 中间轴的两端为测点 3、4, 由于输出轴的输出无法安装传感器, 只在另一端设置一个测点 5. WTDS 齿轮箱和测点分布简图如图 3 所示.

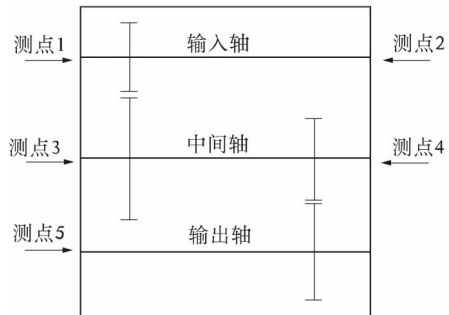


图 3 WTDS 齿轮箱和测点分布简图

Fig. 3 The gear box and the measuring points distribution diagram of WTDS

利用 PDES-E 中加速度传感器对 5 个测点进行振动信号采集,采集过程中由于实验台的原因,在每个测点安装传感器时,并不能保证两个通道是绝对的水平与竖直方向,但两通道始终保持着垂直关系,如图 4 所示.

在下文中所指的水平方向  $x$  信号和竖直方向

$y$  信号都是相对的,并非绝对的. 齿轮箱一级减速齿数比为 100/29,二级减速齿数比为 90/35,输入轴转速为 3 600 r/min,即旋转频率为 60 Hz,则中间轴和输出轴的旋转频率分别为 17.4 Hz 和 6.8 Hz. 采样频率为 7 680 Hz,采样点数为 4 096. PDES-E 测得各测点  $x$  和  $y$  信号,对测得的数据进行处理,得到各测点信号频谱图如图 5~7 所示.

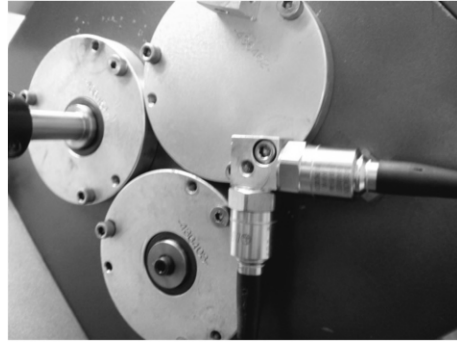


图 4 传感器安装位置

Fig. 4 Sensor installation location

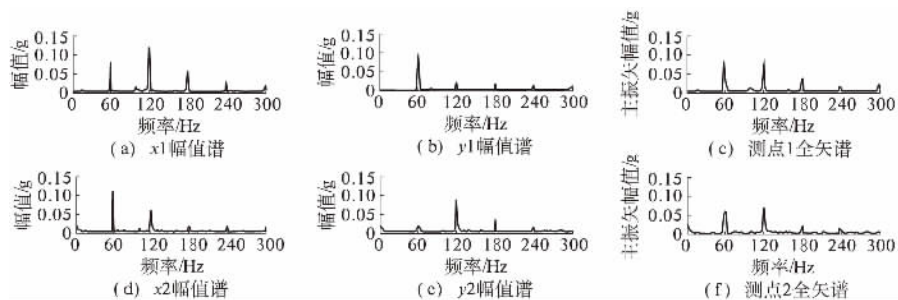


图 5 输入轴测点 1,2 幅值谱和全矢谱

Fig. 5 The amplitude spectrum and full vector spectrum of input shaft measuring points 1,2

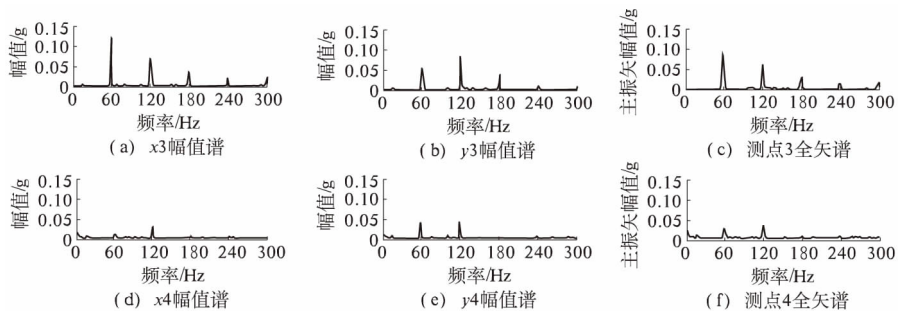


图 6 中间轴测点 3,4 幅值谱和全矢谱

Fig. 6 The amplitude spectrum and full vector spectrum of intermediate shaft measuring points 3,4

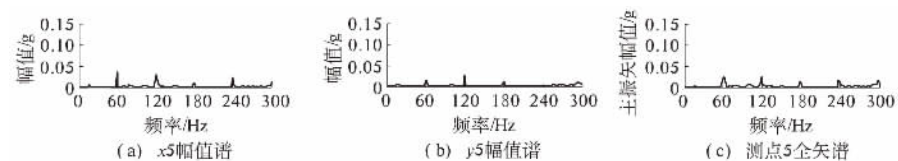


图 7 输出轴测点 5 幅值谱和全矢谱

Fig. 7 The amplitude spectrum and full vector spectrum of output shaft measuring point 5

对各测点振动幅值进行分析: 图 5 中输入轴两端测点 1 和 2 振动幅值较大; 图 6 则可以看出中间轴两端测点 3 振动幅值较大, 而测点 4 振动幅值就比较小; 图 7 中测点 5 的振动比较小, 与测点 4 的振动比较类似. 这主要是因为测点 1、2 和 3 振幅比测点 4 和 5 大, 结合图 3 测点分布, 由振动的能量传递关系可知, 可能是输入轴或者中间轴部件出现故障. 横向对比: 对比测点 1、2 和 3 的

$x$  或  $y$  单通道幅值时, 单从各测点单通道幅值谱分析, 比较 3 个测点  $x$  通道振幅和  $y$  通道振幅大小时会判断出不同的故障位置, 造成误判; 对比测点主振矢大小, 1 和 3 测点振幅比测点 2 大, 可推测是输入轴和中间轴大小齿轮啮合时出现故障, 准确判断出故障位置. 5 个测点频谱图有一个共同点就是分别在频率为 60、120 和 180 Hz 处有比其他频率较大的振动幅值, 输入轴频率又为 60

Hz,因此可推断输入轴小齿轮出现故障.要判断出故障性质,还需对测点1的信号振动特征作进一步分析.纵向对比:图5中, $x_1$ 通道二倍频振幅大于一倍频是转子平行不对中的故障特征; $y_1$ 通道具有强烈的一倍频能量,属于转子不平衡的故障特征,同一个位置的测点得出两种不同的故障,故出现误判.而对比分析测点1的主振矢特征,以输入轴的转频及其高次谐波有较大的振幅并且振动冲击逐渐减小,是典型的齿轮缺齿或局部断裂故障特征.综上,通过全矢谱分析,可判断该故障是输入轴小齿轮缺齿故障,这与实验所用的小齿轮相吻合.从上述实验结果可以看出,在WTDS实验台上,单独以单通道振动特征判断故障所在的位置及其性质与实验所用的小齿轮缺齿故障是有差别的,而在该实验中利用全矢谱技术所判断出的故障位置与性质和实验预设故障是相符的.

### 3 结论

笔者简单介绍了全矢谱的快速计算方法,并分别通过在WTDS实验台上运用单通道测量与基于同源信息融合的全矢谱技术,对比发现:基于同源信息融合的全矢谱技术在WTDS实验台上

能正确地找到预设的故障位置,并准确地判断出故障性质.同时,上述实验也证明了运用全矢谱技术的WTDS实验台可以作为大型风力发电机组齿轮箱故障诊断的实验平台,为机组故障诊断提供现场应用.

### 参考文献:

- [1] 王植申,韩捷,陈宏,等.基于全矢谱的风力发电系统齿轮箱的故障诊断研究[J].机械设计与制造,2011(11):109-111.
- [2] AMIRAT Y, BENBOUZID M E H, AI-AHMAR E, et al. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2009 (13): 2629-2636.
- [3] 雷文平,韩捷,陈宏,等.全矢动平衡方法及其实验研究[J].中国工程机械学报,2011,9(1):103-107.
- [4] 韩捷,石来德.全矢谱技术及工程应用[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [5] 韩捷,张瑞林.旋转机械故障机理及诊断技术[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [6] 李小丽. PDES设备安全评价点巡检系统在漳村煤矿的应用[J].煤,2011,20(12):52,91.

## The Application of Full Vector Spectrum Technology in Fault Diagnosis of WTDS Experimental Platform

HAN Jie, ZHANG Qianlong

(Institute of Vibration Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to accurately diagnose the wind turbine gear box fault, the application of full vector spectrum was fully introduced in an experimental data processing of wind turbine drivetrain diagnostics simulator (WTDS). The result showed that full vector spectrum technology which based on homologous information fusion could find the correct preset fault location and accurately determine the nature of the fault on WTDS.

**Key words:** full vector spectrum; wind turbine; fault diagnosis



# 基于螺栓联接非线性系统的杆式超声电机建模与分析

陶 征, 胡 斌, 刘 旭

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对当前杆式超声电机设计中通常采用连续复合材料结构形式的有限元模型而导致计算精度不足的问题, 提出了在螺栓预紧力条件下的杆式多自由度超声电机振子的建模方法, 并分析了螺栓预紧力和联接面摩擦系数对振子模态频率的影响. 实验表明, 考虑螺栓连接非线性因素的有限元分析方法对电机各阶工作模态频率的计算误差分别只有 0.05%、0.47%、0.64%, 有着很好的计算精度, 该结果说明考虑螺栓联接非线性的有限元模型更有利于电机性能的设计和预估.

**关键词:** 超声电机; 电机振子; 螺栓联接; 非线性

**中图分类号:** TM356 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.006

## 0 引言

超声电机的结构动态特性设计是电机设计过程中的一个重要内容<sup>[1-3]</sup>. 而建立准确反映电机结构动态特性的动力学模型是必要的前提和保障, 其中解析法和有限元法是两种最主要的方法, 如文献[4-6]. 解析法对于复杂结构而言, 往往需要进行结构的简化和条件假设处理. 因此, 很难满足求解的精度要求, 具有一定的局限性.

鉴于此, 有限单元法的结构动力学分析已成为现阶段超声电机结构设计中最主要的方法. 然而, 根据笔者的研究发现, 长期以来, 在诸如纵扭超声电机、单定子多自由度超声电机等杆式超声电机的结构设计过程中, 电机振子的有限元模型大都采用连续复合材料结构形式, 与实际多个结构由螺栓连接而成出入较大, 使得分析计算结果与试验所得相差甚远. 因此, 建立准确的有限元模型非常必要.

笔者以杆式电机中单定子多自由度超声电机振子的设计研究为基础, 探讨了在螺栓预紧力条件下电机振子的建模方法, 并分析了螺栓预紧力和联接面摩擦系数对振子模态频率的影响, 并通过实验分析验证了有限元模型的精度.

## 1 问题的提出

单定子多自由度超声电机由于能够提供两个

或两个以上自由度的运动, 而具有较高的机械集成度, 这一特点使得该电机在构建结构简单、紧凑小巧的机械传动系统方面, 尤其在微创手术以及航天工程的某些特殊结构等方面有着良好的应用前景, 因而, 具有重要研究意义.

### 1.1 电机工作原理

如图1所示, 单定子多自由度超声电机的振子由上、中、下3个金属弹性体、一组纵振陶瓷片和两组弯振陶瓷片以及连接螺栓等部件构成. 其中, 纵振陶瓷片组 PZTC 用于激发振子的1阶纵振模态; 弯振陶瓷片组 PZTA 及 PZTB 在空间上垂直布置, 分别用来激发振子在空间上相互垂直的两个2阶弯振模态, 如图2所示.

当 PZTA、PZTB 两组弯振陶瓷片同时施加相位相差 90° 的高频交流电时, 电机振子在压电陶瓷的逆压电效应作用下产生两个时空相差 90° 的弯曲振动模态(a)、(b). 则振子端部质点通过模

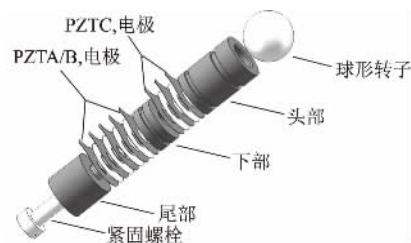


图1 电机振子结构示意图

Fig.1 The structure diagram of the motor vibrator

收稿日期: 2016-08-25; 修订日期: 2016-10-18

基金项目: 机械结构力学及控制国家重点实验室开放课题项目(MCMS-0314G02); 河南省基础与前沿技术研究项目(152300410040)

作者简介: 陶征(1970—), 男, 河南汝南人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事超声电机方面的研究, E-mail: taozheng@zzu.edu.cn.

态运动的合成,形成椭圆形轨迹的运动(简称椭圆运动).通过摩擦驱动转子实现绕  $Z$  轴旋转.同理,在 PZTA、PZTC 或 PZTB、PZTC 两组陶瓷片上同时施加相位相差  $90^\circ$  的高频交流电时,振子将同时产生纵振(c)和弯振(a或b),此时,振子端部质点通过两种模态运动合成驱动转子绕  $X$  轴或  $Y$  轴旋转.

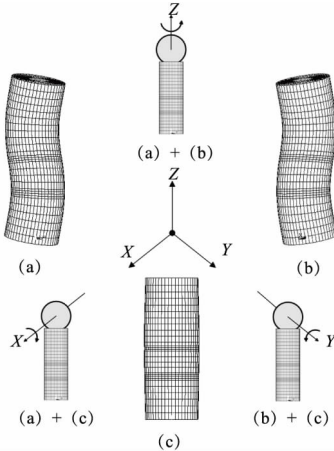


图 2 电机工作原理

Fig. 2 The operating principle diagram of the motor

### 1.2 基于连续体有限元模型的设计

由上述可知,振子驱动端面质点形成的椭圆运动是实现电机驱动的必备条件之一,即要求纵、弯两个振动模式能在同一激励信号作用下达到共振状态,然而根据振动理论,两种异形模态在同一等截面直杆中频率一般是不相等的.为了获得较高的工作效率,实现电能对机械能的最大转换,对单定子多自由度超声电机的振子结构进行合理的设计,确保纵、弯两个工作模式频率具有较高的一致性(频率差值  $< 100$  Hz),是电机振子设计中的关键问题.

现有资料显示<sup>[7-8]</sup>,在定子体开设环形槽,是实现杆式超声电机振子频率一致性的有效方法.如前所述,当前在杆式超声电机的结构设计过程中,电机动态特性的结构动力学模型大都采用连续复合材料结构形式.因此,笔者在初始研究过程

中,基于已有的建模方法,从提高电机输出性能的角度出发,利用 ANSYS 有限元分析软件对电机振子进行计算和分析.

材料属性如表 1 所示,电机定子金属材料 and 压电材料分别由 SOLID45 和 SOLID5 两种单元定义.模型共有 9 348 个单元,11 932 个节点,边界条件为自由-自由.

表 1 材料参数

Tab. 1 The material parameter

材料	密度 / ( $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	弹性模量 / GPa	泊松比
磷青铜	8.96	113	0.32
45#钢	7.85	206	0.24
PZT8	7.50	—	—

表 1 中,PZT8 压电材料性质包括压电应力矩  $[e]$ 、弹性系数矩阵  $[c]$ 、介电系数矩阵  $[\epsilon]$ ,分别为:

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -6.1 \\ 0 & 0 & -6.1 \\ 0 & 0 & 15.7 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[c] = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 3 & 0 & 0 \\ & & & & 2.6 & 0 \\ & & & & & 2.6 \end{bmatrix};$$

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} 7.124 & 0 & 0 \\ 0 & 7.124 & 0 \\ 0 & 0 & 5.841 \end{bmatrix}.$$

经反复试算,最后得到一种较满意的方案,该设计方案中,电机振子各金属弹性体部分结构尺寸参数如图 3 所示,(压电陶瓷尺寸规格事先已选定),各工作模式频率如表 2 所示(计算结果最大偏差仅有 16 Hz).

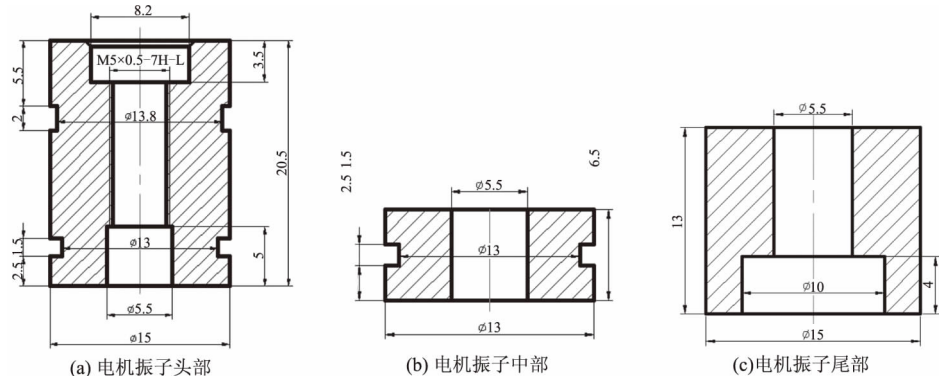


图 3 电机振子结构参数

Fig. 3 The structural parameters of the motor vibrator

表 2 连续体有限元模型的工作模式频率  
Tab.2 The working mode frequency of the  
continuum finite element model Hz

2 阶弯振频率 I	2 阶弯振频率 II	1 阶纵振频率
37 791	37 793	37 807

### 1.3 样机试验分析

基于图 3 结构参数加工、制造的电机样机振子如图 4 所示。



图 4 样机振子

Fig.4 The prototype motor vibrator

对样机振子采用 PSV-300F-B 型激光扫描多普勒测振仪器进行扫频测试,结果如图 5 所示,各阶模式频率如表 3 所示。

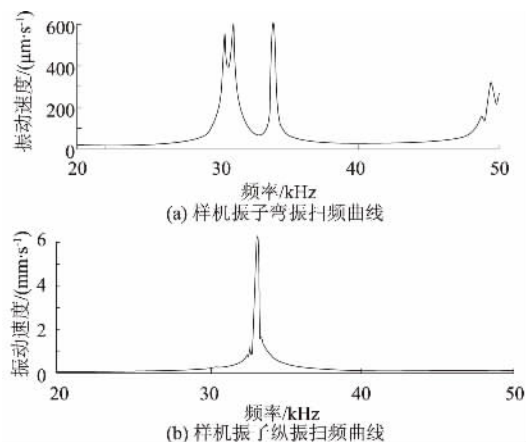


图 5 扫频测试曲线

Fig.5 The scanning frequency test curves

表 3 样机振子的测试模式频率

Tab.3 The test mode frequency of the  
prototype motor vibrator Hz

2 阶弯振频率 I	2 阶弯振频率 II	1 阶纵振频率
30 445	30 507	33 179

由表 2、3 可知,基于连续体有限元模型的模态频率计算结果与电机振子的试验测试结果相差甚远,两者之间的误差分别为:2 阶弯振频率(I、II) 24%、23%,1 阶纵振频率 13%。

上述结果说明基于连续体的有限元建模方法不能满足对该电机振子结构动态特性设计要求。因此,寻求准确的有限元建模方法是解决这一问题的前提。

## 2 基于螺栓联接的非线性系统的建模和分析

螺栓联接是机械结构中常见的联接方式,在螺栓连接结构中,螺栓预紧力的作用势必导致各组件间接触表面产生不同的接触应力和接触面粗糙度而形成分布不均的法向接触刚度和阻尼的非线性<sup>[9]</sup>,这种接触界面的复杂行为将对结构整体的动态特性产生显著影响。

单定子多自由度超声电机的振子(如图 1 所示)正是由多个子结构通过螺栓连接而成,其联接界面的局部刚度和阻尼的非线性是影响结构整体动态特性主要因素。而基于连续体假设的有限元模型由于不能准确反映电机振子因接触面的存在所导致的复杂非线性现象,使得计算结果与实验值往往相差较大。因此,为了提高结构动力学模型的精度,应该考虑螺栓联接对结构动态特性的影响。

鉴于此,我们仍以图 4 所示样机为对象,利用 ANSYS 有限元分析软件,采用接触单元和非线性算法对振子的动态特性进行验证分析计算。

有限元模型如图 6 所示,模型采用六面体单元扫掠网格划分以避免畸形单元出现,并适当增加压电陶瓷单元划分密度以提高有限元模型分析精度。考虑到联接界面是影响结构整体动态特性的主要因素,在有限元建模过程中,忽略螺纹连接,将螺母与螺杆融为一体。其中,金属材料 and 压电材料依然分别采用 SOLID45 和 SOLID5 两种单元。根据振子结构特点,忽略电极片(电极片的厚度 0.1mm),采用面-面接触单元 TARGE170 和 CONTA174 进行接触对定义,同一接触对的接触面和目标面有相同实常数号,接触法向为各自外法线方向,如图 7 所示,共 9 对。TARGE170 模拟刚性目标面、CONTA174 模拟柔性接触面。



图 6 振子的有限元模型

Fig.6 The finite element model of the vibrator

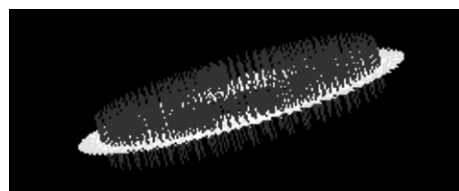


图 7 接触对的定义

Fig.7 The definition of contact pairs

螺栓预紧力的施加通过 ANSYS 提供的 PTS-MESH 和预紧力单元 PRETS179 模拟. 预紧力截面通过 PTSMESS 将已划分网格的螺杆模型联接件切成两部分,并插入预紧力单元定义.

预紧力的大小由工程实际中螺栓预紧力估算公式<sup>[10]</sup>:  $F = M / (Kgd)$  获得. 其中,  $F$  为螺栓轴向预紧力;  $M$  为扭矩;  $K$  为扭矩系数 (0.11 ~ 0.15);  $d$  为螺栓公称直径.

$FKN$  法向接触刚度因子是影响精度和收敛行为的关键,一般来讲,  $FKN$  的取值越大则计算精度越高,然而,对于非线性计算来讲则收敛越困难,为兼顾二者的关系适当选取  $FKN$  的取值. ANSYS 给出的  $FKN$  取值范围为 0.01 ~ 10.

该模型共有 18 009 个单元,25 858 个节点,边界条件为两端自由,螺栓预紧力由公式估算 3 000 N,  $FKN$  值根据收敛情况最终设定为 0.64,综合考虑各接触面间接触情况,摩擦系数定为 0.4.

模态分析过程中,电机振子螺栓联接结构各处应力由结构静态非线性(接触状态为不分离(永远))求解获得,进而把应力以附加刚度的形式叠加到电机振子整体结构之上,最终得到基于螺栓联接非线性系统杆式电机振子各阶工作模态频率,如表 4 所示.

表 4 接触模型各阶工作模态频率

Tab.4 The working mode frequency of the contact model

Hz		
2 阶弯振频率 I	2 阶弯振频率 II	1 阶纵振频率
30 300	30 311	33 194

各阶工作模态频率(表 4)表 3 可知,考虑螺栓预紧力的有限元模型的模态频率计算结果与电机振子的试验测试结果之间的误差分别为:2 阶弯振频率(I、II) 0.47%、0.64%,1 阶纵振频率 0.045%.说明在对杆式超声电机设计中,基于螺栓联接结构下的杆式电机建模方法更接近实际情况.接触模型各阶振型图如图 8 所示.

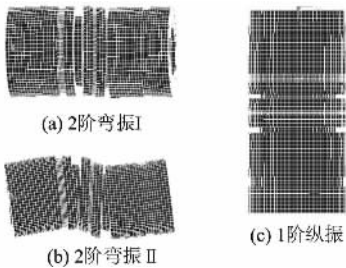


图 8 有限元模型各阶振型图

Fig.8 The vibration modes diagram of the contact model

3 不同预紧力和摩擦系数对模态频率的影响

电机振子动态特性与其结构刚度、螺栓预紧力以及联接面间的摩擦系数等有着密切关系.因此,研究不同预紧力以及摩擦系数对振子模态频率的影响是非常有必要的.

表 5 是基于图 6 所示有限元模型(法向刚度为 0.64,摩擦系数 0.5)在不同预紧力条件下该有限元模型的模态频率计算结果.

表 5 不同螺栓预紧力下的各阶振动频率

Tab.5 The vibration frequency under different bolt pretension

预紧力 /N	2 阶弯振频率 I/Hz	2 阶弯振频率 II/Hz	1 阶纵振频率 /Hz
2 200	30 291	30 301	33 195
2 400	30 293	30 304	33 195
2 600	30 295	30 306	33 194
2 800	30 298	30 309	33 194
3 000	30 300	30 311	33 194

从表 5 可知,随着螺栓预紧力的增加,振子的模态频率也逐渐增加,但变化很小.分析原因,主要是非线性计算的收敛是一个非常麻烦的问题,涉及因素诸多.为了确保计算收敛,我们把预紧力设定在了电机振子合理装配所需预紧力的狭小范围之内,然而,尽管条件的设定尚欠完善,但对问题的研究还是具有一定的参考作用.

表 6 是在法向刚度为 0.64,预紧力为 3 000 N 的条件下,有限元模型在不同摩擦系数下模态频率的计算结果.

表 6 不同摩擦系数下的各阶振动频率

Tab.6 The vibration frequency under different friction coefficients

摩擦系数	2 阶弯振频率 I/Hz	2 阶弯振频率 II/Hz	1 阶纵振频率 /Hz
0.40	29 302	29 312	33 186
0.45	29 833	29 843	33 190
0.50	30 300	30 311	33 194

由表 6 可知,联接面间的摩擦系数对电机振子的动态性能有一定影响.电机振子模态频率随联接面的摩擦系数的增大而增大.

由此可见,对于有着螺栓连接结构的杆式超声电机的振子在进行动态特性的设计过程中,其联接界面预紧力及摩擦应予以考虑,以获得更接近实际情况的分析模型.

#### 4 结论

当前,在对杆式超声电机振子进行动力学设计时,通常以连续复合材料结构的有限元模型进行简化.由于忽略了实际结构中螺栓连接所带来的非线性因素,这种情况直接导致在电机设计中较大的计算偏差从而无法很好地满足对电机的设计要求.针对这一问题,笔者提出了基于螺栓联接非线性系统的杆式超声电机的有限元精确建模分析方法,并在此基础上,分析得到了不同预紧力、摩擦系数对模态频率的影响规律.实验表明,考虑螺栓连接所带来的非线性因素的有限元分析方法与连续复合材料结构形式的有限元分析方法相比,设计频率与实测频率偏差降低了 24%,说明考虑螺栓联接非线性系统影响的有限元模型更有利于电机性能的设计和预估,因此,该方法对杆式类超声电机的设计具有一定借鉴意义.

#### 参考文献:

- [1] 吴文才.多自由度超声电机设计与应用研究[D].南京:南京航空航天大学航空宇航学院,2014.
- [2] 陶征,刘本学.行波型超声电机与纵扭型超声电机的比较[J].郑州大学学报(工学版),2009,30(3):60-64.
- [3] 陈超,赵淳生.基于半解析法的旋转型行波超声电机定子的动态特性分析[J].中国机械工程,2005,16(21):1940-1944.
- [4] ZHOU G. The performance and design of ultrasonic vibration system for flexural mode [J]. Ultrasonics, 2000,38: 979-984.
- [5] BUDINGER M, ROUCHON J, NOGAREDE B. Analytical modeling for the design of a piezoelectric rotating mode motor [J]. ASME transactions on mechatronics, 2004,9(1): 1-9.
- [6] CAROTENUTO R, CALIANO G, IULA A. Langevin flexural piezoelectric motor based on stator precessional motion [J]. Sens actuators, 2004,A113:189-197.
- [7] 陶征,赵淳生.基于 ANSYS 的纵扭超声电机定子的优化设计方法[J].压电与声光,2007,29(5):603-608.
- [8] 陶征,赵淳生.电刷式纵扭型超声电机结构设计中的关键技术[J].振动与冲击,2005,24(6):75-78.
- [9] 赵丹,艾延廷,翟学,等.法向接触刚度对螺栓连接结构振动模态的影响研究[J].航空发动机,2012,38(3):54-57.
- [10] 赵帅,王克明,慕鹏,等.螺栓联接结构振动特性有限元分析方法的研究[J].沈阳航空航天大学学报,2012,29(2):18-22.

### Modeling and Analysis of the Rod-type Ultrasonic Motor Based on Bolted-joint Nonlinear System

TAO Zheng, HU Bin, LIU Xu

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

**Abstract:** The computation accuracy was often insufficient in the rod-type ultrasonic motor design because of the adopted continuous composite structure finite element model. In this paper, a method for modeling the rod-type ultrasonic motor vibrator based on bolt pretension was presented and the influence of bolt pretension and contact surface friction coefficients on modal frequency was analyzed. Experiments showed that, the deviation of motor working mode frequency is 0.05%, 0.47%, 0.64% respectively through this finite element analysis method with consideration of bolted-joint nonlinear factors. Consequently, the calculation accuracy was good. It was shown that the finite element model based on bolted-joint nonlinear system was more conducive to motor performance design and estimation.

**Key words:** ultrasonic motor; vibrator; bolted-joint; nonlinearity



# 原位聚合 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料制备及其性能研究

郑 瑾<sup>1,2</sup>, 张振亚<sup>2,3</sup>, 王 龙<sup>2,3</sup>, 刘文涛<sup>2,3</sup>, 朱诚身<sup>2,3</sup>

(1. 中原工学院 纺织学院, 河南 郑州 450007; 2. 纺织服装产业河南省协同创新中心, 河南 郑州 450007;  
3. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 通过原位聚合法制备 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料, 利用 SEM、TEM 观察复合材料的微观结构, 利用 DSC 分析复合材料的熔融和结晶行为, 测试了其热性能和力学性能, 探讨复合材料的结构与性能之间关系. 结果表明: 当 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒质量分数为 0.8% 时, 可以均匀地分散在 PA66 基体中, SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的加入提高了复合材料的结晶度, 改善了其力学性能和热性能.

**关键词:** 原位聚合; 纳米复合材料; 熔融和结晶; 力学性能; 热性能

**中图分类号:** TQ317.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.025

## 0 引言

PA66 是化学纤维的优良聚合材料<sup>[1-3]</sup>, 具有机械强度高、刚性大、韧性好等特点, 广泛用于制作针织品、轮胎帘子线、气囊丝、滤布、绳索、渔网等. PA66 也是工程塑料的主要原料<sup>[1,4]</sup>, 主要用于生产机械零件, 如齿轮、轴承等. 但是由于 PA66 具有较强的氢键, 分子链的结晶度较高, 易溶解于极性有机溶剂而不溶于水和大多数非极性溶剂, 与其他非极性聚合物的相容性也不好, 从而限制其加工性能和应用范围的扩展. 近年来, 对聚酰胺材料的改性研究受到人们的广泛关注. 针对尼龙进行的化学改性和物理改性研究发展均很快, 主要有接枝共聚、共混、填充和增强等方法, 使尼龙的应用向多功能化方向发展<sup>[5]</sup>. 采用纳米复合技术制备聚合物纳米复合材料正在成为新的聚合物改性发展方向, 在填充少量纳米材料的条件下可使其原有性能得到较大幅度的提高. 纳米 SiO<sub>2</sub> 表面活性高, 可以与塑料基体之间产生较强的物理吸附作用, 阻碍链段的运动, 对提高材料的热稳定性、力学性能以及玻璃化转变点都有一定的作用<sup>[6-7]</sup>, 作为一种优良的填料已经被广泛用于聚合物中. Xu 等<sup>[8]</sup> 研究了纳米 SiO<sub>2</sub> 与 PA66 之间形成的不同界面结构与复合材料力学、结晶等性能之间的关系. Rajatendu 等<sup>[9]</sup>、陈广兵<sup>[10]</sup> 和赵才贤等<sup>[11]</sup> 分别制备了 PA66/纳米 SiO<sub>2</sub> 材料和 PA6/纳米 SiO<sub>2</sub> 材料, 材料力学性能都得到了

定提高. 原位聚合是一种材料聚合过程和共混过程同时进行的方法, 较两次挤出法少了热降解过程, 最大程度地保护了材料的初始性能, 较溶液共混法可以节省大量的溶剂, 此外原位复合法可以实现纳米颗粒的良好分散. 基于上述优点, 笔者采用原位聚合法制备 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料, 探讨了纳米 SiO<sub>2</sub> 含量在 PA66 基体中的分散情况及对材料的结晶度、热稳定性和力学性能的影响.

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料和仪器设备

尼龙 66 盐水溶液: 平顶山神马工程塑料有限公司生产, 质量分数 52%; 纳米 SiO<sub>2</sub>: 冀辉公司生产, 直径 20 nm; 高温高压聚合反应釜: GJR-3 型, 容积 3 L, 威海市恒达化工仪表厂生产; 扫描电子显微镜 (SEM): JSM-6700F, 日本理学公司生产; 透射电子显微镜 (TEM), JEM-400SX, 日本电子公司; 差示扫描量热仪: DSC204, 德国 NETZSCH 公司生产; 注塑机: HTF80B-W2, 宁波海天股份有限公司生产.

### 1.2 PA66 及其 PA66/SiO<sub>2</sub> 复合材料的制备

将一定量 PA66 盐水溶液置于高温高压聚合反应釜中, 将纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒分别按 PA66 盐的质量分数为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6% 加入反应釜, 在一定的温度和压力下反应制得 PA66、PA66-0.4、PA66-0.8、PA66-1.2、PA66-1.6 的复合材料.

收稿日期: 2015-09-26; 修订日期: 2015-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1504527); 河南省高等学校重点科研项目计划 (16A430044)

作者简介: 郑瑾 (1980—), 男, 河南虞城人, 中原工学院副教授, 博士, 主要从事纺织材料研究, E-mail: scizhj@163.com.

### 1.3 分子量的测定

将制备的 PA66 及其复合材料溶解在 90% 的甲酸溶液中,在 25 ℃ 的恒温水浴锅中用乌氏黏度计测其相对黏度,利用  $\lg VR = 1.285 \lg Mn - 3.750$  计算其分子量<sup>[12]</sup>,其中,VR 为相对黏度。

### 1.4 SiO<sub>2</sub> 在尼龙 66 基体中分散形貌和断面观察

取复合材料的光滑断面,用无水酒精清洗,在 90 ℃ 用真空烘箱进行干燥,然后对样品进行喷金处理,用 SEM 观测其断面形貌。将 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料进行超薄切片,切片厚度为 50 ~ 100 nm,用 TEM 观测纳米 SiO<sub>2</sub> 复合材料中的分散情况。

### 1.5 DSC 测试

取合适质量的样品置于 290 ℃ 的热台上,用聚酰亚胺薄膜将样品包裹,并用砝码将熔融的样品压片,保温 10 min 消除热历史,然后将压好的薄片迅速转移至液氮中淬冷。将制取的薄片各取 3 ~ 5 mg,用差示扫描量热法测其结晶熔融曲线。DSC 测量程序如下:①从 20 ℃ 以 10 ℃/min 的速率程序升温至 300 ℃,保温 2 min;②再以 10 ℃/min 的速率从 300 ℃ 程序降温至 20 ℃;③然后再从 20 ℃ 以 10 ℃/min 的速率程序升温至 300 ℃。

### 1.6 力学性能测试

PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的拉伸性能按照国标 GB/T 1040.2—2006 进行测试,拉伸速率设置为 20 mm/min,记录拉伸过程的应力应变曲线,取曲线初始阶段分析材料的拉伸强度及拉伸模量。PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的弯曲性能按照 GB/T 9341—2008 进行测试分析,弯曲速率设置为 2 mm/min,均取同组样品中 5 个试样的平均值为测试结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合材料的分子量

利用甲酸法测得 PA66 和复合材料的相对黏度和分子量见表 1。在纳米 SiO<sub>2</sub> 添加量很少和很多时,PA66 熔体都不能使纳米 SiO<sub>2</sub> 在基体中分散情况良好,SiO<sub>2</sub> 在基体发生团聚,阻碍了基体的聚合。当纳米 SiO<sub>2</sub> 质量分数为 0.8% 时,可以均匀分散在基体中,导致了相对黏度在质量分数为 0.8% 时最高,分子量较大。整体来说,相对黏度变化不大,在误差范围之内。

### 2.2 纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒在 PA66 基体中的分散

图 1 分别是放大 2 000 倍(a)和 10 000 倍(b)复合材料断面的 SEM 图像,从图中可以看到纳米 SiO<sub>2</sub> 在 PA66 基体中分散性能良好,纳米 SiO<sub>2</sub> 以 100 ~ 200 nm 大小的颗粒存在,发生了一

定的团聚,但仍属于纳米级别分散,良好的分散性可以在填料使用量很小的情况下充分发挥作用,提高材料的性能。光滑断面处有片状结构和条纹状结构存在,且条纹状结构分布均匀,说明这是韧性断裂。

表 1 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的分子量

Tab.1 Molecular weight of the PA66/SiO<sub>2</sub> nanocomposites

样品编号	相对黏度	$M_n / (10^4 \cdot g \cdot mol^{-1})$
PA66	33.95	1.29
PA66-0.4	31.54	1.22
PA66-0.8	38.53	1.32
PA66-1.2	32.23	1.24
PA66-1.6	29.21	—

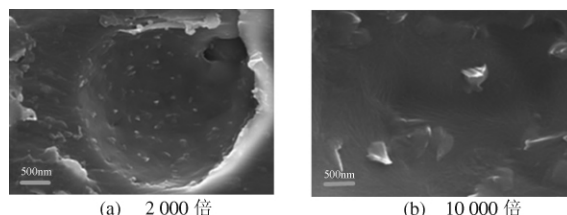


图 1 PA66-0.8 的 SEM 图像  
Fig.1 SEM images of PA66-0.8

图 2 为复合材料的 TEM 图像。当纳米 SiO<sub>2</sub> 质量分数为 0.8% 时,纳米粒子整体性在 PA66 基体中分散良好,没有出现大范围的团聚,且从低放大倍数来看,基体中纳米 SiO<sub>2</sub> 的整体分散情况良好。

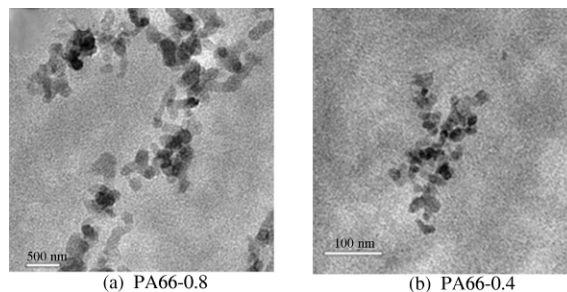


图 2 复合材料的 TEM 图像  
Fig.2 TEM images of composite material

### 2.3 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的熔融结晶行为

图 3 为 PA66 及其复合材料 DSC 测试曲线,表 2 ~ 表 4 为 PA66 及其复合材料的参数。从图 3 中可以看出,PA66 及其复合材料的一次熔融和降温结晶曲线均为单峰。根据下式计算其结晶度:

$$C = \frac{\Delta H_m}{(1-x)\Delta H_m^0} \times 100\%.$$

式中:  $\Delta H_m^0$  为全结晶熔融焓;  $x$  为 SiO<sub>2</sub> 的质量分数。

纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入提高了其结晶度和结晶温度,降低了半宽高和一次熔融温度,在添加量为

0.8% 以上时,材料的结晶度不再随着纳米 SiO<sub>2</sub> 的继续加入而提高,但结晶速率和结晶温度逐渐增大. 和徐翔民等<sup>[8]</sup>的研究相比,结晶度提高较多. 造成这种现象的原因是成核机理不同,纯 PA66 为均相成核,均相成核的条件所需要的温度较低;纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入起到成核剂的作用. 复合

材料为异相成核,而异相成核可以在较高的温度下进行. 纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入也导致 PA66 形成了尺寸小的球晶. 二次熔融与一次熔融相比,结晶度有了明显的提升,这主要是因为一次熔融的样品为液氮淬冷处理的样品,快速降温会导致材料不能充分的结晶.

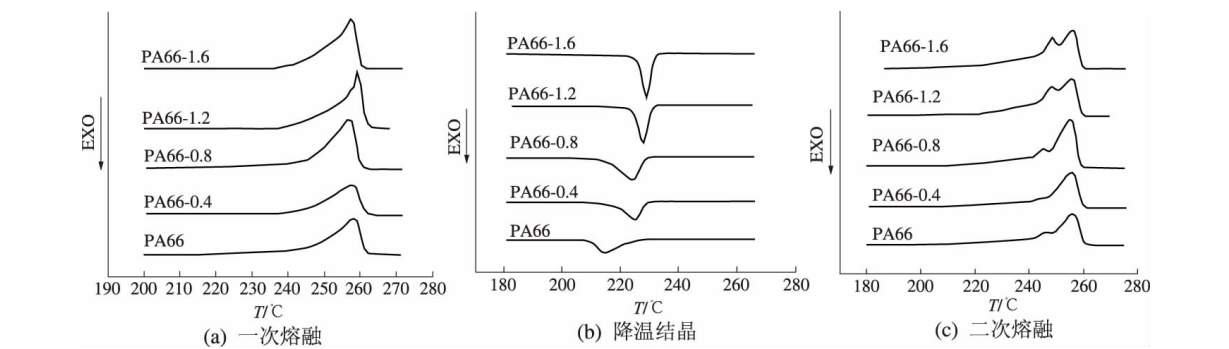


图 3 PA66 及其复合材料的 DSC 测试曲线  
Fig.3 DSC test curve of PA66 and its composite

表 2 PA66 及其复合材料的一次熔融参数  
Tab.2 The first melting curves of PA66 and its composites

样品编号	$T_{mi}/^{\circ}\text{C}$	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$T_{mf}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$C/\%$
PA66	249.3	258.1	261.1	38.9	20.7
PA66-0.4	245.7	257.7	261.4	41.4	22.1
PA66-0.8	247.6	257.1	259.9	52.2	28.0
PA66-1.2	247.9	258.5	260.6	51.3	27.6
PA66-1.6	248.3	257.6	259.9	51.8	28.0

注:  $T_{mi}$  为起始熔融温度;  $T_m$  为峰值熔融温度;  $T_{mf}$  为终止熔融温度;  $\Delta H_m$  为熔融热焓;  $C$  为结晶度.

表 3 PA66 及其复合材料的结晶参数  
Tab.3 The crystallization parameters of PA66 and its composites

样品编号	$T_{cf}/^{\circ}\text{C}$	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$T_{ci}/^{\circ}\text{C}$	$D/^{\circ}\text{C}$	$C/\%$
PA66	210.0	214.9	222.7	9.8	19.79
PA66-0.4	218.7	225.0	228.5	7.6	20.00
PA66-0.8	216.3	223.9	228.4	9.3	31.18
PA66-1.2	222.8	227.6	232.0	6.7	28.16
PA66-1.6	224.2	228.7	233.0	6.2	28.52

注:  $T_c$  为峰值结晶温度;  $T_{ci}$  为结晶开始温度;  $T_{cf}$  为结晶结束温度;  $D$  为半高宽.

表 4 PA66 及其复合材料的二次熔融参数  
Tab.4 The second melting curves of PA66 and its composites

样品编号	$T_{mi}/^{\circ}\text{C}$	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$T_{mf}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$C/\%$
PA66	245.6	256.1	260.2	47.8	25.4
PA66-0.4	246.6	255.8	259.5	49.8	26.6
PA66-0.8	246.6	255.3	258.7	66.0	35.4
PA66-1.2	242.8	255.5	259.6	63.3	34.1
PA66-1.6	243.2	255.9	259.8	64.2	34.7

二次熔融峰均为双峰,这可能是由于形成了不同的晶型,或者是由于完善程度不同的球晶在不同的温度下熔融造成的结果<sup>[13]</sup>. 还可以看到随着纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入,第一个峰变得越来越尖锐,有可能是因为纳米的加入导致生成了更多的不完善晶体.

2.4 PA66/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的力学性能

图 4 为 SiO<sub>2</sub> 含量对 PA66/SiO<sub>2</sub> 拉伸性能和弯曲性能的影响曲线,从图 4 中可以看到,纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入提高了材料的力学性能,当纳米 SiO<sub>2</sub> 质量分数为 0.8% 时,复合材料的拉伸强度和拉伸模量提升了 7% 和 10%,纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的加入比较明显地提高了材料的结晶度,且表面含有大量的羟基,会与 PA66 基体中的羰基形成氢键,氢键作用力大于一般的分子间作用力. 但随着纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的进一步增大,力学性能反而有所降低,这可能是由于纳米 SiO<sub>2</sub> 的团聚造成的,团聚造成 SiO<sub>2</sub> 与 PA66 基体之间的氢键数量减小<sup>[14]</sup>,并且由前面的结晶数据可以看到,纳米 SiO<sub>2</sub> 的质量分数在 0.8% 之后继续增大并不能提高材料的

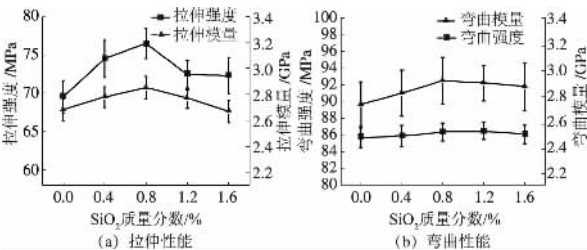


图 4 SiO<sub>2</sub> 含量对 PA66/SiO<sub>2</sub> 拉伸性能和弯曲性能的影响曲线

Fig.4 The effect curves of silica content on tensile and flexural properties of PA66/SiO<sub>2</sub> nanocomposites

结晶度,所以力学性能较纳米  $\text{SiO}_2$  的质量分数为 0.8% 来说,反而有所下降. 相比于拉伸强度和拉伸模量的大幅度提高,材料的弯曲模量和强度变化不明显.

### 3 结论

利用原位聚合法制备出了分子量较稳定的 PA66 及 PA66/ $\text{SiO}_2$  纳米复合材料,用 SEM 和 TEM 对纳米  $\text{SiO}_2$  在基体中的分散性进行了分析表征,发现当纳米  $\text{SiO}_2$  的质量分数为 0.8% 时可以很好地分散在 PA66 基体中. 纳米  $\text{SiO}_2$  起到了很好的成核剂作用,添加 0.8% 就可以使 PA66 的结晶度从 25% 提高到 35%,同时纳米  $\text{SiO}_2$  加快了材料的结晶速度. 纳米  $\text{SiO}_2$  的加入可以提高材料的热稳定性和力学性能,在添加量很少的情况下可以提高综合性能,为工业纺丝做下了铺垫.

### 参考文献:

- [1] 朱建民. 聚酰胺树脂及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [2] BONGARTZ M. 安全气囊纱丝的新发展 [J]. 国际纺织导报, 2008(9): 12-16.
- [3] 武冰, 王平, 李均平. 我国安全气囊袋用纤维的发展现状 [J]. 合成纤维工业, 2005, 28(5): 47-48.
- [4] 唐伟家. 世界聚酰胺工程塑料市场及预测 [J]. 工程塑料应用, 2003, 31(2): 56-58.
- [5] 朱静安, 王立军, 姜明才. 增强增韧尼龙 66 工程塑料结晶行为的研究 [J]. 高分子材料工程与科学, 1999, 15(1): 76-79.
- [6] CHEN J H, RONG M Z, RUAN W H, et al. Interfacial enhancement of nano- $\text{SiO}_2$ /polypropylene composites [J]. Composites science and technology, 2009, 69(2): 252-259.
- [7] PAPAGEOGIOU G Z, ACHILIAS D S, BIKIARIS D N, et al. Crystallization kinetics and nucleation activity of filler in polypropylene/surface-treated  $\text{SiO}_2$  nanocomposites [J]. Thermochimica acta, 2005, 427(1): 117-128.
- [8] XU X M, LI B J, LU H M, et al. The effect of the interface structure of different surface-modified nano- $\text{SiO}_2$  on the mechanical properties of nylon 66 composites [J]. Journal of applied polymer science, 2008, 107(3): 2007-2014.
- [9] RAJATENDU S, ABHIJIT B. Polyamide-6, 6/in situ silica hybrid nanocomposites by sol-gel technique: synthesis, characterization and properties [J]. Polymer, 2005, 46: 3343-3354.
- [10] 陈广兵. 尼龙 66/胺基改性  $\text{SiO}_2$  纳米复合材料的原位聚合制备及其结构性能研究 [D]. 湘潭大学化学学院, 2010.
- [11] 赵才贤, 张平, 陆绍荣, 等. 原位聚合法制备 PA6/ $\text{SiO}_2$  纳米复合材料 [J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(1): 218-221.
- [12] 辽阳石油化纤公司. 锦纶 66 生产基本知识 [M]. 北京: 纺织工业出版社, 1987: 331-331.
- [13] MARAND H, PRASAD A. On the observation of a new morphology in poly (arylene ether ether ketone). A further examination of the double endothermic behavior of poly (arylene ether ether ketone) [J]. Macromolecules, 1992, 25(6): 1731-1736.
- [14] 徐翔民, 张予东, 李宾杰, 等. 纳米  $\text{SiO}_2$ /尼龙 66 复合材料的力学性能和热性能 [J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 56-61.

## Synthesis and Characterization of PA66/ $\text{SiO}_2$ Nanocomposites by In-situ Polymerization

ZHENG Jin<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhenya<sup>2,3</sup>, WANG Long<sup>2,3</sup>, LIU Wentao<sup>2,3</sup>, ZHU Chengshen<sup>2,3</sup>

(1. School of Textiles, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Textile and Clothing Collaborative Innovation Center of Henan Province, Zhengzhou 450007, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** PA66/ $\text{SiO}_2$  nanocomposites were prepared by the in-situ polymerization method. The structure of  $\text{SiO}_2$  in polymer matrix was studied by TEM and SEM, and the melting and crystallization behaviors of composite materials were analyzed by DSC. Mechanical and heat properties were tested, too. The results indicated that  $\text{SiO}_2$  dispersed well in PA66 with nano-scale when the  $\text{SiO}_2$  was 0.8%, the mechanical properties and thermal stability of PA66/ $\text{SiO}_2$  nanocomposites were superior to neat PA66, meanwhile, the crystallinity was improved.

**Key words:** in-situ; nanocomposite; melting and crystallization; mechanical; heat property

# p-n 型 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体材料的 制备与气敏性能研究

秦 聪<sup>1</sup>, 王 燕<sup>2</sup>, 陈泽华<sup>1</sup>, 孙 广<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘 要:** 采用化学沉淀法制备了纯态 CuO 和  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒, 并采用沉积-沉淀法将 p 型半导体 CuO 负载到 n 型半导体  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面, 制备了 p-n 型复合半导体氧化物气体敏感材料 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 对所合成的材料进行了 XRD、SEM、TEM 和 XPS 表征. 结果显示: 负载量较低时, CuO 高分散在  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载体表面, 当负载量达到 30% 时, 形成了新的 CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶相; 所合成的样品由粒径大小约 10 nm 的纳米颗粒组成. 气敏性能测试结果显示: 该材料在 100 ℃ 的较低温度下, 对 CO 的灵敏度相对纯  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 提高了几十倍.

**关键词:** p-n 型; CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 复合氧化物; CO; 气敏材料

**中图分类号:** TB34

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.024

## 0 引言

氧化物半导体气敏元件因其灵敏度高、制作工艺简单及使用方便等优点, 成为气体传感器中备受关注、发展最快的传感器类型之一<sup>[1-2]</sup>. 近年来, 一系列半导体气敏材料如 SnO<sub>2</sub>、ZnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、WO<sub>3</sub> 等相继被开发出来<sup>[3-7]</sup>. 由于受到灵敏度、选择性、温度等因素的限制, 半导体气敏传感器的应用推广目前还存在一定的问题. 如何从根本上改善材料的敏感性能, 如提高灵敏度和选择性、实现低温下对待测气体的低检测限和定性识别依然是半导体气敏材料研究领域所面临的一大挑战. 通过国内外研究者的努力, 运用超细化合成<sup>[8-9]</sup>、贵金属掺杂<sup>[10-11]</sup>、表面修饰<sup>[12]</sup>等技术手段, 使材料的敏感性能得到了逐步的改善.

近年来, 为了进一步提高金属氧化物半导体气敏材料性能, p-n 型复合半导体气敏材料的研究受到了国内外学者的广泛关注<sup>[13-17]</sup>. 相同基质或不同基质构成 p-n 型后, 当价带电子受激发跃迁到导带上, 或是导带电子自发跃迁到价带上, 即表现出不同的物理特性<sup>[18]</sup>. 传统的气敏材料研究多集中在 n 型半导体上, 而 p-n 型半导体气体传

感器是基于气体传感器互补增强和互补反馈原理的一种新结构半导体气体传感器<sup>[13]</sup>. 文献[14]报道了 p-n 型 CuO-ZnO 薄膜的制备, 其对还原性气体表现出良好的敏感性能. 文献[15]提出了利用气敏元件的互补增强和互补反馈原理设计 n-n、p-p 或 p-n 型复合半导体. 文献[16]制备了 NiO 掺杂 SnO<sub>2</sub> 的 p-n 型半导体 LPG 敏感材料. 文献[17]报道了 p-n 型 CuO/BSST 厚膜材料能够实现室温下对 ppb 级(10<sup>-9</sup>) 的 H<sub>2</sub>S 气体的检测. 本研究中, 采用沉积-沉淀法负载 p 型半导体 CuO 到 n 型半导体  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料表面上, 设计制备 p-n 型半导体气敏材料和气敏元件, 并系统研究该材料对乙醇和一氧化碳气体的敏感性能.

## 1 实验方案

### 1.1 纳米 CuO 和纳米 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的制备

采用化学沉淀法制备 CuO 和  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒, 具体制备过程如下: 在磁力搅拌下, 将 0.2 mol/L 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 水溶液滴加到 0.2 mol/L 的 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O (Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O) 水溶液中, 保持溶液的 pH 值为 8 左右, 静置老化 1 h, 经去离子水洗涤多次、离心分离后, 在烘箱中于 80 ℃

收稿日期: 2016-07-01; 修订日期: 2016-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504083; U1404613); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS-FRF140101)

通信作者: 王燕(1982—), 女, 河南周口人, 河南理工大学副教授, 博士, 主要从事气敏材料和器件研究, E-mail: yanwang@hpu.edu.cn.



干燥 2 h, 空气气氛中在马弗炉内 300 °C 焙烧 1 h, 获得纯相纳米 CuO 和纳米  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体。

### 1.2 p-n 型 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料的制备

采用沉积-沉淀法制备 p-n 型 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体材料, 具体制备流程如下: 将一定量的  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体分散于根据不同 CuO 含量(摩尔分数为 5%、10%、15%、20% 和 30%, 文中关于 CuO 的含量均为摩尔分数) 配置的 Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 水溶液中, 超声处理 30 min 后在磁力搅拌下, 逐滴加入 0.2 mol/L 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 水溶液。反应结束后保持混合溶液的 pH 值为 8 左右, 静置老化 1 h、离心洗涤若干次后在 80 °C 下恒温干燥, 然后在空气气氛中 500 °C 焙烧 1 h, 即得到一系列不同含量的 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合纳米粉体。

### 1.3 表征分析

粉体的物相结构分析在日本 Rigaku D/max-2500 型 X 射线衍射仪上进行, 铜靶 ( $\lambda = 0.15418$  nm)。XPS 测试在 PHI-5600 型 X 射线光电子能谱仪上完成。MgK $\alpha$  射线为激发光源(1253.6 eV), 利用 C1s 结合能(284.6 eV) 作荷电校正, 加速电压为 15 kV, 功率为 250 W, 分析面积等于 0.8 cm<sup>2</sup>, 在低于  $1.1 \times 10^{-7}$  Pa 真空度下记录谱图。SEM 表征在 Philips XL30W/TMP 型扫描电镜上进行。TEM 表征在 Philips Recnai G2 20 型透射电镜上进行(电子源 LaB<sub>6</sub> 晶体, 加速电压 200 kV, 点分辨率 0.2 nm)。

### 1.4 气敏性能测试

气敏元件的制作及测试过程如下: 取少量样品在玛瑙研钵中研磨均匀, 并加入少量松油醇调成浆状, 均匀涂敷在焊有叉状金电极的陶瓷管后, 将金电极焊于六角连接底座上, 在 4.0 V 的加热电压下老化 7~10 d, 使元件电阻值趋于稳定。气敏性能的测试在 HW-30A 汉威气敏元件测试系统上进行, 该系统采用静态配气法和电流-电压测试法, 提供回路电压  $V_e$ , 气敏元件加热电压  $V_h$ , 通过与气敏元件串联的负载电阻  $R_L$  上的输出电压  $V_{out}$  来反映气敏元件的特性。元件灵敏度的定义为  $S = R_a/R_g$ , 其中,  $R_a$ 、 $R_g$  分别为待测元件在空气和检测气体中的电阻。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

纯态  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和负载不同含量 CuO 的 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料的 XRD 谱图如图 1 所示。

由图 1 可见, 所制备的纯态  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的特征衍

射峰与标准卡片(JCPDS 33-664) 完全一致, 且峰型尖锐, 由此表明样品具有很好的结晶度。当 CuO 负载的摩尔分数为 5% 时, 样品 XRD 图谱中没有出现 CuO 的特征衍射峰。当负载量增大到 10% 时, 在 2 $\theta$  角为 38.7° 处开始检测到非常微弱的 CuO 特征衍射峰, 继续增加 CuO 负载量到 15% 和 20% 时, 样品的 XRD 图谱与负载量为 5% 样品的图谱基本相同。而继续增大 CuO 负载量到 30% 时, 样品的 XRD 图谱中出现尖晶石结构 CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的特征衍射峰(JCPDS 34-0425)。由此表明, 随着 CuO 负载含量的增大, Cu 原子逐渐进入到  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶格结构中, 并形成了新的 CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 相。

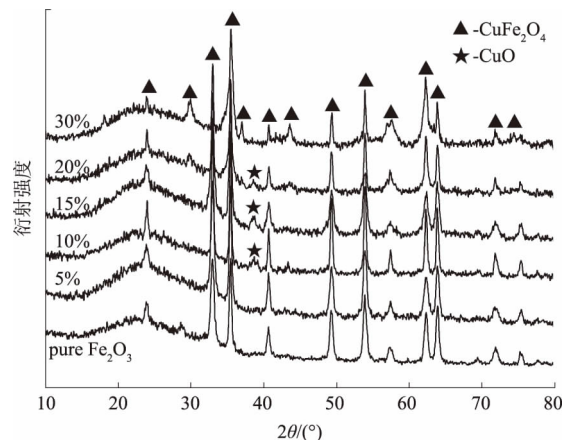
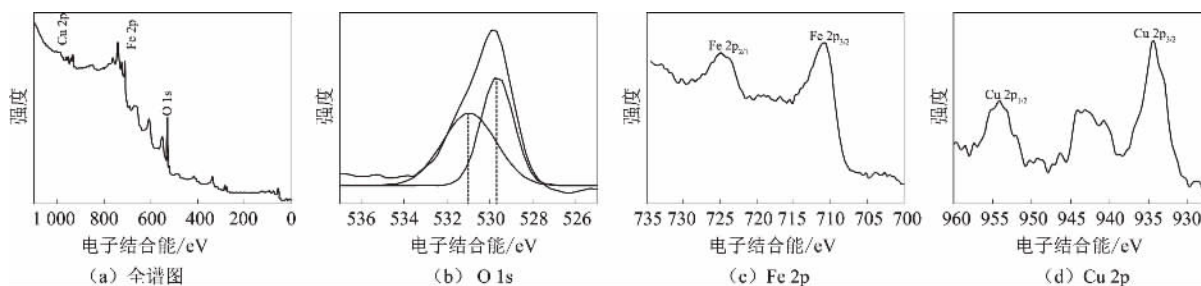


图 1 不同 CuO 含量的 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD analysis of the CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples with different CuO contents

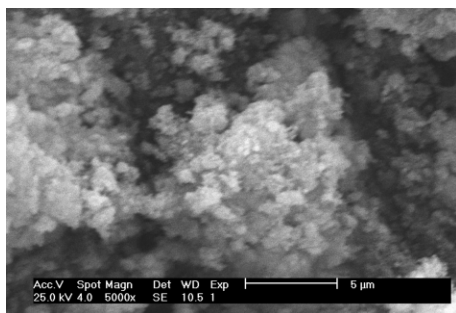
### 2.2 XPS 分析

为详细研究 p-n 型复合半导体 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品表面的阴、阳离子的化学状态, 对 CuO 含量为 15% 的样品进行了 X 射线光电子能谱表征分析, 如图 2 所示。图 2(a) 显示: 材料表面包含 Cu、Fe、O 和 C 元素。其中, C 元素的出现可能是因为表面吸附的有机污染物或者 XPS 测试过程中引入微量 C 所致。图 2(b) 显示: 在 954.1 eV 和 934.5 eV 的结合能处分别出现了对应于 Cu 2p<sub>1/2</sub> 和 Cu 2p<sub>3/2</sub> 的两个特征峰。其中, Cu 2p<sub>3/2</sub> 特征峰出现在 934.5 eV 结合能处并伴随有 940~944 eV 处的震激峰, 表明在 CuO 含量为 15% 样品的表面 Cu 物种以 Cu<sup>2+</sup> 形式出现。图 2(c) 显示: 对应于 Fe 2p<sub>3/2</sub> 和 Fe 2p<sub>1/2</sub> 的两个峰分别出现在 710.9 eV 和 724.8 eV 的结合能处, 表明 Fe<sup>3+</sup> 形式存在。图 2(d) 显示: 分别在电子结合能为 529.7 eV 和 531.1 eV 处出现两个特征峰, 表明在该样品表面有两种不同的氧物种, 较低结合能处的峰归属于晶格氧, 较高结合能处的峰归属于弱吸附离子化的氧物种 O<sup>-</sup>。

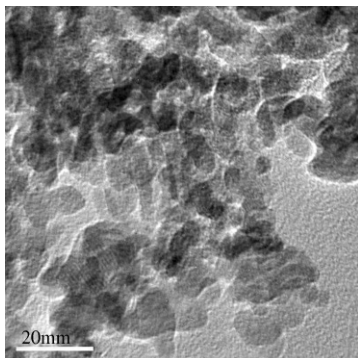
图2 15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  样品的 XPS 谱图Fig.2 XPS patterns of the 15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  sample

### 2.3 SEM 和 TEM 分析

采用场发射扫描电子显微镜观测获得样品的外观形貌,图3所示为15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  样品的高倍扫描电镜照片。从图中可以看出,样品由分散均匀的球形颗粒聚集成。

图3 15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的 SEM 图片Fig.3 SEM image of the 15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  sample

为了进一步获得样品的微观结构特征,通过高倍透射电镜对其进行了测试表征。图4所示为15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的高倍透射电镜照片。从图中可以看出,样品由粒径大小为10~20 nm的球形颗粒组成,颗粒大小比较均匀。但是由于CuO和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的原子量相当,所以难以清晰分辨出二者晶粒的明显差别。

图4 15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的 TEM 图片Fig.4 TEM image of the 15% - $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  sample

### 2.4 气敏性能

为了研究所合成的 p-n 复合半导体气敏材料

的性能和不同复合比例对其半导体类型的影响规律,测定了其从室温到300℃的温度范围内分别对乙醇气体和CO气体的响应-恢复特性。

图5所示为不同CuO负载含量的 $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 基气敏元件在工作温度为300℃时,对 $200 \times 10^{-6}$ 乙醇气体的响应-恢复曲线。从图5可以看出,不同CuO含量的气敏元件对还原性气体乙醇表现出不同的半导体特征。纯 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 气敏元件和负载5%、10% CuO的气敏元件对乙醇气体表现出典型n型半导体的响应-恢复特征,即接触还原性气体后电压降低,脱除后电压升高;相反,随着CuO含量的增加,负载含量为15%、20%的 $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 样品和纯相CuO对乙醇气体则表现出典型p型半导体的响应-恢复特征,即接触还原性气体后电压升高,脱除后电压降低;而负载30% CuO得到的样品 $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 又重新表现出n型半导体的响应-恢复特征。该测试结果表明:通过控制CuO的负载含量能够实现 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 基气敏材料从n型半导体向p型半导体的转变。

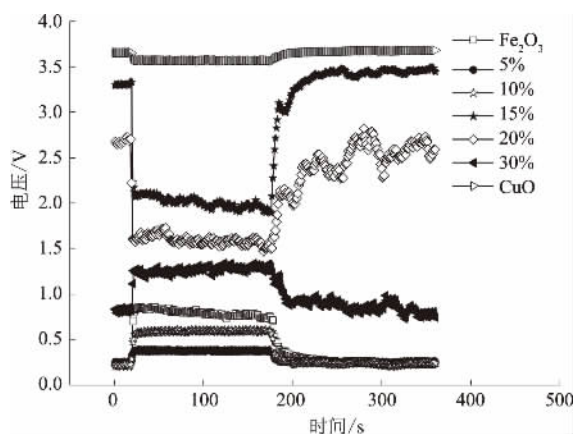
图5 不同CuO含量 $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 样品对体积分数为 $200 \times 10^{-6}$ 乙醇的响应-恢复曲线Fig.5 Response-recovery characteristics of the  $\text{CuO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  sample with different CuO contents to  $200 \times 10^{-6}$  ethanol

表 1 所列为不同 CuO 负载含量和其对气敏元件的半导体类型. 通过对比得知, 负载含量为 15% 的 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品对还原性气体乙醇的灵敏度最高 ( $S = 32$ ).

表 1 不同 CuO 含量样品的半导体类型

Tab. 1 Semiconductor type different of the CuO/ $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sample with different CuO contents							
CuO 摩尔百分含量	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5%	10%	15%	20%	30% (CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	CuO
半导体类型	n	n	n	p	p	n	p

图 6 所示为 CuO 摩尔分数为 15% 的 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品在 50 °C 和 100 °C 的工作温度下, 分别对  $200 \times 10^{-6}$  和  $500 \times 10^{-6}$  CO 气体的响应-恢复曲线. 结果显示: 在这两个较低的工作温度下都能获得对 CO 气体的快速响应和恢复. 工作温度为 100 °C 时, 对 CO 的响应灵敏度更高 ( $S = 58$ ), 相对纯态  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 提高了几十倍 ( $S = 2.1$ ).

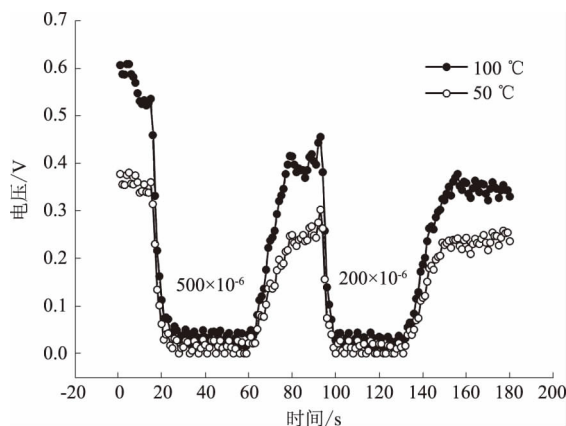


图 6 15%-CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 CO 气体响应-恢复曲线  
Fig. 6 Response-recovery characteristics of the 15%-CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples to CO

为了推断 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体对 CO 的低温敏感机理, 利用 CO 升温氧化微反应装置分别测试了纯  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 15%-CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料随着温度升高对 CO 的催化氧化转化率, 测试结果如图 7 所示. 从图 7 中可以看出: 在较低温度下, 纯  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 不能与 CO 发生氧化还原反应, 从 140 °C 才开始催化氧化 CO 转化为 CO<sub>2</sub>, 当温度升高至 270 °C 时, CO 转化率达到 100%; 而 15%-CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 则在较低温度(40 °C)下即与 CO 发生催化氧化反应, 当温度升至 110 °C 时, CO 的转化率即达到 100%. 该结果很好地解释了 15%-CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 气敏元件在较低的工作温度下(50 °C)对 CO 表现出较高灵敏度的原因, 而随着工作温度的升高(100 °C), 其灵敏度也随之增大.

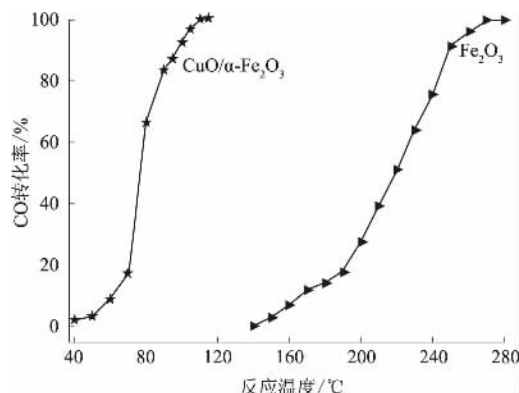
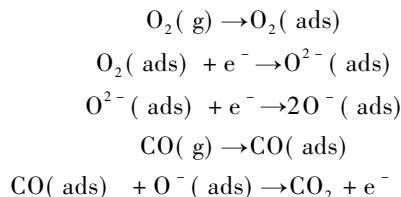


图 7 纯  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 15%-CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 CO 催化氧化转化率

Fig. 7 Catalytic CO oxidation activity of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 15%-CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

结合 XPS 测试结果和 CO 催化氧化反应结果, 笔者推测 p-n 型 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体与 CO 的反应过程如下:



当复合半导体接触 CO 气体之前, 材料表面物理吸附空气中的氧, 随着温度的升高, 氧化物由物理吸附转化为化学吸附状态, 化学吸附态的氧会从半导体材料表面夺取自由电子转化为氧离子, 使半导体导带中的空穴浓度增加, 从而导致材料表面的电导增大; 当气敏材料接触 CO 后, 氧离子与 CO 发生氧化还原反应, 被吸附氧夺取的自由电子重新回到半导体的导带中, 从而引起半导体的电导发生变化.

### 3 结论

(1) 采用沉积-沉淀法制备了 p-n 型 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体氧化物纳米材料. 该材料在较低工作温度时即对 CO 有较高的灵敏度.

(2) 随着 CuO 负载含量的增加, CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体类型由 n 型转为 p 型, 当负载量增大至 30% 时, Cu 元素进入 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶格, 得到的产物为尖晶石结构 CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

(3) 通过结合 CO 催化氧化反应提出了 p-n 型 CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合半导体对 CO 的敏感反应机理.

### 参考文献:

- [1] WILLIAMS D E. Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors [J]. Sensors and actuators B: Chemical,

- 1999, 57: 1 – 16.
- [2] 陈艾. 敏感材料与传感器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] XU J Q, HAN J J, ZHANG Y, et al. Studies on alcohol sensing mechanism of ZnO based gas sensors [J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2008, 132( 1): 334 – 339.
- [4] SUN G, QI F X, ZHANG S S, et al. Synthesis and enhanced gas sensing properties of flower-like SnO<sub>2</sub> hierarchical structures decorate with discrete ZnO nanoparticles [J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 617: 192 – 199.
- [5] SOULANTICA K, ERADES L, SAUVAN M, et al. Synthesis of indium and indium oxide nanoparticles from indium cyclopentadienyl precursor and their application for gas sensing [J]. Advanced functional materials, 2003, 13: 553 – 557.
- [6] MENG D, YAMAZAKI T, SHEN Y B, et al. Preparation of WO<sub>3</sub> nanoparticles and application to NO<sub>2</sub> sensor [J]. Applied surface science, 2009, 256( 4): 1050 – 1053.
- [7] SUN G, QI F X, LI Y W, et al. Solvothermal synthesis and characterization of ultrathin SnO nanosheets [J]. Materials letters, 2014, 118: 69 – 71.
- [8] ROTHCHILD A, KOMEN Y. The effect of grain size on the sensitivity of nanocrystalline metal-oxide gas sensors [J]. Journal of applied physics, 2009, 45: 6374 – 6380.
- [9] WANG Y, CAO J L, YU M G, et al. Porous  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hollow microspheres: Hydrothermal synthesis and their application in ethanol sensors [J]. Materials letters, 2013, 100: 102 – 105.
- [10] WANG Y, WANG Y M, CAO J L, et al. Low-temperature H<sub>2</sub>S sensors based on Ag-doped  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles [J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2008, 131: 183 – 189.
- [11] TONG M S, DAO G R, GAO D S. Surface modification of oxide thin film and its gas-sensing properties [J]. Applied surface science, 2001, 171 ( 3/4): 226 – 230.
- [12] 巩飞龙, 张永辉, 肖元化, 等. 多孔 ZnO 纳米片的制备及气敏性能研究 [J]. 郑州大学学报( 工学版), 2012, 33( 6): 104 – 106.
- [13] 杨留方, 谢永安, 李开毅, 等. n + p 组合结构臭氧气体传感器研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2005( 10): 1 – 3.
- [14] DANDENEAU C S, JEON Y H, SHELTON C T, et al. Thin film chemical sensors based on p-CuO/n-ZnO heterocontacts [J]. Thin solid film, 2009, 517: 4448 – 4454.
- [15] WANG Y D, WU X H, ZHOU Z L. Novel high sensitivity and selectivity semiconductor gas sensor based on the p + n combined structure [J]. Solid-state electronic, 2000, 44: 1603 – 1607.
- [16] JAIN K, PANT R P, LAKSHMIKUMAR S T. Effect of Ni doping on thick film SnO<sub>2</sub> gas sensor [J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2006, 113: 823 – 829.
- [17] JAIN G H, PATIL L A. CuO-doped BSST thick film resistors for ppb level H<sub>2</sub>S gas sensing at room temperature [J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2007, 123: 246 – 253.
- [18] 王心芬, 鲁业频. 半导体 pn 结的过去现在和未来 [J]. 现代物理知识, 2000, 12( S1): 38 – 40.

## Synthesis and Gas Sensing Properties of p-n Type CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanomaterials

QIN Cong<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, CHEN Zehua<sup>1</sup>, SUN Guang<sup>1</sup>

( 1. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** CuO and  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanomaterials were prepared by the chemical precipitation method. And, the p-n type semiconductor metal oxide composite was successfully prepared by the deposition-precipitation method. The structure and morphology of the as-prepared samples were characterized by the techniques of powder X-ray diffraction ( XRD ), scanning electron microscope ( SEM ), transmission electron microscopy ( TEM ) and X-ray photoelectron spectroscopy ( XPS ). The analysis results indicated that when the content of CuO was small, the CuO nanoparticles were high dispersed on the surface of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. When the content of CuO over 30mol% , the new phase of CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> was formed. The SEM and TEM images showed that the obtained sample consisted of the nanoparticles with the size of about 10 nm.

**Key words:** p-n type; CuO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; metal oxide composite; CO; gas-sensing material



## 聚乙烯醇分散对 $\text{LiFePO}_4$ 薄膜气敏性的影响

帕提曼·尼扎木丁, 阿布力孜·伊米提

(新疆大学 化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 为了优化  $\text{LiFePO}_4$  薄膜制备条件, 提高  $\text{LiFePO}_4$  薄膜气敏元件的灵敏度, 用水热法合成  $\text{LiFePO}_4$  并把它分散在聚乙烯醇(PVA)当中. 利用旋转-甩涂法将  $\text{LiFePO}_4$ -PVA 分散溶液涂布于锡掺杂玻璃光波导表面, 研制出  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导敏感元件; 利用平面光波导检测系统对其气敏性进行研究. 研究表明, 分散剂质量分数为 2%, 超声波振荡时间为 2 h, 分散温度为 25  $^{\circ}\text{C}$  时, 所制备出的敏感元件对二甲苯等苯类气体显出良好的气敏特性, 其对二甲苯体积分数的检测范围为  $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-3}$ , 分散之后, 敏感元件对二甲苯等气体的检测灵敏度有所提高.

**关键词:** 光波导气敏元件; 分散剂;  $\text{LiFePO}_4$  薄膜; 气敏性

**中图分类号:** O657.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.007

### 0 引言

随着生活水平的不断提高, 人们对医疗保健、环保更加重视. 各种有毒、有害气体的探测, 大气污染及居住环境质量的检测等方面对气体传感器提出了更高的要求. 气敏材料(元件)是气体传感器的重要部分, 而气敏薄膜材料成膜方法、薄膜微、纳米结构(如晶粒尺度、空隙率和比表面积)等特性均对传感器的性能(如灵敏性、选择性、稳定性等)有至关重要的影响. 由于纳米气敏材料尺寸小、比表面能、比表面积大<sup>[1-2]</sup>, 在制备纳米薄膜过程中容易发生粒子团聚而使其粒径增大, 分散性变差, 失去了纳米气敏材料原有优势<sup>[3]</sup>, 因此解决纳米气敏材料的团聚问题是提高其性能的关键.

橄榄型  $\text{LiFePO}_4$  作为半导体材料在离子电池、电化学传感器、离子传感器、燃料电池等领域得到广泛应用<sup>[4]</sup>. 由于  $\text{LiFePO}_4$  导电率和离子扩散率极低, 国内外研究的重点侧重于  $\text{LiFePO}_4$  合成技术的改善及通过掺杂导电物来提高电化学性能, 但有关  $\text{LiFePO}_4$  纳米薄膜光学性能以及气敏性研究未见报道. 为此, “光化学传感器研究”组对  $\text{LiFePO}_4$  纳米薄膜光学特性及其气敏性进行了大量的研究<sup>[5-6]</sup>. 据实验结果可知,  $\text{LiFePO}_4$  薄膜

具有良好的光学透明性并对苯类挥发性有机气体有一定的气敏性(但灵敏度不是很高), 并且易于制备. 笔者为了提高  $\text{LiFePO}_4$  薄膜气敏元件的灵敏度, 从优化  $\text{LiFePO}_4$  薄膜制备条件入手, 将 PVA 作为分散剂, 利用光波导传感气敏测试系统研究聚乙烯醇分散对  $\text{LiFePO}_4$  薄膜气敏性能的影响.

光波导传感器基于倏逝波原理, 即利用导模倏逝波“感知”波导表面附近样品材料特性的变化, 从而改变光波的相位或振幅, 然后利用合适的光路和电路进行探测而得到样品材料的相关信息.

光波导传感器的研究起源于 1983 年由苏黎世的瑞士联邦工学院光学实验室发明的  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  薄膜(100 ~ 150 nm)平面波导湿敏传感器<sup>[7]</sup>. 之后随着新型材料和纳米技术的涌现得到了快速发展. 目前, 国内外关于光波导技术的研究主要侧重于新型光波导材料的制备或其优化, 如 HONG 等<sup>[8]</sup>用氧离子注入法制备出新的光波导材料  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ; HLASEK 等<sup>[9]</sup>通过掺杂 Er 等金属离子使  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{Ga}_y\text{O}_{12}$  材料具有多模特性及结构. 另外, 在气敏机理方面, 一般用单个光学参数(吸收系数或有效折射率)的变化<sup>[10-11]</sup>来反映. 近几年来, 本课题组将材料光学特性和电化学特性联系起来用多个参数来探讨气敏机理<sup>[5]</sup>. 笔者利用

收稿日期: 2016-10-20; 修订日期: 2016-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21265020); 新疆大学博士启动基金资助项目(209-61317)

作者简介: 帕提曼·尼扎木丁(1982—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 新疆大学化学化工学院讲师, 博士, 主要从事光波导化学传感器及纳米薄膜材料研究, E-mail: patima207@aliyun.com.



敏感薄膜透光率的变化研究聚乙烯醇分散对  $\text{LiFePO}_4$  薄膜光学气敏性的影响.

## 1 试验方法

### 1.1 试验原材料

氢氧化锂、硫酸亚铁、磷酸、聚乙烯醇,均为国产分析纯试剂.

### 1.2 试验内容

1) 磷酸亚铁锂的合成: 将  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (85%) 及  $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$  按 1:1:3 的摩尔比混合,然后将混合物移到水热反应釜中,在  $150^\circ\text{C}$  下保温 15 h 进行反应. 自然冷却后,收集反应釜中的固体粉末,经多次洗涤过滤后,在  $120^\circ\text{C}$  下真空干燥 1 h<sup>[12]</sup>,并用 X 射线衍射仪进行表征.

2) 磷酸亚铁锂薄膜的制备: 分别配制质量分数为 1.0%、2.0%、3.0%、4.0% 的聚乙烯醇分散溶液,称取合成出来的  $\text{LiFePO}_4$  粉体加入其中,在  $25^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ 、 $45^\circ\text{C}$  下,超声波清洗器里震荡 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 h,最后,用旋转-甩涂法将此溶液涂抹于锡掺杂玻璃光波导表面,在室温下真空干燥 24 h 备用.

3) 气体的检测: 取微量被测挥发性有机物液体(分析纯)注入标准体积的容器中自然蒸发,待完全蒸发后,用对应的气体检测管确认其浓度.

光波导传感元件测试系统示意图如图 1 所示,系统由光源、载气、流量计、反射镜、流动池(2 cm × 1 cm × 1 cm)、 $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导敏感元件、光电倍增管和记录仪(电脑)等部分组成. 将研制出的  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导敏感元件固定在检测架上,利用棱镜耦合法激励导波光. 为了能使棱镜(折射率为 1.78)紧贴于玻璃光波导元件表面,在交界面滴入二碘甲烷( $\text{CH}_2\text{I}_2$ , 折射率为 1.74)液体,将波长为 650 nm 的半导体激光通过第一个棱镜输入到导波层内,

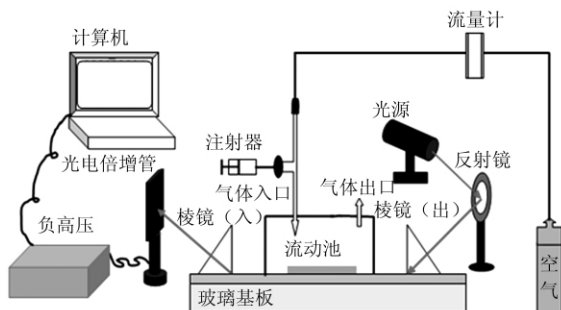


图1 平面玻璃光波导气敏测试系统总示意图

Fig.1 Schematic view of optical Waveguide (OWG) gas sensor system

在导波层内传播的光以倏逝波的方式进入敏感层,然后传播到另一个棱镜时输出. 当敏感(层)薄膜与被测气体作用时,敏感薄膜光学特性发生变化而引起输出光强度的变化. 由棱镜输出的光信号被光电倍增管转换成电信号,最后由计算机记录光强度随时间的变化数据. 纯空气流入流动池的速度控制在  $50\text{ cm}^3/\text{min}$ ,整个步骤在室温下进行.

## 2 分析与讨论

### 2.1 $\text{LiFePO}_4$ 的表征

用水热法所得产物的 X-射线衍射谱如图 2 (a) 所示,图 2 (b) 为 JCPDS nos. 40-1499 标准谱. 样品 X-射线衍射谱中各衍射峰的位置和相对强度与标准谱(标准卡片)完全一致,由此可确定所合成的产物为正交晶系 Pmnb 空间群的橄榄石结构  $\text{LiFePO}_4$ . 图 3 为  $\text{LiFePO}_4$  粉末分散前后透射电镜图,由图 3 可看出, $\text{LiFePO}_4$  分散于 PVA 之前颗粒大小不一且有明显的团聚现象,最大颗粒直径有 500 nm 左右;分散之后, $\text{LiFePO}_4$  颗粒趋向于均一化,团聚情况得到较大程度的改善,晶粒也大幅度减小,即最大颗粒的直径有 100 nm 左右.

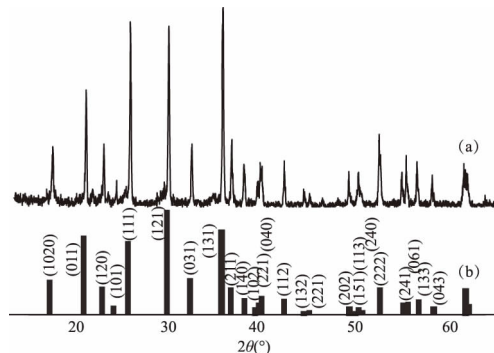


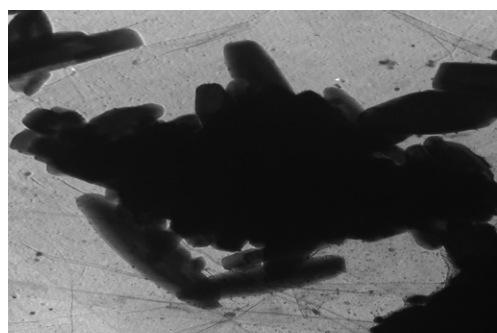
图2 水热合成的  $\text{LiFePO}_4$  粉末 X-射线衍射谱 (a) 及其 JCPDS nos. 40-1499 标准谱图 (b)

Fig.2 X-ray diffraction patterns (a) and JCPDS nos. 40-1,499  $\text{LiFePO}_4$  (b) of  $\text{LiFePO}_4$  prepared by hydrothermal method

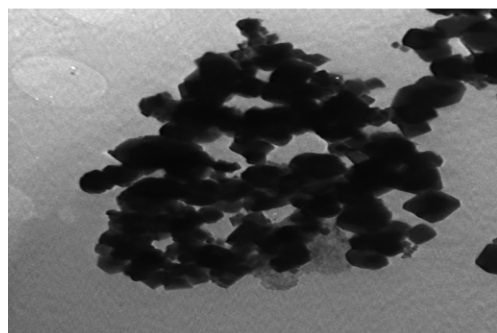
### 2.2 敏感薄膜制备条件的筛选

敏感薄膜制备条件包括分散剂质量分数、超声时间和超声温度等. 分别配制质量分数为 1.0%、2.0%、3.0%、4.0% 的聚乙烯醇分散溶液,将水热合成出的  $\text{LiFePO}_4$  粉末加入其中,超声时间分别设定为 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 h; 超声介质温度分别设定为  $25^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ 、 $45^\circ\text{C}$ . 最后,用旋转-甩涂法将上述所得的  $\text{LiFePO}_4$ -PVA 分散溶液涂抹于锡掺杂玻璃光波导表面,研制一系列 PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$

薄膜/锡掺杂玻璃光波导元件. 根据薄膜元件与相同浓度不同挥发性有机气体 VOCS 作用时, 在光波导测试系统发生的输出光强度的变化值(响应,  $\Delta I = I_{\text{空气}} - I_{\text{气体}}$ ) 筛选出最佳制膜条件.  $\text{LiFePO}_4$  粉末的透射电镜如图 3 所示. 由图 4 所示的研究结果可知, 在相同体积分数为  $1 \times 10^{-3}$  的 8 种挥发性有机气体中, 各个敏感元件仍对二甲苯有较大的响应, 其次是苯乙烯、氯苯, 这与被测气体摩尔折射度有关<sup>[13]</sup>. 因在 PVA 质量分数为 2.0%、超声时间为 2 h、分散介质温度为 25  $^{\circ}\text{C}$  时, PVA 的分散性良好, 使  $\text{LiFePO}_4$  晶粒尺寸明显减小(图 3), 表面积增大, 对二甲苯等气体的吸附变大, 因而对应的薄膜元件显出良好的气敏特性. 综合以上结果确定, 最佳制膜条件: 超声时间为 2 h, 分散剂的质量分数为 2%, 分散介质温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ .



(a) 分散前

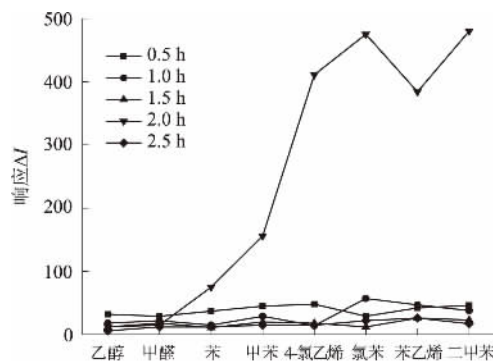


(b) 分散后

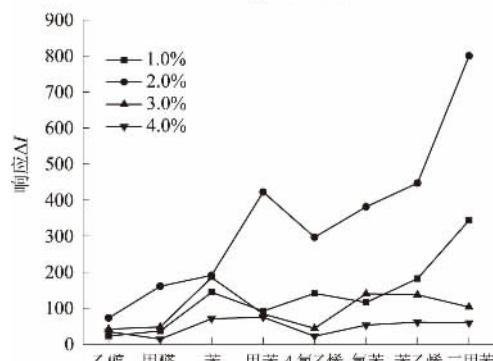
图 3  $\text{LiFePO}_4$  粉末的透射电镜Fig. 3 TEM image of  $\text{LiFePO}_4$ 

图 5 为 PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导元件对不同体积分数的二甲苯气体的响应. 当载气流入流动池时, 输出光强度基本上保持一条平稳线; 当一定体积分数的二甲苯气体注入流动池吸附到敏感层表面时, 因透光率减小(图 6)而引起输出光强度减弱. 随着二甲苯气体脱离敏感层表面从流动池中排出, 输出光强度增大, 最终完全恢复到原来的强度. PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导元件对二甲苯体积分数的检

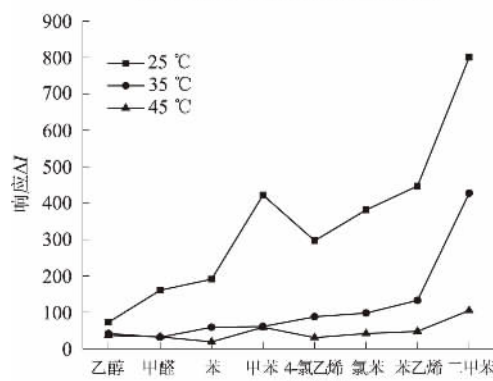
测范围为  $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-3}$ ; 响应恢复时间分别小于 2 s 和 19 s.



(a) 不同时间



(b) 质量分数不同的聚乙烯醇分散溶液



(c) 不同温度

图 4 不同条件下制备的 PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导元件对体积分数为  $1 \times 10^{-3}$  的挥发性有机气体的响应

Fig. 4 The response of PVA dispersed  $\text{LiFePO}_4$  film/tin diffused optical waveguide which prepared under different conditions to  $1 \times 10^{-3}$  of volatile organic compounds

通过比较在室温下干燥的  $\text{LiFePO}_4$  薄膜元件和 PVA 分散之后的  $\text{LiFePO}_4$  薄膜元件对相同体积分数的二甲苯、苯乙烯、氯苯、甲苯等苯类挥发性气体的响应可知, 如图 7 所示, PVA 分散之后,  $\text{LiFePO}_4$  薄膜元件对苯类气体的响应较大, 与此同时对二甲苯气体的检测灵敏度提高了 10 倍, 这与 PVA 分散之后晶粒尺寸变小有关.

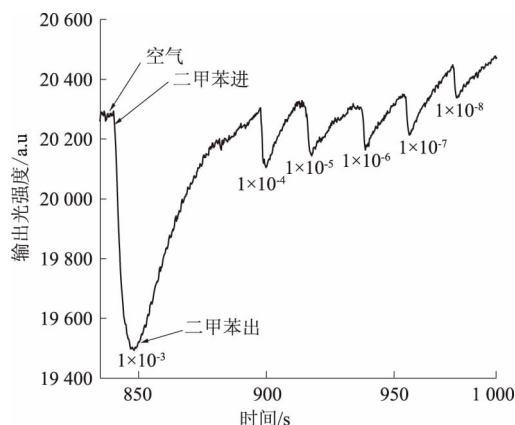


图 5 PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导元件对二甲苯的响应

Fig. 5 Response of PVA dispersed  $\text{LiFePO}_4$  thin film Optical Waveguide gas sensor to various concentration of Xylene

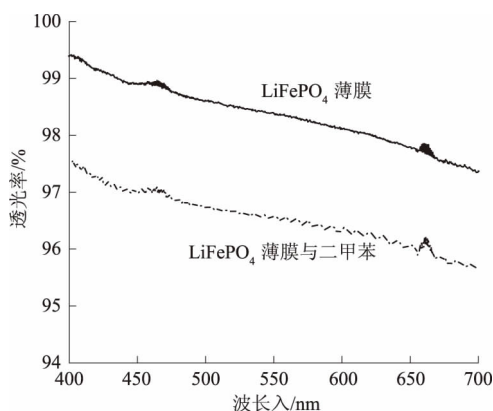


图 6 PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$  薄膜与二甲苯气体作用前后的透光率变化

Fig. 6 The transmittance change of PVA dispersed  $\text{LiFePO}_4$  thin film after and before exposure to Xylene

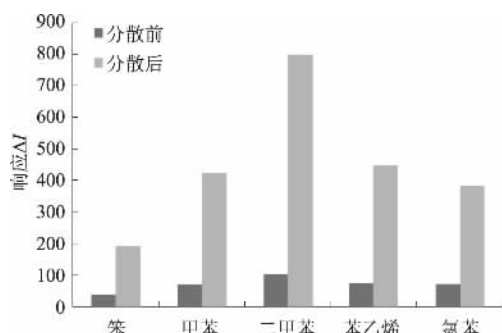


图 7 PVA 分散前后  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导元件气敏性的比较

Fig. 7 The comparison of sensitivity of  $\text{LiFePO}_4$  thin film Optical Waveguide before and after dispersion in PVA

### 3 结论

(1) 用水热法合成  $\text{LiFePO}_4$  粉体并将它分散在聚乙烯醇 (PVA) 当中. 利用旋转-甩涂法将  $\text{LiFePO}_4$ -PVA 分散溶液涂抹于锡掺杂玻璃光波导表面, 研制出 PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$  薄膜/锡掺杂玻璃光波导敏感元件.

(2) 通过实验筛选出最佳制膜条件: 超声时间为 2 h, 分散温度为 25  $^{\circ}\text{C}$  和分散剂质量分数为 2%.

(3) 在最佳条件下研制出的 PVA 分散  $\text{LiFePO}_4$  薄膜光波导敏感元件对二甲苯等苯类气体有较大的响应. 该光波导敏感元件对二甲苯体积分数的检测范围为  $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-3}$ . PVA 分散之后, 敏感元件对二甲苯气体的检测灵敏度有所提高.

### 参考文献:

- [1] 刘密, 韩莉锋, 肖元化, 等. 多孔  $\text{Co}_3\text{O}_4$  纳米片的制备及其电化学性能研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(3): 46-49.
- [2] 李永刚, 赵向南, 范桂霞, 等. 硅元素对 Zn-75Al 合金组织及性能的影响 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 100-103.
- [3] 李沙沙, 徐基贵, 史洪伟, 等. 不同分散剂对纳米 ZnO 分散性能的影响 [J]. 洁净煤技术, 2012, 18(5): 39-41.
- [4] SAUVAGE F, TARASCON J M, BAUDRIN E. Formation of autonomous ion sensors based on ion insertion-type materials [J]. Appl electrochem, 2008, 38: 803-808.
- [5] PATIMA N, ABLIZ Y, ADALAT A et al. Formaldehyde gas sensor based on silver-and-yttrium-codoped-lithium-iron phosphate thin film optical waveguide [J]. Sensors&Actuators: B. chemical, 2013, 176: 460-466.
- [6] PATIMA N, ABLIZ Y, JI DE W et al. Optical properties and sensing applications of lithium iron phosphate thin films [J]. Thin solid films, 2012, 520: 6250-6255.
- [7] TIEFENTHALER K, LUKOSZ W. Grating couplers as integrated optical humidity and gas sensors [J]. Thin solid films, 1985, 126(3/4): 205-211.
- [8] HONG L S, XUE L W. Optical planar waveguide in magnesium aluminate spinel crystal using oxygen ion implantation [J]. Appl Phys B, 2015, 120: 25-29.
- [9] HLASEK T, RUBESOVA K, JAKES V. Structural and waveguiding characteristics of  $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{-yG-ayO}_{12}$  films grown by the liquid phase epitaxy [J]. Optical materials, 2015, 49: 46-50.

- [10] AISSAM A, DOMINIQUE D, BRUNO B. Design and sensing properties of an integrated optical gas sensor based on a multilayer structure [J]. Anal Chem, 2008, 80: 9188 – 9194.
- [11] AKIRA Y, KAZUHIRO H, NORIO T. Optical waveguide sensor based on a porous anodic alumina/aluminum multilayer film [J]. Anal Chem, 2009, 81: 105 – 111.
- [12] 庄大高, 赵新兵, 曹高劭, 等. 水热法合成  $\text{LiFePO}_4$  的形貌和反应机理 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 2034 – 2038.
- [13] 近藤精一, 石川达雄, 安部郁夫. 吸附科学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 155.

## The Impact of Polyvinyl Alcohol Dispersion of $\text{LiFePO}_4$ Gas Sensing Properties thin Film

PATIMA Nizamidin, ABLIZ Yimit

( College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** In this paper, in order to optimize the preparation conditions and to improve the sensitivity of  $\text{LiFePO}_4$  thin film gas sensor, the  $\text{LiFePO}_4$  was synthesized by hydrothermal method and dispersed in polyvinyl alcohol (PVA). The PVA dispersed  $\text{LiFePO}_4$  thin film/tin-diffused glass optical waveguide sensing element was fabricated via spin-coating a  $\text{LiFePO}_4$ -PVA dispersion solution onto the surface of tin diffused glass optical waveguide; In the end, the gas sensing properties was monitored using the planar optical waveguide detection system. The testing results indicated that, the best condition for fabrication of sensing film was: the dispersant concentration was of 2wt.%, the ultrasonic vibration time was 2 h, dispersion temperature was 25 °C, and the corresponding sensing element exhibited good response to BTXs (benzene, toluene, xylene). The detection limits for the PVA dispersed  $\text{LiFePO}_4$  thin film/tin-diffused glass optical waveguide sensor was  $1 \times 10^{-8}$  –  $1 \times 10^{-3}$ . After the dispersion, the sensitivity was increased.

**Key words:** optical waveguide sensing element; dispersant;  $\text{LiFePO}_4$  thin film; gas sensing properties