

- 中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1671-6833
CN 41-1339/T
CODEN ZDXGAN

郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE

2014.1

第35卷 第1期
Vo1.35 No.1
2014年1月出版

ISSN 1671-6833



目 次

电气工程

基于蚁群及空间邻域信息的 FCM 图像分割方法	毛晓波, 张勇杰, 陈铁军(1)
基于加权小波分解的人脸识别算法研究	苏士美, 王 燕, 王明霞(5)
PSASP 动态等值功能的应用与分析	刘宪林, 矫龙飞, 程子霞(10)
新型正交铁芯三相磁控电抗器的研究	赵国生, 程子霞, 孙可钦(15)
树枝形专用线取送车优化问题的研究	李 斌, 董 昱, 孙云霞(20)
基于 MSP430 和模糊控制的微量计量泵控制系统	杨艳萍, 陶彩霞, 吴俭民(25)
基于改进型 JGPC 的网络系统随机时延补偿	刘艳红, 罗永平, 刘言兴(30)
基于改进粒子群算法的路径优化问题研究	梁 静, 宋 慧, 瞿博阳, 毛晓波(34)
基于模糊相似选择和接近度的电网谐波综合评估方法	陈根永, 柴鹏飞, 郭耀峰, 方 向, 伽胜利(39)
带有可信度的偏序偏好决策信息的聚合方法	陈树伟, 周 威, 蔡丽娜(43)

化工与材料工程

向心透平导向叶栅的结构优化	魏新利, 邱志明, 马新灵, 王 慧(46)
600 MW 火电机组间接空冷塔流动换热特性数值研究	王为术, 张雨飞, 常娜娜(51)
H ₂ O ₂ 助 TiO ₂ 可见光催化降解水中的扑草净	李庆奎, 周秉彦, 唐建军, 陈益清(55)
双酚 A 在盐水中溶解度的测定及关联	岳金彩, 朱南南, 刘先红(60)
混合液回流比对膜工艺处理效果影响的研究	王素兰, 段胜君, 于 洁, 邢传宏(64)
乙二胺硅胶材料固定床吸附铜离子的研究	范忠雷, 查会平, 王玲慧(68)
二仲丁基二硫醚合成反应动力学研究	胡国勤, 吴培培, 谢帮海, 张素娟(73)
粘接界面弹塑性内聚力模型子程序开发	张 军, 贾 宏, 田 阳(77)
成型磁性污泥活性炭的制备与分析	徐正坦, 刘心中(81)

土木与交通工程

受热不可压黏弹性圆柱体中空穴的动态增长	陈亚娟, 王钦亭, 尚新春(85)
配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土柱抗震性能研究	李艳艳, 李泽高, 刘 坤, 张彦平(89)
公路桥梁车桥耦合振动数值分析方法	刘世忠, 刘永健, 程 高, 王 旭, 李 娜, 赵明伟(94)
基于迭代分析的多塔悬索桥合理成桥状态确定方法	周云岗(99)
考虑界面影响的钢纤维混凝土细观力学等效性能研究	程站起, 夏乃凯(104)

信息与机械工程

基于块衰落信道的 turbo 码一致界	张卫党, 王姣姣, 陈泽先(108)
一种新的 OFDM-OQAM 的信道估计方法	范文兵, 范程龙, 李海涛, 邢军阳(112)
基于规则推理的继电保护动作行为评价的新方法研究	徐 敏, 陈 全, 张锦文, 柯朝辉, 姚 斌, 冯 超(116)
小型化超宽带(UWB)功分器的模拟与设计	惠晓威, 姜 瀚(120)
机场集装箱/板升降平台车桥平台的设计与研究	李 霞, 张志显, 张三川, 刘 剑(124)

期刊基本参数: CN 41-1339/T * 1980 * b * A4 * 128 * zh * P * ¥10.00 * 1600 * 29 * 2014-01

责任编辑: 陈晓堂

CONTENTS

[Electrical Engineering]

- Image Segmentation Based on the Ant Colony and Improved FCM Clustering Algorithm with Spatial Information MAO Xiao-bo, ZHANG Yong-jie, CHEN Tie-jun (1)
- Face Recognition Research Based on Weighted Wavelet Decomposition SU Shi-mei, WANG Yan, WANG Ming-xia (5)
- The Application and Analysis of PSASP Dynamical Equivalence LIU Xian-lin, JIAO Long-fei, CHENG Zi-xia (10)
- Research on Novel Orthogonal Core Three-Phase Magnetic Controllable Reactor ZHAO Guo-sheng, CHENG Zi-xia, SUN Ke-qin (15)
- Research on PTW on Branch-shaped Sidings LI Bin, DONG Yu, SUN Yun-xia (20)
- Trace Metering Pump Control System Based on MSP430 and Fuzzy PID YANG Yan-ping, TAO Cai-xia, WU Jian-min (25)
- Delay Compensation of Network Control Systems Based on JGPC LIU Yan-hong, LUO Yong-ping, LIU Yan-xing (30)
- Research on Path Planning Problems Based on Improved Particle Swarm Optimizer LIANG Jing, SONG Hui, QU Bo-yang, MAO Xiao-bo (34)
- Application of Fuzzy Similarity Selection and Proximity on Grid Power Harmonic Comprehensive Evaluation CHEN Gen-yong, CHAI Peng-fei, Guo Yao-fen, FANG Xiang, Qie Sheng-li (39)
- An Approach to Aggregating Partially Ordered Preferences with Belief Degrees for Decision Making CHEN Shu-wei, ZHOU Wei, CAI Li-na (43)

[Chemical Engineering and Material Engineering]

- The Structural Optimization of Guide Vane of Radial-Inward-Flow Turbine WEI Xin-li, QIU Zhi-ming, MA Xin-ling, WANG Hui (46)
- Numerical Simulation on the Flow Field and Heat Transfer Characteristics of Indirect Air-Cooling Tower in 600MW Supercritical Thermal Power Unit WANG Wei-shu, ZHANG Yu-fei, CHANG Na-na (51)
- Degradation of Prometryn by TiO_2 Visible Photocatalysis with H_2O_2 Assistance LI Qing-kui, ZHOU Bing-yan, TANG Jian-jun, CHEN Yi-qing (55)
- Measurement and Correlation of the Solubilities of BPA in NaCl Solution YUE Jin-cai, ZHU Nan-nan, LIU Xian-hong (60)
- Study on the Effect of Mixed Liquid Recycle Ratio on Membrane Process WANG Su-lan, DUAN Sheng-jun, YU Jie, XING Chuan-hong (64)
- Fixed Bed Adsorption of Copper Ions on Ethylenediamine-grafted Silica Gel FAN Zhong-lei, ZHA Hui-ping, WANG Ling-hui (68)
- Kinetic Study on Synthesis of Di-sec Butyl Disulfide HU Guo-qin, WU Pei-pei, XIE Bang-hai, ZHANG Su-juan (73)
- Development of Subroutine for Elastic-plastic Cohesive Zone Model of Bonded Interface ZHANG Jun, JIA Hong, TIAN Yang (77)
- The Preparation and Analysis of Shaped Magnetic Sludge Activated Carbon XU Zheng-tan, LIU Xin-zhong (81)

[Civil Engineering and Construction Engineering]

- Dynamical Growth of Cavity in a Heated Incompressible Viscoelastic Cylinder CHEN Ya-juan, WANG Qin-ting, SHANG Xin-chun (85)
- Research on Seismic Behavior of HRB500 Reinforced Concrete T-shaped Section Columns LI Yan-yan, LI Ze-gao, LIU Kun, ZHANG Yan-ping (89)
- Numerical Analysis of Vehicle-Bridge Coupling Vibration for Highway Bridges LIU Shi-zhong, LIU Yong-jian, CHENG Gao, WANG Xu, LI Na, ZHAO Ming-wei (94)
- Determination Method of Reasonable Finished Dead State Of Multi-Town Suspension Bridges Based on Iterative Analysis ZHOU Yun-gang (99)
- Micromechanics Equivalent Performance Study of Steel Fiber Reinforced Concrete with Interface Layers CHENG Zhan-qi, XIA Nai-kai (104)

[Information Engineering and Mechanical Engineering]

- Union Bound of Turbo Codes on Block-Fading Channels ZHANG Wei-dang, WANG Jiao-jiao, CHEN Ze-xian (108)
- A New OFDM-OQAM Channel Estimation Method FAN Wen-bing, FAN Cheng-long, LI Hai-tao, XING Jun-yang (112)
- Research on a New Method of Relay Protection Action Evaluation Based on Rule Based Reasoning XU Min, CHEN Quan, ZHANG Jin-wen, KE Chao-hui, YAO Bin, FENG Chao (116)
- Simulation and Design of Miniaturized UWB Power Divider HUI Xiao-wei, JIANG Han (120)
- Research and Design of the Airport Container/pallet Lifting Loader LI Xia, ZHANG Zhi-xian, ZHANG San-chuan, LIU Jian (124)

本刊被下列数据库及文摘收录:

- 美国《化学文摘》(CA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《科学文摘》(SA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》

- 《万方数据系统》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国无机分析化学文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《工程机械文摘》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《电子科技文摘》

郑州大学学报(工学版)
Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxue Ban)
双月刊 (1980年创刊)
第35卷 第1期 总第133期 2014年1月10日

Journal of Zhengzhou University
(Engineering Science)
Bimonthly (Started in 1980)
Vol.35 No.1 Sum No.133 Jan.10, 2014

主管单位 河南省教育厅
主办单位 郑州大学
出版单位 《郑州大学学报(工学版)》编辑部
电子信箱 gxb@zzu.edu.cn
地 址 河南省郑州市科学大道100号(450001)
电 话 (0371)67781276 67781277
主 编 辛世俊
副 主 编 李秀明
印刷单位 河南金河印务有限公司
发行范围 国内外公开发行
征 订 处 全国各地邮政局
发行单位 河南省邮政发行局

Administrated by The Education Department
of Henan Province
Sponsored by Zhengzhou University
Edited & Published by Editorial Board of Journal of
Zhengzhou University
E-mail gxb@zzu.edu.cn
Address No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, China
Telephone (0371)67781276 67781277
Chief Editor XIN Shi-jun
Executive Chief Editor LI Xiu-ming
Printed by Henan Jinhe Printing Co., Ltd.
Distributed by Publishing Trading Corporation,
P.O.B.782, Beijing 100011, China

中国标准刊号: **ISSN 1671-6833**
CN 41-1339/T

定价: 10.00元

邮发代号: 36-232

文章编号:1671-6833(2014)01-0001-04

基于蚁群及空间邻域信息的 FCM 图像分割方法

毛晓波, 张勇杰, 陈铁军

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对模糊 C 均值(FCM)聚类算法聚类个数难以确定、搜索过程易陷入局部最优的缺陷,把蚁群算法与改进的 FCM 聚类算法相结合,提出了一种基于蚁群算法的带有空间邻域信息的模糊 C 均值聚类图像分割算法. 首先利用分水岭算法对图像进行初始分割,然后利用蚁群算法寻优,求得聚类中心和聚类个数,将其作为模糊 C 均值聚类的初始聚类中心和聚类个数进行模糊聚类. 实验结果表明:由于聚类样本数量显著减少,很大程度上提高了聚类速度和抗噪能力,增强了算法的鲁棒性.

关键词: 蚁群算法;分水岭;空间约束;图像分割

中图分类号: TP311

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.001

0 引言

图像分割是图像分析、理解和识别的基础. 分割效果直接决定了后续图像分析和识别的性能. 由于标准的 FCM 算法易陷入早熟状态、没有考虑像素之间的空间约束等缺点,因而对含噪声和灰度不均匀的图像较敏感. 已有研究表明,图像中的像素点所属类别同时受当前像素点的灰度值和其邻域内像素点灰度值的影响,因此,在图像分割中考虑邻近像素的空间关系非常重要. 目前在 FCM 算法的基础上,许多学者已经提出了一些改进算法,文献[1]将图像像素的空间信息引入到相似性度量中,不需要根据图像提前设置参数,因此普遍性高且方法新异;文献[2]中引入空间函数,通过控制函数中的参数对图像中的噪声点、边缘点以及区域内部的点进行区别对待,该方法用时较长,在要求实时性高的条件下是不可用的;文献[3]提出了基于核函数及空间邻域信息的 FCM 图像分割算法. 这些算法均可以在不同程度上提高原始 FCM 算法的抗噪能力.

蚁群算法作为一种仿生进化算法,具有离散性、正反馈性、易与其它算法相结合等特点^[4],在解决复杂的组合优化问题中具有优势. 但基本蚁群算法进行大规模优化时存在一些缺陷:收敛时

间过长,易陷入局部最优.

针对以上问题,笔者提出了一种蚁群算法和 FCM 模糊聚类相结合的图像分割方法. 该算法弥补了单独使用分水岭法时的典型分割错误(过分割)^[5],减少了蚁群寻优时间,同时可以有效地克服 FCM 算法对初始化参数及噪声的敏感,分割效果良好.

1 相关算法

1.1 蚁群算法

蚁群算法是因蚂蚁觅食行为而提出的一种全局优化算法. 具体步骤为:假定样本集合为 $X = \{X_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ (n 个输入样本),确定聚类中心的过程就是蚁群从蚁穴出发去寻找食物的过程,食物为聚类中心^[6]. d_{ij} 是 X_i 到 X_j 的加权欧氏距离. 令

$$d_{ij} = \|Q(X_i - X_j)\| = \sqrt{\sum_{l=1}^m Q_l(x_{il} - x_{jl})}. \quad (1)$$

式中: Q 为加权因子,可根据各分量在聚类中的影响程度而定.

设聚类半径为 r ,统计误差为 ε ,初始化各路径信息素浓度 $\tau_{ij}(0) = 0$. 计算各路径上的信息素浓度为

收稿日期:2013-09-10;修订日期:2013-11-16

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114101110005);河南省重大科技攻关项目(102101210100);河南省教育厅科学技术研究重点项目资助计划项目(12A410002).

作者简介: 毛晓波(1965-),男,河南开封人,郑州大学教授,博士,研究方向为仿生机器视觉、智能仪器仪表, E-mail: mail-mxb@zzu.edu.cn.

$$\tau_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & d_{ij} \leq r. \\ 0 & d_{ij} > r. \end{cases} \quad (2)$$

X_i 是否归并到 X_j 的概率由下式给出.

$$P_{ij}(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s=1}^j \tau_{sj}^\alpha(t) \eta_{sj}^\beta(t)}. \quad (3)$$

式中: $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ 为引导函数; α 为信息调节因子, 表示运动轨迹的相对重要性; β 为期望调节因子, 表示能见度的相对重要性. 如果 $P_{ij}(t) \geq P_0$, 则 X_i 归并到 X_j 邻域内. 令 $C_j = \{X_k | d_{kj} \leq r, k = 1, 2, \dots, J\}$, C_j 表示所有归并到 X_j 邻域的数据集合. 基于上面计算, 求得理想聚类中心为

$$O_j = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^J X_k, X_k \in C_j. \quad (4)$$

第 j 个聚类的偏离误差计算

$$D_j = \sum_{k=1}^j \left[\sum_{i=1}^2 (x_{ki} - O_{ji})^2 \right] 1/2. \quad (5)$$

式中: O_{ji} 表示第 j 个聚类中心的第 i 个分量, 计算

总体误差 $\varepsilon = \sum_{j=1}^k D_j$, 若 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$, 则输出聚类个数 c 和聚类中心.

1.2 改进的 FCM 算法

图像的一个重要特征就是相邻的像素大都具有相似的特征值, 并且它们被聚为同一类的概率很大^[7], 基于此, 笔者对 FCM 算法进行改进, 在利用灰度信息的同时, 考虑了空间邻域信息. 主要思想是定义一种新的距离测度函数, 同时考虑目标像素点的特征值和其邻域像素点对聚类的影响^[8], 此距离测度函数会根据邻域内容自适应地调整参数从而得到较好的分割效果.

假设 W 为可移动的 3×3 像素领域窗口, x_j 为窗口中心像素点灰度值, W 窗口包含 M 个邻接像素点, Ω_j 是点 j 邻接像素点的集合, 则可以重新定义像素 x_j 到聚类中心 v_i 的距离

$$d_{ij}^* = \lambda d_{ij} + (1 - \lambda) \sum_{x_k \in \Omega_j} d_{ik}. \quad (6)$$

式中: d_{ij}^* 表示特征向量 X_j 与第 i 类中心向量 V_i 的相似性度量; $d_{ij} = \|x_j - v_i\|^2$ 表示点 j 到第 i 个聚类中心的欧式距离; $d_{ik} = \|x_k - v_i\|^2$ 表示点 j 空间邻域的空间邻域信息.

$$\lambda = \frac{\sum_{k \in W_j} |d_{ik} - d_{ij}|}{\sum_{k \in W_j} d_{ik}}. \quad (7)$$

此时的目标函数为

$$J_m(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ij}^2 d_{ij}^*. \quad (8)$$

式中: c 为聚类个数; $U = \{u_{ij}\}_{c \times n}$ 为隶属度矩阵; u_{ij} 表示特征向量 X_j 属于第 i 类的隶属度; V 为聚类中心矩阵. 据拉普拉斯乘子寻优算法, 可导出隶属度函数:

$$u_{ij} = \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{jk}} \right)^{2/(m-1)} \right]^{-1}. \quad (9)$$

聚类中心:

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m}, 1 \leq i \leq c. \quad (10)$$

2 基于蚁群算法及改进的 FCM 图像分割

笔者将像素的空间信息引入到 FCM 算法中, 提出一种将分水岭算法、蚁群算法和改进的 FCM 聚类算法相结合的图像分割算法. 首先利用分水岭算法对图像进行预处理, 得到 M 个最大相似区域, 再将 M 个相似区域看成具有不同属性的蚂蚁, 用蚁群算法对区域进行优化, 求得 FCM 的初始聚类中心和聚类个数, 最后使用改进的 FCM 算法进行聚类. 算法的具体步骤如下.

1) 对图像进行预处理, 得 M 个最大相似区域. 初始化 $N, r, \varepsilon_0, \alpha, \beta, P_0, \tau_{ij}(0)$.

2) 根据(1)式计算 d_{ij} , 据(2)式计算 $\tau_{ij}(t)$, 据(3)式计算 $p_{ij}(t)$. 若 $P_{ij}(t) \geq P_0$ 成立, 则 X_i 合并到 X_j 的邻域. 否则 $i+1$ 转到 b .

3) 据式(4)计算该类的聚类中心 O_j . 据式(5)计算 D_j 和总体误差 ε , 若满足 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$, 则输出聚类中心 O_j 和聚类个数 c , 否则, 继续迭代.

4) 将得到的类别数 c 作为 FCM 聚类算法的分类个数, 聚类中心点作为 FCM 初始化聚类中心, 初始化各参数.

5) 根据式(6)计算测度距离 d_{ij}^* . 据式(9)计算隶属度 u_{ij} , 据式(10)计算聚类中心 v_i , 据式(8)计算目标函数 $J_m(U, V)$.

6) 反复更新计算 $u_{ij}, v_i, J_m(U, V)$, 直到满足 $J_m(U, V)^{(n)} - J_m(U, V)^{(n-1)} \leq \varepsilon^*$ 或达到迭代次数为止.

3 实验结果与分析

为了验证该算法的可行性和实用性, 笔者分别对以下图像进行仿真如图 1~4 所示, 并将仿真结果与传统 FCM 聚类算法和基于蚁群算法的 FCM 聚类算法分割结果进行比较, 如表 1 所示. 同时, 为了定性地评价方法的性能, 引入正确分割

率(SA),其定义为: $SA = (\text{正确分割的像素数} / \text{所有的像素数}) \times 100\%$ [9]. 参数设置为:改进 FCM 算法参数设置中 $m = 2, \varepsilon = 0.01$, 邻域大小为 3×3 . 图 2、图 3 中,传统 FCM 聚类算法的分割结果,脑部图像的白质和灰质分割边界比较模糊,而且有较多散落分布的小像素块;基于蚁群的分割

将白质和灰质明显的分开,但分割边界仍然模糊,且此方法用时远多于标准 FCM 分割. 对于蝴蝶图像,标准 FCM 算法和基于蚁群的模糊聚类算法分割的蝴蝶,绿叶和花的分割边界不清晰,而笔者算法,不仅正确分出了目标图像,而且用时相对合理.



图 1 各图的原始图像

Fig.1 Original images



图 2 图 1(a) 分割结果

Fig.2 Segmentation results of fig 1 (a)



图 3 图 1(b) 分割结果

Fig.3 Segmentation results of fig 1 (b)

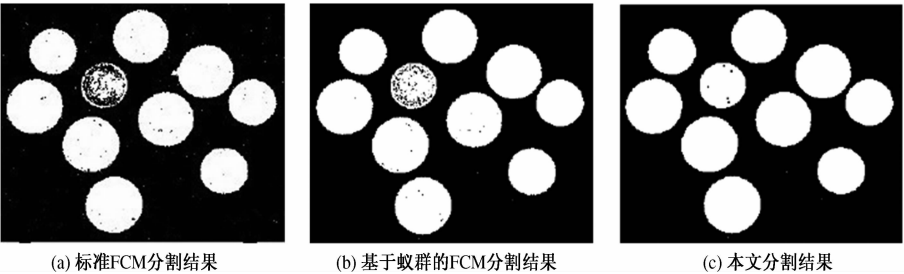


图 4 图 1(c) 分割结果

Fig.4 Segmentation results of fig 1 (c)

表 1 3 种算法分割性能比较
Tab.1 Segmentation performance comparison
of the three algorithms

图像	算法	时间/s	正确率/%
图 1(a)	标准 FCM	15.74	80.25
	基于蚁群的模糊聚类	84.32	86.97
	本文算法	39.85	94.38
图 1(b)	标准 FCM	18.12	92.54
	基于蚁群的模糊聚类	89.38	94.69
	本文算法	44.28	95.13
图 1(c)	标准 FCM	20.31	81.48
	基于蚁群的模糊聚类	91.84	89.44
	本文算法	53.36	89.92

图 4 中,为了验证笔者算法的鲁棒性,对添加 2% 的高斯噪声图像进行分割,从图的分割效果可以看出,笔者的算法对噪声图像的分割效果明显优于传统 FCM 分割方法,且分割用时很少,表现出了本算法的鲁棒性和优越性.

4 结论

该算法以分水岭算法、蚁群算法、模糊 C 均值聚类、像素空间邻域信息为基础,将图像的空间信息分别引入到相似性度量的特征距离中.实验结果表明,笔者算法比标准的 FCM 算法和基于蚁群的 FCM 算法具有更好的鲁棒性,有效克服模糊聚类方法对噪声敏感的缺陷,对信噪比较低的图像分割效果较理想.

参考文献:

[1] LI Chuan-long, LI Ying, WU Xue-rui. Novel fuzzy c-

means segmentation algorithm for image with the spatial neighborhoods[C]. Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2012 2nd International Conference. NanJing, 2012; 1-4.

[2] 王媛媛. 合理利用空间信息的 MRI 脑部图像分割[J]. 微型机与应用, 2011, 30(19): 31-34.

[3] 杨悦, 郭树旭, 任瑞治, 等. 基于核函数及空间邻域信息的 FCM 图像分割新算法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(2): 283-287.

[4] 杨卫莉, 郭雷, 许钟, 等. 基于区域生长和蚁群聚类的图像分割[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(5): 1579-1582.

[5] 余旺盛, 侯志强, 王朝英, 等. 基于改进滤波和标记提取的分水岭算法[J]. 电子学报, 2011(4): 825-830.

[6] 李玉梅. 基于蚁群模糊聚类算法的图像分割研究[J]. 天津职业院校联合学报, 2011, 13(2): 78-81.

[7] 黄宁宁, 贾振红, 余银峰, 等. 改进的 FCM 与局部信息相结合的图像分割[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(8): 97-100.

[8] 张爱梅, 孔文杰. 基于图像处理和 DSP 的交通灯实时智能控制系统研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010, 31(3): 54-56.

[9] AHMED M N, YAMANY S M, MOHAMED N, et al. A modified fuzzy c-means algorithm for bias field estimation and segmentation of MRI data[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2002, 21(3): 193-199.

Image Segmentation Based on the Ant Colony and Improved FCM
Clustering Algorithm with Spatial Information

MAO Xiao-bo, ZHANG Yong-jie, CHEN Tie-jun

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

Abstract: With the fuzzy C-means clustering (FCM) algorithm it is difficult to determine the number of clusters on image segmentation, which is easy to get into a local optimum. In order to solve the problems, this paper proposed a new segmentation method based on the ant colony and improved FCM Clustering Algorithm with spatial information. Dividing image with the help of watershed algorithm, we got the initial segmentation results. It made full use of the ability of global optimization of the ant colony algorithm to obtain the accurate original cluster centers and cluster number. Then the results were obtained as the initial cluster centers and the number of clusters of fuzzy C-means clustering algorithm. The experimental results show that: due to the decrease of the size of clustering samples, the clustering speed, noise immunity and the robustness of the algorithm are improved significantly.

Key words: ant colony algorithm; watershed; spatial information; image segmentation

文章编号:1671-6833(2014)01-0005-05

基于加权小波分解的人脸识别算法研究

苏士美, 王 燕, 王明霞

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:小波变换能有效地将图像分解成高频和低频信息. 现有的人脸识别算法多数都是基于小波分解后的低频信息, 没有充分利用高频信息. PCA 是人脸识别中被广泛使用的一种算法, 它具有实现简单、正面图像识别率高等优点, 但 PCA 算法计算量大, 且易受光照、表情变化等因素的影响. 基于加权小波分解和 PCA 算法提出一种新的人脸识别算法, 对小波二级分解后的低、高频子分量进行加权融合, 以便充分利用人脸的细节信息, 并分别给 PCA 前三个最大主分量赋予一个新权值, 来弥补传统 PCA 算法对光照、表情变化敏感的缺点. 实验结果表明提出的人脸识别算法在识别率和训练时间方面都得到了明显的改进.

关键词:小波分解; PCA; 人脸识别; 离散小波变换

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.002

0 引言

人脸识别的研究开始于上世纪六十年代末七十年代初, 并随着社会对人脸识别系统的迫切需求以及计算机科学的迅猛发展, 在九十年代以来成为国际国内研究的热点. 特征提取是人脸识别中最最重要的一个环节, 目的是从高维的特征数据中找出最能代表该人脸的少量特征数据, 以便进行识别分类. 目前常用的人脸识别特征提取算法有: 主分量分析 (Principal Component Analysis, PCA)^[1-2]、独立分量分析 (Independent Component Analysis, ICA)^[3]、线性鉴别分析 (Linear Discriminate Analysis, LDA)^[4] 和类依赖特征分析 (Class-dependence Feature Analysis, CFA)^[5] 等.

其中影响较大的是 Turk 等^[1]提出的特征脸方法即 PCA 方法. PCA 是人脸识别中被广泛使用的一种算法, 它具有实现简单、正面图像识别率高等优点. 但传统的 PCA 算法计算量过大, 且在光照、表情等因素变化较大时, 识别效果不是很好. 小波变换应用到人脸识别中, 主要利用小波的分解和重构算法来提取人脸图像信息、降低数据维数、滤除噪声. 同时小波变换对光照、图像大小缩放、旋转及平移具有一定程度的不敏感性, 可以降

低预处理后的人脸图像对后续 PCA 算法的影响. 小波变换能有效地将图像分解成高频和低频信息, 但人脸识别中通常都是舍弃能量较少且含噪声较多的高频子带, 仅用低频子带来进行后续处理, 人脸图像的信息利用并不完全. 基于以上原因, 笔者首先对小波二级分解后的低、高频子分量进行加权融合, 以便充分利用人脸的细节信息. 然后, 对 PCA 前 3 个最大主分量赋予一个新权值, 来弥补传统 PCA 算法对光照、表情变化敏感的缺点. 最后在 ORL 人脸库中通过 Matlab 编程实现来验证加权二级小波变换对改进 PCA 算法的影响.

1 加权小波变换

小波分析方法是傅里叶 (Fourier) 分析方法的延续与拓展. 小波分析方法可以有效地克服传统傅里叶分析的时空分隔这一缺点. 它是一种时间窗和频率窗均可动态变化的局部分分析方法, 通过伸缩和平移等运算对信号进行多尺度分析, 从而可以从信号中有效地提取出有用信息, 被誉为“数学显微镜”. 图像处理是小波分析应用的重要领域之一, 主要利用小波的分解和重构算法, 来降低图像数据维数, 去除噪声等, 并保留图像主要信息.

收稿日期: 2013-09-20; **修订日期:** 2013-11-20

基金项目: 河南省自然科学基金计划资助项目 (2011A510022)

作者简介: 苏士美 (1965-), 女, 河南商丘人, 郑州大学副教授, 硕士, 主要从事信号检测与处理方面的研究, E-mail: smsu@zzu.edu.cn.

若 $\psi(t)$ 满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$, 则通过对 $\psi(t)$ 的伸缩和平移就可以生成连续小波函数族:

$$\left\{ \psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \left| \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \right|, a \in \mathbf{R}^+, b \in \mathbf{R}, \text{ 且 } a \neq 0 \right\}. \tag{1}$$

式(1)定义的小波 $\psi_{a,b}(t)$ 称为连续小波基函数, a 为伸缩尺度, b 为平移距离. 小波变换与傅里叶变换的思想基本一致, 都是用信号在由一族基函数扩张形成的空间中的投影来表征信号. 其时宽与带宽的乘积很小, 并且在时空上都很集中.

用计算机来处理图像的小波分解, 只是将图像看做是离散函数, 故需用离散小波变换方法 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 来解决问题. 目前最实用的方法是对尺度按幂级数进行离散化, 即令尺度 $a = a_0^j, j \in \mathbf{Z}$. 尺度扩大为原来的 a_0^j 倍, 意味着频率降低 a_0^j 倍, 因此采样间隔扩大 a_0^j 倍. 而以 a_0^j 为采样间隔进行均匀采样, 由 Nyquist 采样定理可知, 原始信息不会丢失. 同时当 j 发生很小变化, 便会引起 a_0^j 非常大的变化, 即尺度的动态变化范围较大, 因此以幂级数进行离散化是一种非常有效的离散方法. 在实际应用中, 常取 $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0$, 其中 $a_0 \neq 1$, 带入式(1), 则对应的离散小波基函数:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0). \tag{2}$$

小波分解技术应用于人脸图像的识别中, 两个最重要的问题就是小波基和小波分解层数的选择. 不同的小波基影响不同区域的能量分布和特征提取的效果, 故而影响到识别率. 而小波分解层数的选取将影响到算法的复杂度和识别率, 当分解层数过多时, 图像数据维数降低, 后续算法复杂度则会大大降低, 但会使同一人脸的不同表情引起的差异和不同人脸之间的差异的模糊度增大, 降维后人脸图像携带的信息较少, 会造成识别率的降低; 而当分解层数较少时, 不但会影响后续算法的复杂度, 也不利于降低图像中的表情和光照等因素对后续处理的影响^[6]. 因此, 在用小波变换对人脸图像进行预处理时, 要考虑到小波基和小波分解层数对后续处理的影响.

对人脸图像进行 i 级分解, 将得到 $3i + 1$ 幅子带图像. 图 1 给出了小波二级分解的示意图. 其中 LL 是原始图像的低频量子图, LH 和 HL 分别为水平和垂直方向的子图, HH 是斜边缘子图. 人是

一个生命体, 他有着丰富多彩的表情, 而人脸表情的变化主要体现在眼睛和嘴巴上. 对于正面人脸识别而言, 眼睛和嘴巴的水平特征更明显些, 因此水平边缘子带图 LH 刻画了人脸的表情特征. 人脸的轮廓和鼻子的垂直特征较水平特征更明显, 但易受侧脸姿势和发型的影响, 因此垂直边缘子带图 HL 受人脸侧脸姿势和发型影响较大. 对于刚体模式, 斜边缘子带图 HH 反映图像的整体结构特征, 但人是非刚体的, 所以斜边缘信息稳定性最差. 因此 LH、HL 和 HH 子图包含了人脸表情、姿势、发型等可变因素, 在人脸识别中, 这些因素会影响到人脸的识别效果. 因此大多数研究者都会舍弃能量较少且含噪声较多的高频子带, 仅用低频子带来进行后续处理. Zhao 等^[7] 提出了一种基于小波变换的加权特征脸识别方法, 它是利用小波分解后 LL 和 HL、LH 平均子图并行进行特征脸识别, 最后加权排序得出识别结果. Liu 等^[8] 提出了用小波一级分解后的低频分量和加权高频分量分别结合 PCA 进行特征脸提取, 然后加权得出识别结果. 虽然这两种方法的识别率均有所提高, 但计算量过大. 笔者为了能够充分利用低、高频子带所携带的有用信息并缩短训练时间, 结合 ORL 人脸库中的图像特点, 舍弃水平边缘子带图 LH 和 HH 斜边缘子带图, 仅对低频子带 LL2 和垂直边缘子带 HL2 进行加权融合, 这样使得算法更为简单. 而笔者提出的这种加权小波分解, 称为 WDWT (Weighted DWT).

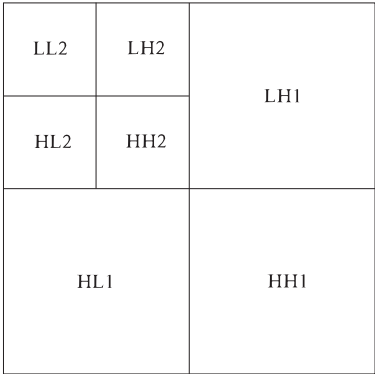


图 1 二级小波分解示意图
Fig.1 Schematic diagram of two-level wavelet decomposition

2 改进 PCA 算法 (Improved PCA, IPCA)

PCA 算法是多元统计分析中用于数据降维和特征提取的一种数据分析方法. PCA 算法的基本思想是通过线性空间变换, 寻找出一组最优单位

正交基,用这些正交基的线性组合来重构原人脸图像,并使重构以后的图像和原人脸图像的均方误差最小.该方法的基础是 Karhunen-Loeve 展开式,简称 K-L 展开式.

将每幅图像表示成列向量 $\mathbf{x}_i, i = 1, 2, \dots, M$, 设组成的列向量维数为 N , 计算其平均脸 $\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{x}_i$, 令 $\mathbf{A} = [\mathbf{x}_1 - \mu, \mathbf{x}_2 - \mu, \dots, \mathbf{x}_M - \mu]$, 则协方差矩阵 $\mathbf{cov} = \mathbf{A} \mathbf{A}^T$, 维数为 $N \times N$.

根据 K-L 变换, 所求新坐标系由 \mathbf{cov} 的前几个最大非零特征值所对应的特征向量组成. 在实际应用中, 考虑到直接计算, 计算量比较大, 通常都用奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 定理来获取 \mathbf{cov} 的特征值和特征向量.

SVD 定理如下.

设 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}_r^{m \times n} (r > 0)$, 则存在一个 m 阶正交矩阵 \mathbf{U} 和一个 n 阶正交矩阵 \mathbf{V} , 使得 $\mathbf{U}^T \mathbf{A} \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 其中 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$. σ_i 为矩阵 \mathbf{A} 的非零奇异值, 满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$. 前几个比较大, 它们包含了矩阵 \mathbf{A} 的大部分信息. \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 的列向量分别是 $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$ 和 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 对应 σ 的特征向量.

由于 PCA 分析是基于图像向量的, 在分析过程中, 必须把二维的人脸图像转化为一维列向量, 这就造成了人脸图像列向量维数过高, 使整个人脸特征提取过程所耗费的计算量相当大. 故笔者采用先对原始人脸图像进行小波变换, 降低数据维数, 然后结合 PCA 算法进行特征提取. 光照变化引起人脸外观的剧烈变化, 严重影响到识别系统的性能^[9]. 虽然小波分解对光照具有一定的不变性, 但光照变化对 PCA 算法的影响还是存在的. Burcu Kepenekci^[10] 提到, 经典 PCA 方法的前 3 个最大主分量往往反应了图像间由于光线不同而造成的差异. 因此, 当光照条件影响很明显的时候, 前 3 个主分量受污染最为严重, 处理它们在一定程度上可能会提高识别率. 对于这 3 个主分量的处理, 国内外研究者采用其他预处理方法来实现光照补偿, 或者是直接去掉这 3 个主分量. Li 等^[11] 提出了一种对这 3 个主分量进行加权处理的思想, 但他们仅仅对图像进行了改进 PCA 算法 (Improved PCA, IPCA), 未对图像进行降维, 这样特征提取所耗时间较长. 笔者首先对原始图像进行加权小波二级分解, 然后通过实验对这前 3 个主分量进行加权处理, 确定加权系数, 以保留它们

所包含的有用人脸信息, 进一步减少光照带来的影响.

IPCA 算法步骤:

- (1) 将每幅训练图像表示成列向量 $\mathbf{x}_i, i = 1, 2, \dots, M$, 组成图像矩阵 \mathbf{X} ;
- (2) 计算平均脸 $\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{x}_i$;
- (3) 进行自身零均值处理, 得 $\mathbf{A}_i = \mathbf{x}_i - \mu$;
- (4) 构建协方差矩阵 $\mathbf{cov} = \mathbf{A} \mathbf{A}^T$, 利用 SVD 定理, 求解协方差矩阵 \mathbf{cov} 的前 k 个最大特征值对应的特征向量 \mathbf{V} ;
- (5) 对 \mathbf{V} 的前三个分量赋予一个新的权系数;
- (6) 训练图像经自身零均值处理后, 组成的矩阵 \mathbf{A} 向投影空间进行投影;
- (7) 测试图像按照步骤 (1), 组成图像矩阵 \mathbf{Y} , 然后减去步骤 (2) 中的平均脸, 得处理后的图像矩阵向投影空间进行投影;
- (8) 采用最近邻分类器进行分类识别.

3 测试结果与分析

ORL 人脸库是由英国剑桥大学 AT&T 实验室创建的, 它包含 40 个人, 每人 10 张, 共 400 张正面人脸图像. 这 400 张正面人脸图像已进行过大归一化, 大小皆为 112×92 、灰度级为 256 的图像. 这些人脸图像并不全是拍摄于同一时期, 面部表情各异, 眼睛或睁或闭, 同时脸部细节也有不同程度的变化, 如戴着眼镜或不戴眼镜等. 图 2 是 ORL 数据库中一个人的 10 张人脸图像. 笔者选取每人前 5 张图像为训练样本, 后 5 张为测试样本来进行实验的. 首先对图像进行尺寸归一化, 归一化后的图像大小为 80×80 .



图 2 ORL 人脸库中一个人的人脸图像
Fig. 2 Face images of a person in ORL face database

图 3 给出了不同小波基下的人脸识别, 可以看出, 采用 db2 小波基, 识别率较高. 表 1 给出了小波一级分解和小波二级分解的识别率及所用时间, 截取维数为 45. 实验结果表明, 采用小波二级分解所用的训练时间远低于小波一级分解所用时

间,且识别率也得到了明显提高.针对 ORL 人脸库,一般采用 2 或 3 级小波分解时效果最佳,故笔者采用小波二级分解,小波基为 db2.

笔者通过对比实验来进行测试分析.图 4 给出了不同方法下的识别结果.

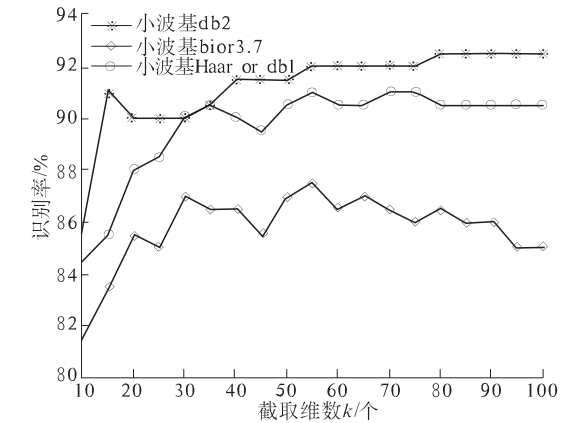


图 3 不同小波基下的识别率

Fig. 3 Recognition rates under different wavelet bases

表 1 不同分解层数下的识别率和所用时间对比

Tab. 1 Recognition rates and consumed time under different decomposition levels

项目	识别率/%	训练时间/s	识别时间/s
一级小波分解	88.5	51.048 20	0.019 20
二级小波分解	91.5	4.142 14	0.015 49

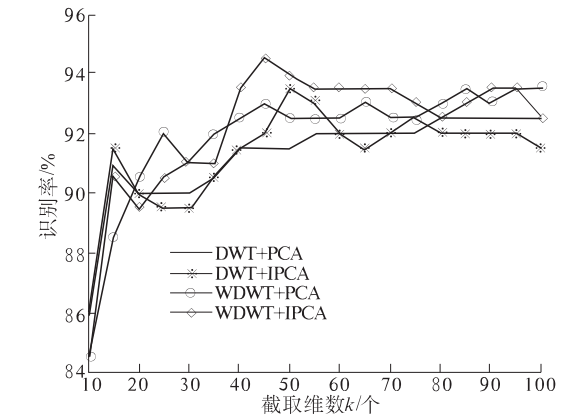


图 4 不同方法下的人脸识别率

Fig. 4 Recognition rates under different methods

DWT + PCA:原始图像经过二级小波分解,利用其低频子带,结合经典 PCA 算法进行特征提取,最后采用最近邻分类器来进行分类识别.

DWT + IPCA:用笔者提出的改进 PCA 算法进行特征提取,其它过程与 DWT + PCA 算法的过程一样.通过大量实验结果对比,笔者确定前 3 个主分量加权系数分别为 0.95,0.95,0.95.

WDWT + PCA:采用笔者提出的加权小波分

解方法(WDWT)进行人脸图像数据降维预处理,其它过程同 DWT + PCA 算法的过程一样.由低、高频子带所携带的能量大小入手,进行加权处理,通过实验,确定低、高频子图的加权系数.实验确定低频子带 LL2 和垂直边缘子带 HL2 分别为 0.95和 0.05.

WDWT + IPCA:原始图像采用 WDWT 方法进行降维预处理,结合 IPCA 算法进行特征提取,最后采用最近邻分类器来进行分类识别,这就是笔者提出的新算法.各加权系数采用上文两种方法实验得出的加权系数.

由图 4 可以看出,WDWT + PCA 算法整体上比 DWT + PCA 算法的识别效果好.此实验结果表明 ORL 人脸库中图像高频部分的确包含有用的信息,故为了提高识别率,不能完全舍弃高频子带.由于我们采用的是 PCA 算法,通常采用特征值总和的 90%,维数约为 50 左右.表 2 给出这 4 种方法在维数 50 前后的识别率.故尽管采用前三个主分量加权后,维数较少或者较大时,笔者提出的方法 WDWT + IPCA 的识别率可能降低,但在维数 50 前后,由表 2 可以看出 WDWT + IPCA 的识别率优于前 3 种方法.特别是维数为 45 时,笔者提出的 WDWT + IPCA 算法比 DWT + PCA 算法的识别率高出 3 个百分点.

表 2 4 种方法在维数为 50 前后的识别率

Tab. 2 Recognition rates at about 50 dimensions under these four methods

维数	DWT + PCA	DWT + IPCA	WDWT + PCA	WDWT + IPCA
35	90.5	90.5	92.0	91.0
40	91.5	91.5	92.5	93.5
45	91.5	92.0	93.0	94.5
50	91.5	93.5	92.5	94.0
55	92.0	93.0	92.5	93.5
60	92.0	92.0	92.5	93.5
65	92.0	91.5	93.0	93.5

4 结论

笔者结合 ORL 人脸库中人脸图像的特点,由低、高频所携带的能量大小入手,对二级小波分解的低、高频信息进行加权处理,尽可能多地保留图像中的有用信息,并首次对经过二级小波分解的人脸图像采用实验的方法,确定 PCA 前 3 个主分量的加权系数.经实验验证,笔者提出的 WDWT + IPCA 算法的识别率可高达 94.5%.但由于笔者提出的算法的加权系数是根据 ORL 人脸库数

据实验得出的,还需要在更多的人脸中进一步进行验证.

参考文献:

- [1] TURK M A, PERTLAND A P. Eigenfaces for Recognition [J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 1991, 3 (1): 71 - 86.
- [2] 焦斌亮, 陈爽. 基于 PCA 算法的人脸识别[J]. 计算机工程应用, 2011, 47(18): 201 - 204.
- [3] 刘伟. 基于 PCA 和 ICA 特征的人脸识别[D]. 郑州: 郑州大学信息工程学院, 2009.
- [4] 赵武峰. 人脸识别中特征提取方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学电气学院, 2009.
- [5] 章毓晋. 基于子空间的人脸识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 75 - 96.
- [6] 王杰青. 基于小波变换的人脸表情识别算法的分析与研究[D]. 长春: 长春工业大学计算机科学与工程学院, 2011.
- [7] ZHAO Ming-hua, LI Peng, LIU Zhi-fang. Face recognition based on wavelet transform weighted modular PCA [C]//Image and Signal Processing. USA: IEEE, 2008: 589 - 593.
- [8] 刘秀丽, 彭复员. 基于小波变换的加权特征脸识别算法[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(10): 163 - 165.
- [9] SHERMINA J. Illumination invariant face recognition using discrete cosine transform and principal component analysis [J]. Proceedings IEEE Conference on Electrical and Computer Technology, 2011, 31(2): 826 - 830.
- [10] BURCU K. Face recognition using gabor wavelet transform [D]. Ankara: Department of Electrical and Electronics Engineering, Middle East Technical University, 2001.
- [11] 李荣健, 韩其龙, 杨鑫华. 改进的 PCA 人脸识别新算法[J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(4): 48 - 51.

Face Recognition Research Based on Weighted Wavelet Decomposition

SU Shi-mei, WANG Yan, WANG Ming-xia

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

Abstract: Wavelet transform can effectively decompose an image into high-frequency and low-frequency information. Existing face recognition algorithms mostly based on the low-frequency information do not take full use of the high-frequency information. PCA has been widely used in face recognition algorithms because of its simple realization and high recognition rate for frontal faces. But PCA is computationally intensive, and it's vulnerable to the changes of illumination and facial expression. This paper presents a new face recognition method uniting weighted wavelet decomposition with the PCA algorithm. This method can make up for the disadvantage of the traditional PCA algorithm which is sensitive to the changes of illumination and facial expression, for the face details are fully utilized through the weighted fusion of the secondary decomposition of wavelet low frequency components and setting the new weighted values to the first three maximum principal vectors of PCA. Experimental results show that the proposed method has a marked improvement in recognition rate and training time.

Key words: wavelet decomposition; PCA; face recognition; discrete wavelet transform

PSASP 动态等值功能的应用与分析

刘宪林, 矫龙飞, 程子霞

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为简化计算常将电力系统不需要进行详细分析的某些区域进行等值简化. 以典型算例和实际大规模区域电网为对象, 对 PSASP 中的 EPRI E' 动态等值功能进行验证分析, 指出其优点和不足. 该功能操作简便实用; 既可用于单区域等值, 也可以实现多区域等值; 既可用于稳态等值计算, 也可实现机电暂态稳定等值计算; 但在某些情况下可能出现无法完成等值计算即等值失效的情况, 具体原因及其改进措施有待进一步研究.

关键词: PSASP; 电力系统; 动态等值; 潮流计算; 暂态分析

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.003

0 引言

随着互联电力系统的日益增大, 区域电网之间的联系加强, 逐渐形成了大规模的联合电力系统, 这就使得电力系统的仿真计算规模变得异常庞大. 为了节省计算时间和计算机空间, 在保留原系统动态特性前提下, 对不需研究分析的部分进行等值简化处理. 动态等值是保持电力系统中需要研究的区域不变(或称为内部系统, 研究网), 而对外部系统(等值网)在保证其对研究系统的动态影响不畸变前提下进行简化的过程^[1].

PSASP(电力系统分析综合程序)是国内电力部门和科研院所普遍应用的系统分析计算软件, 它构造上万节点的大型电力网络数据库^[2]. 该软件可进行电力系统的多种计算分析, 如暂态稳定性分析、继电保护的整定、电力系统等值计算等. 笔者在分析动态等值原理的基础上, 应用 PSASP6.28 版动态等值模块, 对经典算例和实际系统进行计算研究, 指出了软件该模块的优点及部分不足, 以期能为工程科技人员应用该软件的动态等值功能和软件的更新升级提供参考.

1 PSASP 动态等值基本原理

1.1 电力系统常用的动态等值方法简介

电力系统等值可以分静态等值和动态等值两

部分. 电力系统静态等值法主要有 Ward 等值法和 REI 等值法. 电力系统常用的动态等值方法有同调等值法^[3]、模式等值法、估计等值法等.

同调等值法是将互联电网受到扰动后转子振荡趋势较为接近发电机划分为一组, 这一组发电机可以用一台等值机标示. 该方法适用于大规模电力系统离线暂态稳定分析. 研究系统在任何同一大扰动下, 等值前后转子摇摆曲线相同或者接近.

模式等值法是通过消去外部系统线性化模型矩阵的高频特征根来实现系统的降解简化^[4-5]. 它物理概念清晰, 具有严格的数学基础, 适用于大规模电力系统的小扰动分析.

系统在受到扰动情况下, 利用数值拟合方法对内部系统和外部系统联络线上外部系统的动态响应来估计和辨识外部系统参数的等值方法是估计等值法^[6]. 估计等值法的近年来研究比较多的电力系统等值方法. 该方法需要有大量的实测数据做支撑, 当系统有变化时用这些实测数据对外部系统进行辨识等值, 以便对研究系统进行动态分析. 相较于前两种等值方法, 估计等值法可以对大规模电力系统进行在线动态安全分析.

1.2 EPRI E' 等值法

PSASP 等值计算提供了两种等值方法, 一种是用于稳态计算的 Ward 等值法, 另一种是由中

收稿日期:2013-09-03; 修订日期:2013-11-09

基金项目:河南省教育厅重点科研计划资助项目(12A470008)

作者简介:刘宪林(1955-), 男, 河南洛阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究; E-mail:liuxl@zzu.edu.cn.

国电力科学研究院提出的一种在稳态计算和暂态计算均可应用的 E' 等值法,称为 EPRI E' 等值法. 程序提供了图示化的等值结果,方便查看等值结果,并且等值结果可直接生成等值数据库组,可通过文本方式进行浏览,同时也可以进行数据组选择,方便简化后网络的各种计算以及等值前后网络的对比计算等. 笔者主要对 EPRI E' 等值法进行讨论.

EPRI E' 等值法在等值机的处理上与静态等值中的 REI 等值法类似,是具有固定的网络接线方式的有源多端子系统的等值方法. 该等值方法除能够保证稳态边界外,还考虑了待简化子系统的开路和短路条件,这就保证等值子系统边界处的开路电压和短路阻抗等与等值前系统的相关参数相等,能够用于暂态稳定的计算.

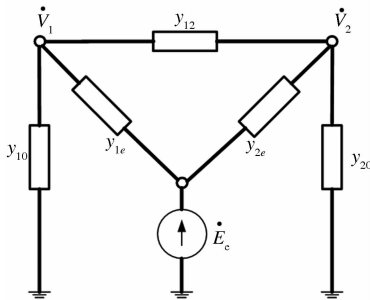


图 1 两端口网络的等值电路

Fig. 1 The equivalent circuit of two - port network

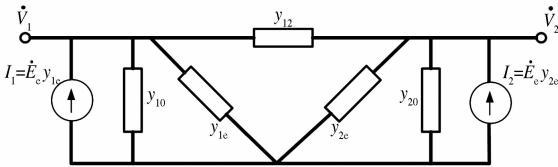


图 2 以电流源表示的两端口网络等值电路

Fig. 2 The equivalent circuit of two - port network with current source

EPRI E' 等值法的基本思想是以一台等值机及相应的固定接线网络来等值系统中动态行为相近的机组及相应的负荷、线路,等值网络的固定接线方式随着端口数的不同而变化,端口数确定后相应的接线方式亦可确定,如图 1 所示即为两端口等值网络的固定接线形式. 当待简化的子系统(等值网)确定后,该方法可以确定子系统等值机的内电势(大小和角度)和等值网络的参数.

假设待简化的子系统内有 n 台发电机及若干负荷,所有发电机以暂态电抗后恒定电势(E')模拟;所有负荷以恒阻抗模型模拟. 当用一台恒定电势模拟的电机等值时,等值惯性常数为

$$T_J = \sum_{i=1}^n T_{Ji}. \quad (1)$$

按照各个发电机惯性常数加权平均,可得到等值机的恒定电势和电势角

$$E_e = \frac{1}{T_J} \sum_{i=1}^n T_i E'_i. \quad (2)$$

$$\delta_e = \frac{1}{T_J} \sum_{i=1}^n T_i \delta_i. \quad (3)$$

其中, T_i, E'_i, δ_i 分别为各个发电机的惯性常数、恒定电势及电势角. 以上 3 个公式实际上已求出了等值系统的惯性中心(即等值机). 如果等值区域内的机组同调或者其动态行为相似或相近,等值计算后网络的动态特性与等值前的更加接近.

图 2 是与图 1 对应的以电流源表示的等值后两端口网络等值电路,可得其节点电流方程

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

导纳矩阵各元素可由实际待简化子系统得到. 将等值后固定接线方式的网络各元件阻抗代入上式后可得以下等式

$$\begin{cases} Y_{11} + Y_{12} = y_{10} + y_{1e}; \\ Y_{21} + Y_{22} = y_{20} + y_{2e}; \\ Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}. \end{cases} \quad (5)$$

若切断待简化子系统与主系统的联系,将子系统内所有电压源短路并在两个端口注入电流源(如图 2 所示),则端电压就是实际子系统的开路电压 \dot{V}_{10} 和 \dot{V}_{20} ,可以方便地由实际待简化子系统开路后的方式计算得到. 将式(4)写为阻抗矩阵形式,并以电流源形式表示注入电流有

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_e y_{1e} \\ \dot{E}_e y_{2e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{10} \\ \dot{V}_{20} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(4)~(6)式即可解出两端口等值网络中各个导纳参数. 一般的,对于 n 端口网络子系统可用相应的固定接线方式及相同的算法求取等值网络参数^[7].

使用 PSASP 进行等值计算的流程可用图 3 简要表示,其中等值方法可选择动态等值或静态等值(笔者仅涉及前者),而通过输电断面两侧的一对或多对母线则可确定等值区域和保留区域.

在电网实际计算中有时需要将多个互不直接联系的子区域进行简化处理,即多区域等值. EPRI E' 等值法不仅可以完成单个区域的等值计算,还可以同时对多个区域进行等值,等值机的数量与等值子区域数量相等.

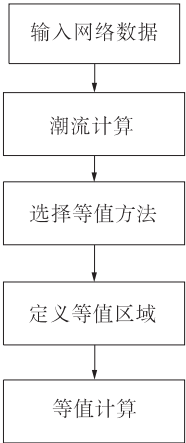


图 3 等值计算流程图

Fig. 3 The flow chart of equivalent calculation

2 PSASP 动态等值的应用分析

2.1 典型算例单区域等值计算应用分析

IEEE39 节点纯交流电力系统单线图如图 4 所示,该系统有 10 台机,19 个负荷,节点 31 为平衡节点.在 PSASP 暂态稳定计算中 10 台发电机的同步机模型均选择“3”,即 E_q' 变化的三阶模型.以系统节点 2,17,18 为等值网边界,以节点 1,3,16 为研究网边界进行等值计算.本部分对等值前后网络的潮流计算和暂态稳定性计算分别进行对比分析.

按照图 3 的流程进行等值计算,得到惯性中心(即其等值机)的恒定电势为 1.609,等值电势角

的值是 42.48° ,惯性常数 18.1 s.用等值后数据组进行潮流计算,并和等值前网络潮流进行对比,如表 1 所示.表中传输有功、无功为等值网边界向研究网传送的功率,正值表示等值网向研究网输送功率,负值表示等值网向研究网吸收功率.最右一栏“变化率”是分别计算等值前后传输有功、无功之差除以等值前该边界传输的有功、无功取百分数而得.

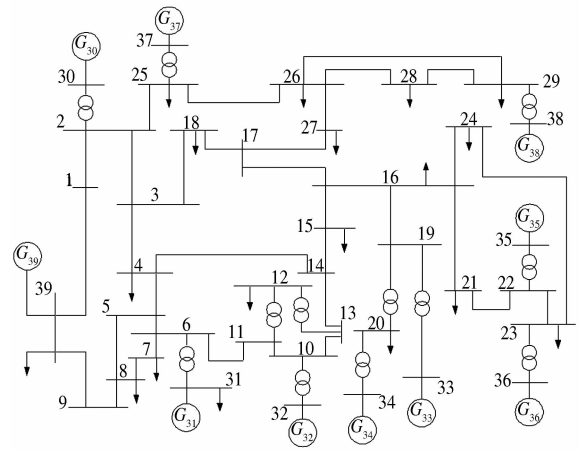


图 4 IEEE 10 机 39 节点系统

Fig. 4 IEEE39 bus power system

从表 1 可以看出,等值前后边界节点传输的功率几乎没有变化,进一步查看等值前后研究网的各个节点电压相角也基本一致,EPRI E' 等值计算可以满足工程计算中稳态潮流计算要求,可以通过等值突出研究网,节省计算时间.

表 1 10 机 39 节点系统等值前后边界潮流

Tab. 1 Boundary flow of the IEEE39 bus system before and after equivalence

边界节点		等值前(标幺)		等值后(标幺)		变化率/%	
等值网	研究网	传输有功	传输无功	传输有功	传输无功	有功	无功
2	1	1.161 1	-0.276 9	1.161 2	-0.277	-0.008 61	-0.036 11
2	3	4.072 9	0.983 6	4.073 3	0.983 6	-0.009 82	0
17	16	-1.286 4	0.118 0	-1.286 2	0.118 0	0.015 547	0
18	3	-0.272 7	0.021 9	-0.272 7	0.021 9	0	0

对等值系统的暂态分析通过假设系统发生三相对地短路的严重故障来进行,观察发电机的转子相对角度 δ 为表示区分称故障点距离等值子系统近的近点和故障点距离等值子系统远的远点来进行.近点选择母线 16 处出口两相短路接地,0.2 s 发生故障,0.35 s 切除故障,观察发电机 35 和 39 的转子相对角变化曲线 δ_{35-39} ;远点故障选择母线 11 处三相接地短路,其他实验条件与近点故障相同.

图 5 所示为近点故障时系统等值前后转子相对角变化曲线,图 6 所示为远点故障时系统等值前后转子相对角变化曲线.通过对比可以看出,系统发生故障后 2 s 内原系统和等值简化后的系统转子相对角变化曲线一致,不影响暂态稳定性分析.

2.2 实际电网多区域等值应用分析

以华中电网实际系统为例,对 EPRI 等值法进行验证.华中电网区域包括豫、鄂、赣、湘、渝、川

等省市的电网. 赣网和湘网通过若干条 500 kV 交流线与鄂网连接, 而赣网和湘网之间并无直接连接的线路. 以赣网和湘网作为需要等值简化的两个子区域, 对网络等值前后的稳态潮流和发电机相对角度变化情况进行对比.

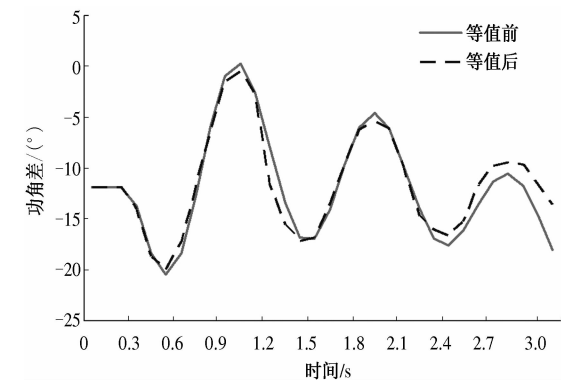


图 5 近点故障等值前后 δ_{35-39} 曲线
Fig. 5 The curve of relative rotor angle before and after equivalence at vicinity

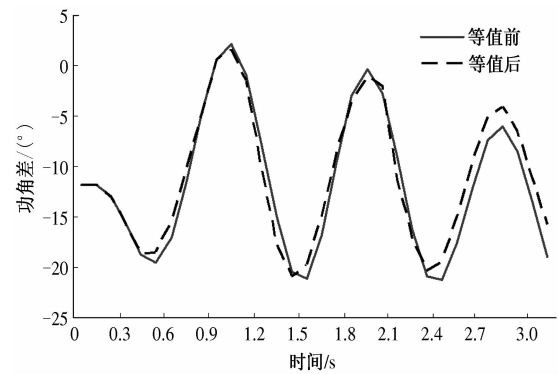


图 6 远故障等值前后曲线
Fig. 6 The curve of relative rotor angle before and after equivalence at distance

等值后湘网得到惯性中心(即等值机)的恒定电势为 1.059 2, 等值电势角的值是 31.22° , 惯性时间常数 876.1 s; 赣网惯性中心的恒定电势为 1.110 9, 等值电势角 8.66° , 惯性时间常数 739.356 s. 等值前后等值网边界和研究网边界的功率传输情况如表 2 所示.

表 2 华中网等值前后边界潮流

边界节点		等值前(标么)		等值后(标么)		变化率/%	
等值网	研究网	传输有功	传输无功	传输有功	传输无功	有功	无功
鄂宋家 500	宋岗抗	11.741 7	1.378 7	11.740 5	1.378 5	0.010 22	0.014 506
鄂江陵 500	江复 I 抗	8.132 1	0.274 6	8.130 7	0.274 5	0.017 216	0.036 417
鄂江陵 500	江复 II 抗	8.132 1	0.264 5	8.130 6	0.264 4	0.018 445	0.037 807
鄂磁湖 500	磁永抗	8.631 3	0.839 4	8.632 5	0.839 6	-0.013 9	-0.023 83
鄂咸宁 500	咸梦 I 抗	10.944 4	0.563 0	10.945 5	0.563 1	-0.010 05	-0.017 76
鄂咸宁 500	咸梦 II 抗	10.949 9	0.562 1	10.951 0	0.562 3	-0.010 05	-0.035 58

不难看出, 等值前后等值边界处的功率传输变化率最大不足 0.04%, 这在工程实际中并不影响计算精度. 等值前潮流计算用时 2 s, 等值后潮流计算用时 1 s, 时间大为缩短.

EPRI E' 等值法暂态特性分析假设川网中一点发生三相接地短路的严重故障, 时间是 0.1 ~ 0.3 s, 取川白水河#2 机组和豫姚孟 5G 机组, 观察其转子相对角的变化, 计算结果见图 7.

由图 7 可见, 该区域电网等值前后发生暂态故障时发电机间转子相对角变化情况一致, 可以用等值后的系统代替等值前系统作暂态分析. 等值前网络暂态计算耗时 8.8 s, 等值后网络耗时 6.89 s, 计算时间减少.

2.3 在等值计算中遇到的问题

通过算例对比发现, EPRI E' 等值法对等值系统动态行为的描述在系统发生扰动的 2 ~ 3 s 内与等值前原系统动态行为描述相似, 但继续加长

观察时间等值前后系统动态特性差异较大, 不能很好地反映等值前系统的实际状况. 可见该等值方法适用于暂态稳定性分析, 但对需要较长观察时间的低频振荡等稳定性分析并不适用.

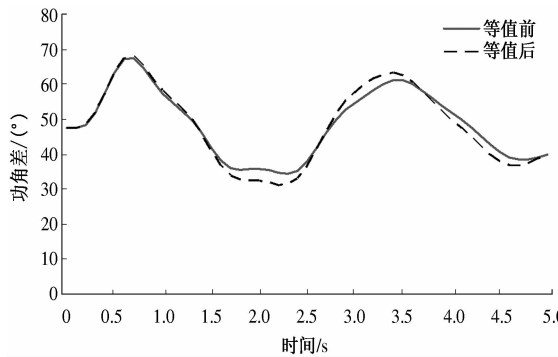


图 7 多子区域等值前后转子相对角曲线
Fig. 7 The curve of relative rotor angle before and after two areas equivalent calculation

文献[7]指出等值区域的选择主要依据计算经验和对计算数据的分析,通过大量计算分析的基础上来确定等值区域的划分,这给等值区域的合理选择带来了比较大的困难.

对华中电网进行等值时,将川网、湘网、赣网分别单独等值均可得到合理结果. 但将川渝网作为一个整体等值时,曾以母线渝张家坝 500 和渝九盘 500 作等值网边界节点、以母线张恩抗和奉节串补作研究网边界节点,或以母线张恩抗和渝九盘 500 为等值网边界节点、以母线鄂恩施 500 和奉节串补为研究网边界节点,等等,PSASP 程序均提示“The Voltages of E. Q Networks Is Not Equal To The Voltages of LF Network”,等值过程终止,不能得出等值结果. 这表明,PSASP 的动态等值功能在某些情况下会失效. PSASP 是一款在国内外都有重要影响、使用广泛的电力系统计算商用软件. 发现上述问题后,曾与软件开发人员进行了沟通和探讨,但未能得到明确的解释. 基于直观的判断,导致等值失败的可能原因,一是相比于川网、湘网、赣网单独等值,川渝网的规模更大,覆盖地域更广,二是等值区域与研究区域之间的输电断面上安装有串补,但确切的原因及其改进方法值得深入研究.

3 结论

笔者通过对 PSASP 中 EPRI 动态等值功能进行验证分析,得出以下结论:该功能操作简便实

用;既可用于单区域等值,也可以实现多区域等值;既可用于稳态等值计算,也可实现机电暂态稳定等值计算;但用于大型区域电力系统等值,或等值区域与研究区域之间的输电断面上安装有串补时,等值可能失败,确切原因及其改进措施有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [2] 魏巍,王渝红,李兴源,等. 基于 PSASP 的双馈风电场建模及接入电网方针[J]. 电力自动化设备, 2009,29(12):68-73.
- [3] 李如琦,杭乃善. 暂态稳定分析中的角加速度同调识别法[J]. 广西大学学报:自然科学版,1995,20(4):373-377.
- [4] 张翼松. 电力系统动态等值及其应用[D]. 郑州:郑州大学电气工程学院,2011.
- [5] RAMIREZ J, VALLE R. Identification of dynamic equivalents preserving the internal modes ramirez [C] // IEEE Power Tech Conference Proceedings . Berin: Bologna, 2003 : 415-419.
- [6] 陈涵,邓长虹,李大路. 基于循环神经网络的动态等值模型辨识[J]. 高电压技术,2008,34(5):1001-1004.
- [7] 周孝信,李汉香,吴中习. 暂态稳定计算中的电网等值方法[J]. 中国电机工程学报,1983,1:12-17.

The Application and Analysis of PSASP Dynamical Equivalence

LIU Xian-lin, JIAO Long-fei, CHENG Zi-xia

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

Abstract: For simplified calculation, we often simplify some areas that do not need intensive study in power system analysis. By using the PSASP software to process dynamical equivalence calculation in typical example and actual large scale power networks, this paper analyzes the advantages and disadvantages of PSASP dynamical equivalence function, which is named EPRI. It is convenient to use. It could calculate multiple equivalence and the calculated results are suitable for transient analysis. But in some situations the EPRI equivalent can not get results, and the equivalent calculation interrupts. The specific causes and improvement measures need to be further studied.

Key words: PSASP; power system; dynamical equivalence; power flow calculation; transient analysis

文章编号:1671-6833(2014)01-0015-05

新型正交铁芯三相磁控电抗器的研究

赵国生, 程子霞, 孙可钦

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:目前的正交铁芯磁控电抗器都是单相结构,按这种结构制造成三相磁控电抗器时成本高.为此,提出一种正交铁芯三相磁控电抗器,首先介绍了该正交铁芯三相磁控电抗器的结构和工作原理,并对其进行了场路耦合电气特性分析,然后用 Ansoft 电磁场分析软件建立该新型三相磁控电抗器三维仿真模型,通过仿真分析验证了该电抗器的空载电流谐波含量很小,且通过调节晶闸管的触发角可以平滑地调节电抗器的电抗特性,最后对该三相磁控电抗器的电磁场分布情况进行了仿真分析.

关键词:正交铁芯三相磁控电抗器(MCR);Ansoft;电磁场仿真

中图分类号:TM72 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.004

0 引言

目前基于磁控电抗器的动态无功补偿装置的优点主要体现在以下几个方面:补偿容量连续平滑可调、设备自身产生的谐波电流含量小、设备抗冲击干扰能力强、使用寿命长、且不需要加滤波装置^[1-4],同时由于磁控电抗器使用的晶闸管承受的电压很低,其晶闸管不需要串并联使用,使其控制部分成本降低,从而在电力系统中得到广泛的应用.

电力系统中的三相磁控电抗器都采用每个铁芯柱加磁阀的三相六柱式磁控电抗器,这种电抗器的铁芯柱与磁轭中的交直流磁通相互叠加,在空载(不加触发角)时其电流波形为间断的尖峰形状、谐波含量很大,随着触发角的减小,其电流波形的导通宽度逐渐变大,谐波电流成分逐渐减小.虽然设计与制造工艺可以保证磁阀结构的三相磁控电抗器的谐波电流含量都在其额定电流的3%以下,但三相磁阀式可控电抗器仍有其自身的缺陷,这主要表现在以下两个方面:①铁芯制造工艺复杂,特别是多级磁阀结构磁控电抗器,制造时需要定制昂贵的铁芯开口刀具,硅钢片的加工工作量大量增加,相应地制造成本增加.②磁控电抗器的噪音增大,其噪音水平远大于同容量变压器的噪音,对环境有较大的噪音干扰,为了减小其噪

音,制造厂家需要使用昂贵的铁芯固定胶进行粘合,即使这样处理后,其噪音水平仍很高.

正交铁芯磁控电抗器由于其交直流铁芯磁路相分离,通过控制正交铁芯上的直流偏磁场可以间接控制交流磁场,它的空载电流接近标准正弦电流波形,谐波成分极小,且由于正交铁芯磁控电抗器不需要在铁芯柱上制造磁阀,可同时节省制造成本、降低磁控电抗器的噪音水平.但国内外学者提出的正交铁芯磁控电抗器都是单相结构^[5-6],这种电抗器的铁芯制造工艺复杂、制造成本高,这是因为需要制作两个独立的工艺复杂的U形铁芯柱(轭),不仅浪费材料,而且占据很大的空间,制作三相磁控电抗器时不适合采用这种结构.为了克服当前磁控电抗器的上述缺陷,笔者提出一种正交铁芯三相磁控电抗器,对磁控电抗器的结构进行改进.该正交铁芯三相磁控电抗器的制造工艺简单,可有效降低三相磁控电抗器的空载电流,同时还可以降低三相磁控电抗器的噪音水平,该结构的正交铁芯磁控电抗器有很好的工程应用价值.

1 正交铁芯三相磁控电抗器结构及原理

1.1 正交铁芯三相磁控电抗器的结构

笔者提出的正交铁芯三相磁控电抗器的结构如图1所示,其铁芯结构为两个三相三柱式(1、

收稿日期:2013-09-01;修订日期:2013-11-09

基金项目:河南省重大科技攻关计划资助项目(092101210105)

作者简介:赵国生(1965-),男,河南南阳人,郑州大学副教授,硕士,主要从事电力电子、滤波器、磁控电抗器等方面的研究,E-mail:zgs410@zzu.edu.cn.

2)铁芯前后并列放置,前面的三柱铁芯左边柱与后面的三柱铁芯的左边柱通过侧视图中两个截面积较小的磁轭构成 A 相铁芯柱,两个铁芯柱上的绕组结构与晶闸管连接方式同单相四柱式磁阀式电抗器的中间两柱连接方式完全相同. 同样,前后两个三柱铁芯的中柱通过它们之间的连接磁轭构成 B 相铁芯柱,前后两个三柱铁芯的右边柱铁芯通过它们之间的连接磁轭构成 C 相铁芯柱,B、C 两相绕组的结构与连接方式的侧视图同 A 相相同. 设每柱的铁芯柱面积为 A_b , 长度为 l , 正视与斜视时上、下磁轭的长度为 l_t 、其面积为 A_{b1} , 铁芯柱的截面积 A_b 要大于其上下磁轭的截面积 A_{b1} ($A_{b1} < A_b$), 每个铁芯柱上都绕有两个匝数为 $N/2$ 的线圈;其上下两线圈之间有一抽头比为 $\delta = N_2/N$ 的抽头,抽头间接可控硅 $K_1(K_2)$;每相不同铁芯柱的上下两个线圈交叉连接后与电网电源并联联接,二极管 D 则横跨在交叉端点.

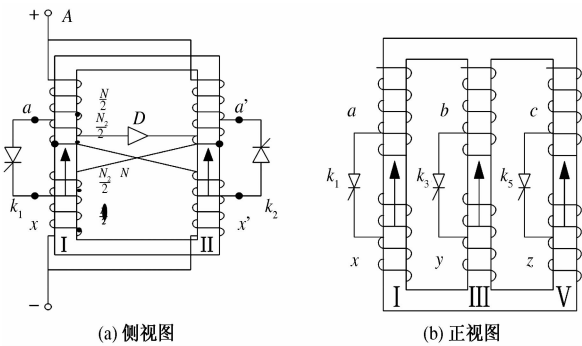


图 1 正交铁芯三相磁控电抗器结构原理图
Fig. 1 Three-phase MCR structure schematic diagram

1.2 正交铁芯三相磁控电抗器的原理

新型正交铁心三相磁控电抗器每相工作电流的调节是通过改变晶闸管的触发角,调节绕组中的直流励磁电流的大小,进而改变铁心柱的磁导率来实现.

现以 A 相为例进行原理性的解释,当晶闸管 K_1, K_2 上不加触发脉冲时,磁控电抗器上通过的电流很小,由于其交流磁通的铁芯柱内无磁阀,而在磁轭部位三相交流磁通的瞬时值叠加为零,其空载电流波形接近完整的正弦波波形,磁控电抗器处于空载状态. 若在电源电压的正半周时,给晶闸管 K_1 施加触发脉冲,让 K_1 导通,在电源电压处于负半周时,给晶闸管 K_2 施加触发脉冲,让 K_2 导通,在忽略晶闸管的正向压降的情况下,在电源电压完整周期内的 K_1, K_2 轮流导通,可起到可控全波整流的作用,改变晶闸管的触发角便可平滑地改变绕组中通过的直流电流,直流控制电流产

生的磁通沿着图 1 侧视图所示的铁芯回路构成闭合路径,而其两个铁芯柱上的交流磁通并不沿该侧视图所示的闭合磁路流过,而是沿正视图中的闭合铁芯磁路流通,交叉连接的二极管 D 起到续流的作用. 这样,通过改变晶闸管的触发角,可以调节绕组中流过的直流电流,绕组中流过的直流电流大小控制该相铁芯柱的饱和程度,进而起到调节轭部磁阀的交流磁通通过量的大小从而改变工作绕组中通过的交流电流的大小.

在正交铁心三相磁控电抗器中,由于每相的直流控制磁通在图 1 侧视图中的两个铁芯柱内形成闭合回路,正视图中每相的交流工作绕组产生的交流工作磁通与其他两相工作绕组中产生的交流工作磁通在铁轭上相加为零,所以可以按照 A 相的分析方法对 B、C 两相的工作原理进行相似的分析.

2 新型磁控电抗器的场路耦合电气特性分析

在对所提出的正交铁芯磁控电抗器的电磁分析时,可假定电网的三相电压是对称的,磁控电抗器的每相磁路结构与绕组结构相同,则三相交流工作电流的磁通也是互相对称的,有 $\phi_a + \phi_b + \phi_c = 0$.

在所提出的新型三相磁控电抗器的结构图 1 的正视图中;自左向右分别为 A 相、B 相、C 相,设每相在对应铁芯柱上的磁通依次为 $\phi_{a1}, \phi_{b1}, \phi_{c1}$, 对应的磁势分别为 F_{a1}, F_{b1}, F_{c1} , 对应的磁感应强度依次为 B_{a1}, B_{b1}, B_{c1} , 流过的交流电流分别为 i_{a1}, i_{b1}, i_{c1} , 控制电流分别为 I_{k1}, I_{k3}, I_{k5} , 心柱高为 l , 磁轭长度为 l_t, μ 为铁芯的磁导率. 后面的三个铁芯柱的对应量用同样符号表示,其下标则分别用 2,4,6 代替 1,3,5 来表示.

当晶闸管不加触发脉冲时,流过磁控电抗器的交流工作电流很小,可认为电抗器处于空载状态,此时磁轭部分磁阻比较大,而铁心柱工作在不饱和状态,磁阻比较小,可近似地认为前后面铁心柱的磁通相等 $\phi_{a1} = \phi_{a2}, \phi_{b1} = \phi_{b2}, \phi_{c1} = \phi_{c2}$, 其中 $\phi_a = \phi_{a1} + \phi_{a2}, \phi_b = \phi_{b1} + \phi_{b2}, \phi_c = \phi_{c1} + \phi_{c2}$. 当 A 相晶闸管 K_1, K_2 轮流导通时,A 相绕组产生的磁动势可由图 2 分析得出:

$$\begin{cases} F_{a1} = (1 - \delta) Ni_{a1} - \frac{\delta N}{2} I_{k1} = \frac{B_{a1}}{\mu} l_t; \\ F_{a2} = (1 - \delta) Ni_{a2} - \frac{\delta N}{2} I_{k1} = \frac{B_{a2}}{\mu} l_t. \end{cases} \quad (1)$$

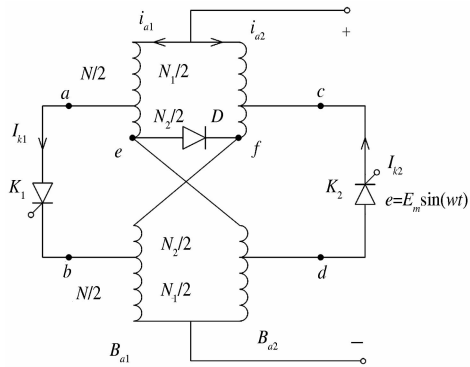


图 2 A 相电路图

Fig. 2 The circuit diagram of A phase

晶闸管 K_1 导通时 A 相的电磁方程^[1]:

$$\begin{cases} \frac{dB_{a1}}{dt} = \frac{\frac{E_m \sin wt}{(1-\delta)N} - \frac{Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} + \frac{\delta Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a1})}{dB_{a1}}(A_b - A_{b1}) + A_{b1}}; \\ \frac{dB_{a2}}{dt} = \frac{\frac{(1-2\delta)E_m \sin wt}{(1-\delta)N} + \frac{\delta Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} - \frac{Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a2})}{dB_{a2}}(A_b - A_{b1}) + A_{b1}}. \end{cases} \quad (2)$$

晶闸管 K_2 导通时 A 相的电磁方程:

$$\begin{cases} \frac{dB_{a1}}{dt} = \frac{\frac{(1-2\delta)E_m \sin wt}{(1-\delta)N} - \frac{Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} + \frac{\delta Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a1})}{dB_{a1}}(A_b - A_{b1}) + A_{b1}}; \\ \frac{dB_{a2}}{dt} = \frac{\frac{E_m \sin wt}{(1-\delta)N} + \frac{\delta Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} - \frac{Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a2})}{dB_{a2}}(A_b - A_{b1}) + A_{b1}}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_m 为 A 相电压最大值; R 是线圈的电阻; α 为晶闸管的触发角; A_b, A_{b1} 分别为铁芯柱与磁轭的截面积; δ 为抽头匝数比。

晶闸管 K_1 导通时 A 相前铁芯柱绕组流过的电流为

$$\begin{aligned} i_{a1} &= \frac{F_{a1}}{(1-\delta)N} - \frac{\delta F_{a2}}{(1-\delta)N} \\ &= \frac{2l_t A_b (1+\delta)}{(1-\delta)N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos wt}{N\mu}. \end{aligned} \quad (4)$$

晶闸管 K_1 导通时 A 相后铁芯柱绕组流过的电流为

$$i_{a2} = \frac{F_{a2}}{N} = -\frac{2l_t A_b}{N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos wt}{N\mu}. \quad (5)$$

A 相绕组流过的直流控制电流为

$$I_{k1} = \frac{\delta E_m (1 + \cos \alpha)}{\pi (1 + \delta) R}. \quad (6)$$

A 相前、后铁芯柱的控制绕组流过的直流电流在侧视图中磁轭部分产生直流磁通,其交流电流的磁通在前后两个正视图所示的磁通中构成回路。

B, C 两相的电磁方程的分析可采用与 A 相相同的分析方法,其磁动势方程分别为

$$\begin{cases} F_{b1} = (1-\delta)Ni_{b1} - \frac{\delta N}{2}I_{k3} = \frac{B_{b1}}{\mu}l_t; \\ F_{b2} = (1-\delta)Ni_{b2} - \frac{\delta N}{2}I_{k3} = \frac{B_{b2}}{\mu}l_t. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} F_{c1} = (1-\delta)Ni_{c1} - \frac{\delta N}{2}I_{k5} = \frac{B_{c1}}{\mu}l_t; \\ F_{c2} = (1-\delta)Ni_{c2} - \frac{\delta N}{2}I_{k5} = \frac{B_{c2}}{\mu}l_t. \end{cases} \quad (8)$$

晶闸管 K_3 导通时 B 相前铁芯柱绕组流过的电流为

$$i_{b1} = \frac{2l_t A_b (1+\delta)}{(1-\delta)N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos(wt - 120^\circ)}{N\mu}. \quad (9)$$

晶闸管 K_3 导通时 B 相后铁芯柱绕组流过的电流为

$$i_{b2} = \frac{F_{b2}}{N} = -\frac{2l_t A_b}{N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos(wt - 120^\circ)}{N\mu}. \quad (10)$$

晶闸管 K_5 导通时 C 相前铁芯柱绕组流过的电流为

$$i_{c1} = \frac{2l_t A_b (1+\delta)}{(1-\delta)N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos(wt + 120^\circ)}{N\mu}. \quad (11)$$

晶闸管 K_5 导通时 C 相后铁芯柱绕组流过的电流为

$$i_{c2} = \frac{F_{c2}}{N} = -\frac{2l_t A_b}{N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos(wt + 120^\circ)}{N\mu}. \quad (12)$$

B, C 相绕组流过的直流控制电流为

$$I_{k3} = I_{k5} = \frac{\delta E_m (1 + \cos \alpha)}{\pi (1 + \delta) R}. \quad (13)$$

3 三相磁控电抗器电磁场分析

3.1 三相磁控电抗器的分析模型

新型三相磁控电抗器的分析模型如图 3 所示,模型中各个参数数值如下:铁芯柱模型的尺寸为 $150 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,正视与斜视的上、下磁轭的宽度为 90 mm ,每两柱铁芯柱间的距离为 300 mm ,每铁芯柱上绕组线圈匝数为 $1\,200$ 匝,抽头分压匝数比为 3% ,电源电压为幅值等于 $14\,140 \text{ V}$ 的工频交流电压。

按照仿真要求设定铁心、线圈及边界的各种

参数后,再设定电源参数,同时设定好网格剖分参数后,利用 Ansoft 软件对模型进行网格剖分,剖分后的三相磁控电抗器网格结构如图 4 所示。

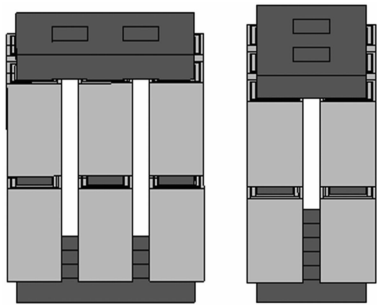


图 3 磁控电抗器分析模型

Fig.3 Simulation model of three-phase MCR

3.2 Ansoft 仿真结果与分析

设定不同的导通角后,计算机进行多次有限元计算,可得出在不同导通角下的工作电流波形。图 5 给出的是新型三相磁控电抗器模型在不同触

发角下三相绕组中流过的电流波形。图 5 中 $ia_1, ia_2, ib_1, ib_2, ic_1, ic_2$ 为三相磁控电抗器由左至右交流绕组中流过的电流,其中 $ia_1 = ia_2, ib_1 = ib_2, ic_1 = ic_2$,由于电流相等造成波形重叠,图中仅显示了三个电流波形。从输出波形可以看出:改变晶闸管的触发角可以平滑地调节电抗器电流,从而改变电抗器的电抗,并且输出电流波形中谐波含量很小。

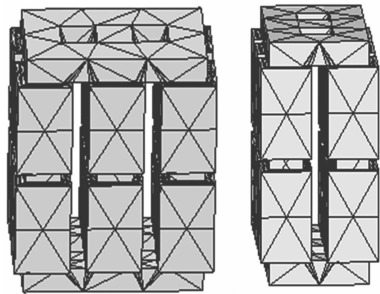


图 4 磁控电抗器的网格划分图

Fig.4 Grid division of three-phase MCR

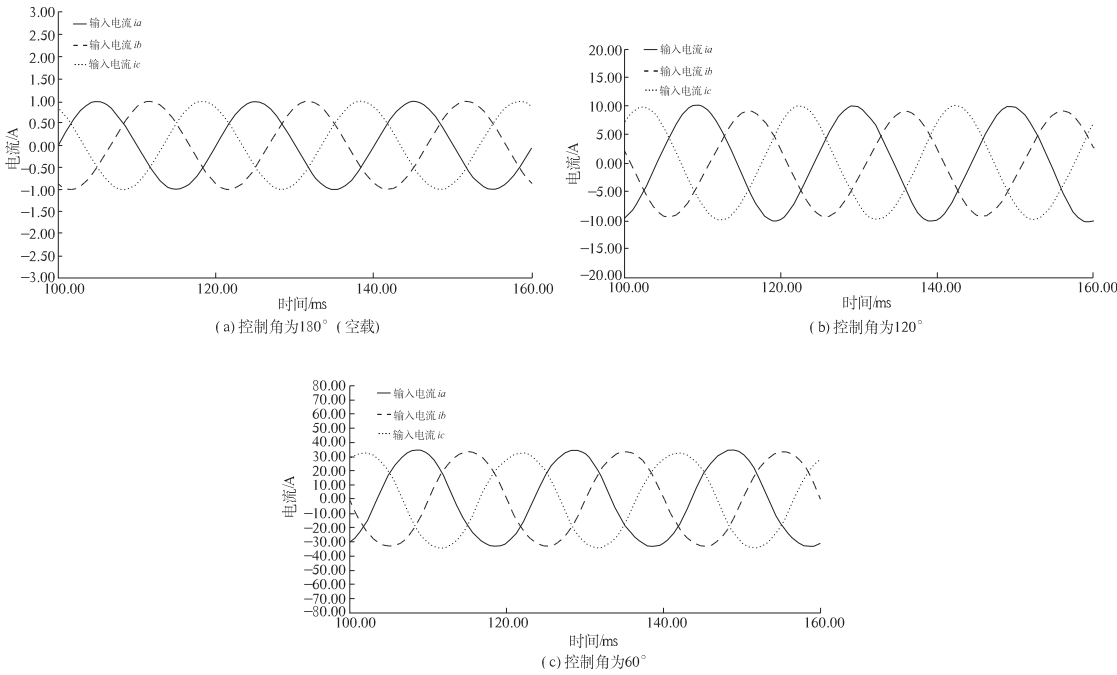


图 5 在不同触发角下流过三相磁控电抗器的电流波形

Fig.5 The current waveform of the three-phase MCR in different triggering angle

图 6(a) 对应于触发角为 60°时的磁密分布、(b) 对应于触发角为 120°时的磁场强度分布,由图中可以看出,随着触发角的增加,直流控制电流减小,磁轭部位的饱和度减小,漏磁减小,相应地可以减小绕组及磁轭部位的涡流损耗。

4 结论

笔者提出了一种新型三相磁控电抗器,介绍

了它的结构和工作原理,同时对所提出的三相磁控电抗器分析模型进行了电磁场有限元计算及工作电流波形仿真,通过分析可以得出如下结论:

- (1) 通过减少三相磁控电抗器的磁轭面积可以取代三相磁控电抗器的磁轭的作用,并且得到与铁芯柱存在磁轭时同样的控制效果。
- (2) 改变晶闸管的触发角可以平滑地调节新型三相磁控电抗器的电流,从而改变电抗器的电抗。

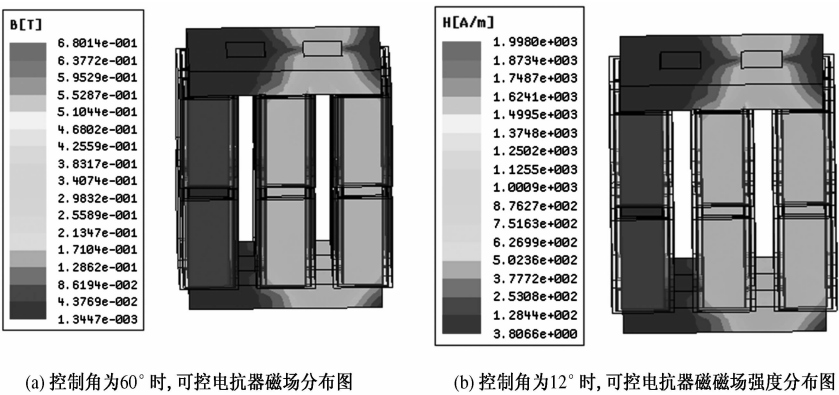


图 6 不同触发角下三相 MCR 内的磁力线分布图形

Fig. 6 The graph of magnetic line in three-phase MCR under different triggering angle

(3) 新型三相磁控电抗器的空载输出电流波形中谐波含量很小。

(4) 新型磁控电抗器由于铁芯柱内不采用分布式磁阀结构,可有效地减低磁控电抗器的噪音水平及制造成本,而其电气性能并不变差。

参考文献：

[1] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社, 1999.

[2] 刘仁,赵国生,王欢,等. 三相磁阀式可控电抗器的特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39

(7):110-114.

[3] 田翠华,陈柏超. 低谐波双级饱和磁控电抗器研究[J]. 电工技术学报,2006,21(1): 19-23.

[4] 宋江保,王贺萍,张战永,等. 三相磁阀式可控电抗器的分析研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23): 20-22,40.

[5] 同向前,薛均义. 电子式连续可调电抗器的控制特性[J]. 电力自动化设备,2005,25(1): 25-27.

[6] 牟宪民,王建赟,魏晓霞,等. 新型正交铁芯可控电抗器. 中国电机工程学报,2008,28(21): 57-62.

Research on Novel Orthogonal Core Three-Phase Magnetic Controllable Reactor

ZHAO Guo-sheng, CHENG Zi-xia, SUN Ke-qin

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

Abstract: Now the orthogonal core magnetic controllable reactors proposed in the papers are single phase structure,three phase controllable reactor used this structure needs high cost, in order to solve the problem, a novel orthogonal core three-phase magnetic controllable reactor is proposed in this article, its structure and the principle are introduced. The paer conducted the electromagnetic field analysis and circuit characteristic analysis on the proposed controllable reactor. By using Ansoft electric-magnetic field analysis software we established the novel orthogonal core magnetic controllable reactor three-dimensional simulation model, verified the feasibility of adjust the reactor reactance smoothly by adjusting the thyristor's triggering angle and the less harmonic component in no load, the analysis of the three-phase magnetic controllable reactor's electromagnetic field distribution is made at the same time.

Key words: orthogonal core magnetic controllable reactor; Ansoft; electromagnetic field simulation

文章编号:1671-6833(2014)01-0020-05

树枝形专用线取送车优化问题的研究

李 斌,董 昱,孙云霞

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 基于企业铁路树枝形专用线的分布特点,采用多种取送作业方式,针对列车分批到达编组站情况下的取送车优化问题建立数学模型,该数学模型是以充分利用调机的牵引能力为原则,以货车总消耗时间最小化为优化目标;同时提出遗传蚁群算法求解该取送车优化问题.利用遗传算法的随机搜索、快速性及全局收敛性等特点,产生取送车问题的初始信息素分布;然后利用蚁群算法的并行性、正反馈机制及求解效率高等特性求出精确解.最后结合实例求得取送车作业的最优解,来验证该模型的合理性、可行性;并通过遗传蚁群算法和蚁群算法的对比,说明该算法的优越性.

关键词: 企业铁路;树枝形;取送车作业;遗传蚁群算法

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.005

0 引言

当前,我国企业铁路以人工调度为主,编组站容易长期处于满负荷状态,从而造成堵车、运输不及时等问题^[1].在企业专用线运输中,取送车作业衔接着车辆交接、调车运用、货物装卸等作业,因此合理安排取送车作业,有效缩短货车停留时间,对于提高运输效率 and 经济效益有着重大意义.

取送车问题是经典的 NP 问题,为此学者们提出了许多优化方法求解此问题.文献[2-3]提出以调机走行时间最短为优化目标,采用“单一送车”的方式,仅对一趟到达列车的送车作业进行研究,其模型的建立没有考虑装卸区容车能力、调机牵引能力、货物作业时间等重要因素.文献[4-11]从求解算法方面进行优化,哈密尔顿图法直观简单,但仅适用于规模较小的问题;模拟退火算法^[6]和遗传算法^[7]具有良好的全局搜索性,但求解效率较低;蚁群算法能求得较好的解^[8-9],但执行时间长且全局搜索能力差.

1 问题的描述

从当前的布置形式上来看,多数工矿企业编组站内轨道纵横、装卸点分散、呈树枝状分布、车流分散到发.所以笔者把企业编组站内的装卸货专用线抽象为树枝型专用线,其特点是调机在同

一批次取送作业过程中不必返回编组站.

尽管企业编组站没有列车运行图的限制,但为了节约成本,尽量使货车在编组站停留时间最少.所以笔者针对多趟列车分批到达编组站进行取送作业的情况,采用“连送带取”、“单取(送)”的作业方式,提出以货车总消耗时间最小化为优化目标.取回的车组被编入就近的出发列车,离开编组站.

2 数学模型的建立

设有 n 趟列车分批到达编组站,调机将分组后的各个车组送往其对应的装卸点.由于调机的牵引能力和装卸点容车能力的限制,在同一批次的作业过程中其牵引的货车辆数有限.该模型的最终目的是求得取送作业的顺序方案及相应的批次方案,以使计划阶段内所有货车的总消耗时间最短,同时使调机的牵引能力得到充分利用.

2.1 确定作业条件

根据前面的分析,得到取送车问题的条件:

- (1) 一台调机执行任务;
- (2) 将解体完毕时刻相同、去往同一装卸点的车辆作为一个车组;
- (3) 每个车组的货车辆数已知;
- (4) 装卸点个数及各装卸点的容车辆数已知;
- (5) 调机的最大牵引力已知;

收稿日期:2013-10-13;修订日期:2013-11-06

基金项目:甘肃省科技支撑计划资助项目(1204GKCA038)

通信作者:董 昱(1962-),男,甘肃兰州人,兰州交通大学教授,研究方向为交通信息工程及控制.

(6) 各车组的货物作业时间、调机在每个装卸点之间所用时间已知;

(7) 编组列车的开始编组时间及牵引能力已知.

2.2 数学模型

设阶段计划内所有取送货车总消耗时间为 F , 得到该研究的取送问题数学模型为

(1) 目标函数. 货车的总消耗时间为

$$\min F = \sum_i \sum_j m_{ij} (t_{ij}^{\text{marsh}} - t_i^0). \quad (1)$$

(2) 约束条件. 约束条件为

$$\begin{cases} c(ij^q) < c(ij^{q'}), \text{ if } q < q'(1); \\ f_j^{\text{region}} < wac_j, \text{ if } j \in J(2); \\ f_b^{\text{wagon}} < hcl, \text{ if } j \in B(3). \end{cases} \quad (2)$$

式中: j 为装卸点的编号, 其集合为 J ; i 为按所到列车的先后进行排号, 其集合为 I ; q 为作业性质 ($q=1$ 是送, $q=2$ 是取); ij 为取送车组, ij^q 为 ij 的作业类型; t_i^0 为 i 的解体完成时分; m_{ij} 为车组 ij 的车辆数; t_{ij}^{marsh} 为是指车组 ij 所对应的编组开始时分; wac_j 为装卸点 j 最多同时容纳的车辆数; hcl 为调机的牵引能力; b 为取送批次编号, 其集合为 B . f_j^{region} 为用以判断装卸点 j 容纳货车辆数的最大值; f_a^{wagon} 为判断在第 a 批次中调机牵引车辆数的最大值.

上述(1)式是对于同一个车组要满足先送后取的偏序约束, (2)式是到达装卸点的车辆数要满足其容车能力.

2.3 取送批次的构造

根据到达编组站列车的先后顺序, 再依据车组要到达装卸点编号的大小, 对每个车组 ij 的取送作业进行编号, 得到唯一一个顺序集合 C , 设解的集合为 $x = \{c(ij^q) | c \in C, i \in I, j \in J, q = 1, 2\}$.

取送批次的划分是根据调机不必要走行原则、及时取送和牵引能力的约束进行优化的, 为此定义了3个函数.

函数1 最大牵引能力函数: $f_{\max}(x): c_{\text{begin}}(a) \rightarrow c_{\text{end}}(a)$

其中, $c_{\text{begin}}(a)$ 表示第 a 批次中第一个作业在 x 中的作业编号, $c_{\text{end}}(a)$ 表示最后一个作业的编号.

原则: 以调机牵引效率最大化为目标, 调机在每个批次 a 中要尽可能达到其最大牵引能力,

功能: 根据充分利用调机的牵引效率来确定第 a 批次中的最后一个作业. 由此可知, 当 $a=1$ 时, $c_{\text{begin}}(a)=1$; 当 $a>1$ 时, $c_{\text{begin}}(a)=c_{\text{end}}(a-1)+1$.

函数2 调机走行最小函数: $f_{\min}(x): c_{\text{end}}(a) \rightarrow c'_{\text{end}}(a)$

原则: 如果批次 a 中有两个不相邻的作业要到达同一个装卸点, 那么这两个作业的性质只能是先送后取.

功能: 在函数1生成第 a 批次中 $c_{\text{end}}(a)$ 的基础上, 根据调机走行最小原则来更新 $c_{\text{end}}(a)$, 产生新的最后一个作业 $c'_{\text{end}}(a)$.

函数3 及时取送函数: $f_{\text{pro}}(x): c'_{\text{end}}(a) \rightarrow c''_{\text{end}}(a)$

原则: 如果 x 中的 $a-1$ 个批次已经确定, 那么函数2确定的第 a 批次中满足此原则的作业不能再出现在以后批次中.

功能: 在函数2生成第 a 批次中 $c'_{\text{end}}(a)$ 的基础上, 根据及时取送原则来更新 $c'_{\text{end}}(a)$, 产生新的最后一个作业 $c''_{\text{end}}(a)$.

根据以上3个原则, 生成取送批次的主函数.

输入: 顺序方案 x , 作业总数 n ;

Step1 令 $s:=1, a:=1$;

Step2 如果 $s \leq n$ 并且方案 x 可行, 转 Step3;

否则, 如果 x 可行, 计算且输出 x ;

否则, 输出“方案不可行”提示;

Step3 调用函数1;

调用函数2;

调用函数3;

令 $c_{\text{begin}}(a+1) := c''_{\text{end}}(a) + 1, a := a + 1, s := c_{\text{begin}}(a)$;

转 Step2;

注: 在 Step2 中, 若“ x 不可行”, 那么必须产生新的初始取送方案 x' .

3 优化算法的设计

遗传算法的全局搜索速度很快, 但对反馈信息的利用不充分, 容易陷入冗余迭代, 使其求精确解效率较低; 蚁群算法 (Ant Colony Algorithm, ACA) 虽然初期信息素匮乏, 可是具有鲁棒性、易与其他算法结合和全局精确的收敛能力. 因此, 笔者把两种算法融合成 GACA 对该问题进行求解. 前期利用遗传算法产生取送车问题的初始信息素分布; 然后利用蚁群算法求出精确解.

3.1 遗传算法的设计

Step1 初始种群: 设 $X_k = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 代表一个取送方案. 以每个车组先送后取、装卸时间长的作业尽量排在前面为原则, 使用“轮盘赌”的方法构成第一代取送方案 $X = (X_1, X_2, \dots, X_j)$;

Step2 适应度评估: 设 $f_k = 1/F_k$ 为的适应度函数, f_k 越大的被选择的概率越大, F_k 越接近最优解;

Step3 自然选择: 计算 X 的平均适应度 f , f_k 的相对适应度, 得到 X_k 的生存数量, 生成下一代

取送方案;

Step4 交叉重组:根据选择概率 P_c 选择个体进行交叉重组,交叉规则采用 PMX 法;

Step5 变异操作:在每代取送方案中,以变异概率 P_m 对染色体进行变异;

返回 Step2,进行循环.

3.2 遗传算法与蚁群算法的衔接

GA 求出的若干组优化路径 G_{better} 决定了 ACA 的初始信息素分布,在初始 t_0 时刻,作业点 (i,j) 间的信息素生成规则为

$$\tau_{ij}(t_0) = \begin{cases} \tau_c, & \text{otherwise;} \\ \tau_c + \tau_j, & i, j \in G_{better}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ_c 为信息素常数; τ_j 为 G_{better} 转换的信息素值.

3.3 蚁群算法的设计

在 t 时刻作业点 i 的第 k 只蚂蚁在作业点 i 和 j 间转移概率 $P_{ij}^k(t)$ 为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} 0, & \text{others;} \\ \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{u \in \text{allowed}_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}(t)]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 表示边 (i,j) 上的遗留信息浓度; $\eta_{ij}(t)$ 表示路径启发信息; j 表示还未访问过的需求点.

只将最好的蚂蚁用于信息素的更新,其全局更新规则为

$$\tau_{ij}(t+n) \leftarrow (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t) \quad (6)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} (L_{\text{best}})^{-1}, & \text{if } (i,j) \in g_{\text{lobal}} - \text{best}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ 表示信息素挥发参数; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻作业点 i,j 间信息素的增加量; L_{best} 为到目前为止找出的全局最优路径.

在搜索路径的同时,每只蚂蚁应用局部更新规则对它们经过的边进行激素更新,更新规则为

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t). \quad (8)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} Q/d_{ij}, & \text{if } ant \in (i,j) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (9)$$

式中: Q 是蚂蚁通过轨迹 (i,j) 时所释放的信息素量,若蚂蚁通过轨迹 (i,j) ,则进行信息素的更新.

4 算例验证与分析

4.1 数学模型的验证

某钢铁企业的树枝形专用线如图 1 所示,该编组站只有一台调机进行取送作业. $V_1 \sim V_5$ 表示 5 个装卸点,括号内数字代表其容车能力.由此可得出调机在各装卸点之间的行走时间表(见表 1).

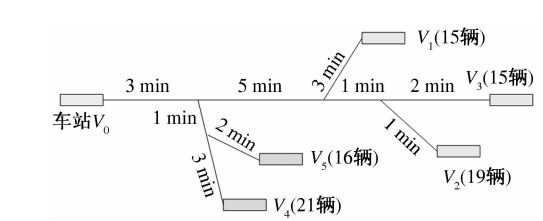


图 1 树枝形铁路专用线布置示意图

Fig. 1 Wagons in branch-shaped private siding

表 1 各路径的调机行走时间

Tab. 1 The travel time of conditioner at each path min

	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
V ₀	0	11	10	11	7	6
V ₁	11	0	5	6	12	11
V ₂	10	5	0	3	11	10
V ₃	11	6	3	0	12	11
V ₄	7	12	11	12	0	5
V ₅	6	11	10	11	5	0

现有 4 列车相继到达 V_0 ,解体后根据货车要到达的装卸点进行分组,该问题的已知信息如表 2 所示.

表 2 取送问题的已知信息表

Tab. 2 The known information of TPW

c	i	q	j	i_j	$m_{ij}/\text{辆}$	t_{i0}	$t_{ij\text{cargo}}/\text{min}$
1	1	1	1	3	6	11:55	48
2	1	2	2	1	5	11:55	50
3	1	1	2	1	5	11:55	99
4	1	2	4	2	11	11:55	99
5	1	1	4	2	11	11:55	99
6	1	2	2	1	5	12:02	64
7	2	1	2	6	8	12:02	80
8	2	2	3	7	9	12:02	63
9	2	1	5	4	5	12:02	55
10	2	2	2	6	8	12:02	80
11	2	1	3	7	9	12:02	63
12	2	2	5	4	5	12:02	55
13	2	1	5	4	5	12:02	55
14	2	2	2	6	8	12:02	80
15	3	1	1	10	5	12:39	39
16	3	2	2	9	5	12:39	50
17	3	1	5	8	6	12:39	66
18	3	2	2	12	3	14:31	25
19	3	1	3	11	2	14:31	23
20	3	2	4	13	5	14:31	45
21	4	1	2	12	3	14:31	25
22	4	2	3	11	2	14:31	23
23	4	1	4	13	5	14:31	45
24	4	2	2	12	3	14:31	25
25	4	1	4	13	5	14:31	45
26	4	2	2	12	3	14:31	25

注: t_{ij}^{cargo} 表示车组 i_j 的货物作业时间.

取回编组站的车组要进行编组,根据就近原则编入出发列车,出发列车信息见表 3。

表 3 出发列车信息表
Tab.3 The train information

出发列车编号	1	2	3	4	5
编组开始时刻	14:50	14:10	15:30	15:50	16:00
牵引能力/辆	30	20	20	20	20

设调机在挑选车组时所用时间是相等的(4 min),根据上述已知条件,利用 GACA 在 MAT-

LAB 中进行求解,参数设置如下。
遗传算法: $N_1=50,P_c=95\%,P_m=5\%$;
蚁群算法: $N_2=150,\tau_c=60,\tau_x=2,\alpha=1,\beta=5,Q=1\,000,\rho=0.7$ 。
算法得到最优的取送车顺序为 5-7-11-3-17-6-1-8-9-4-12-2-15-13-19-25-18-21-10-23-16-24-26-14-20-22,货车总消耗最少时间 $F=270.43\text{ h}$,根据运算结果得到相应的取送方案如表 4 所示。

表 4 算例仿真取送方案
Tab.4 The take delivery program of simulation

顺序	作业 编号	取送 时刻	批次	装卸点	挂运 列车	顺序	作业 编号	取送 时刻	批次	装卸点	挂运 列车
1	5	12:00	1	4	—	14	13	14:16	3	5	—
2	7	12:04	1	1	—	15	19	14:20	3	5	—
3	11	12:08	1	3	—	16	25	14:24	3	4	—
4	3	12:12	1	2	—	17	18	14:28	3	2	3
5	17	12:48	2	2	—	18	21	15:23	4	2	—
6	6	12:52	2	4	1	19	10	15:27	4	2	3
7	1	12:52	2	1	—	20	23	15:27	4	1	—
8	8	12:56	2	5	1	21	16	15:31	4	1	3
9	9	12:56	2	2	—	22	24	15:31	4	3	4
10	4	13:00	2	2	1	23	26	15:31	4	4	4
11	12	13:00	2	3	2	24	14	15:31	4	5	4
12	2	14:12	3	1	2	25	20	15:31	4	5	5
13	15	14:12	3	1	—	26	22	15:31	4	2	5

注:解对应的优化目标: $F=270.43\text{ (h)}$; 批次数:4(次)。

表 5 各批次调机最大牵引辆数表
Tab.5 The capacity of machine traction

取送批次	1	2	3	4
牵引能力/辆	36	32	35	35

结果表明,针对多趟列车分批到达编组站的情况,笔者将取送顺序、取送时间、批次和挂运列车作为一个整体进行优化;所得取送作业方案中作业(15,16)为“同送”方式,(21,22,23)为“同取”方式,(6,7,8),(12,13),(19,20,21)为“送取结合”方式;由表 5 可得在优化的批次中使调机的能力达到了最大化,这使得方案在不影响此系统货车总消耗时间的基础上,提高了调机的牵引效率。

4.2 遗传蚁群算法的验证

为了验证 GACA 的优点,分别用基本 ACA 和 GACA 对本取送问题进行求解,解与迭代次数之间的关系如图 2、图 3 所示。

由仿真对比图可知:GACA 当迭代次数达到 103 次时求得最优解为 $F=270.43\text{ h}$,ACA 当迭代

次数达到 123 次时求得最优解 $F=291.63\text{ h}$ 。因此 GACA 的迭代次数大幅度减小;所求得的解收敛精度提高。

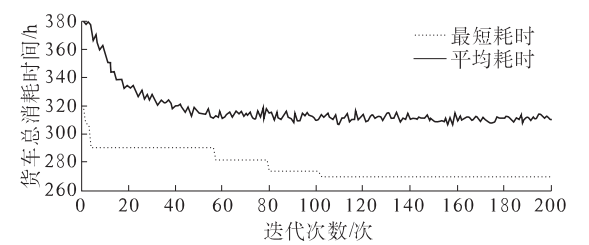


图 2 GACA 最优解与迭代次数关系图
Fig.2 The relation graph of GACA

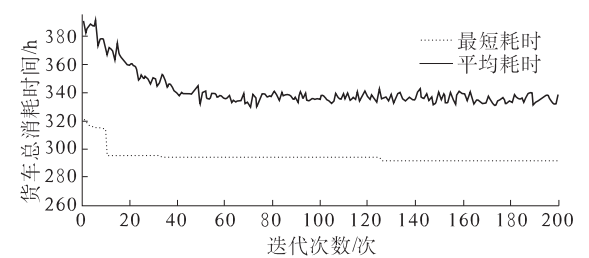


图 3 ACA 最优解与迭代次数关系图
Fig.3 The relation graph of ACA

5 结论

笔者针对多趟列车分批到达编组站的情况,提出了一种新型树枝形取送问题的数学模型和遗传算法与蚁群算法的融合算法求解此问题。

与传统模型相比,笔者改进后所得到的数学模型把取送问题的顺序、时间和批次作为一个系统进行优化,适用于多种取送作业方式,同时考虑到了调机的牵引能力和装卸区的容车能力的约束,因此所得数学模型更符合编组站的实际要求。

提出用 GACA 求取最优取送顺序,由 GA 产生的初始解,减少了 ACA 盲目的搜索次数,加快了收敛速度;在收敛速度加快的同时,ACA 中的参数对取送车问题规模变化的敏感度降低,提高了算法的鲁棒性。所以无论是算法的性能优化、收敛速度还是鲁棒性,GACA 都取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 雷友诚,吴志飞.改进的蚁群算法在放射形专用线取送车优化中的应用[J].控制工程,2012,19(6):1007-1010.
- [2] 李智.基于改进蚁群算法的货物作业车取送模型优化[J].铁道运输与经济,2004,26(4):73-76.
- [3] 杨运贵,王慈光.树枝形铁路专用线取送车问题的遗传算法研究[J].计算机工程与应用,2008,44(12):210-214.
- [4] 石红国,彭其渊.树枝型专用线取送车问题的哈密尔顿图解法[J].中国铁道科学,2005,26(2):132-135.
- [5] 张健,宋建业.货物作业车取送模型的优化[J].铁道货运,2008,26(10):13-16.
- [6] 张波,叶家玮,胡郁葱.模拟退火算法在路径优化问题中的应用[J].中国公路学报,2004,17(1):179-181.
- [7] 王雅琳,李开峰.遗传算法在企业铁路取送调车作业优化中的应用[J].系统工程,2007,25(3):94-99.
- [8] 吴海辉.基于遗传算法的铁路编组站阶段计划编制研究[D].南昌:华东交通大学机电工程学院,2009.
- [9] WANG Miao. Hybrid behavior ant colony algorithm for vehicle routing problem[J]. Computational and Information Sciences,2012,4:168-171.

Research on PTW on Branch-shaped Sidings

LI Bin, DONG Yu, SUN Yun-xia

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

Abstract: Based on the distribution characters of enterprise railway branch - shaped sidings, using a variety of mode of operation, the mathematical model of wagons for several trains arriving at station in batches was built. The principle is to make full use of the traction and the optimization goal was the least time of vehicle total consumption; meanwhile, the genetic ant colony algorithm(GACA) was put forward to solve the problem. Using the random search, rapidity and global convergence of genetic algorithm, the initial pheromone was produced. Then the exact solution was calculated by using the parallelism, positive feedback mechanism and high solving efficiency of ant algorithm. In combination with an example, the optimal solution was found to verify the rationality and feasibility of the model. And in comparison with ant colony algorithm, illustrate the superiority of the algorithm is shown.

Key words: railway station; branch-shaped; Placing-in and Taking-out wagons; genetic ant colony algorithm

基于 MSP430 和模糊控制的微量计量泵控制系统

杨艳萍, 陶彩霞, 吴俭民

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以超低功耗单片机 MSP430F149 作为核心,设计了一套通过控制步进电机的方向和转速来实现流量控制的微量计量泵控制系统.采用模糊 PID 控制方式,实现了步进电机的闭环控制,并用 LabVIEW 开发了上位机控制显示界面,通过 RS-232 实现与上位机的串口通信.该系统稳定性好、控制精度高.

关键词:MSP430 单片机;步进电机;微量计量泵;虚拟仪器

中图分类号:TP273.5 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.006

0 引言

传统的计量泵控制方式因其精度低、显示不直观、可靠性差,无法满足对大规模工业化生产工艺的控制要求^[1].近年来,单片机行业随着机电一体化快速发展迅速崛起,给现代工业测量控制领域带来了新的技术革命.使用单片机实现流量的调节控制,能有效地提高控制的精度,降低功耗^[2].笔者在现有的微量计量泵控制系统的基础上,采用 MSP430 系列单片机,设计了一套流量控制系统,具有一定的实用价值.

1 系统的基本组成和控制原理

系统由超低功耗单片机、电源模块、按键模块、步进电机驱动模块、步进电机、检测装置、串口通信模块和上位机界面显示模块等部分组成.

系统采用上下位机控制结构,上位机发送指令给下位机,下位机执行完成后将自己的状态信息发送给上位机,上位机和下位机通过标准串口通信.

本系统是以 MSP430 单片机作为核心控制步进电机驱动芯片,进而控制步进电机动作,光电编码器则作为检测装置形成闭环系统.设定输入流量值转化为步进电机的转速,通过步进电机驱动柱塞运动,光电编码器将检测到的步进电机转速反馈给上位机,与设定速度进行比较,使系统智能调节步进电机转速.红外光电传感器检测凸轮的位置状态,在系统泵液结束后,立即快速回弹.系

统硬件原理如图 1 所示.

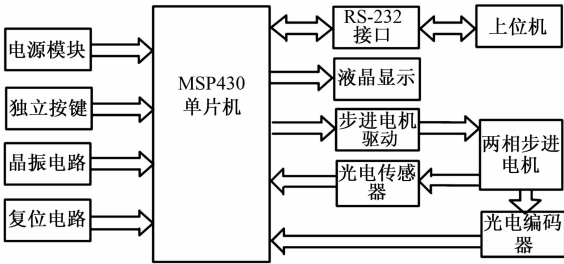


图 1 系统硬件连接框图

Fig. 1 Hardware connection block diagram

2 系统硬件设计与实现

系统硬件原理图如图 2 所示.系统控制电路由按键模块、步进电机驱动模块、检测装置、串行通信模块和 1602 液晶显示及上位机界面显示模块等部分组成.

2.1 以单片机为核心的控制系统

MSP430 系列单片机是一种超低功耗、功能强大的单片机.系统中采用的是 MSP430F149. MSP430FG4619 微控制器的配置有 2 个 16 位定时器,1 个高性能 12 位的 A/D 转换器,双通道 12 位 D/A 转换器、3 个可配置运算放大器、1 个通用串行通信接口(USCI)、1 个通用同步/异步通信接口(USART)、DMA、80 个 I/O 引脚和一个带稳压充电泵的液晶显示器(LCD)驱动器.数控振荡器 DCO 可以使器件在少于 6 μ s 的时间内,从低功耗模式迅速激活到运行模式^[3-4].

收稿日期:2013-09-20;修订日期:2013-11-20

通信作者:陶彩霞(1972-),女,甘肃兰州人,兰州交通大学副教授,主要从事电机及其控制等方面的研究,E-mail:1733425004@qq.com.

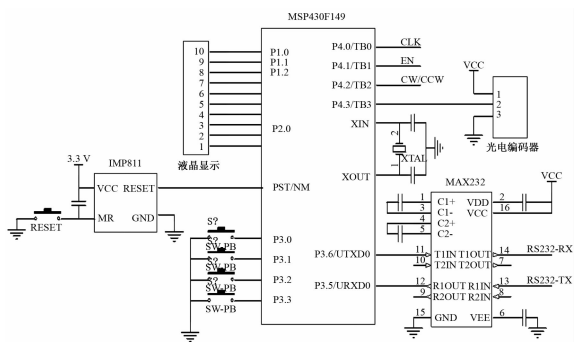


图 2 系统硬件原理图

Fig. 2 Hardware principle diagram

2.2 电源模块

系统电源电路如图 3 所示. 系统中采用 S - 50 - 12 V 开关电源提供 12 V 直流电压. 单片机工作电压为 3.3 V, 将 12 V 电压经过 LM7805 转换为 5 V, 再经过 LM317 降为 +3.3 V. 控制系统中步进电机驱动芯片工作电压为 5 V, 芯片的功率电压为直流 12 V.

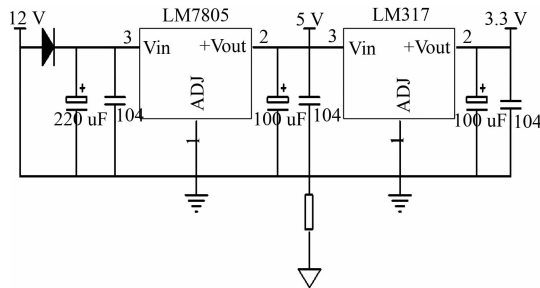


图 3 电源电路图

Fig. 3 Power supply circuit diagram

2.3 电机控制

步进电机驱动芯片采用 THB7128H, 其中 M1, M2, M3 细分设置端口与 3 位 DIP 开关连接. 可设置 8 种不同细分模式, 分别为 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128.

单片机 P4.0 脚与驱动芯片 THB7128H 的电机的脉冲信号输入端 CLK 连接; P4.1 与正反转控制端 CW/CCW 相连, 控制步进电机的转动方向; P4.2 脚与使能端 ENABLE 相连, 在工作时状态始终为 1; 两相四线步进电机的 A +、A - 端和 B +、B - 端分别与驱动芯片 THB7128 的 OUT_1A、OUT_2A 和 OUT_1B、OUT_2B 端口连接. 如图 4 所示.

2.4 光电编码器

光电编码器输出信号为一组方波脉冲 Z 相信号. 光电编码器每旋转一周, Z 相便输出一个脉冲, 输出脉冲的个数和步进电机旋转角度成正比

关系. 采用 M/T 法测速通过计算脉冲数从而计算出步进电机运行的转速. 将光电编码器测得的转速上传到上位机, 与设定流量下的转速进行比较.

3 系统的软件设计与实现

MSP430 单片机的软件开发平台使用最多的是 IAR 公司专为 MSP430 系列单片机提供的集成调试环境 Embedded Workbench 嵌入式工作台和 C 语言调试器 C - SPY, 提供了快捷方便而且功能丰富的窗口调试界面, 使编译调试的效率大大提高^[4-5].

软件主程序流程图如图 5 所示. 系统的控制策略是采用单片机定时器中断的方法产生步进时钟脉冲, 通过对步进脉冲数和脉冲频率的控制实现对步进电机的转速的调节控制. 在子程序中设定定时器的初始值, 通过调整定时初始值调节流量^[6].

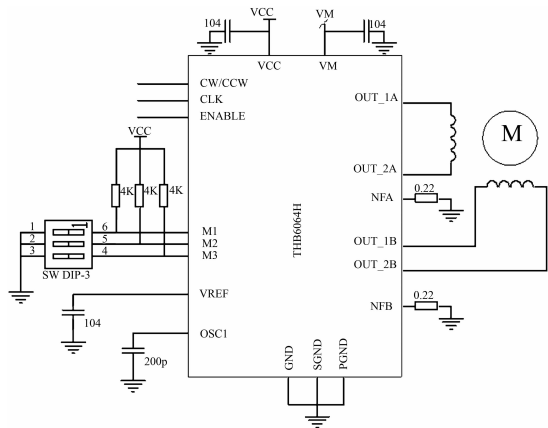


图 4 THB7128 外围电路

Fig. 4 THB7128 peripheral circuit

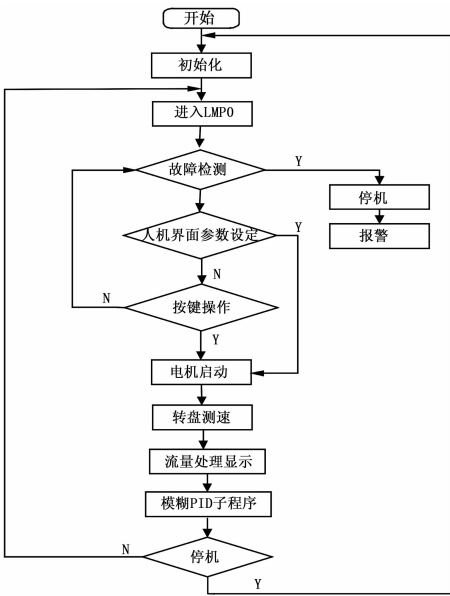


图 5 主程序流程图

Fig. 5 Main program flow chart

系统主程序如下:

```
voidstepmotor ( )
```

```
{
```

```
WDCTL = WDPW + WDTHOLD;
```

```
P3IES = 0x0f; //P4. 0 ~ P4. 3 下降沿 按 键 中 断
```

```
P3IE = 0x0f; //P4. 0 ~ P4. 3 允许中断
```

```
P3IFG = 0x00; //中断标志位设置为 0
```

```
P3DIR = 0xf0; // P4. 0 ~ P4. 3 设为输入 模 式
```

```
_EINT(); //打开使能
```

```
while(1)
```

```
{
```

```
    unsigned int keyin;
```

```
    unsigned int temp1; // temp1 = 返回值
```

```
    if(keyin! = 0x0f) //有键按下
```

```
        delay();
```

```
        if(keyin! = 0x0f) //确定有键按下
```

```
{
```

```
    temp1 = keyin; //键盘输入值
```

```
switch( temp1 )
```

```
{
```

```
case 0x0e: stepmotor_run(); break;
```

```
case 0x0d: stepmotor_speedup(); break;
```

```
case 0x0b: stepmotor_speeddown(); break;
```

```
case 0x07: stepmotor_stop(); break;
```

```
default:
```

```
    while(keyin! = 0x0f); //等待按键放开
```

```
    P3IFG = 0;
```

```
.....
```

```
    return;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

系统初始化完成后,首先检测步进电机是否无故障,然后进入低功耗 LMP0 模式. 如果上位机给控制系统发送指令或者有操作按键被按下(4个按键的功能分别是开始、上升、下降、停止),立即退出低功耗模式,单片机根据设定值驱动步进电机转动. MSP430 定时器 TIMER_B 的捕捉功能,准确捕捉来自光电编码器的信号. 完成采集信号的转换后,通过 RS232 接口传送给上位机. 与上位机或操作面板按键设置流量值进行比较,采用模糊 PID 算法可以得到的步进电机需要转动

的脉冲数或者脉冲频率发送给步进电机驱动芯片,步进电机通过同轴连接柱塞机构运动,从而实现流量的闭环调节. 红外光电传感器检测凸轮的位置状态,系统泵液结束后,立即快速回弹. 当不需要泵液时,CPU 进入 LPM0 模式,等待外部信号唤醒.

4 模糊 PID 控制算法的仿真及软件实现

两相混合步进电机的传递函数为

$$G(S) = \frac{\theta_0(S)}{\theta_i(S)}. \quad (1)$$

式中: θ_0 为目标值; θ_i 为控制值.

两相混合步进电机的电压平衡方程式为

$$\begin{cases} U - Ri_A - L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + \frac{d}{dt} [\Phi_m \cos(p\theta)] = 0; \\ U - Ri_B - L \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_A}{dt} + \frac{d}{dt} [\Phi_m \cos(p\theta)] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: U 为线组端电压,V; L 为各相绕组自感,H; M 为 AB 两相的互感,H; R 为相绕组电阻, Ω .

单相励磁时运动方程为

$$J \frac{d^2(\Delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\Delta\theta)}{dt} + 2p^2 \Phi_m I_0 \Delta\theta = 0. \quad (3)$$

式中: $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_i$; I_0 为扰动前的电流 $I_0 = i_A = i_B$.

作拉普拉斯变换,计入零初始条件得到:

$$(s^2 J + sD + 2p^2 \Phi_m I_0) \theta_0(s) = 2p^2 \Phi_m I_0 \theta_i(s). \quad (4)$$

于是,

$$\begin{aligned} G(S) &= \frac{\theta_0(S)}{\theta_i(S)} = \frac{2p^2 \Phi_m I_0}{Js^2 + Ds + 2p^2 \Phi_m I_0} \\ &= \frac{\omega_{np}^2}{s^2 + \frac{D}{J}s + \omega_{np}^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\omega_{np} = \sqrt{\frac{2p^2 \Phi_m I_0}{J}}$ 为固有角频率.

由于步进电机构成的控制系统存在着非线性、时变、干扰等特性,而常规的 PID 控制方法无法达到理想的控制效果,对此采用模糊 PID 控制算法. 模糊 PID 控制是将模糊控制与 PID 控制相结合,由定义变量、模糊化、知识库、逻辑判断及反模糊化 5 个部分组成. 以误差 e 和误差 ec 作为输入,利用专家的经验 and 知识建立模糊控制规则,对 PID 参数进行在线修正,输出整定参数 Δk_p , Δk_i , Δk_d , 模糊控制系统结构如图 6 所示^[7-9].

控制结果表达式为

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p; \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i; \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d. \end{cases} \quad (6)$$

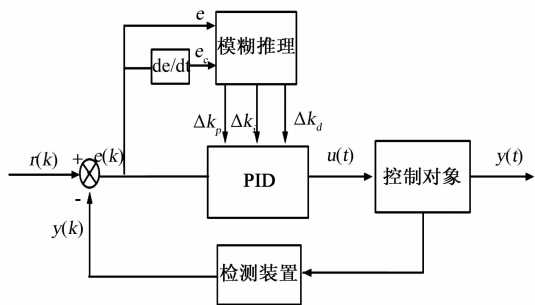


图 6 模糊控制结构框图

Fig. 6 Fuzzy control structure diagram

式中： k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} 为常规 PID 整定法整定的初始值。

误差 e 的论域范围取为 $[-6, 6]$, 误差变化 ec 的论域范围取为 $[-6, 6]$. 输出 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的论域分别取为 $[-6, 6], [-6, 6], [-3, 3]$. 语言变量都取为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$.

由上述 PID 参数调整原则, 编辑合理的模糊规则, 得到输出变量 k_p, k_i, k_d 的 49 条模糊规则.

if $e = NB$ and $ec = NB$, then $Kp = PB$, $Ki = NB$, $Kd = PS$

if $e = NB$ and $ec = NM$, then $Kp = PB$, $Ki = NB$, $Kd = PS$

if $e = NB$ and $ec = NS$, then $Kp = PM$, $Ki = MB$, $Kd = ZO$

...

if $e = PB$ and $ec = PM$, then $Kp = NB$, $Ki = PB$, $Kd = PB$

if $e = PB$ and $ec = PB$, then $Kp = NB$, $Ki = PB$, $Kd = PB$

根据控制对象的特性对系统建模仿真. 如图 7 所示.

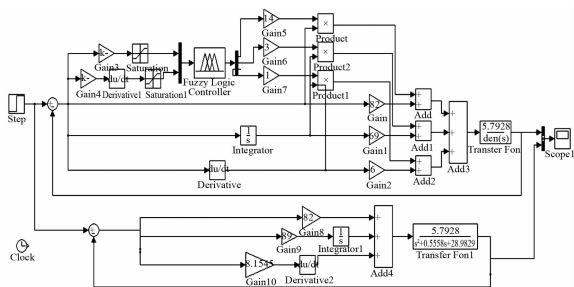


图 7 仿真结构图

Fig. 7 Simulation diagram

模糊 PID 控制和常规 PID 步进电机速度同步仿真响应曲线如图 8 所示.

由图 8 可知, 模糊 PID 控制方式相对于常规 PID 控制具有响应时间短、响应速度快、超调量小和稳态特性好的特点.

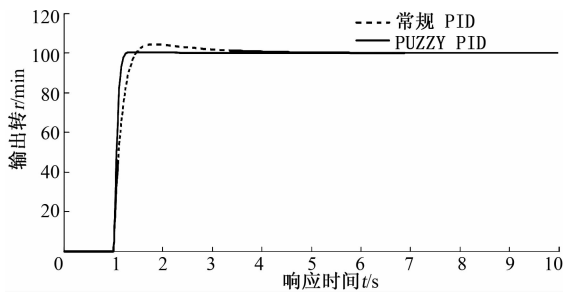


图 8 步进电机速度同步仿真响应曲线

Fig. 8 Stepper motor speed synchronous simulation response curve diagram

5 LabVIEW 上位机通信与显示

系统采用 RS-232 标准接口电路实现 LabVIEW 与单片机的串行通信, 完成上位机对微量计量泵的控制. 采用 MAX3232 芯片完成 TTL/CMOS 到 RS-232 的电平转换, 如图 2 中所示.

LabVIEW 是图形化编程语言的软件. 程序中运用 VISA 函数实现对仪器的控制, VISA 是 I/O 接口(计算机与仪器之间的标准软件通信接口)软件标准及其相关规范的总称, 用以实现对仪器的程控. 它的实质是一组函数集, 通过它可以直接访问计算机硬件设备.

基于 RS-232 协议的串口通信模块, 如图 9 所示. 采用 VISA 端口配置“VISA 写入”、“VISA 读取”、“VISA 关闭”函数来实现对仪器驱动函数的调用. 根据下位机的串口通信协议来设置程序中的串口设置, 程序中产口参数的设定选择波特率、数据数据位、校验位、停止位^[10].

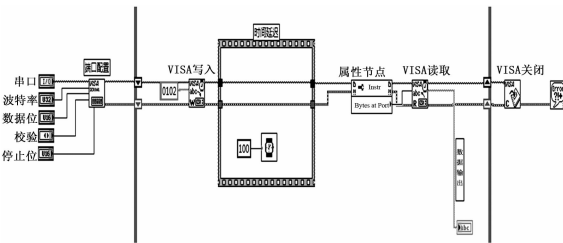


图 9 RS-232 接口通讯程序框图

Fig. 9 RS-232 interface communication program block diagram

基于 LabVIEW 8.6 平台设计的前面板如图 10 所示.

6 试验

对于 AA-94-2 微量计量泵, 流量为 0~10 mL/min, 采样周期为 0.1 s, 采样时间为 100 s, 实验结果如表 1. 计量泵的稳定性精度在 2% 以内.



图 10 上位机界面显示图
Fig.10 PC interface display

表 1 流量设定和计量试验数据

Tab.1 Flow setting and measurement test datas

上位机设 置理论值 /(mL·min ⁻¹)	步进电机 转速/ (r·min ⁻¹)	实测流量/ (mL·min ⁻¹)			容积率/ %	稳定性精 度/%
		1	2	平均值		
0.8	100	0.78	0.81	0.795	99.3	1.89
4.00	500	3.82	3.92	3.870	96.7	1.29
5.00	625	4.85	4.90	4.875	97.5	0.51
8.00	1 000	7.81	7.68	7.745	97.4	0.84

参考文献:

[1] 郑水华,张生昌.隔膜式煤浆泵国内外研究现状及发展趋势[C]//中国农业机械学会 2006 年学术年会论文集.北京:中国农业机械学会,2006:254-260.

[2] 邓鸿英,张生昌.基于单片机的计量泵流量控制器[J].工业仪表与自动化装置,2009(3):51-53.

[3] 胡大可.MSP43 系列 FLASH 型超低功耗 16 位单片机[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001.

[4] 胡大可.MSP430 系列单片机 C 语言程序设计与开发[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.

[5] 魏小龙.MSP430 系列单片机接口技术及系统设计实例[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.

[6] 李国友,程硕.基于步进电机的微量计量泵控制系

统的研究与实现[J].电机与控制应用,1999(3):26-30.

[7] 高向东,黄石生.步进电机模糊控制技术的研究[J].微特电机,2012,39(1):3-5.

[8] ZOU Xi-yong, XU De. Piecewise fuzzy control for path tracking of nonholonomicmobile robots [J]. Control and Decision,2008,23(6):655-659.

[9] LUO Xu-tao. A self-adaptive control approach for the attitude of aircraft with double-loop SMC[C]//Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2008:1396-1398.

[10] 郑对元.精通 LabVIEW 虚拟仪器程序设计[M].北京:清华大学出版社,2012.

Trace Metering Pump Control System Based on MSP430 and Fuzzy PID

YANG Yan-ping,TAO Cai-xia,WU Jian-min

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

Abstract: The ultra-low-power MSP430F149 was set as the core in this paper to develop a set of trace metering pump control system, which could achieve flow control by controlling the stepper motor. We realized closed loop control of stepper motor by a Fuzzy PID Control method, developed a PC control display interface using LabVIEW, and achieved serial port communication with PC via RS-232. The system with good stability was highly efficient.

Key words: MSP430 MCU; stepper motor; micro-metering pump; LabVIEW

7 结论

微量计量泵的控制系統是非线性的控制系统,采用模糊 PID 控制算法,在该控制系统上取得了较理想的控制精度.设计了 MSP430 单片机的外围电路,编写系統控制程序,主要实现了转速测量和流量显示等功能.采用 LabVIEW 编写进行上位机监控系统,通过标准串口实现了上位机与单片机之间的通信,其软件界面生动形象,且编程简单,方便应用,机界面显示直观.

基于改进粒子群算法的路径优化问题研究

梁 静¹, 宋 慧¹, 瞿博阳², 毛晓波¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)

摘 要:把动态约束机制及改进的粒子群优化算法(含交叉策略的动态多组群粒子群优化算法)与 Bezier 曲线结合来实现路径优化. 用三次 Bezier 曲线来描述路径, 测试不同算法下得到的曲线在路径优化问题中的特性, 通过比较得出不同算法的优劣性. 实验结果表明: 动态多组群粒子群优化算法克服了标准粒子群优化算法易于早熟和陷入局部最优的特点, 动态约束提高了交叉策略下算法的寻优性能, 能够灵活地处理约束条件, 克服了以往静态惩罚函数的缺点.

关键词:动态约束机制; 动态多组群粒子群优化算法; Bezier 曲线

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.008

0 引言

近些年, 随着科技的发展, 机器人已经应用到工业、农业、医疗、航空航天等方面. 而路径优化则是机器人实施各种操作最基本的环节. 机器人路径优化的实质是按照一定的技术指标(例如: 路径最短, 时间最少, 花费最小等), 找到一条满足特定技术指标的从起点到终点和障碍物之间无碰撞的路径^[1]. 目前, 已有多种进化算法应用到路径优化中, 其中文献[2-3]介绍了遗传算法实现的路径优化, 但是其计算量大并且处理规模较小, 文献[4-5]中, 差分进化容易陷入最优, 搜索能力差, 信息反馈不完整, 在运用时需要对其进行改进.

粒子群优化算法是一种模拟鸟群觅食行为的优化算法, 由于粒子群优化算法在概念上容易理解, 方便应用而且收敛迅速, 跟其他的进化算法相比, 它有一个突出的优势, 就是可以用较少的个体进行搜索而获得较好的结果, 存储量和计算量都相对较低^[6]. 但是, 粒子群优化算法由于收敛速度较快, 易于陷入局部最优.

为了克服标准粒子群优化算法存在的缺点, 笔者提出一种改进粒子群优化算法—动态多组群粒子群优化算法(DMS-PSO)的移动机器人路径规划方法. 用三次 Bezier 曲线来描述路径, 可以将路径

规划问题转化为生成 Bezier 曲线的节点位置优化问题^[7]. 以往的静态约束机制由于参数设置过大或者过小, 都不易使粒子找到最优解, 因此, 采用一种新的动态约束机制来克服这种缺点. 实验结果表明: 动态多组群粒子群优化算法增加了粒子的离散度, 新的动态约束机制提高了算法的寻优能力.

1 曲线介绍

Bezier 曲线是由法国工程师 P. E Bezier 于 1962 年提出的一种新的曲线表示方式^[8-10]. 目前 Bezier 曲线已广泛应用于计算机绘图.

一条 n 次 Bezier 曲线可以表示为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u)P_i, 0 \leq u \leq 1. \quad (1)$$

式中: $\{P_i\}$ 称为控制点; $\{B_{i,n}(u)\}$ 是著名的 n 次 Bernstein 多项式, 其定义为

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i}, i = 0, 1, \dots, n. \quad (2)$$

在 Bezier 曲线中, 最常用的是三次 Bezier 曲线, 要想获得三次 Bezier 曲线, 应使 $n = 3$, 由(1)和(2)可以得到三次 Bezier 的各点参数方程如下:

$$C(u) = P_0(1-u)^3 + 3P_1u(1-u)^2$$

收稿日期: 2013-09-20; 修订日期: 2013-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(211000531605); 中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50639); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20114101110005); 河南省科技攻关项目(132102210521).

作者简介: 梁静(1981-), 女, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要研究领域为进化计算、模式识别、运筹学理论、群体智能的研究, E-mail: liangjing@zzu.edu.cn.

$$+ 3P_2u^2(1-u) + P_3u^3, u \in [0,1]. \quad (3)$$

文中用 P_0, P_1, P_2, P_3 定义一段三次 Bezier 曲线. 曲线起始于 P_0 走向 P_1 , 并从 P_2 的方向来到 P_3 , 曲线一般不会经过 P_1 或 P_2 . 两段或者多段 Bezier 曲线, 为保证曲线的连续性和在段与段之间的光滑性, 相邻两段曲线之间满足一定的条件. 现以两段为例说明这种情况, 假设 P_0, P_1, P_2, P_3 为第一段曲线上的 4 个点, P_4, P_5, P_6, P_7 为第二段曲线上的 4 个点(其中 P_4 为该段的起点, P_7 为该段的终点), 那么这两段上的点满足

$$P(u) = \begin{cases} P_0(1-u)^3 + 3P_1u(1-u)^2 + 3P_2u^2(1-u) + P_3u^3, & i=1; \\ P_3^{i-1}(1-u)^3 + 3(2P_3^{i-1} - P_2^{i-1})u(1-u)^2 + 3P_2u^2(1-u) + P_3u^3, & 1 < i < n; \\ P_3^{i-1}(1-u)^3 + 3(2P_3^{i-1} - P_2^{i-1})u(1-u)^2 + 3P_2u^2(1-u) + P_1u^3, & i=n. \end{cases} \quad (5)$$

2 算法描述

2.1 标准粒子群优化算法

粒子群算法基本思想起源于对鸟群行为的模拟. 设想一群鸟在一个特定的空间内寻找食物, 并且在这个空间里有且仅有一个食物. 假如每只鸟都不知道食物被放在什么位置, 但是知道自己现在的位置与食物之间的距离. 为了能够快速简单地找到食物, 最好的办法是在离食物最近的鸟的周围进行搜索. 粒子群优化算法就是从这种设想中受到启发而被提出, 用于解决各种优化问题^[11].

在粒子群优化算法中, 每一个潜在的解代表的是搜索范围中的一只鸟, 我们把它叫做“粒子”, 每一个粒子有一个适应度值, 这个适应度值是由优化函数决定的, 每个粒子都有一个决定他们下一步的飞行方向和距离的速度. 具体优化的算法模型如下

$$V_i^d = \omega \cdot V_i^d + c_1 \cdot \text{rand}1_i^d \cdot (pbest_i^d - X_i^d) + c_2 \cdot \text{rand}2_i^d \cdot (gbest^d - x_i^d). \quad (6)$$

$$X_i^d = X_i^d + V_i^d. \quad (7)$$

式中: c_1, c_2 是学习因子; r_1, r_2 是介于 $[0,1]$ 之间的随机数; ω 是惯性因子.

但是标准粒子群优化算法易出现局部最优和早熟现象.

2.2 动态多组群粒子群优化算法

动态多组群粒子群优化算法 (Dynamic Multi-Swarm Particle Swarm Optimizer, 简称 DMS-PSO) 是利用分群的思想把整个种群均分成若干个小种群, 这些小种群在自己的范围内寻找其内部的最优解 ($lbest$), 经过 L (粒子的分群周期, 每隔 L 代粒子进行重组) 代之后, 再把所有的

$$P_3 - P_2 = P_5 - P_4, P_3 = P_4. \quad (4)$$

由以上关系可以得知: 假如一条曲线由 n 段 Bezier 组成, 规定起点和终点已知, 那么这段曲线将由 $2n$ 个未知点, 即是 $4n$ 个变量, 每一段的变量形式为 $P_{1x}^1, P_{1y}^1, P_{2x}^1, P_{2y}^1, P_{3x}^1, P_{3y}^1, P_{2x}^2, P_{2y}^2, P_{3x}^2, P_{3y}^2, \dots, P_{2x}^n, P_{2y}^n$.

$u \in [0,1]$, 由式子(3)和(4)可以得出每段曲线各点的参数方程如下.

小种群重新随机组合, 继续寻找自己范围内的 $lbest$. DMS-PSO 克服了标准粒子群优化算法的缺点, 扩大了粒子寻优的离散度, 不容易陷入局部最优的情况^[12], 交叉策略增大了粒子寻找最优解的可能性^[9].

基于交叉策略的动态多组群粒子群优化算法速度和位置更新公式为

$$\begin{aligned} & \text{If } \text{rand} < 0.5 \\ & V_i^d \leftarrow \omega \cdot V_i^d + c_1 \cdot \text{rand}1_i^d \cdot (pbest_i^d - X_i^d) + c_2 \cdot \text{rand}2_i^d \cdot (lbest_k^d - X_i^d) \\ & V_i^d = \min(V_{\max}^d, \max(-V_{\max}^d, V_i^d)) \\ & X_i^d \leftarrow X_i^d + V_i^d \\ & \text{Otherwise} \\ & X_i^d \leftarrow pbest_i^d \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 评价指标

机器人路径优化解决的是在机器人和障碍物之间满足的技术指标问题, 在本研究中, 考虑的惩罚包括安全性惩罚和最短路径惩罚^[9-10].

安全性惩罚描述的是机器人和障碍物之间的无碰撞问题. 假设障碍物是圆, D_{safe} 表示圆的半径, 当所有障碍物与圆心之间的最短距离 d_{\min} 小于 D_{safe} 时, 就会产生惩罚, 用 f_{safe} 来表示安全性惩罚, 其函数定义如下:

$$d_{\min} = \min_{o \in C_{\text{obs}}} \min_{u \in [0,1]} \sqrt{(x(u) - o_x)^2 + (y(u) - o_y)^2}. \quad (9)$$

$$f_{\text{safe}} = \begin{cases} 0, & d_{\min} > D_{\text{safe}}; \\ d_{\min}, & 0 \leq d_{\min} \leq D_{\text{safe}}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x(u)$ 和 $y(u)$ 是每个点的坐标; o_x 和 o_y 是障

障碍物的圆心（假设障碍物是圆）； C_{obs} 是障碍物的集合。

而最短路径描述的是机器人通过障碍物从起点到终点的最短距离。用 f_{len} 表示路径最短惩罚，其定义如下：

$$f_{\text{len}} = l = \int_0^1 \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} dt. \tag{11}$$

2.4 动态约束策略

在文献[9]中，采用了静态的惩罚系数来平衡 f_{safe} 和 f_{len} 的比例，但是很难选择一个合适的系数，如果该值选择过大，粒子很容易陷入局部最优，选择过小，又会使机器人和障碍物相撞。为了克服这种缺点，笔者采用新的动态约束策略。

把安全性指标 f_{safe} 作为一个约束，和动态临界值 ε 相比较，比较的结果看作总的惩罚约束， ε 的定义如下：

$$\varepsilon = \max(\min(D_{\text{safe}} \cdot (1 - 2 \cdot FEs / \max FEs), f_{\text{safe}}(pbest)), 0). \tag{12}$$

其中， FEs 是当前适应度评价次数， $\max FEs$ 预先定义的最大适应度评价次数，当 $pbest$ 和 $gbest$ 更新时，如果：

$$\begin{cases} f_{\text{safe}}(x_i) < \varepsilon \& f_{\text{safe}}(x_j) < \varepsilon \& f_{\text{len}}(x_i) < f_{\text{len}}(x_j); \\ f_{\text{safe}}(x_i) < \varepsilon \& f_{\text{safe}}(x_j) > \varepsilon; \\ f_{\text{safe}}(x_i) > \varepsilon \& f_{\text{safe}}(x_j) > \varepsilon \& f_{\text{safe}}(x_i) < f_{\text{safe}}(x_j). \end{cases} \tag{13}$$

那么， x_i 就比 x_j 好。

3 实验设置和结果

6 种路径问题用来测试以上约束机制下的 6 种算法和 Bezier 曲线在描述路径时的特性。图 1 描述的是被测问题的最好的路径，圆代表障碍物。在实验时，用两段的 Bezier 曲线来描述路径，由于 n 段 Bezier 曲线需要优化点的个数是 $4n$ ，那么，本实验所需要优化的参数就是 8 个。实验中用到的 6 种算法描述如下。

- (1) 标准粒子群优化算法 (PSO)；
- (2) 标准粒子群优化算法 + 动态约束 (PSO- ε)；
- (3) 标准粒子群优化算法 + 动态约束 + 交叉策略 (PSO- ε +)；
- (4) 动态多群体粒子群优化算法 (DMS-PSO)；
- (5) 动态多组群粒子群优化算法 + 动态约束 (DMS-PSO- ε)；
- (6) 动态多组群粒子群优化算法 + 动态约束 + 交叉策略 (DMS-PSO- ε +)。

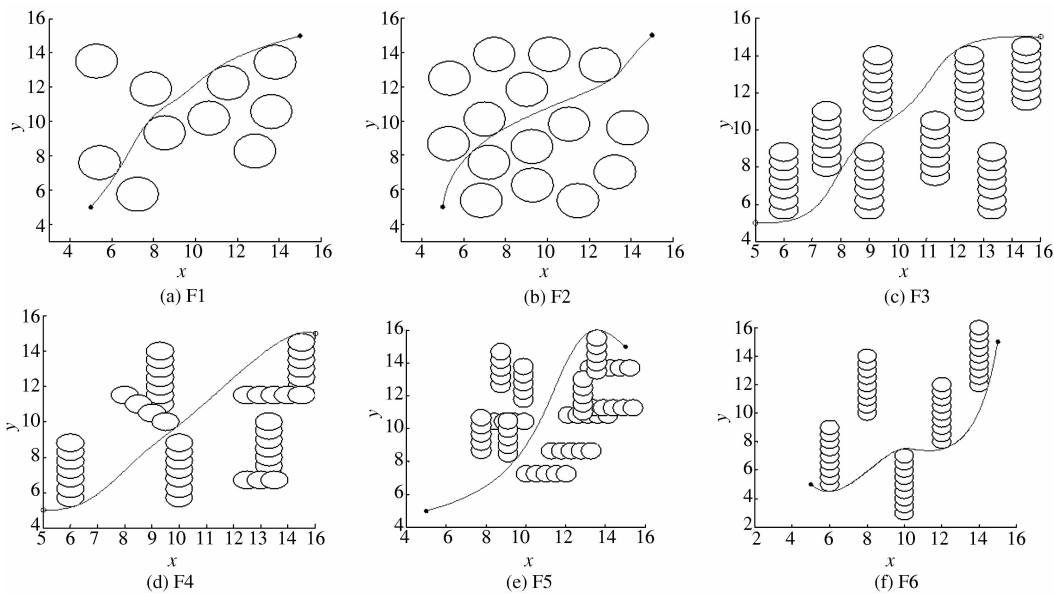


图 1 被测试问题
Fig.1 Landscapes of the test problems

在本实验中，种群的规模设为 30 个粒子，在动态多群体粒子群优化算法中，把粒子随机平分

为 3 个小种群，那么小种群的规模是 10。对于所有的算法最大适应度评价次数为 20 000，即 $\max FEs$

$= 20\,000$ ， $c_1 = c_2 = 1.494\,45$ ， $\omega = 0.729$ ， $L = 5$ 。所有的问题都是基于 25 次以上的随机独立实验下完成的。表 1 是该实验的结果。

表 1 实验结果
Tab. 1 Experiment result

问题		PSO	PSO-ε	PSO-ε +	DMS-PSO	DMS-PSO-ε	DMS-PSO-ε +
F1	平均值	15.764 0	15.141 9	14.899 5	15.038 9	15.007 3	14.846 8
	方差	1.116 7	0.266 2	0.274 9	0.028 1	0.593 2	0.254 5
	Min	14.911 8	14.767 6	14.673 1	14.910 6	14.651 1	14.651 0
	Max	18.386 4	17.150 4	16.975 9	15.479 8	16.928 4	16.915 0
F2	平均值	16.505 4	15.231 6	14.777 9	15.632 1	14.717 9	14.682 2
	方差	3.853 7	0.244 0	0.008 1	1.661 2	0.014 3	0.001 4
	Min	14.680 7	14.755 8	14.677 8	14.6676	14.625 1	14.632 2
	Max	19.407 5	16.746 2	15.091 5	18.770 9	15.073 8	14.745 0
F3	平均值	16.726 9	16.826 9	16.326 4	16.473 5	16.376 8	16.244 8
	方差	0.180 5	0.350 7	0.344 8	0.123 8	0.247 7	0.243 6
	Min	16.491 6	15.638 0	15.362 2	15.389 1	15.222 6	15.239 7
	Max	18.590 9	18.886 7	17.139 1	16.687 8	16.661 8	16.688 5
F4	平均值	16.186 3	15.465 7	15.084 5	14.859 4	14.977 5	14.746 0
	方差	1.072 0	0.563 2	0.503 9	0.184 3	0.531 1	0.150 1
	Min	14.617 8	14.902 1	14.672 0	14.616 7	14.612 8	14.613 9
	Max	17.932 0	17.593 7	16.695 7	16.602 8	16.682 0	16.599 1
F5	平均值	17.556 5	16.982 4	16.775 3	16.875 2	16.909 7	16.470 0
	方差	0.142 1	0.270 9	0.311 6	0.325 2	0.480 2	0.082 8
	Min	16.897 8	16.481 6	16.385 6	16.357 2	16.292 6	16.275 8
	Max	18.097 2	18.076 0	17.910 8	17.828 7	18.098 7	17.368 1
F6	平均值	18.165 7	17.996 5	17.483 8	17.354 9	17.614 6	17.329 2
	方差	0.736 8	0.180 0	0.484 3	0.743 0	0.909 0	0.991 4
	Min	16.741 7	17.085 7	16.826 3	16.705 8	16.705 5	16.706 9
	Max	19.372 1	18.929 8	20.390 1	19.440 7	20.014 5	20.698 4

实验结果表明:1)DMS-PSO 比 PSO 的整体结果要好;2)PSO-ε + 的性能优于 PSO 和 PSO + , DMS-PSO-ε + 的性能优于 DMS-PSO 和 DMS-PSO + ;3)DMS-PSO-ε + 在这 6 种算法中性能最好.

从以上 3 个方面的比较可以得到:DMS-PSO 具有较好的全局搜索能力,克服了标准粒子群算法易于陷入局部最优的缺点.交叉操作在路径优化过程中是非常有用的,扩大了搜索范围的离散度.动态约束中由于参数的变化性,增大了粒子找到与障碍物最安全的距离并且使整个路径最短的可能性.

4 结论

在本设计中,用 Bezier 曲线和动态多组群粒子群优化算法结合交叉策略和动态约束来实现路径优化.通过应用分段的 Bezier 曲线来描述路径,把路径问题转化为求最优问题.考虑到路径优化的本身特性,利用优化算法、交叉操作和动态约束来提高它的性能.实验结果表明利用动态约束下的交叉操作的 DMS-PSO 能够避免陷入局部最优和找到和障碍物保持安全距离的最短路线.

参考文献:

[1] 刘华军,杨静宇,陆建峰,等. 移动机器人运动规划研究综述[J]. 中国工程科学, 2006, 8(1): 85 - 94.

[2] QU Yao-hong,PAN Q,YAN Jian-guo. Flight path planning of UAV based on heuristically search and genetic algorithms[C]// 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Xi'an:Industrial Electronics Society,2005:45 - 49.

[3] JU Ming-yi, CHENG Ching-wen. Smooth path planning using genetic algorithms[C]// the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Tainan: Intelligent Control and Automation,2011: 1103 - 1107.

[4] MO Hong-wei,Li Zhen-zhen. Bio-geography based differential evolution for robot path planning[C]// IEEE Internation. Shengyang: Information and Automation, 2012: 1 - 6.

[5] CHAKRABORTY J, KONAR A, CHAKRABORTY U K. Distributed cooperative multi-robot path planning using differential evolution[C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. Hongkong: Springer Verlag, 2008: 718 - 725.

[6] 纪震,廖惠连,吴青华. 粒子群算法与应用[M]. 北京:科学出版社, 2009.

- [7] HUANG X Y, WEN Z. Vehicle routing optimization based on improved PSO[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2009, 38(4): 166 – 171.
- [8] 杭后俊, 李汪根. 有理三次 Bezier 曲线表示圆弧的一种实用方法[J]. 计算机应用与工程, 2011, 48(6): 185 – 189.
- [9] LIANG Jing, SONG Hui, QU Bo-yang. Path planning based on dynamic multi-swarm particle swarm optimizer with crossover[C]// 8th International Conference on Intelligent Computing Theories and Applications, ICIC 2012. Huangshan: Springer Verlag, 2012: 159 – 166.
- [10] 朱东伟, 毛晓波, 陈铁军. 基于改进粒子群三次 Bezier 曲线优化的路径规划[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(5), 1710 – 1712.
- [11] 黄日朋. 有理 q-Bernstein-Bezier 曲线的构造及其应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(5): 1359 – 1362.
- [12] 刘会刚, 秦国亮. 一种基于 Bezier 曲线的军事箭标实现[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(2): 67 – 68.

Research on Path Planning Problems Based on Improved Particle Swarm Optimizer

LIANG Jing¹, SONG Hui¹, QU Bo-yang², MAO Xiao-bo¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electric and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: This paper describes that dynamic constraint mechanism and improved Particle Swarm Optimizer (Dynamic Multi-Swarm Particle Swarm Optimizer with Crossover) are combined to solve path planning problems combining with Bezier curves. Different algorithms are used to test characteristics of the curves in the path planning process and Bezier curve is used to describe the path. The results show that the DMS-PSO overcomes the phenomenon of precocious and easy convergence compared with standard PSO, and constraint mechanism improves performance of the optimization algorithm which is combined with crossover, can deal with the constraints flexibly and overcomes the shortcomings of static penalty function.

Key words: constraint mechanism; dynamic multi-swarm particle swarm optimizer; bezier curves

(上接第 33 页)

Delay Compensation of Network Control Systems Based on JGPC

LIU Yan-hong, LUO Yong-ping, LIU Yan-xing

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

Abstract: The uncertain factors such as the network delays usually deteriorate the control performance and stability of networked control systems (NCS), even result in instability. In this paper, we propose a novel delay compensation method to enhance the stability of NCS. First, an auto regressive model for the network time delays is established and the parameter self-tuning LMS(Least mean square) algorithm is used to predict the network delay online. Then, a improved JGPC algorithm is proposed for the compensation of the networked time delay. This algorithm can get a better system performance than GPC. Simulation results show that the proposed method can effectively compensate the network delay and improve the dynamic performance of the NCS.

Key words: Network control systems; Auto regressive model; JGPC algorithm; Random delay prediction; time delay compensation

文章编号:1671-6833(2014)01-0039-04

基于模糊相似选择和接近度的电网谐波综合评估方法

陈根永¹, 柴鹏飞¹, 郭耀峰², 方向³, 伽胜利⁴

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 禹州市电力工业公司, 河南 禹州 461670; 3. 汝阳县电业局, 河南 洛阳 471200; 4. 许昌县电业公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了分析区域电网谐波污染情况, 构建了一种基于模糊相似选择和接近度的谐波综合评估方法. 首先将评估对象的指标序列与评估等级序列进行比较分析, 其次利用模糊贴近度和灰关联分析构成的接近度指标, 分析评价结果, 得出评估对象对于最优等级及相邻等级的隶属度, 达到精细考察谐波污染情况的目的. 该方法模型简单, 计算便捷, 指标扩展性好, 适合于电能质量在线分析系统对谐波进行统一评估, 实现谐波的智能治理.

关键词: 谐波评估; 模糊相似选择; 接近度; 最优等级

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.009

0 引言

随着电力系统的日益扩大和电网的不断延伸, 电能质量的分析研究受到越来越多地关注. 在我国, 谐波污染是最突出的电能质量问题. 目前, 针对谐波问题的研究较多. 文献[1-2]介绍了谐波的检测方法及治理方案. 文献[3-4]分别以人工神经网络和遗传算法等方法为基础, 对谐波污染进行评估. 但这些评估算法往往模型复杂, 计算量大, 评估过程中还会遇到维数灾, 陷入局部最优或早熟等问题. 文献[5-6]中利用投影寻踪法和模糊聚类对谐波进行分类评估, 只得出评估对象的最优等级, 没有得出最优等级以及相邻等级的隶属度. 在工程实际中, 难以比较隶属于同一等级内的各个评估对象的谐波污染情况, 不适宜对大量的评估对象进行统一评估, 对评估模型的扩展具有一定的局限性.

针对上述不足, 提出了一种基于模糊相似选择的谐波综合评估方法, 首先利用该方法得出评估对象的最优等级, 次优等级以及第三优隶属等级, 然后利用模糊贴近度和灰关联分析构成的接近度指标, 精确地分析评价结果, 得出每一评估对象对于该等级的隶属度. 该方法相比于其他方法的优点: 第一, 能够克服常规评估方法中人为主观

因素的影响, 客观的反应谐波污染情况. 第二, 其评估模型简单, 计算便捷, 指标扩展性好, 适合于电能质量在线分析系统对电能质量进行统一评估. 第三, 能够对谐波污染情况进行准确的分级, 实现分级智能治理.

1 相关理论

1.1 模糊相似选择法

设有集合 $U = \{x_0, x_1, \dots, x_m\}$, 其中基准序列 $x_0(t_k) = \{x_0(t_1), x_0(t_2), \dots, x_0(t_n)\}$ 计算比较序列 x_i, x_j 相对于基准序列的距离:

$$x_i(t_k) = \{x_i(t_1), x_i(t_2), \dots, x_i(t_n)\}.$$

$$x_j(t_k) = \{x_j(t_1), x_j(t_2), \dots, x_j(t_n)\}.$$

其中 $i, j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$.

$$D(X_{i0}(t_k)) = |X_i(t_k) - X_0(t_k)|; \quad (1)$$

$$D(X_{j0}(t_k)) = |X_j(t_k) - X_0(t_k)|. \quad (2)$$

r_{ij} 表示 x_i 优越于 x_j 的程度:

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \left[\sum_{k=1}^n \frac{D(X_{j0}(t_k))}{D(X_{i0}(t_k)) + D(X_{j0}(t_k))} \right]. \quad (3)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} > 0.5, & \text{表示 } i \text{ 比 } j \text{ 接近比较标准;} \\ = 0.5, & \text{表示 } i \text{ 与 } j \text{ 接近程度一直;} \\ < 0.5, & \text{表示 } j \text{ 比 } i \text{ 接近比较标准.} \end{cases}$$

其中当 $i = j$ 时 $r_{ij} = 0.5$ 且 $r_{ji} = 1 - r_{ij}$ (r_{ji} 表示 x_j 优

收稿日期:2013-09-01; 修订日期:2013-10-09

基金项目:河南省科技攻关资助项目(132102210403)

作者简介:陈根永(1964-),男,河南禹州人,郑州大学教授,硕士,主要从事电配电网可靠性及电力系统规划方面的教学与研究.

越于 x_i 的程度)

写出由 r_{ij} 构成的模糊关系矩阵 $R(i \times j)$ 以及各个 λ (λ 为 r_{ij} 的数值) 水平下的选择矩阵 R_λ, R_λ 中的值 (若 $r_{ij} \geq \lambda$ 则值为 1, 若 $r_{ij} < \lambda$ 则值为 0), 由 λ 从大至小逐个检查 R_λ , 若某个 R_λ 中第 i 行元素除主对角线上元素以外其余元素均为 1, 则元素 x_i 为集合 U 中相对最优序列, 去除该行后重新形成模糊关系矩阵, 继续上述方法可得次优序列和第三优序列等。

1.2 模糊贴近度

模糊集贴近度是反应两个模糊集接近程度的一种度量, 常用的贴近度有海明贴近度、欧氏贴近度和最值贴近度等。

引用上文中的比较序列 $x_0(t_k), x_i(t_k)$, 称如下定义的 $D_p(x_i, x_0)$ 为 A 与 B 的 Minkowski (闵可夫斯基) 距离

$$D_p(x_i, x_0) = \left(\sum_{k=1}^n |x_i(t_k) - x_0(t_k)|^p \right)^{1/p}. \quad (4)$$

特别地, 当 $p=1$ 时, 称 D_{p1} 为 $x_i(t_k)$ 与 $x_0(t_k)$ 的海明距离, 构造如下海明贴近度

$$D_{p1}(x_i, x_0) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_i(t_k) - x_0(t_k)|. \quad (5)$$

$p=2$ 时称欧几里得距离, 构造如下欧式贴近度:

$$D_{p2}(x_i, x_0) = 1 - \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_i(t_k) - x_0(t_k))^2}. \quad (6)$$

最值贴近度为

$$\sigma(x_i, x_0) = \frac{\sum_{k=1}^n \min(x_i(t_k), x_0(t_k))}{\sum_{k=1}^n \max(x_i(t_k), x_0(t_k))}. \quad (7)$$

1.3 灰色关联度

引用上文中的比较序列 $x_0(t_k), x_i(t_k)$ 定义 $x_i(t_k)$ 对 $x_0(t_k)$ 的灰色关联系数为

$$\xi_i(t_k) = \left[\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq k \leq n} |x_i(t_k) - x_0(t_k)| + \rho \times \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq k \leq n} |x_0(t_k) - x_0(t_k)| \right] / |x_i(t_k) - x_0(t_k)| + \rho \times \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq k \leq n} |x_i(t_k) - x_0(t_k)|. \quad (8)$$

ρ 为分辨系数, 一般取 0.5.

等权重的灰色关联度 r_i 定义为

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(t_k). \quad (9)$$

1.4 综合接近度

海明贴近度和欧氏贴近度反映模糊序列与标准序列之间的相对距离; 最值贴近度反映模糊序

列之间的最值的贴近程度; 灰色关联度反映模糊序列各个元素的相似于接近程度; 将这四者结合起来综合反映模糊序列间的位置接近程度和趋势变化, 形成新的指标—综合接近度, 相比于单一的贴近度能更全面的反应评估对象的隶属程度。

综合接近度的表达式为

$$\delta = aD_{p1} + bD_{p2} + c\sigma + dr. \quad (10)$$

式中: a, b, c, d 为权重系数, 且 $a + b + c + d = 1$, 由于各个贴近度和灰色关联度反应不同的接近形式, 系数应当由专家结合实测情况进行适当选取. 笔者取其权重系数相等且都为 0.25, 也可选取其它权重. 比较不同权重下的评估结果。

2 谐波电压分级标准

国标[7]中规定了公用电网各个电压等级的谐波电压限制标准. 笔者以 110 kV 等级电压为例进行分析, 110 kV 电压总谐波畸变率为 2%, 各次谐波电压含有率为 1.6% 限值标准。

由于三相平衡电网系统中偶次谐波可基本忽略, 只考虑奇次谐波, 应选取谐波畸变率较高的次数指标作为评估指标. 根据测试点数据 15 次以上谐波畸变率比较低, 所以算例选择总畸变率和 3~13 次的奇数次谐波占有率为评价指标. 因不包含所有的谐波次数, 故选取谐波总畸变率的 90%, 根据谐波电压的计算公式建立各次谐波的畸变率值标准。

同理可以根据不同电压等级的谐波电压限制标准以及实际谐波污染情况, 建立相应电压等级的谐波电压分级标准, 也可以对电能质量的其它方面例如谐波电流, 建立相应的谐波电流标准, 对谐波电流进行评估. 建立 110 kV 电压等级下谐波电压评估的分级标准如表 1.

其中, 1~5 级的谐波电压在限值范围内属于合格, 每个等级跨度为 0.4 (国标限值的 1/5). 6~9 级谐波电压超过国标及为不合格的情况, 每个等级跨度为 0.8 (国标限值的 2/5). 选取这种等级划分方式可以达到在合格时精细评估结果、而在不合格时大范围考察谐波超标情况的目的. 谐波污染情况从 1~9 级逐级严重^[5].

3 实例分析

对许昌 110 kV 高压网观测数据进行实例分析, 测试数据见表 2.

对数据分别利用前述公式进行计算, 在计算模糊贴近度和灰色关联度时应对数据进行标准

化.表 3 为变电站 A 的详细评估数据.表 4 为各个变电站的谐波电压评估结果.

谐波污染等级从 1 级开始逐级严重,1 到 3 级为谐波良好情况,4 到 5 级为合格情况,6 到 9 级为不合格,而且等级越高,谐波污染越严重.综合接近度越大表明测试点越接近评估等级.由表 4 可知变电站 A 属于等级 6 为不合格,应当对变电站 A 进行针对性的谐波治理.变电站 G 属于等

级 5 虽然属于合格,但是应当进行适当的监控和谐波抑制措施,防止谐波污染情况加重.

相比较于文献[5-6]只得出评估对象的最优等级,难以比较隶属于同一等级内的各个评估对象的谐波污染情况.由表 4 可知对于同属于等级 3 的变电站 B,D,F,虽然同属于合格,但是由于 $B\delta_4 > F\delta_4 > D\delta_4$,说明变电站 B 对于等级 4 的接近度更大,及污染程度更高.且由 $D\delta_2 > F\delta_2 > B\delta_2$ 可

表 1 110 kV 谐波电压分级标准

Tab.1 Grade standards of harmonic voltage (110 kV) %

等级	总畸变率 (x_1)	3 次 (x_2)	5 次 (x_3)	7 次 (x_4)	9 次 (x_5)	11 次 (x_6)	13 次 (x_7)
1	0.2	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
2	0.6	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
3	1.0	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
4	1.4	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
5	1.8	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
6	2.4	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
7	3.2	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
8	4.0	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
9	>4.8	>1.86	>1.86	>1.86	>1.86	>1.86	>1.86

表 2 检测点谐波电压测试数据

Tab.2 Measurement data of harmonic voltage in the monitoring point %

变电站	总畸变率	3 次	5 次	7 次	9 次	11 次	13 次
A	2.71	1.12	1.24	0.63	0.87	0.93	0.96
B	1.19	0.36	0.62	0.57	0.42	0.28	0.44
C	0.58	0.22	0.14	0.26	0.23	0.28	0.17
D	0.93	0.34	0.45	0.29	0.44	0.14	0.35
E	0.78	0.40	0.36	0.25	0.17	0.32	0.21
F	1.08	0.32	0.25	0.28	0.35	0.50	0.59
G	1.90	0.58	1.02	0.62	0.46	0.73	0.79

表 3 变电站 A 谐波电压评估结果

Tab.3 Evaluation outcome of harmonic voltage in the substation A

A 变电站	海明贴近度	欧式贴近度	最值贴近度	灰色关联度	综合接近度
最优等级 6	0.828 4	0.918 8	0.858 8	0.760 5	0.841 6
次优等级 7	0.688 9	0.861 8	0.783 6	0.638 8	0.743 3
第三优等级 5	0.626 9	0.827 4	0.700 9	0.600 5	0.688 9

表 4 变电站谐波电压评估结果

Tab.4 Evaluation outcome of harmonic voltage in the substation

变电站	A	B	C	D	E	F	G
最优等级	6	3	2	3	2	3	5
综合接近度 δ	0.841 6	0.855 4	0.916 0	0.885 0	0.851 0	0.845 1	0.847 1
次优等级	7	4	1	2	3	2	4
综合接近度 δ	0.743 3	0.835 6	0.770 5	0.777 6	0.829 9	0.744 8	0.767 1
第三优等级	5	2	3	4	1	4	6
综合接近度 δ	0.688 9	0.687 3	0.672 7	0.721 2	0.620 2	0.760 6	0.719 6

以知道变电站 D 对于等级 2 接近度更大,污染程度最低。

由此笔者得到了基于模糊相似和接近度的该区域 110 kV 电压等级变电站谐波电压评估结果,同理在根据相应电压等级下的国标限制标准,制定相应的谐波评价等级标准,也可以得到其他电压等级下的谐波评估等级。

在电能质量实时监控系统中,对监控点的测试数据可以进行实时评估,避免一次评估造成的不全面性。对于同一监控点不同时段的评估结果进行分类处理,制定出一个实时的谐波治理方案,从而实现实时监控,在线分析,智能处理达到最优的谐波治理效果,这也是未来智能电网的发展方向。

4 结论

将模糊相似选择和接近度的方法引入了谐波综合评估方法,以谐波电压污染为例进行了分类评估。该方法也可对电能质量中频率偏差,谐波电流,电压闪变等各个指标进行分级评估。由算例表明该方法能够客观地反应谐波污染情况,同时其

评估模型简单,计算便捷,指标扩展性好,适合于电能质量在线分析系统对区域电网谐波污染情况进行统一评估,并能够对谐波污染情况进行准确的分级,实现智能治理。

参考文献:

- [1] 罗辉. 广元电力系统谐波检测方案研究[D]. 重庆大学电气工程学院,2002.
- [2] 周勇,任伟. 配电系统的谐波问题与对策[J]. 郑州大学学报:工学版,2006,27(3):107-109.
- [3] 王小华,何怡刚. 一种新的基于神经网络的高精度电力系统谐波分析算法[J]. 电网技术,2005,29(3):72-75.
- [4] 陈辉. 基于遗传算法的谐波分析模型研究[J]. 天津电力技术,2005(03):1-3.
- [5] 李国栋,刘颖英,顾强,等. 遗传投影寻踪和特征值赋权法综合评估地区谐波[J]. 高电压技术,2008,34(2):329-333.
- [6] 姚猛,蒋德珑,陈根永. 基于模糊聚类的电网谐波综合评估方法[J]. 电测与仪表,2011(10):1-4.
- [7] 国家技术监督局. GB/T 145492—1993,电能质量公用电网谐波[S]. 北京:中国标准出版社,1993.

Application of Fuzzy Similarity Selection and Proximity on Grid Power Harmonic Comprehensive Evaluation

CHEN Gen-yong¹, CHAI Peng-fei¹, Guo Yao-fen², FANG Xiang³, Qie Sheng-li⁴

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China; 2. Yuzhou Power Supply Company, Yuzhou 461670, China; 3. Ruyang County Power Supply Bureau, Ruyang 471200, China; 4. Xuchang County Electrical Industrial Company, Xuchang 461100, China)

Abstract: In order to analyze regional power grid harmonic pollution situation, a method of fuzzy similarity selection and proximity on grid power harmonic comprehensive evaluation was proposed. Firstly, the index sequences between the evaluation object and the known object were compared and analyzed. Then the proximity indicators were used to evaluate the results, which were combined with fuzzy nearness and grey relational analysis, and the membership of assessment object for the optimal level and next level was acquired to analyze the purpose of the harmonic pollution situation. This method is simple and involves less calculation. Besides, the scalability of indicators is good. It is suitable for power quality analysis system to assessment harmonic uniformly, and can achieve intelligent management.

Key words: fuzzy similarity selection; grading evaluation criteria; proximity; optimal level

带有可信度的偏序偏好决策信息的聚合方法

陈树伟, 周 威, 蔡丽娜

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:提出了一种解决带有可信度的偏序形式的偏好信息的决策方法. 对于决策者给出的带有可信度的偏好信息, 通过把每个偏好看成一个序列, 对于每对方案, 利用上下文概率计算一个方案排到另一个方案之前的概率. 然后, 根据偏好排序算法对这些概率进行聚合, 得到一个近似最优的总方案排序. 并通过实例说明其有效性.

关键词:决策; 偏好; 偏序; 可信度; 聚合

中图分类号: TP182

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.010

0 引言

在实际应用中, 决策是至关重要的一步, 如组织管理、财务规划和产品评价等. 多数情况下, 是根据现有的标准或偏好信息^[1], 在一组方案中选择出最合适的一个或多个方案. 在许多现实的决策问题中, 对于决策者而言, 运用方案间的优先顺序形式比提供定量的偏好度更自然和合理. 此外, 现实中的决策问题有很多的条件或标准的限制, 可是由于决策问题的不确定性和复杂性^[2], 不是所有的条件都能够同时得到满足, 有时, 由于时间的限制、知识或数据的缺少、有限的专业知识等等, 决策者对于每个属性的判断并不总是可行的. 另外, 偏序结构还避免了对一些无关信息的比较.

对于偏好排序目前使用较广泛的是: 波达计数法或波达规则^[3-4], 这种方法存在的问题是: 通常, 绝对的分值并不容易得到; 同样的分值对于不同的决策者可能意义不同^[5-6]. 为了克服这些问题, Cohen^[5]提出了根据决策者偏好关系生成备选方案的近似最优排序的算法, 而无须给各方案分配分值. 在此基础上, wang^[7]提出了根据决策者给出的偏好关系计算每对方案偏好度的方法, 然后将 Cohen 提出的算法应用于这些偏好度, 生成备选方案的近似最优排序.

现有的偏好决策方法很少考虑由不同决策者给出的偏好信息的可信度, 以及其他不确定性, 比

如不同意见的一致性程度. 这些不确定因素总是伴随在个人偏好表达的过程中. 因此有必要研究有关带有可信度的偏序偏好信息的聚合问题.

笔者将决策者给出的带有可信度的偏序形式的偏好信息作为序列, 对于每一对方案, 利用上下文概率函数计算一种方案被排到另一种方案之前的概率. 然后, 运用偏好排序算法^[5]得到一个总的方案排序, 这个总的排序可以最大程度地体现所有决策者给出的偏好信息^[1].

1 带有可信度的偏好信息的聚合

考虑如下决策问题: 一组决策者或专家 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 其对应的权重: $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, $\sum \omega_i = 1$. 对一组备选方案 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 进行评估并给出对这组方案的偏好. 记决策者给出的所有偏好的集合为 D , 在这里 D 中的每一个元素都是一个偏序, 如: $a_1 a_2 a_5, a_4 a_3, a_3 a_5 a_2 a_1$. 另外偏好集合 D 伴随一组可信度: $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$, 其中 N 是 D 中偏好的个数且 $0 \leq b_i \leq 1, i = 1, i = 1, \dots, N$, 每一个 B 中的元素对应的表示 D 中偏好的可信度, 如 $a_1 a_2 a_5$ 的可信度是 $b_1 = 0.85$. 我们的任务是找到一个备选方案的排序, 使其最大程度地体现所有决策者给出的偏好信息.

采用 wang^[7]的观点: 我们认为: 根据决策者提供的偏好信息计算一个方案在另一个方案之前

收稿日期: 2013-08-20; 修订日期: 2013-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61175055); 教育部高校博士点专项科研基金(20114101110005)

作者简介: 陈树伟(1977-), 男, 河南新乡人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事模糊控制与决策等方面的研究, E-mail: swchen@zzu.edu.cn.

的概率,比给每个方案分配绝对的分值更合理.这些概率是通过把每个偏好当作一个序列后基于上下文概率得到的.接下来,运用偏好排序算法把得到的概率作为输入来产生一个总的排序结果,而且,这个总的排序结果可以最大程度地体现所有决策者给出的偏好信息.

1.1 上下文概率

设 V 是一个集合, F 是 V 上的 δ 域或扩展数据空间,如:若 V 是有限的,则在 V 上的 δ 域即是 V 的幂集,对于 V 上的概率函数 P 是从 F 到 $[0, 1]$ 上的映射,上下文概率^[5]是一个函数 $G: F \rightarrow [0, 1]$ 对于 $X \in F$, 有

$$G(X) = \sum_{E \in F} P(E) f(X \cap E) / K. \quad (1)$$

式中: $K = \sum_{E \in F} P(E) f(E)$ 是一个标准化因子,且对于 $X \in F$, 设非负函数 $f(X)$ 满足 $f(x_1 \cup x_2) = f(x_1) + f(x_2)$, 当 $x_1 \cap x_2 = \phi$.

例如,假设 $f(X) = |X|$, $f(X)$ 是 X 的基数,都称作一个邻域,并且,若 E 与 X 不重叠(即 $f(X \cap E) \neq 0$),那么, E 是 X 的一个邻域. 对于 $t \in V$, 如果 $t \in E$, 我们称: E 涵盖了 t .

基于初始概率 P , 我们可以根据公式(1)计算出上下文概率. 但在实际中, P 通常是未知的. 这时我们可以根据样本数据 D , 按照公式(2)的方法去估算上下文概率.

定理[1]^[7] 设 N 是样本数据集 D 中元素的个数, 由于 $t \in V$, 得

$$\tilde{G}(t) = \frac{1}{NK} \sum_{x \in D} \text{cov}(t, x). \quad (2)$$

式中: $\text{cov}(t, x)$ 是指 t 和 x 的所有相同邻域的数目.

基于上下文概率函数, wang^[8] 通过把每个偏好看成一个序列, 提出了一种计算一对偏好可以排成一个序列的概率方法. 但是, 该方法却没有考虑到可信度的问题, 为了解决这个问题, 我们可以提出一种新的上下文概率计算公式为

$$\tilde{G}(t) = \frac{1}{NK} \sum_{i=1}^N b_i \text{cov}(t, x_i). \quad (3)$$

这里的 $x_i \in D$, 且 b_i 是 x_i 的可信度.

1.2 $\text{cov}(t, x_i)$ 的计算

要计算公式(3)的结果, 首先求出 $\text{cov}(t, x_i)$ 的大小, 即两个序列的所有公共子序列的一个算法.

算法1 求两个序列的公共子序列

输入: 序列 α, β

输出: α 和 β 的公共子序列列表 $L_{\alpha, \beta}$

其流程图如图1所示.

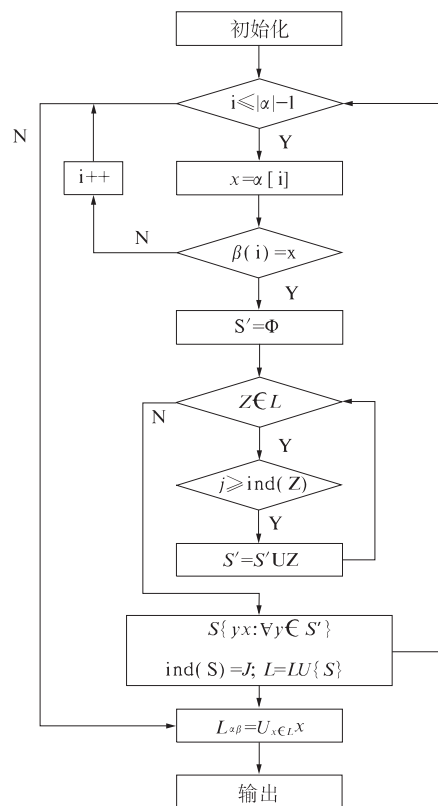


图1 求公共子序列的算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart of seeking common subsequences

例1. 对于序列 $\alpha = qwer, \beta = qewr$ 由算法1可得.

初始化: $S = \{\Phi\}, \text{ind}(S) = 0$

$L = \{\{\Phi\}\}$

$i = 0: S = \{q\}, \text{ind}(S) = 0$

$L = \{\{\Phi\}, \{q\}\}$

$i = 1: S = \{w, qw\}, \text{ind}(S) = 2$

$L = \{\{\Phi\}, \{q\}, \{w, qw\}\}$

$i = 2: S = \{e, qe\}, \text{ind}(S) = 1$

$L = \{\{\Phi\}, \{q\}, \{e, qe\}, \{w, qw\}\}$

$i = 3: S = \{r, qr, er, qer, wr, qwr\}, \text{ind}(S) = 3$

$L = \{\{\Phi\}, \{q\}, \{e, qe\}, \{w, qw\}, \{r, qr, er, qer, wr, qwr\}\}$

从而, 公共子序列为: $L_{\alpha, \beta} = \{\Phi, q, e, qe, w, qw, r, qr, er, qer, wr, qwr\}$, 进而可得 $\text{nem}(\alpha, \beta) = 12$.

1.3 计算一个方案排在另一方案之前的概率

对于两个备选方案 α_i 和 α_j , 为了计算方案在 α_j 之前的概率, 我们设 $\alpha = \alpha_i \alpha_j$, 可以利用下面的公式得到这个概率

$$\tilde{G}(t) = \frac{1}{NK} \sum_{i=1}^N b_i \text{nem}(\alpha, x_i). \quad (4)$$

式中: N 是集合 D 中序列的个数; K 是与 α 无关的

标准化因子; $x_i \in D$; b_j 是 x_i 对应的可信度; $\text{ncm}(\alpha, x_i)$ 是序列 α 和 x_i 的所有公共子序列的数目. 最后根据所有序列成对比较的概率大小, 利用偏好排序算法^[3] 得到对于所有方案的一个近似最优的总体排序结果.

2 偏好排序

根据上面计算出的概率大小, 我们可以利用一个算法对所有方案进行排序, 最后得到一个近似最优总的排序结果. 这个算法的基本内容如下.

算法 2 偏好排序算法

```
输入: 备选方案 X; 偏好函数 PREF
输出: 一个近似最优排序函数  $\rho$ 
1  let  $V = X$ 
2  for each  $v \in V$  do
     $\varphi(v) = \sum_{u \in V} \text{PREF}(v, u) - \sum_{u \in V} \text{PREF}(u, v)$ 
3  while  $V$  is not empty do
4  Let  $t = \arg \max_{u \in V} \varphi(u)$ 
5  Let  $\rho(t) = |V|$ 
6  Let  $V = V - \{t\}$ 
7  for each  $v \in V$  do
     $\varphi(v) = \varphi(v) + \text{PREF}(t, v) - \text{PREF}(v, t)$ 
8  end
```

算法 2 中的偏好函数 PREF 即公式(4) 计算得到的 \tilde{G} 概率, 而表示具有最大函数值的 V 中的元素.

3 例子

假设有 3 个专家: e_1, e_2, e_3 , 5 种备选方案: a, b, c, d, e . 每个专家给出的偏好为: $e_1: abcde, e_2: ab, aced, e_3: bc, aed$, 假设所有专家的权重是相同的, 得到一个偏好集合: $D = \{abcde, ab, aced, bc, aed\}$, 对于这些偏好的可信度为 $B = \{0.7, 0.9, 0.95, 0.85, 0.95\}$

假设查询序列为 $q = ac$, 根据公式(4) 来计算概率 $\tilde{G}(q)$, 首先计算 $\text{ncm}(q, x)$ 即序列 q 和 x 的所有公共序列的数目.

对于序列 $x = abcde$. x 的所有子序列为 $\{\Phi, a, b, c, d, e, ab, ac, ad, ae, bc, bd, be, cd, ce, de, abc, abd, abe, acd, ace, ade, bcd, bce, bde, cde, abcd, abce, abde, acde, bcde, abcde\}$. ac 序列的所有子集为 $\{\Phi, a, c, ac\}$. 因此(由算法 1) 可得 $\text{ncm}(ac, abcde) = 4$. 同样地 $\text{ncm}(ac, ab) = 2$,

$\text{ncm}(ac, aced) = 4, \text{ncm}(ac, bc) = 2$, 和 $\text{ncm}(ac, aed) = 2$. 因此, $\tilde{G}(ac) = \frac{1}{NK}(0.7 \times 4 + 0.9 \times 2 + 0.95 \times 4 + 0.85 \times 2 + 0.95 \times 2) = \frac{12}{NK}$. 同

样我们可以得到: $\tilde{G}(ab) = \frac{11.9}{NK}, \tilde{G}(ad) = \frac{13.05}{NK}, \tilde{G}(ae) = \frac{13.05}{NK}, \tilde{G}(bc) = \frac{10.85}{NK}, \tilde{G}(bd) = \frac{10.1}{NK}, \tilde{G}(be) = \frac{10.1}{NK}, \tilde{G}(cd) = \frac{11.1}{NK}, \tilde{G}(ce) = \frac{11.1}{NK}$ 和 $\tilde{G}(de) = \frac{10.25}{NK}$. 运用算法 2, 可以得到近似最优的总的排序为: a, b, c, e, d , 并且这个排序最大程度地体现了由 3 个专家给出的所有偏好^[3]. 决策者可以根据这个结果做出决定. 同时, 对于可信度都为 1 的情况, 公式(3) 将退化为公式(2), 从而运用笔者的方法与未考虑信任度的方法所得结果是一致的.

4 结论

笔者针对带有可信度的偏序形式的偏好信息的决策问题, 提出了一种解决方法. 即首先, 把决策者给出的带有可信度的每对偏好信息看成一个序列. 其次, 对于每对方案, 可以利用上下文概率计算出一个方案排在另一个方案之前的概率, 再根据偏好排序算法对这些概率进行聚合, 得到一个近似最优的总方案排序. 最后, 用一个例子说明了这一方法的有效性.

参考文献:

[1] HERRERA F, AAONSO S, CHICLANA F, et al. Computing with words in decision making: foundations, trends and prospects [J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2009, 8(4): 337 - 364.

[2] CHEN Y-Hsiu, WANG Tien-Chin, WU Chao-Yen. Multi-criteria decision making with fuzzy linguistic preference relations [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(3): 1322 - 1330.

[3] HECKELMAN J C. Probabilistic Borda rule voting [J]. Social Choice and Welfare, 2003, 21(3): 455 - 468.

[4] BLACK D. Partial justification of the Borda count [J]. Public Choice, 1976, 28(1): 1 - 15.

向心透平导向叶栅的结构优化

魏新利, 邱志明, 马新灵, 王 慧

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:以 R245fa 为工质, 采用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT, 运用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 对叶片数分别为 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 叶片安装角分别为 $24^\circ, 28^\circ, 32^\circ, 36^\circ, 40^\circ$ 的导向叶栅进行了数值研究. 计算结果显示, 当叶片数为 21, 安装角为 28° 时, 导向叶栅的出口周向平均速度、出口平均温度、速度系数等与原设计相比均有了很大的改善. 在此叶片数和安装角下, 采用线性拟合得到了满足设计流量所需的叶高. 研究表明优化后流道内流动情况良好, 为高效导向叶栅的设计提供了参考.

关键词:向心透平; 导向叶栅; 二次流; 优化

中图分类号:TK14 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.011

0 引言

向心透平具有大焓降、高转速、高膨胀比等特点^[1], 在工程实际中有着广泛的应用. 例如以其作为关键部件的微小型燃气轮机, 广泛用于小型分布式发电、冷热电联供、车辆混合动力以及军用车辆的辅助电站等^[2]. 研究发现, 若静叶叶片与叶轮速度系数分别提高 1%, 整机轮周效率将分别提高约 1% 和 0.2%, 因此导叶的速度系数的变化对轮周效率的影响相当大, 提高导向器叶片的流动效率将会给向心透平带来更大的收益^[3]. 前人多以空气、水蒸汽或其他有机物为工质, 考虑因素也多仅限于单因素如叶高或叶片数单独对静叶性能的影响. 笔者通过 CFD 软件 FLUENT, 以 R245fa 为工质研究了叶片数和安装角同时对静叶性能的影响, 再根据设计流量确定叶高, 最终提出了优化后的设计方案.

1 数值模拟及分析方法

1.1 流体动力学控制方程

三维可压定常标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的各个基本方程如下^[4].

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

Reynolds 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}]. \quad (2)$$

紊流能量输送方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ & + \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \varepsilon - 2\rho \varepsilon M_i^2. \end{aligned} \quad (3)$$

紊流能量耗散率方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \\ & \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \Phi. \quad (5)$$

其中, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$;

$$\begin{aligned} \Phi = & \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ & \left. \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda \text{div} u. \end{aligned}$$

式中: ρ 为密度; u_i 为速度; p 为流体微元体上的压力; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; σ_k 和 σ_ε 分别为与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数; μ 为动力黏度; μ_t 为湍流黏度; Pr_i 为湍动 Prandtl 数; g_i 为重力加速度在第 i 方向上的分量; β 为热膨胀系数; M_i 为湍流马赫数; c_p 为比热容; T 为热力学

收稿日期:2013-10-03; 修订日期:2013-11-06

基金项目:河南省科技攻关计划资助项目(122102210041); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A480722)

作者简介:魏新利(1956-), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事生物质能利用、低温余热制冷及发电等研究, E-mail:xlwei@zzu.edu.cn.

温度; λ 为流体的传热系数; Φ 为由于黏性作用机械能转换为热能的耗散部分. 常数分别取: $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

1.2 模型的建立和网格的生成

向心透平静叶主要结构参数如图 1 所示. 其中 b 为弦长, α 为叶片安装角, R_0 为静叶环进口半径, R_n 为静叶环出口半径, R_l 为叶轮入口半径, L_n 为叶片高度. 原设计静叶的叶型采用莫斯科动力学院的 TC-4P 叶型, 叶片数为 17, 叶高为 2.5 mm, 叶片安装角为 36° , 质量流量为 0.432 kg/s.

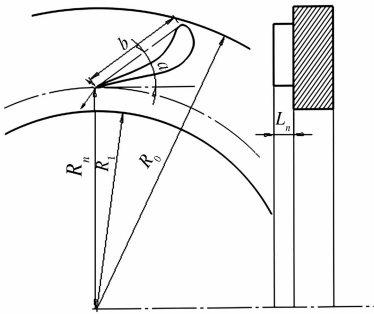


图 1 静叶结构参数
Fig.1 Structure parameters of stator

由于导向叶栅结构上的对称性, 为了研究方便笔者仅取单个流道作为研究对象进行数值研究. 对在静叶前缘、尾缘及壁面附近的网格进行局部加密结果如图 2 所示.

1.3 计算方法和边界条件

计算区域采用结构化网格, 湍流模型采用标

准 $k-\varepsilon$ 模型. 工质从入口到出口逐渐加速膨胀且均处于气态, 计算中对应物性参数直接从数据库中调取. 网格单元所在区域采用静止的绝对坐标系. 将进出口截面分别设为压力进口和压力出口, 将因分割流道而产生的面设成周期性边界条件, 其余面均设为绝热固壁条件. 进出口边界参数均按设计工况给定. 入口总压为 500 kPa, 总温为 343 K. 出口静压为 180 kPa, 回流总温为 324.18 K.



图 2 模型的建立和网格的生成过程
Fig.2 Modeling and the mesh generation

2 计算结果与分析

对原设计静叶进行数值模拟, 发现气体在叶片入口附近缓慢膨胀, 在斜切口附近开始急剧膨胀, 压力总体分布情况与实际情况相符. 另外, 计算得到的出口平均速度为 153.25 m/s, 与热力计算得到的静叶出口速度 158.82 m/s 吻合得较好. 由于笔者考虑了壁面的黏性力等产生的耗散作用, 因此计算结果与热力计算所得数值相比略小是可以接受的, 所以计算结果是可信的.

相同条件下, 静叶出口速度越大, 温度越低, 则叶栅的膨胀能力越好. 图 3 是各参数随不同安

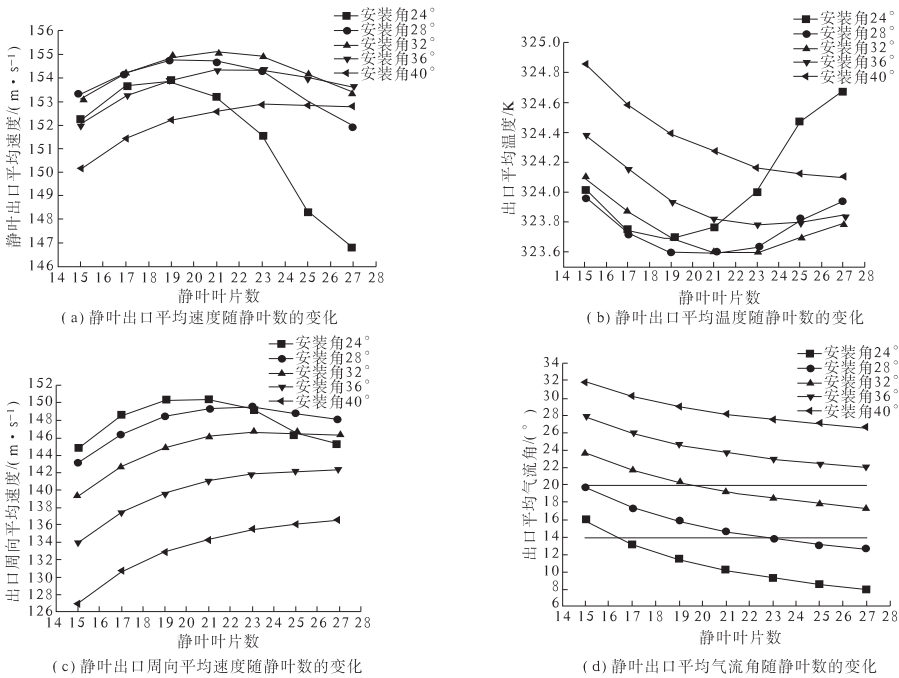


图 3 各参数随不同安装角和叶片数的变化曲线
Fig.3 Curves of each parameter changing with different setting angles and vane number

装角和叶片数的变化曲线图. 从图 3(a)、(b)中可以看出:在不同安装角下,静叶的出口平均速度都随叶片数的增加有先增大后变小的趋势,而静叶的出口平均温度的变化趋势则恰好相反. 这是由于随着叶片数的增加,气流速度分布的均匀程度也逐渐增加,减少了气流的局部脱离进而减少了漩涡的产生. 然而随着叶片数的增加,壁面摩擦损失也随之增加. 当叶片达到一定数目时,壁面摩擦损失已占主导地位,此时若继续增加叶片数将会导致效率大大降低. 图 3(a)还表明随着安装角的增大,最大速度系数所对应的叶片数呈现出逐渐增大的趋势. 综合图 3(a)、(b)可知,叶片安装角为 28°或 32°,叶片数为 21 是较为理想的选择.

提高静叶出口周向速度是提高向心透平轮周功的有力手段. 从图 3(c)中可以看出当叶片数从 15 变化到 27 时,除安装角为 24°外,出口周向速度随着安装角的减小以及叶片数的增加而不断增大. 单从该图来看,安装角为 24°,叶片数为 19 或者 21 与安装角为 28°,叶片数为 21 或者 23 都是

较为理想的选择.

在现有的向心透平结构中,导向叶栅出气角很少有超过 25°的,一般都处于 14°~20°^[1]. 从图 3(d)中可以看出:相同叶片数下,叶片安装角越小,静叶的出气角越小;同一安装角下,出口气流角随着叶片数的增加逐渐减小,而且减小的趋势变得越来越平缓. 这是由于随着叶片数的增加,各个叶片对单位质量的工质的导向作用越来越强. 而在一定的安装角下,叶片改变来流工质的气流方向的能力是有限的. 图中的两条黑直线之间的范围表示气流角在 14°~20°内,该范围内的点都在可选范围之内. 它们分别是:安装角为 24°,叶片数为 15;安装角为 28°,叶片数为 15,17,19,21 和安装角为 32°,叶片数为 21,23,25,27.

以上计算结果虽是在设计条件下得出的,但分析其产生的现象的本质原因可知,其基本的定性规律仍适用于其它工况. 综合图 3 的分析结果可知,设计条件下,安装角为 28°,叶片数为 21 是最佳的选择,该方案能保证静叶高效地运转.

表 1 不同叶片高度下透平的流量
Tab.1 The mass flowrate of turbine in different blade height

叶高/mm	2.5	3	3.5	4	4.5
流量/(kg·s ⁻¹)	0.241 708	0.289 450	0.335 711	0.383 827	0.429 889

在其它结构参数不变的情况下,调整叶片高度及叶片安装角都可使向心透平的流量发生变化^[5]. 为使优化后静叶能满足设计所需的流量 0.432 kg/s,由于安装角已确定,下面还需确定叶片的高度.

表 1 是当叶片高度由 2.5 mm 变化到 4.5 mm 时向心透平的质量流量. 图 4 为静叶质量流量随叶片高度变化的折线图和拟合后的直线图. 从图中可以看出两者几乎重合. 拟合得到的直线为

$Y=0.006\ 6+0.941\ 5X(R^2=0.999\ 96)$. (6)
其中, Y 表示静叶出口的质量流量,kg·s⁻¹; X 表示静叶的叶片高度,mm; R 是相关系数.

把 $Y=0.432$ 代入式 (6), 计算得 $X=4.518\ 32$.

至此,静叶的全部结构参数都已确定. 建立安装角为 28°,叶片数为 21,叶高为 4.518 32 mm 的导向叶栅. 按前文所述步骤离散化后再进行计算.

表 2 优化后的主要参数
Tab.2 Main parameters after optimization

平均速度/ (m·s ⁻¹)	平均温度/ K	周向速度/ (m·s ⁻¹)	速度 系数	质量流量/ (kg·s ⁻¹)
155.032 9	323.578 2	149.732 6	0.927 3	0.432 797 4

计算得到的主要参数如表 2 所示. 与原设计相比,优化后的速度系数提高了 1.16%,周向速度提高了 8.93%,静叶出口的质量流量为 0.432 797 4 kg/s,与设计目标值的相对误差仅为 1.85e10⁻³.

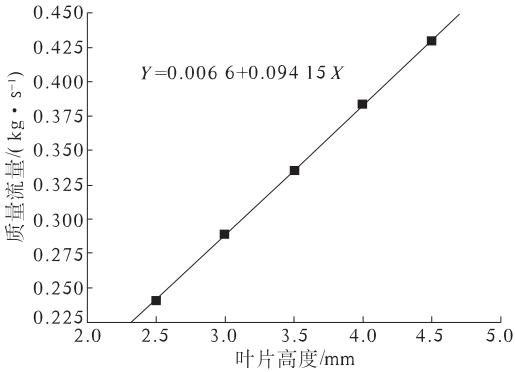


图 4 静叶质量流量与叶片高度的关系
Fig.4 Relation of mass flowrate and blade height

图 5 为优化前后半叶高处叶片表面的静压分布.对比发现优化前后工质在压力面上的压力分布基本保持不变;优化前在叶片入口处吸力面的压力就开始明显下降,而优化后到约沿弦长方向 20% 处压力才开始迅速下降.并且优化后沿弦长方向约 50% 处的小段逆压区趋势也变得较为平缓.

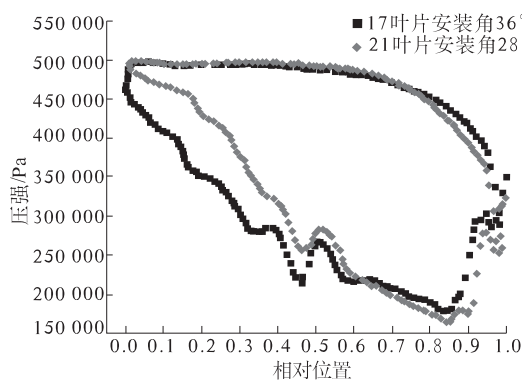


图 5 优化前后半叶高处叶片表面的静压分布
Fig.5 Static pressure distributions on blade surface at half of vane's height before and after optimization

二次流是区别于主流而定义的一种流动,是指在叶栅通道上下端部的附面层内,由于汽流速度相对很小,所产生的离心力不足以抵消从叶栅压力面到吸力面产生的横向压力差,在横向压力差作用下,上下端壁附面层的汽流便从叶栅内弧向背弧横向运动^[6].因此控制压力面和吸力面之间的横向压力差能有效地防止二次流的产生.从图 5 看出优化后叶片前半部分压力面与吸力面的压差明显小于优化前的值,这进一步降低了二次流发生的可能性.叶根处由于黏性力的存在流速相对较小,最易产生二次流.图 6 为流道叶根处的极限流线分布图和叶片前缘、尾缘的局部放大图.从图中可以看出流道内流线分布均匀顺畅并无横向流动情况,在叶片前缘气流分流处和尾缘气流汇集处过渡平缓.

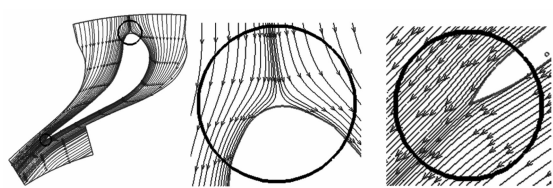


图 6 叶根处的流线分布
Fig.6 The distribution of streamlines at hub

3 结论

(1)一般情况下,安装角相同时,随着叶片数的增加,静叶速度系数呈现出先增大后减小的趋势,这本质上是由于局部脱流产生的漩涡损失和与叶片的摩擦损失共同作用的结果;安装角变化时,最大速度系数所对应的叶片数是不一样的.设计条件下,当安装角从 24°变化到 40°时,最大速度系数所对应的叶片数呈现出逐渐增大的趋势.

(2)一般情况下,在合理范围内叶片安装角的减小能提高静叶的速度系数,但减小到超过一定值(本文静叶的这个值在 28°~32°之间)时,静叶的效率会迅速减小.这主要是由于安装角减小到这个值时,流体的尾迹损失会迅速增加引起的.

(3)通过分析叶片数、叶片安装角、叶片高度共同对静叶性能的影响,得出叶片安装角为 28°,叶片数为 21,叶高约为 4.52 mm 时满足设计要求.在设计工况下,该方案与原设计方案相比不仅减小了流道中压力面与吸力面的压力差,在更大程度上避免了二次流的产生,而且使周向速度提高了 8.93%,速度系数提高了 1.16%.

参考文献:

[1] 康婷,李雪松,顾春伟. 微型燃气轮机向心透平内部流动分析[J]. 热力透平,2009,38(2):38.
[2] 奚忠,径流透平气动设计及优化方法研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所,2012.
[3] 邓清华,丰镇平. 微型燃气轮机向心透平导向器的流场分析与设计研究[J]. 西安交通大学学报, 2005,39(9):962-965.
[4] 张师帅. 计算流体动力学及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011:82-84.
[5] 张鹏刚. 微型燃气轮机向心透平气动性能的数值研究[D]. 大连:大连理工大学能源与动力学院,2005.
[6] 栾忠兴,李勇,薛彦光,等. 汽轮机静叶栅二次流损失的数值研究[J]. 东北电力大学学报,2012,32(2):43-47.

The Structural Optimization of Guide Vane of Radial-Inward-Flow Turbine

WEI Xin-li, QIU Zhi-ming, MA Xin-ling, WANG Hui

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

Abstract: R245fa is used as the the working fluid, the computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT is adopted, and the standard $k-\varepsilon$ model is applied in this paper. The guide vanes that blade numbers range from 15 to 27 increased by 2 and the setting angles range from 24° to 40° increased by 4° have been numerically studied. The results of computation show that the guide vane's outlet average circumferential velocity, outlet average temperature and velocity coefficient have greatly improved compared with the original design, when the vane number is 21 and the setting angle is 28° . The blade height that original design flowrate required is got with the linear fitting method in this vane number and setting angle. Research shows that the flow in the channel is in good condition after optimization. This paper may provide a reference for designing an efficient guide vane.

Key words: radial-inward-flow turbine; guide vane; secondary flow; optimization

(上接第 45 页)

- | | |
|--|---|
| [5] COHEN W W, SCHAPIRE R E, SINGER Y. Learning to order things[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1999, 10(1): 243 - 270. | [C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. Lawrence Erlbaum: Associates LTD, 2005: 27 - 32. |
| [6] ELZINGA C, WANG Hui, LIN Zhi-wei, et al. Concordance and consensus[J]. Information Sciences, 2011, 185(12): 2529 - 2549. | [8] AUGUSTO J C, WANG Hui, LIU Jun. Situation assessment in disaster management[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2008, 1(3): 237 - 247. |
| [7] WANG Hui, DUBITZKY W. A flexible and robust similarity measure based on contextual probability | |

An Approach to Aggregating Partially Ordered Preferences with Belief Degrees for Decision Making

CHEN Shu-wei, ZHOU Wei, CAI Li-na

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

Abstract: we propose in this paper an approach to aggregating partially ordered preferences with belief degrees for decision making. We consider a set of preferences associated with belief degrees, and treat each preference as a sequence with belief degree. For every pair of considered alternatives, we calculate the probability that one alternative should be placed before another. These probabilities are then fed to the ORDER-BY-PREFERENCE algorithm to generate an approximately optimal total order over all the alternatives. A simple example is given to illustrate this approach.

Key words: decision making; preference; partial order; belief degree; aggregating

文章编号:1671-6833(2014)01-0051-04

600 MW 火电机组间接空冷塔流动换热特性数值研究

王为术, 张雨飞, 常娜娜

(华北水利水电大学 热能工程研究中心, 河南 郑州 450011)

摘 要:采用 Fluent6.3 软件对 600 MW 超临界火电机组自然通风间接空冷塔流动和换热性能进行了数值模拟, 对不同的环境风速下空冷塔内流场特性和换热规律进行了研究. 研究表明, 空冷塔在风速为零的情况下流场较为稳定, 散热量和通风量最大, 随着风速的增大, 空冷塔内流场发生了较大的变化, 散热量和通风量都呈现下降趋势, 对间接空冷机组的运行产生不利影响. 研究结果为大型电站锅炉间接空冷塔的运行改造提供了理论依据.

关键词:环境风速; 空冷塔; 散热量; 数值模拟

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.012

0 引言

传统火电厂循环冷却水损耗大, 据统计, 600 MW 机组冷却塔水损失达 1 000 t/h, 我国以火电为主, 年耗水资源量巨大, 为适应国家火电西移布局 and 节约珍贵的水资源, 空冷技术被用于火电厂替代循环水冷却系统, 能节水约 65% ~ 90%^[1]. 间接空冷技术^[2]中凝汽器冷凝介质——循环水闭式循环, 在空冷塔底部四周设置散热器, 空气冷却循环水, 蒸发损失为零. 空冷塔是间接空冷系统中极其重要的设备, 其流动和换热性能对电厂的经济性和安全性有重要的影响^[3]. 空冷塔设备体积较大, 如果采用传统的试验方法, 投资成本高, 难度大, 影响因素多, 通常采用数值模拟方法进行性能的研究, 主要集中在塔内流场、塔外环境风影响和散热器性能等三方面. 唐革风^[4], 翟志强^[5], 宫婷婷^[6]和王晓华^[7]等分别研究了塔外横风、侧风对塔内流动和传热的影响; 王晓华^[7]还提出在背风侧设置挡风墙来优化塔内换热; 杨立军^[8-9]模拟了间接空冷系统空冷散热器的传热和运行特性; 卜永东^[10]对电站间接空冷系统的变工况性能进行了分析. 笔者采用 Fluent6.3 软件, 以 600 MW 超临界火电机组间接空冷塔为模拟对象, 研究在不同环境风速下空冷塔内流动和传热性能, 为大型间接空冷机组设计和运行提供理论依据.

1 研究对象及网格划分

1.1 模拟研究对象

模拟研究对象为 600 MW 火电机组自然通风间接空冷塔, 如图 1 所示. 空冷塔外形采用旋转双曲线形壳体, 塔体高 150 m, 出口直径 84.536 m, 喉部高度 140 m, 进风口高 26 m, 底部外围直径 134.544 m. 散热器采用翅片强化换热, 垂直布置在空冷塔底部四周.

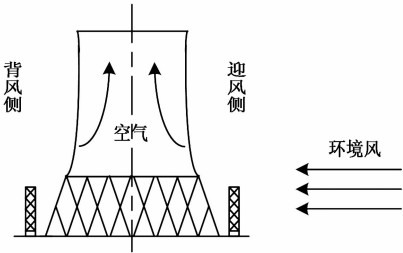


图 1 空冷塔示意

Fig. 1 Air-cooling tower

1.2 网格划分

利用 CFD 软件平台, 通过数值模拟方法对空冷塔内流动和换热特性进行研究. 空冷塔关于中心截面对称, 为便于计算, 选取几何模型的 1/2 进行研究. 散热器结构复杂, 为计算方便, 在数值建模的过程中将散热器简化为一个空心圆柱体. 利用 Gambit2.0 软件进行三维建模和网格划分, 采用结

收稿日期:2013-09-01; 修订日期:2013-11-09

基金项目:河南省教育厅自然科学研究计划资助项目(2011A470007)

作者简介: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.

构化六面体网格系统,并在空冷塔塔壁周围和散热器区域进行网格加密.空冷塔网格如图 2 所示.

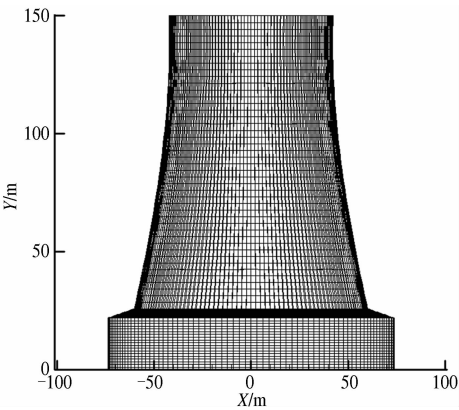


图 2 空冷塔网格

Fig. 2 The grid diagram of the air-cooling tower

2 数学模型

空冷塔入口和侧面均设置为速度入口,出口设置为压力出口,空冷塔的顶面和底面均设置为内部边界条件,其他均为固壁边界条件.湍流流动模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型,控制方程求解采用 SIMPLE 算法,近壁面采用标准壁面函数法.空冷塔散热器的流动和传热性能采用 Fluent 中的散热器模型,模拟计算中忽略散热器的辐射换热.

用空冷塔散热量和通风量描述空冷塔宏观传热和流动性能,空冷塔散热量定义为通过空冷塔散热器交换的热量;通风量定义为通过散热器进入空冷塔内的空气流量.通过 Fluent 计算可以得到通过散热器的热流量 q ,则空冷塔的散热量计算公式为

$$Q_1 = qA. \tag{1}$$

式中: Q_1 为空冷塔的散热量, W; A 为散热器的面积, m^2 .

对于空冷散热器,由于能量守恒,冷空气吸收的热量和热流体放出的热量相等,通过散热器的空气流量可由热平衡方程式求得

$$Q_2 = c_a m_a \Delta t_a = c_w m_w \Delta t_w = Q_1. \tag{2}$$

式中: Q_2 为冷空气吸收的热量, W; c_a, c_w 分别为水和空气的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m_a, m_w 分别为水和空气的质量流量, kg/s ; $\Delta t_a, \Delta t_w$ 分别为水和空气进口和出口的温度变化, K.

3 计算结果与分析

3.1 散热量和通风量

据统计,我国大部分地区常规平均风速不超

过 4 m/s ,选取环境风速分别为 $0, 2, 4, 6$ 和 8 m/s 等 5 种风速对空冷塔内流场和换热情况进行数值模拟,通过模拟计算,得到间接空冷塔在各工况下空冷塔的散热量和通风量,由于计算模型的对称性,散热器的散热量和通风量分别为计算结果的 2 倍.空冷塔散热量和通风量如图 3 和图 4 所示.从图中可以看出,在所研究的工况中,随着风速的增大,空冷塔的散热量和通风量都呈现下降趋势,对空冷电厂的运行产生不利影响.当风速为 8 m/s 时,相比 0 m/s 计算结果,其散热量下降了约 25%,通风量下降了约 45%.

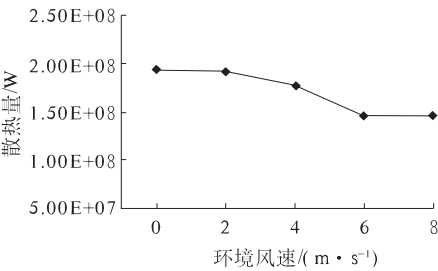


图 3 各工况空冷塔的散热量

Fig. 3 The heat dissipation of air-cooling tower under different working conditions

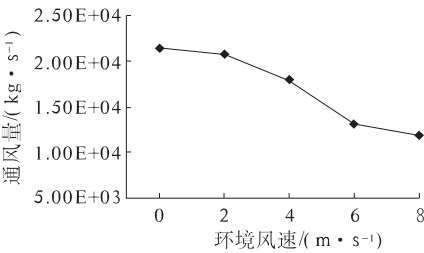


图 4 各工况空冷塔的通风量

Fig. 4 The ventilation quantity of air-cooling tower under different working conditions

从图中可以看出,风速从 4 m/s 到 6 m/s 时散热量和通风量降低最多,选取 0 m/s 、 4 m/s 和 6 m/s 3 个工况进行分析对比,3 种工况下空冷塔内的速度、温度和压力分布如图 5 ~ 7 所示,其中温度单位为 K,压力单位为 kPa.

3.2 无风时的情况

当环境风速为 0 m/s 时,空冷塔内的流动参数分布如图 5 所示.空气处于自然对流状态,是一种理想状况,从图中可以看出,空冷塔内流场分布均匀,空冷塔塔体底部的压强最小,驱使塔外的空气流经散热器进入到空冷塔内部,同时散热器与空气进行对流换热,使空气温度升高,达到了 298 K ,相比环境温度为 289 K 时空气密度减小,与塔外的空气形成密度差造成塔内空气上浮运动,塔内中心气

流上升速度高于四周,进塔风速为 2 m/s.

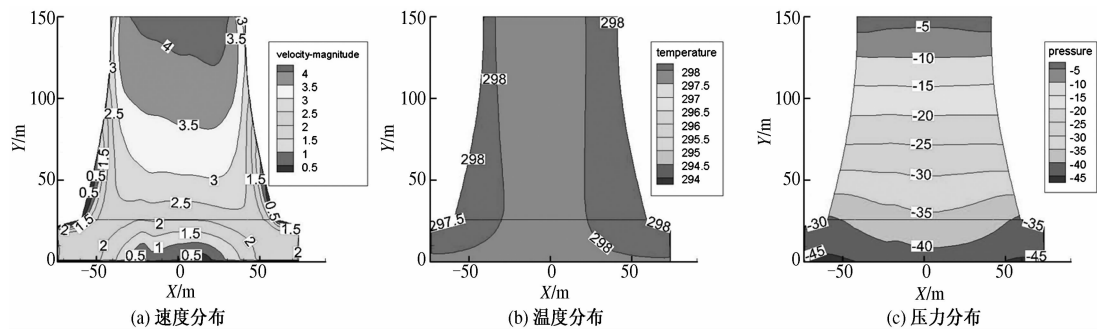


图 5 风速为 0 m/s 时空冷塔的参数分布

Fig. 5 The Parameter distribution of air-cooling tower under the condition of the wind velocity is 0 m/s

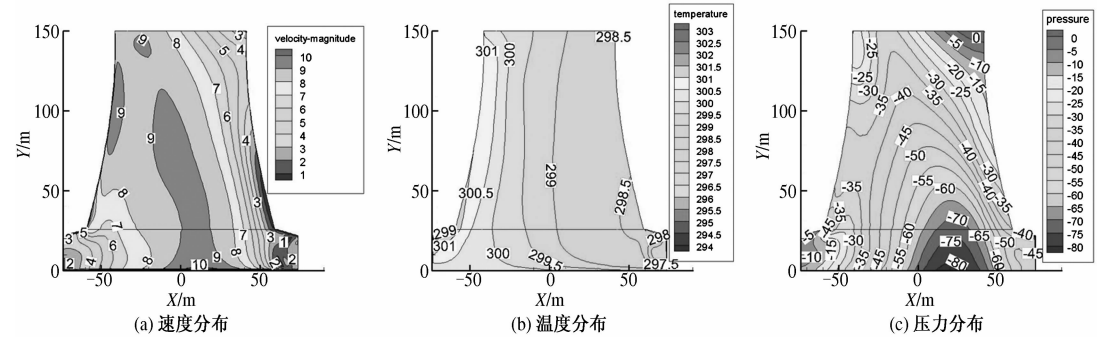


图 6 风速为 4 m/s 时空冷塔的参数分布

Fig. 6 The Parameter distribution of air-cooling tower under the condition of the wind velocity is 4 m/s

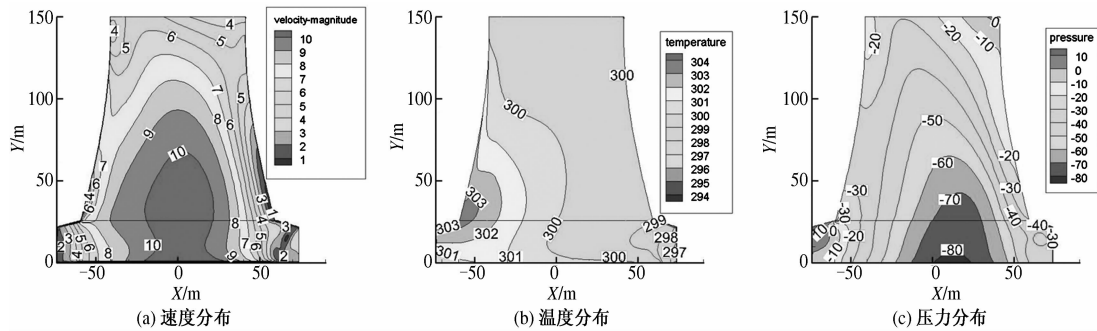


图 7 风速为 6 m/s 时空冷塔的参数分布

Fig. 7 The Parameter distribution of air-cooling tower under the condition of the wind velocity is 6 m/s

3.3 有环境风时的情况

当环境风速大于 0 m/s 时,空冷塔内的流动参数分布如图 6、7 所示. 由于环境风速随地面高度呈现指数分布,表明空冷塔对应的离地面高度越高,所对应的环境风速越大,由于风速的不均一性,使得塔内的速度、温度分布不像无风时呈现对称的现象.

当有环境风速存在时,空冷塔内流场及换热情况都随着环境风速的不同而发生变化. 在空冷塔的迎风侧,塔外散热器会对空气的流动产生相应的阻碍作用,造成空气速度降低,压力升高,空冷塔内外压差增大,随着环境风速的不断增大,空冷塔内外两侧的压差也随着逐渐增大,塔外冷空

气进入塔内的速度逐渐升高,从而造成迎风侧的换热量增加;在空冷塔的背风侧,随着环境风速的增大,塔外冷空气进入塔内的速度逐渐降低,使得背风侧的散热量下降.

空冷塔外围在来流下游产生了低压区,造成空气回流,影响空冷塔塔顶流体的运动,空冷塔塔顶敞口处,其下游的流体速度均比上游的大,这主要是因为塔内流体速度发生变化,对于塔顶敞口处上游流体,由于受到塔外上游来流的压制,改变了塔内流体原本的流动规律,降低了流动速度;而塔顶敞口处下游流体所受塔外上游来流的影响则相对较小. 但随着环境风速的增大,塔顶敞口处受到上游来流的压制就越强,大大降低了空冷塔通

风量,从而降低了散热器散热效果.这也可从塔内空气温度看出,随着环境风速的增大,塔内温度分布逐渐升高,在所研究的工况中,无风时塔内温度分布均匀,温度约为 298 K,而当环境风速达到 6 m/s 时,塔内最高温度达到了 303 K,塔内温度升高,说明换热效果不理想.

另外,由于空冷塔外围在来流下游产生低压区造成的空气回流,速度和温度在空冷塔顶部区域呈羽状流分布,且随着环境风速的增大,羽状流越受压制,同时在塔顶部区域形成明显回流,降低了空冷塔顶部出口速度,致使空冷塔通风量降低,同时也抑制了空冷塔散热效果.如在环境风速为 4 m/s 时,空冷塔顶部出口风速约为 8 m/s,而当环境风速为 6 m/s 时,空冷塔顶部出口风速约为 4 m/s.

4 结论

(1)当环境风速为零时,空冷塔内流场分布均匀,当有环境风速时,塔内流场发生了较大的变化.当风速达到一定程度时,空冷塔出口气流会与塔内壁出现壁面脱流,塔外冷风随涡流重新倒流回塔内,造成空冷塔通风量降低,散热量下降.

(2)空冷塔在无风的情况下散热量最大,在有环境风存在的情况下,空冷塔的散热量下降,且散热量随着环境风速的增大而逐渐减小,产生这种结果的主要原因是空冷塔背风侧的进塔风速随着迎风侧进塔风速的增大而明显减小,引起背风侧散热量降低所造成的.

参考文献:

- [1] 陈立军,米利俊,徐超,等.新形势下直接空冷和间接空冷的发展分析[J].电站系统工程,2010,26(6):5-6.
- [2] 温高.发电厂空冷技术[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [3] 徐士民,白旭,蒋雪辉,等.发电厂空冷系统的特点和发展[J].汽轮机技术,2000,42(3):140-144.
- [4] 唐革风,苏铭德,符松.横向风影响下空冷塔内外流场的数值研究[J].空气动力学学报,1997,15(3):328-336.
- [5] 翟志强,唐革风,符松.横向风对自然通风干式冷却塔运行性能影响的实验与数值研究[J].热力发电,1997(3):3-7.
- [6] 宫婷婷.侧风对于间接空冷塔性能影响的实验研究及数值模拟[D].山东:山东大学能源与动力工程学院,2012.
- [7] 王晓华.侧风情况下空冷塔性能的数值模拟[D].天津:天津大学机械工程学院,2005.
- [8] 杨立军,杜小泽,杨勇平.间接空冷系统空冷散热器运行特性的数值模拟[J].动力工程,2008,28(4):594-599.
- [9] 杨立军,贾思宁,卜永东,等.电站间冷系统空冷散热器翅片管束流动传热性能的数值研究[J].中国电机工程学报,2012,32(32):50-57.
- [10] 卜永东,杨立军,杜小泽,等.电站空冷系统变工况性能的数值研究[J].中国电机工程学报,2012,32(35):66-73.

Numerical Simulation on the Flow Field and Heat Transfer Characteristics of Indirect Air-Cooling Tower in 600MW Supercritical Thermal Power Unit

WANG Wei-shu, ZHANG Yu-fei, CHANG Na-na

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

Abstract: The flow field characteristics and heat transfer of the natural ventilation indirect air-cooling tower in 600MW supercritical thermal power unit were numerically simulated by Fluent6.3 at different environment wind speeds. The results indicate that when the wind velocity is 0, the flow field is relatively stable. The heat dissipating capacity and the ventilation quantity are the largest in the air-cooling tower under this condition. With the increase of wind speed, large changes of the flow field inside the tower have taken place, at the same time, heat dissipation and ventilation quantity showed a trend of decline. It can cause an adverse impact on the operation of the indirect air-cooling units. The results provide a theoretical basis for the operation of indirect air-cooling tower in the large power plant unit.

Key words: environment wind speed; air-cooling tower; heat dissipating capacity; numerical simulation

文章编号:1671-6833(2014)01-0055-05

H₂O₂ 助 TiO₂ 可见光催化降解水中的扑草净

李庆奎¹, 周秉彦¹, 唐建军², 陈益清²

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 深圳职业技术学院 建筑与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

摘 要:以 TiO₂-P25 为光催化剂, 内分泌干扰物扑草净作模型污染物, 研究了 H₂O₂ 助 TiO₂ 可见光催化降解扑草净的反应特性. 表明 H₂O₂ 能助 TiO₂ 可见光催化降解扑草净, 反应 120 min 时, 扑草净的降解率达 80%; 反应过程中, 控制溶液体系的 pH 值为 3.0 左右, H₂O₂ 与扑草净的初始浓度比约 45:1 较为适宜; 在扑草净的降解过程中, 甲基、硫基及氨基被氧化脱除, NO₃⁻、SO₄²⁻ 被持续释放出来, TOC 去除率达 70%, 降解终产物为三聚氰酸; 通过对反应体系的光谱分析显示, H₂O₂ 吸附于 TiO₂ 表面形成复合物结构, 在可见光作用下转为自由基等活性物种, 扑草净的降解涉及羟基自由基(·OH)的产生与参与.

关键词:可见光催化; 二氧化钛; 过氧化氢; 扑草净; 羟基自由基

中图分类号: O643.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.013

0 引言

扑草净(C₁₀H₁₉N₅S)是一种广泛使用的三嗪类除草剂, 被认定为内分泌干扰物质(Endocrine disrupting chemicals, ECDs)^[1], 已得到国际社会深度关注. 扑草净结构稳定, 难以降解, 被微生物矿化过程十分缓慢, 目前对这一环境污染物的去除主要以高级氧化法为主^[2].

TiO₂ 光催化作为一种基于羟基自由基(·OH)过程的高级氧化技术, 在应用于降解水中的扑草净等难生物降解的有机污染物方面具有优势. 但由于 TiO₂ 的光吸收范围限于波长小于 387 nm 的紫外区, 而太阳光谱中紫外部分能量通常不到 5%, 实际应用时需要耗费大量的电能产生紫外光, 致使这一高级氧化技术目前难以推广应用. 从利用太阳能角度出发, 发展 TiO₂ 可见光催化反应势在必行, 此项工作主要集中在对 TiO₂ 进行金属^[3]或非金属^[4]掺杂. 掺杂处理虽可拓宽 TiO₂ 的光吸收范围至可见光区, 也将同时影响 TiO₂ 的稳定性, 且掺杂后的 TiO₂ 能带间隙变窄, 在可见光作用下对有机污染物的降解有选择性^[5]. 此外, 有研究者基于有机染料分子吸收可见光形成激发态的特点, 开发 TiO₂ 可见光催化降解有机染料的

反应体系^[6].

在 TiO₂ 可见光催化降解有机染料的过程中, 反应过程生成中间产物 H₂O₂^[7], 且中间产物 H₂O₂ 的生成是由于有机染料分子的光敏化效应及 TiO₂ 的电子传输作用所致. 另有研究显示^[8], 中间产物 H₂O₂ 虽只是一瞬时产物, 但对有机染料的降解起决定性作用. 基于 H₂O₂ 能助 TiO₂ 可见光响应^[9], TiO₂ 可见光催化反应显示较好的应用前景, 既不需要复杂的掺杂改性处理而影响 TiO₂ 的稳定性, 且扑草净等非染料类有机物也能在此条件下被降解.

1 实验过程

1.1 光催化实验

激发光源采用 CMH-250 型金卤灯光纤照射装置, 功率 200 W, 发光波长范围 380~800 nm, 滤光片规格为 400 nm, 光强 75.9 W/m², 实验条件标记为 Vis; 催化剂采用锐钛矿型 TiO₂(VK-TA18)、金红石型 TiO₂(VK-T25) 及混晶 TiO₂(Degussa 产品), 分别记为 TIO-A、TIO-R 及 TIO-P25, 根据 XRD 及 BET 分析结果, 它们的特征参数见表 1; 模型污染物扑草净(纯度 99.3%)的起始浓度 9 mg/L, 其分子结构式及液相色谱图如图 1 所示.

收稿日期:2013-09-13; 修订日期:2013-11-04

基金项目:深圳市战略性新兴产业发展专项(ZDSY20120619093952884)

通信作者:唐建军(1973-), 男, 湖南东安人, 深圳职业技术学院教授, 博士, 研究方向为污水处理及资源化技术, E-mail: tangjj7384@sina.com.

表 1 TiO₂ 光催化剂的特征参数

Tab.1 Characteristics of TiO₂ photocatalysts

样品 编号	锐钛型所 占百分比 /%	粒径 /nm	比表面积 /(m ² ·g ⁻¹)/(g·mL)	堆积密度
TIO-A	>99%	20	65	0.38
TIO-R	<1%	35	40	0.45
TIO-P25	85±5%	21	50	0.13

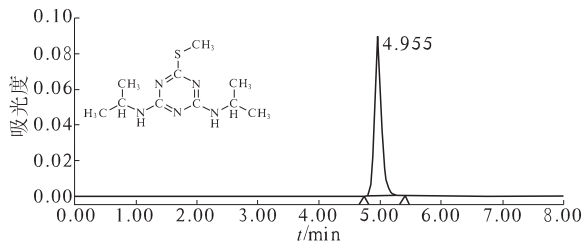


图 1 扑草净的分子结构式及液相色谱图(9 mg/L)

Fig.1 Molecule structural and HPLC spectra of prometryn(9 mg/L)

实验过程中,先将 100 mL 含扑草净及 TiO₂ 的悬浊液在暗态下搅拌 30 min,再置于反应器中加入过氧化氢进行光催化实验;反应一定时间取样,用 0.22 μm 的微孔滤膜过滤后进行相关分析.除非特别说明,催化剂浓度为 1.0 g/L,起始 pH 约 3.0.

1.2 分析与测试

扑草净浓度分析采用 Waters 2695 型高效液相色谱仪,进样量 10 μL,流动相 V(乙腈):V(水)=65:35,流速 1.0 mL/min,分离柱 Symmetry C18

5 um,4.6 × 150 mm,2998PDA 检测器,检测波长 λ = 221 nm;分析中间产物三聚氰酸的浓度时,流动相为 V(磷酸盐):V(甲醇) = 95:5,检测波长 λ = 213 nm,磷酸盐溶液为 10 mmol/L 磷酸氢二钾,并用 10 mmol/L 磷酸二氢钾调解 pH 值至 7.4;硫酸根和硝酸根离子的浓度分析采用戴安 DIONEX ISC-1500 型离子色谱仪,分离柱 Ion Pac AS 9-HC (4 mm × 250 mm),电导检测器,淋洗液为 9 mmol/L 碳酸钠(优级纯)溶液,流速为 1.0 mL/min,进样量 25 μL;有机碳的测试采用 TOC-VCPH/CPN 总有机碳分析仪;H₂O₂ 浓度分析采用钛盐光度法检测,检测波长 λ = 385 nm;光吸收性能分析采用 Hitachi U-3010 型紫外-可见分光光度计(带积分球配件),以标准 BaSO₄ 为参比,扫描波长范围 350 ~ 500 nm;羟基自由基(·OH)的测试采用 Hitachi F-7000 型荧光分光光度计,以浓度 3.0 × 10⁻³ mmol/L 的对苯二甲酸作探针分子,溶液 pH 值 11.

2 结果与讨论

2.1 H₂O₂ 的可见光催化分解

图 2 为不同晶型 TiO₂ 光催化剂经 0.168 mol/L 的 H₂O₂ 浸泡处理后的 UV-Vis 吸收谱图,内附小图为所使用催化剂的 XRD 图.表明经 H₂O₂ 浸泡处理后明显改善了 3 种晶型 TiO₂ 光催化剂对 400 nm 以上可见光的吸收效应,3 种 TiO₂ 光催化剂经 H₂O₂ 浸泡处理后均显淡黄色,经室内自然光照射后则逐渐褪色.

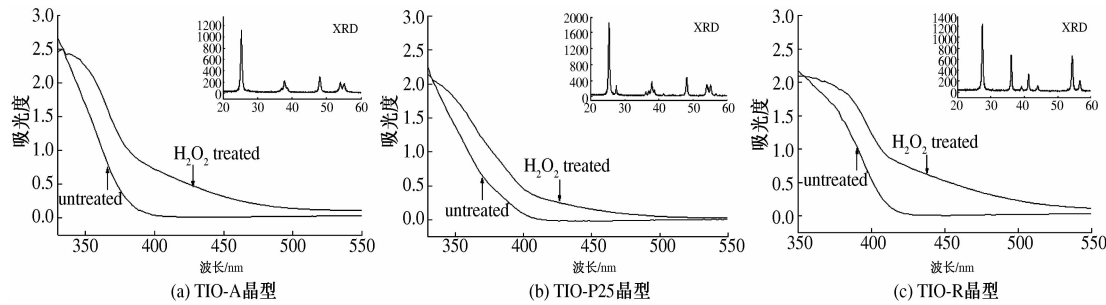


图 2 H₂O₂ 处理对不同晶型 TiO₂ 光吸收性能的影响

Fig.2 Effects of H₂O₂ treatment on the light absorption characteristics of different TiO₂ crystal photocatalysis

图 3 表示 3 种 TiO₂ 光催化剂在可见光作下催化分解 H₂O₂ 的特性,其中 H₂O₂ 的初始浓度为 0.6 mmol/L,溶液 pH 为 3.0,图中阴影部分表示暗态吸附时间段.表明 3 种不同晶型组成的 TiO₂ 光催化剂对 H₂O₂ 均有一定的吸附性能,但 TIO-R 由于粒径最大、比表面积小而对 H₂O₂ 的吸附

性能弱一些;单纯可见光照射下 H₂O₂ 的浓度变化很小,而在加入 TiO₂ 光催化剂时,则 H₂O₂ 浓度显著减小,说明 H₂O₂ 能被 TiO₂ 可见光催化分解.其原因是虽然 TiO₂ 及 H₂O₂ 的光吸收范围均限于波长低于 400 nm 的紫外区,但 H₂O₂ 能吸附于 TiO₂ 表面形成复合物,并拓宽 TiO₂ 的光吸收范围

至可见光区.

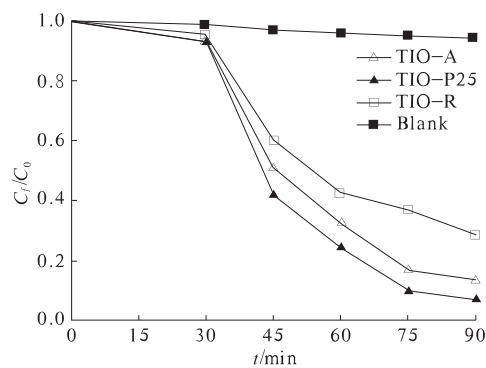


图 3 TiO₂ 可见光催化分解 H₂O₂ 的实验结果

Fig. 3 H₂O₂ decomposition results by TiO₂ visible-light

图 4 表示 3 种不同晶型组成的 TiO₂ 可见光催化降解扑草净的实验结果. 在 H₂O₂ 条件下, TIO-R 催化活性非常明显,反应 120 min 后降解率已达 40%,但较 TIO-A 及 TIO-P25 还是明显低, TIO-P25 的降解率达 80%. 因此,在接下来的条件试验中,均以 TIO-P25 为光催化剂.

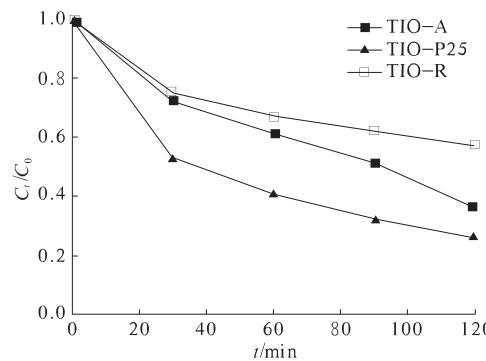


图 4 3 种 TiO₂ 可见光催化 H₂O₂ 降解扑草净的实验结果

Fig. 4 Comparson among the three photocatalysts by prometryn degradation with H₂O₂ assistance

2.2 降解因素影响

图 5 为 H₂O₂ 浓度对扑草净降解的影响. 可以得出,反应体系中的 H₂O₂ 浓度应当适中,在较低浓度范围内时,增大其浓度可加快扑草净的降解,但若浓度过高,由于 H₂O₂ 本身又是羟基自由基(·OH)的捕获剂,此时反而不利于扑草净的降解. 根据 H₂O₂ 与扑草净的化学方程式: C₁₀H₁₉N₃S + 45H₂O₂ = 10CO₂ + 51H₂O + 5NO₃⁻ + SO₄²⁻ + 7H⁺, 它们的化学计量比是 45,即完全降解 9 mg/L 的扑草净理论上要求 H₂O₂ 的浓度是 1.68 mmol/L,从图 5 中实验结果来看,控制 H₂O₂ 与扑草净的初始浓度比在 45 左右较为适宜.

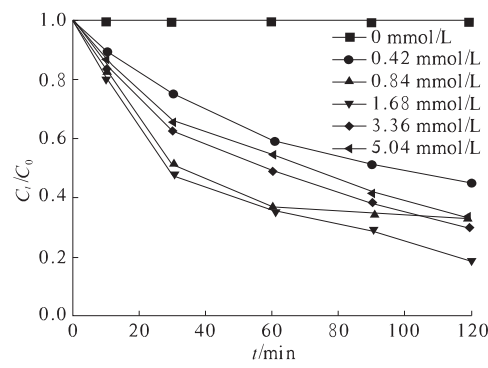


图 5 H₂O₂ 浓度对 TIO-P25 可见光催化 H₂O₂ 降解扑草净的影响

Fig. 5 The influence of H₂O₂ concentration on prometryn degra-dation by TIO-P25 visible photocatalysis with H₂O₂ assistance

图 6 表示反应体系初始 pH 值的影响. H₂O₂ 能在较低 pH 值下稳定存在,而当增大反应体系的 pH 值,尤其至碱性环境下,将导致 H₂O₂ 自分解加快,而不利扑草净的降解;另一方面,在扑草净的降解过程中可能生成显酸性的中间产物,反应体系 pH 值过低,则会阻碍氧化反应的进行. 从图 6 实验结果来看,控制反应体系的 pH 值为 3 左右较为适宜.

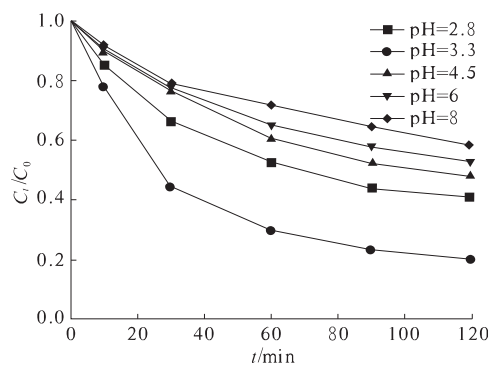


图 6 pH 对 TIO-P25 可见光催化 H₂O₂ 降解扑草净的影响

Fig. 6 The influence of pH on prometryn degradation by TIO-P25 with H₂O₂ assistance

图 7 表示以 TIO-P25 为光催化剂的不同反应体系的 3D 荧光扫描谱图,反应时间 60 min. 表明往反应体系加入起始浓度为 1.68 mmol/L 的 H₂O₂ 时,在波长 312 nm 光激发下,422 nm 发射处有一很强的荧光峰,而不往反应体系加入 H₂O₂ 时,则 422 nm 发射处并未出现明显的荧光峰. ·OH 自由基是光催化反应体系中的主要活性物种,但对苯二甲酸可与其作用生成荧光物质二羟基对苯二甲酸(TA-OH)^[10]. 因此,在上述光催化

反应体系中,荧光的产生是由于 $\cdot\text{OH}$ 自由基与对苯二甲酸生成 TA-OH 的结果,扑草净的降解涉

及 $\cdot\text{OH}$ 自由基的产生与参与.

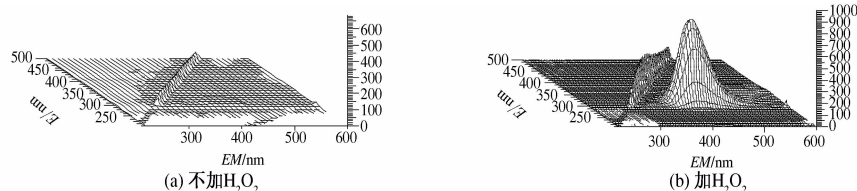


图 7 对苯二甲酸溶液体系的荧光 3 d 扫描光谱图

Fig. 7 The 3d scanned fluorescence spectroscopy of the supernatant liquid containing 3 mM TA

2.3 降解过程分析

为进一步弄清楚扑草净的降解过程,延长反应时间至 480 min,并考虑反应体系 H_2O_2 的消耗(图 3 所示),实验过程中每隔 120 min 往反应体系加入 H_2O_2 ,并控制每次加入的初始浓度为 1.68 mmol/L. 此外,考虑到扑草净降解过程的中间产物主要为三聚氰酸^[11],因此对降解过程的中间产物只分析了三聚氰酸及其浓度的变化,实验结果如图 8 所示. 从中可以看出,随着反应的进行,溶液中的扑草净及 TOC 浓度均不断减小,而 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度则不断增大,趋势并不一致. 如反应 120 min,扑草净的去除率约 80%,而 TOC 的去除率仅 42%,说明在降解过程中生成了一些中间产物;而 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 浓度约为 0.01 mmol/L,即此时被降解的扑草净脱 S 及脱 N 都不完全. 对照图 1 扑草净的分子结构式,表明在扑草净的降解过程中,外层 $-\text{CH}_3$ 持续被氧化脱除,硫基和氨基被氧化,C—S 及 C—N 键断裂不完全,虽有 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 不断释放出来,但降解过程生成了一些可能含 S、N 的中间产物.

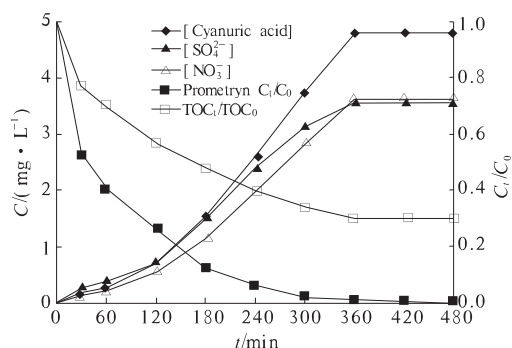
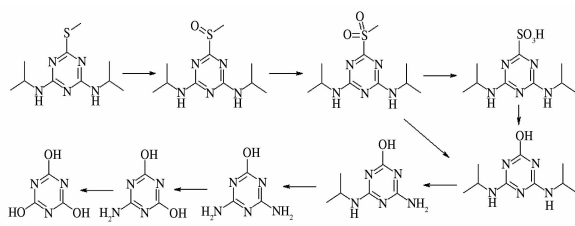


图 8 扑草净、TOC、三聚氰酸、 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 浓度随时间变化

Fig. 8 Time dependence on prometryn, TOC, cyanuric acid, SO_4^{2-} and NO_3^- concentration

反应 360 min 时扑草净的降解率达 100%, TOC 去除率 68%,并随反应时间的延长,TOC 去

除率基本保持在 70% 左右;在反应的初始阶段(0 ~ 120 min), SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度增大趋势较为缓慢,而随着反应的进行(120 ~ 360 min), SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度明显增大,并在反应进行到 420 min 时保持不变;中间产物三聚氰酸的浓度也是先增大,并在 360 min 后基本保持不变. 计算表明,初始浓度 9 mg/L 的扑草净被氧化降解成三聚氰酸,则反应完毕后三聚氰酸的浓度理论上为 4.81 mg/L,TOC 去除率为 70%,反应体系 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度分别为 3.58、4.62 mg/L. 实验结果除 NO_3^- 浓度外与理论的计算值较为吻合,而 NO_3^- 浓度不吻合的原因可能是因为氨基只是部分被氧化为 NO_3^- ,还可能以 NH_4^+ 、 N_2 等其它形式释放. 即扑草净经降解产生等物质的量浓度的 SO_4^{2-} 和三聚氰酸,说明本研究的可见光催化反应体系只能将扑草净外层的甲基、硫基、氨基等完全氧化脱除,不能氧化分解三嗪环结构,导致降解过程的终产物为三聚氰酸. 降解过程如下.



3 结论

(1) H_2O_2 能助 TiO_2 可见光响应及降解扑草净,反应 120 min 后,100 mL 扑草净的降解率达 80%,降解过程涉及 $\cdot\text{OH}$ 自由基的产生与参与.

(2) 反应过程中,控制初始 pH, H_2O_2 与扑草净的起始浓度比分别约为 3 及 45 较为适宜.

(3) 在扑草净的降解过程中,可能生成一些含 S 及 N 的中间产物,反应体系不能氧化分解三嗪环结构,降解终产物为三聚氰酸.

参考文献:

- [1] 曹军,尹小乐,布文安,等. 环境中除草剂扑草净残留分析方法的研究[J]. 分析科学学报,2007,23(4):397-400.
- [2] 李绍峰,孙颖,李平,等. 臭氧/过氧化氢降解扑草净试验研究[J]. 中国给水排水,2010,26(23):79-82.
- [3] ZHAO Bin-xia, MELE G, LI Jun, et al. Degradation of 4-nitrophenol (4-NP) using Fe-TiO₂ as a heterogeneous photo-Fenton catalyst [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176: 569-574.
- [4] 唐玉朝,黄显怀,汤利华,等. N 掺杂 TiO₂ 可见光催化降解有机物机理研究[J]. 环境工程学报,2012,6(5):1585-1590.
- [5] MARTA M, WILLIAM B, COLUSSI A J, et al. Oxidative power of nitrogen-doped TiO₂ photocatalysts under visible illumination[J]. J. Phys. Chem. B, 2004, 108(45):17269-17274.
- [6] ALEX S, SANTHOSH U, DAS S. Dye sensitization of nanocrystalline TiO₂: enhanced efficiency of unsymmetrical versus symmetrical squaraine dyes[J]. J Photochem Photobiol A: Chem, 2005, 172: 63-71.
- [7] GOTO H, HANADA Y, OHNO T, et al. Quantitative analysis of superoxide ion and hydrogen peroxide produced from molecular oxygen on photoirradiated TiO₂ particles [J]. Catal, 2004, 225: 223-229.
- [8] 唐建军,范小江,邹原,等. H₂O₂ 在 TiO₂ 可见光催化反应中的作用机理[J]. 中国有色金属学报,2009,19(2):292-297.
- [9] YAO Y F, CHU W. Reaction mechanism of linuron degradation in TiO₂ suspension under visible light irradiation with the assistance of H₂O₂ [J]. Environ. Sci. Technol., 2009, 43: 6183-6189.
- [10] ISHIBASHI K, FUJISHIMA A, WATANABE T, et al. Detection of active oxidative species in TiO₂ photocatalysis using the fluorescence technique [J]. Electrochemistry Communications, 2000, 2: 207-210.
- [11] EVGENIDOU E, BIZANI E, FYTIANOS K, et al. Heterogeneous photocatalytic degradation of prometryn in aqueous solutions under UV-Vis irradiation[J]. Chemosphere, 2007, 68(10):1877-1882.

Degradation of Prometryn by TiO₂ Visible Photocatalysis with H₂O₂ AssistanceLI Qing-kui¹, ZHOU Bing-yan¹, TANG Jian-jun², CHEN Yi-qing²

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Construction and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The degradation of prometryn by TiO₂-P25 visible-light photocatalysis with H₂O₂ assistance was studied. The results indicated that prometryn could be degraded by TiO₂ visible-light photocatalysis with H₂O₂ assistance, and the degradation ratio could be 80% after 120 min reaction. It was appropriate to control pH and the ratio of [H₂O₂]/[prometryn] to be 3.0 and 45, respectively. In the degradation process of prometryn, methyl, thio and amino groups were oxidized as NO₃⁻ and SO₄²⁻, the removal ratio of TOC reached 70%, and the end product of prometryn degradation was cyanuric acid. Spectrum analysis indicated that the composite structures by H₂O₂ adsorbing on the TiO₂ surface was converted to free radicals under visible light, and the reaction process was predominated by the hydroxyl free radical(·OH) generation in the system.

Key words: visible light photocatalytic; titanium dioxide; hydrogen peroxide; prometryn; hydroxyl free radical

双酚 A 在盐水中溶解度的测定及关联

岳金彩¹, 朱南南¹, 刘先红²

(1. 青岛科技大学 计算机与化工研究所, 山东 青岛 266042; 2. 青岛科技大学 化工学院, 山东 青岛 266042)

摘 要: 采用平衡法测定了温度在 293.15 ~ 353.15 K 下双酚 A 在水、5%、10%、15%、20% 和 25% NaCl 溶液中的溶解度. 结果表明 BPA 溶解度随温度升高而增大, 随 NaCl 溶液浓度增加而减小. 分别采用理想溶液模型、 λ - h 方程和 Apelblat 模型对溶解度数据进行了关联, 总平均相对误差分别为 1.88%、2.83%、1.57%, 表明三种模型均适用于含电解质的三元物系, 能较好地关联 BPA 的溶解度数据.

关键词: 双酚 A; 平衡法; 溶解度; 溶解度模型

中图分类号: TQ013.1 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.014

0 引言

双酚 A (Bisphenol A, 简称 BPA) 是重要的有机化工原料, 广泛应用于聚碳酸酯 (PC)、环氧树脂和聚砜的生产, 还被用作多种塑料的稳定剂和抗氧化剂^[1-2]. BPA 生产及其在工业中的广泛应用都有可能使它进入水环境. 作为一种具有雌激素活性的环境内分泌干扰物质, BPA 对植物生长^[3]、动物和人类的内分泌系统有一定的影响, 造成一定的危害^[4].

PC 生产过程产生大量含有 BPA 的高盐废水, 废水处理成为 PC 生产需要解决的问题. BPA 具有较低的水溶解性, 其溶解度数据很少, 关于固液平衡也未见报导. 笔者研究了 BPA 在水及不同浓度盐水中的固液相平衡, 在不同温度下测定了 BPA 的溶解度数据, 并用理想溶液模型、 λ - h 方程和 Apelblat 模型进行关联, 为研究评价其在环境中的污染行为以及高盐废水的处理提供基础数据.

1 实验部分

1.1 试剂、仪器和分析方法

BPA: 分析纯, 含量 $\geq 99.5\%$, 天津市大茂化学试剂厂; NaCl: 分析纯, 含量 $\geq 99.5\%$, 国药集团化学试剂有限公司; 实验用水为实验室自制去离子蒸馏水.

水浴恒温振荡器 (SHA-C 型, 常州市华普达教学仪器有限公司); 电子天平 (BS224S, 德国赛

多利斯); 高效液相色谱仪 (戴安 P680, 德国戴安公司), Summit HPLCUVD34U 检测器; 色谱柱: Kromasil C-18, $5\ \mu\text{m}$, $250 \times 4.6\ \text{mm}$, 北京康林科技.

样品中的 BPA 含量分析采用液相色谱, 流动相为: $V_{\text{甲醇}}:V_{\text{水}}=6:4$, 流速 $1\ \text{mL/min}$.

1.2 溶解度测定方法

测定溶解度的常用方法有热分析法^[5]、平衡法^[6]和合成法^[7]. BPA 熔点高, 达到平衡的时间长, 适合采用平衡法测定其溶解度.

将水或一定浓度的盐水和过量的 BPA 放入锥形瓶中, 于一定温度下在水浴恒温振荡器中振荡一定时间达到平衡后静置, 使用 $0.45\ \mu\text{m}$ 过滤器对清液过滤后, 分析其中 BPA 含量. 改变温度, 重复上述步骤^[8].

1.3 平衡时间的确定

以质量分数为 10% 的 NaCl 溶液为溶剂, 303.13 K 下每隔 12 h 取样分析, BPA 的溶解度分别为 87.258 9, 102.357 8, 120.457 9, 125.606 2, 125.606 mg/L. 由数据可知: 体系在 48 h 后溶解达到平衡. 为确保溶解平衡的建立, 实验中均采用恒温 48 h 取样分析.

2 实验结果和讨论

2.1 溶解度测定结果

笔者测定了温度在 293.15 ~ 353.15 K 下 BPA 在水以及 5 种 NaCl 溶液中的溶解度 (用溶质 BPA 的摩尔分数 x 表示), 结果见图 1. 由图 1 可知: BPA 在各种溶液中的溶解度均随温度的升

收稿日期: 2013-09-20; 修订日期: 2013-10-20

作者简介: 岳金彩 (1969-), 男, 山东青岛人, 青岛科技大学副教授, 博士, 主要研究方向为过程系统工程.

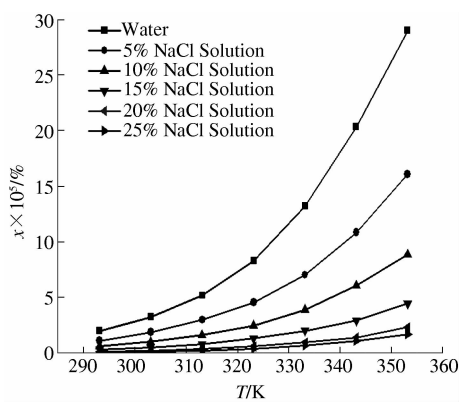


图 1 不同盐水浓度中的 T - x 图

Fig.1 T - x curve for different NaCl solution

高而升高,但趋势有所不同.在水及 5% NaCl 溶液中,溶解度随温度升高增速较快,在高浓度 NaCl 溶液中增速相对缓慢.在同一温度下,随着 NaCl 浓度的增高,BPA 溶解度下降.BPA 为弱极性的大分子化合物,其介电常数小于水,在离子的电场作用下,具有较高介电常数的水分子聚集在 Na^+ 、 Cl^- 的周围,把具有较低介电常数的 BPA 分子从 Na^+ 、 Cl^- 的附近驱出,产生过饱和现象,使过量的

BPA 从水中析出,产生了盐析效应,从而降低了其在 NaCl 溶液中的溶解度.

2.2 关联模型和关联结果

常用的溶解度关联模型有理想溶液模型^[9-10]、 $\lambda-h$ 方程^[11]和 Apelblat 模型等^[12-13],关联式分别如下.

理想溶液模型: $\ln x = \frac{A}{T} + B.$ (1)

$\lambda-h$ 方程: $\ln \left[1 + \frac{\lambda(1-x)}{x} \right] = \lambda h \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right).$ (2)

Apelblat 模型: $\ln x = A + \frac{B}{T} + C \ln T.$ (3)

式中: A, B, C, λ, h 分别为方程中的回归参数; T 为温度,K; T_m 为溶质组分熔点,K; x 为溶质摩尔分率.

分别采用式(2)~(4)对图 1 中的实验数据进行关联,实验值 x_{exp} 和计算值 x_{cal} 以及相对误差 RD 列于表 1~6 中. RD 定义为

$RD = \frac{x_{\text{exp}} - x_{\text{cal}}}{x_{\text{exp}}} \times 100\%.$ (4)

表 1 不同温度下 BPA 在水中溶解度

Tab.1 Solubilities of BPA in water under different temperatures

T/K	$x_{\text{exp}} \times 10^5$	理想溶液模型 ^①		$\lambda-h$ 方程 ^②		Apelblat 模型 ^③	
		$x_{\text{cal}} \times 10^5$	$RD/\%$	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	$RD/\%$	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	$RD/\%$
293.15	1.985 0	1.921 8	3.18	1.976 3	0.44	1.960 9	1.21
303.15	3.225 4	3.257 4	-0.99	3.267 0	-1.29	3.251 5	-0.81
313.15	5.170 3	5.338 2	-3.25	5.246 3	-1.47	5.266 6	-1.86
323.15	8.281 4	8.484 8	-2.46	8.217 7	0.77	8.349 2	-0.82
333.15	13.224 4	13.116 3	0.82	12.608 1	4.66	12.976 1	1.88
343.15	20.344 9	19.767 5	2.84	19.029 9	6.46	19.801 3	2.67
353.15	29.011 1	29.107 5	-0.33	28.394 4	2.12	29.707 7	-2.40

注:①模型参数: $A = -4\,689.27, B = 5.136\,48$;②模型参数: $\lambda = 2.397\,41 \times 10^{-3}, h = 1.843\,51 \times 10^6$;③模型参数: $A = -52.020\,9, B = -1\,978.79, C = 8.437\,63$.

表 2 不同温度下 BPA 在 5% NaCl 溶液中溶解度

Tab.2 Solubilities of BPA in 5% NaCl solution under different temperatures

T/K	$x_{\text{exp}} \times 10^5$	理想溶液模型 ^①		$\lambda-h$ 方程 ^②		Apelblat 模型 ^③	
		$x_{\text{cal}} \times 10^5$	$RD/\%$	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	$RD/\%$	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	$RD/\%$
293.15	1.086 3	1.084 3	0.18	1.092 0	-0.52	1.103 7	-1.60
303.15	1.862 7	1.822 5	2.16	1.823 9	2.08	1.819 5	2.32
313.15	2.966 1	2.963 3	0.09	2.956 8	0.31	2.928 3	1.27
323.15	4.535 3	4.675 5	-3.09	4.672 1	-3.02	4.609 5	-1.64
333.15	6.995 1	7.177 7	-2.61	7.225 5	-3.29	7.110 0	-1.64
343.15	10.848 6	10.747 2	0.93	10.985 6	-1.26	10.763 1	0.79
353.15	16.080 8	15.728 0	2.19	16.500 5	-2.61	16.013 0	0.42

注:①模型参数: $A = -4\,614.69, B = 4.309\,73$;②模型参数: $\lambda = 1.470\,01 \times 10^{-3}, h = 3.071\,14 \times 10^6$;③模型参数: $A = -46.030\,7, B = -2\,227.47, C = 7.431\,30$.

表 3 不同温度下 BPA 在 10% NaCl 溶液中溶解度

Tab. 3 Solubilities of BPA in 10% NaCl solution under different temperatures

T/K	$x_{\text{exp}} \times 10^5$	理想溶液模型 ^①		$\lambda-h$ 方程 ^②		Apelblat 模型 ^③	
		$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%
293.15	0.573 3	0.570 6	0.47	0.576 0	-0.47	0.579 8	-1.13
303.15	0.991 7	0.969 7	2.21	0.970 7	2.12	0.968 3	2.36
313.15	1.573 5	1.592 9	-1.23	1.586 8	-0.85	1.575 9	-0.15
323.15	2.459 5	2.537 6	-3.18	2.526 6	-2.73	2.505 3	-1.86
333.15	3.880 4	3.931 2	-1.31	3.935 0	-1.41	3.897 8	-0.45
343.15	6.052 2	5.936 6	1.91	6.021 3	0.51	5.944 6	1.78
353.15	8.846 2	8.758 2	0.99	9.097 0	-2.84	8.901 3	-0.62

注:①模型参数: $A = -4\,712.25$, $B = 4.000\,56$; ②模型参数: $\lambda = 8.493\,13 \times 10^{-4}$, $h = 5.413\,63 \times 10^6$; ③模型参数: $A = -41.402\,5$, $B = -2\,559.18$, $C = 6.702\,44$.

表 4 不同温度下 BPA 在 15% NaCl 溶液中溶解度

Tab. 4 Solubilities of BPA in 15% NaCl solution under different temperatures

T/K	$x_{\text{exp}} \times 10^5$	理想溶液模型 ^①		$\lambda-h$ 方程 ^②		Apelblat 模型 ^③	
		$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%
293.15	0.272 9	0.273 9	-0.37	0.273 3	-0.15	0.272 7	0.07
303.15	0.471 0	0.469 7	0.28	0.467 8	0.68	0.469 9	0.23
313.15	0.767 9	0.778 3	-1.35	0.775 5	-0.99	0.780 6	-1.65
323.15	1.274 7	1.249 9	1.95	1.251 0	1.86	1.254 3	1.60
333.15	1.982 4	1.950 9	1.59	1.971 7	0.54	1.955 6	1.35
343.15	2.886 8	2.967 1	-2.78	3.049 9	-5.65	2.966 1	-2.75
353.15	4.433 3	4.406 9	0.60	4.653 6	-4.97	4.387 0	1.01

注:①模型参数: $A = -4\,793.59$, $B = 3.54\,405$; ②模型参数: $\lambda = 4.700\,07 \times 10^{-4}$, $h = 1.008\,13 \times 10^7$; ③模型参数: $A = 16.221\,1$, $B = -5\,394.75$, $C = -1.871\,39$.

表 5 不同温度下 BPA 在 20% NaCl 溶液中溶解度

Tab. 5 Solubilities of BPA in 20% NaCl solution under different temperatures

T/K	$x_{\text{exp}} \times 10^5$	理想溶液模型 ^①		$\lambda-h$ 方程 ^②		Apelblat 模型 ^③	
		$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%
293.15	0.109 4	0.107 2	2.01	0.109 3	0.09	0.109 2	0.18
303.15	0.193 3	0.193 4	-0.05	0.193 7	-0.21	0.193 0	0.16
313.15	0.326 6	0.335 6	-2.76	0.331 6	-1.53	0.331 4	-1.47
323.15	0.556 5	0.563 0	-1.17	0.551 0	0.99	0.554 7	0.32
333.15	0.939 9	0.915 6	2.59	0.892 5	5.04	0.906 6	3.54
343.15	1.390 5	1.447 6	-4.11	1.415 4	-1.79	1.449 8	-4.26
353.15	2.303 6	2.229 9	3.20	2.209 2	4.10	2.272 1	1.37

注:①模型参数: $A = -5\,236.19$, $B = 4.116\,14$; ②模型参数: $\lambda = 2.661\,97 \times 10^{-4}$, $h = 1.899\,67 \times 10^7$; ③模型参数: $A = -48.323\,7$, $B = -2\,749.42$, $C = 7.74\,122$.

表 6 不同温度下 BPA 在 25% NaCl 溶液中溶解度

Tab. 6 Solubilities of BPA in 25% NaCl solution under different temperatures

T/K	$x_{\text{exp}} \times 10^5$	理想溶液模型 ^①		$\lambda-h$ 方程 ^②		Apelblat 模型 ^③	
		$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%	$x_{\text{cal}} \times 10^5$	RD/%
293.15	0.059 72	0.056 77	4.94	0.059 09	1.05	0.057 78	3.25
303.15	0.103 6	0.109 7	-5.89	0.109 6	-5.79	0.109 5	-5.69
313.15	0.201 3	0.203 2	-0.94	0.195 6	2.83	0.200 8	0.25
323.15	0.356 3	0.362 3	-1.68	0.337 8	5.19	0.357 2	-0.25
333.15	0.636 7	0.624 0	1.99	0.566 9	10.96	0.618 2	2.91
343.15	1.060 1	1.041 2	1.78	0.928 8	12.39	1.042 8	1.63
353.15	1.677 6	1.687 7	-0.60	1.493 3	10.99	1.718 2	-2.42

注:① $A = -5\,852.92$, $B = 5.583\,91$; ② $\lambda = 2.249\,68 \times 10^{-4}$, $h = 2.429\,77 \times 10^7$; ③ $A = -44.4561$, $B = -3\,479.95$, $C = 7.386\,95$.

由表1~6计算得到3种关联模型的总平均相对误差分别为1.88%、2.83%、1.57%,理想溶液模型、 $\lambda-h$ 方程和Apelblat模型均可以较好地用于BPA溶解度的关联,三种模型对含电解质的三元物系同样适用。比较而言, $\lambda-h$ 方程比另外两种模型的误差稍大,分析其原因可能是:理想溶液模型和Apelblat模型是单纯的以温度为函数的经验方程,针对性和实用性强;而 $\lambda-h$ 方程除了与体系温度有关外,还与饱和溶液中溶质分子的平均缔合度及单位溶质的溶解焓有关,针对性和实用性较弱^[8]。

3 结论

(1) 笔者采用平衡法测定了293.15~353.15 K下,BPA在水、质量分数为5%、10%、15%、20%以及25% NaCl溶液中的溶解度,结果表明,BPA在这6种溶液中的溶解度均随温度的升高而增大,且其溶解度随着NaCl溶液的浓度增加而减小。

(2) 采用理想溶液模型、 $\lambda-h$ 方程和Apelblat模型对溶解度数据进行关联,实验值和计算值吻合较好,总平均相对误差分别为1.88%、2.83%、1.57%。

(3) 理想溶液模型、 $\lambda-h$ 方程和Apelblat模型对含电解质三元物系同样适用。

参考文献:

- [1] 孙卫玲,倪晋仁,郝鹏鹏,等. 泥沙对双酚A的吸附及其影响因素研究[J]. 环境科学学报,2004,24(6): 975-977.
- [2] 王燕春,刘启凯,赵庆祥. 双酚A废水的污染状况及处理技术[J]. 城市环境与城市生态,2005,18(4): 15-16.

- [3] SUN Hai, WANG Li-hong, ZHOU Qing. Effects of bisphenol A on growth and nitrogen nutrition of roots of soybean seedlings[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2013, 32(1): 174-180.
- [4] MARI S G, KATHERINE L W, FARLA L, et al. Bisphenol A: Developmental Toxicity from Early Prenatal Exposure[J]. Birth Defects Research (Part B), 2010, 89(6): 441-466.
- [5] 黎文超,宣爱国,吴元欣,等. 固液平衡的研究进展[J]. 石油化工,2007,36(10): 1067-1069.
- [6] ZVAIGZNE A I, ACREE J W. Solubility of anthracene in binary alkane + 3-methyl-1-butanol solvent mixture[J]. Chem Eng. Data, 1994, 39(4): 708-710.
- [7] ROBERTS K L, ROUSSEAU R W, TEJA A S. Solubility of long-chain n-alkanes in heptane between 280 and 350K[J]. Chem. Eng. Data, 1994, 39(4): 793-795.
- [8] 李玉刚,孔令启,马磊,等. 间苯二甲腈在四种溶剂中溶解度的测定及关联[J]. 高校化学工程学报, 2011, 25(3): 390-394.
- [9] WALAS S M. 化工相平衡[M]. 韩世钧,译. 北京: 中国石化出版社,1991.
- [10] 江燕斌,李凯霞,张扬,等. β -萘甲醚在五种有机溶剂中溶解度的测定与关联[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(6): 911-915.
- [11] BUCHOWSKI H, KSIAZCAK A. Solvent activity along saturation line and solubility of hydrogen-bonding solids[J]. J Phys Chem, 1980, 84(9): 975-979.
- [12] APELBLAT A, MANZUROLA E. Solubilities of O-acetylsalicylic, 3, 5-dinitrosalicylic, and p-toluic acid, and magnesium-DL-aspartate in water from T = (278 to 348)K[J]. J Chem Thermodyn, 1999, 31(1): 85-91.
- [13] 任保增,袁晓亮,唐大惠,等. 三聚氰酸在二甲基亚砷中溶解度的测定与关联[J]. 郑州大学学报:工学版, 2004, 25(1): 57-59.

Measurement and Correlation of the Solubilities of BPA in NaCl Solution

YUE Jin-cai¹, ZHU Nan-nan¹, LIU Xian-hong²

(1. Research Center for Computer and Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;
2. College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The solubilities of BPA in water, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% NaCl solution at 293.15~381.15 K were measured with the equilibrium method. According to the experimental data, the solubilities of BPA in above mentioned 6 solvent systems increased with the increase of temperature, but decreased with the increase of concentration of NaCl solution. The experimental data were correlated with ideal solution model, $\lambda-h$ equation and Apelblat model, respectively. The average relative deviations are 1.88%, 2.83%, 1.57%, respectively. The results showed that ideal solution model, $\lambda-h$ equation and Apelblat model could well correlate the solubility data of BPA, and the three models also can be applied to the ternary system containing electrolyte.

Key words: BPA; equilibrium method; solubility; solubility model

混合液回流比对膜工艺处理效果影响的研究

王素兰, 段胜君, 于洁, 邢传宏

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以混合型城市污水为研究对象,采用膜生物反应器强化脱氮除磷集成工艺,探讨了不同混合液回流比对该工艺脱氮除磷的影响.结果表明,混合液回流比对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 影响不大;随着回流比的增大, TN 的平均去除率逐渐提高,当回流比从 1.5 增加到 2.0 时,随着回流比的增加去除率明显增大,由 2.0 增加到 3.0 时,增加幅度有限; TP 的平均去除率随回流比先增大后减小,在回流比为 2.0 时 TP 平均去除率最大.综合考虑,该工艺的最佳回流比为 2.0.

关键词:膜工艺;脱氮除磷;混合液回流比

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.015

0 引言

膜生物反应器(MBR)以其处理效果好、占地面积少^[1]、剩余污泥产率低^[2]、容积负荷高等独特优点日益受到污水处理界的关注.由于 MBR 工艺能够处理高浓度生活废水、难降解性工业废水,近年来已被广泛应用到生活污水、工业废水、农业废水、畜牧业废水的处理过程中,在脱氮除磷过程中也具有极大潜力^[3].然而,环境因素、水质条件和运行参数等因素仍会制约脱氮除磷的效果.

一般环境因素和水质条件不易人为控制,需根据进水条件的波动范围调整运行参数以期获得良好稳定的出水水质^[4].因此,为取得良好的脱氮除磷的效果,必须对进水流量比、曝气量、污泥回流比、外碳源投加量等运行参数进行合理控制和优化^[5],其中,污泥回流比(R)是一个重要的控制参数,能够维持稳定的活性污泥量和正常的处理过程.调整合适的回流比使 DN/PAOs 的富集程度达到最大,便于在缺氧段为 DN/PAOs 提供足够的电子受体,使其在缺氧段能够同步实现反硝化脱氮与过量吸磷,实现一碳两用,缓解了 PAOs 与反硝化菌对碳源的竞争^[6].

本试验采用膜生物反应器强化脱氮除磷集成工艺,以城市污水处理厂沉砂池出水为研究对象,分析研究了回流比为 1.5、2.0、2.5、3.0 时该工艺

的脱氮除磷效果.

1 材料与方法

1.1 试验装置

MBR 集成工艺流程图见图 1 所示.

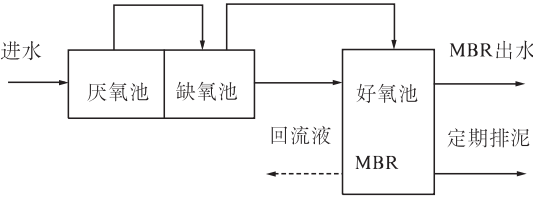


图 1 MBR 集成工艺流程图

Fig.1 Experimental flow chart of MBR process

试验装置由厌缺氧一体池、好氧池(内放置膜组件)组成.装置由有机玻璃制成,厌氧区、缺氧区、好氧区的有效容积分别为 200 L、75 L、300 L.为使污泥充分处于悬浮状态,厌氧区内设搅拌器,缺氧区下部设气管进行搅拌.厌氧区、缺氧区、好氧区的水力停留时间分别为 4.0 h、1.5 h、6.0 h,共 11.5 h.通过排泥控制 SRT 在 15 d. DO 控制在 2~4 mg/L 之间.由于厌氧区与缺氧区设为一体,省去了回流装置,仅设好氧区向缺氧区的回流.

试验膜组件采用的膜材料为耐生物降解的聚偏氟乙烯(PVDF),膜孔径为 0.2 μm ,膜面积为 5.0 m^2 .在膜组件下方进行曝气,使空气形成上浮

收稿日期:2013-09-07;修订日期:2013-11-13

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07210-001-001)

作者简介:王素兰(1971-),女,河南安阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事水污染控制理论与技术研究,E-mail: wangsl@zzu.edu.cn.

的微气泡,在曝气的同时,又使膜表面产生一定的剪切应力,利于膜的表面除污,降低膜表面大分子物质的沉积.

1.2 试验用水和接种污泥

试验在某城市污水处理厂进行,试验进水为该厂二期沉砂池出水,经高位水箱提升后进入试验装置.设计进水流量为 $41.7\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$. 进水水质特征见表 1.

表 1 水质特征

Tab. 1 Influent quality

指标	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH
范围	221~947	17.5~29.1	1.67~11.2	14~58	6~8

试验接种污泥取自该污水处理厂二沉池的回流污泥.

1.3 监测指标及方法

该试验的监测指标及方法如表 2 所示.

表 2 监测指标及方法

Tab. 2 Monitoring guidelines and methods

序号	指标	方法	测量仪器
1	DO	哈希便携式 DO 仪测定法	哈希 sension6 DO 仪
2	TP	哈希快速测定法	哈希 DR2800 便携式分光光度计
3	$\text{NH}_3\text{-N}$	哈希快速测定法	哈希 DR2800 便携式分光光度计
4	$\text{NO}_3\text{-N}$	国标法 ^[7]	离子色谱仪
5	$\text{NO}_2\text{-N}$	国标法 ^[7]	紫外可见分光光度计
6	TN	哈希快速测定法	哈希 DR2800 便携式分光光度计
7	COD	哈希快速测定法	哈希 DR2800 便携式分光光度计

2 结果与讨论

2.1 混合液回流比对 COD 去除效果的影响

不同回流比下 COD 的去除效果见图 2 所示. 试验期间,进水 COD 浓度在 $221\sim 947\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,出水 COD 稳定,基本低于 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,只有个别天出水 COD 浓度略高于 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 COD 的平均浓度为 26.22 mg/L ,平均去除率为 94.23% ,最高去除率可达 98.53% ,优于 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准.

在回流比为 1.5、2.0、2.5、3.0 时,出水 COD 的平均浓度分别为 23.3 mg/L 、 26.68 mg/L 、 24.50 mg/L 、 31.16 mg/L ,平均去除率为 93.87% 、

93.13% 、 94.42% 、 95.48% . COD 平均去除率变化有限,故回流比对 COD 的去除效果影响不大. 分析图 2 可得,当回流比等于 1.5 时,COD 在厌氧区、好氧区下降幅度较大,COD 主要被聚磷菌、好氧异养菌及反硝化菌所利用,相比较缺氧区的降低幅度较小,主要是当回流比较小时反硝化菌在缺氧区可利用的电子受体较少,反硝化菌的活性受到抑制;当回流比大于 2 时,厌氧区、缺氧区下降幅度较大,在好氧区下降幅度较小,分析原因:一方面,回流比越大,缺氧区的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 或硝态氮负荷越高,需要的 COD 越多,反硝化越充分;另一方面,提高缺氧区的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 或硝态氮负荷,DPAOs 的活性越强,厌氧区吸收的 VFAs 越多,COD 在厌氧区的降幅越大^[8]. 另外,膜的截留作用对胶体和颗粒状态的 COD 去除效果加强,进一步提高了出水水质^[9].

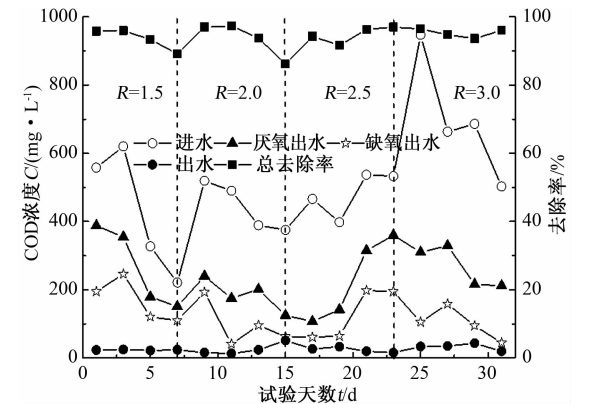


图 2 不同回流比下 COD 的去除效果图
Fig. 2 The diagram of COD removal effect on different reflux ratio

2.2 混合液回流比对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果的影响

不同回流比下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果见图 3 所示.

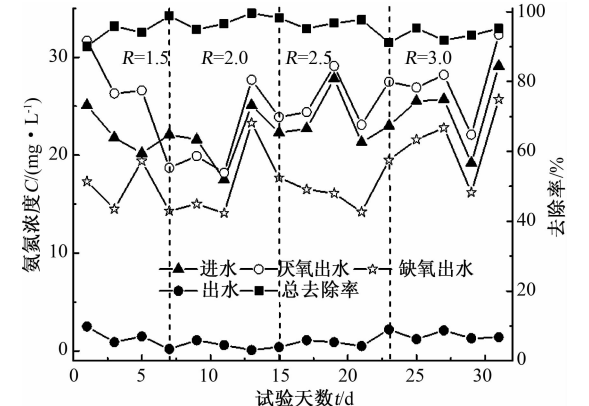


图 3 不同回流比下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果图
Fig. 3 The diagram of $\text{NH}_3\text{-N}$ removal effect on different reflux ratio

由图 3 知, 试验期间, 进水氨氮浓度维持在 $17.5 \sim 29.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 出水氨氮的平均浓度为 $1.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 93.88%。试验过程中较高的曝气量和较高的污泥浓度为硝化过程创造了良好的条件, 即使在低温条件下仍能取得较好的硝化效果^[10]。氨氮主要在好氧池内通过硝化作用得到去除, 另外膜的截留作用进一步提高了出水水质。

在回流比为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 时, 出水氨氮的平均浓度分别为 1.52, 1.30, 1.30, 1.38 mg/L , 平均去除率为 93.53%, 94.03%, 94.59%, 94.30%。各种回流比条件下, 出水氨氮的平均浓度均小于 2 mg/L , 平均去除率在 94% 左右, 可见回流比对氨氮的去除效果影响不大。

2.3 混合液回流比对 TN 去除效果的影响

不同回流比下 TN 的去除效果见图 4 所示。

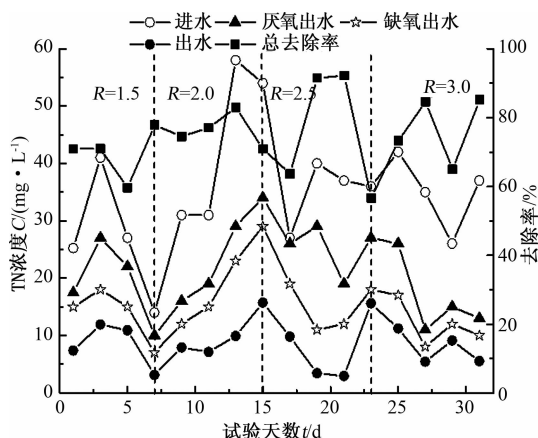


图 4 不同回流比下 TN 的去除效果图

Fig. 4 The diagram of TN removal effect on different reflux ratio

试验期间, 进水 TN 浓度在 $14 \sim 58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 变化范围较大, 但出水基本低于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TN 的平均浓度为 $9.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 74.59%, 优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。

在回流比为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 时, 出水 TN 的平均浓度分别为 8.55, 9.36, 7.52, 7.44 mg/L , 平均去除率为 70.44%, 76.13%, 77.44%, 77.97%。随着回流比的增大, TN 的平均去除率逐渐提高, 当回流比从 1.5 增加到 2.0 时, 随着回流比的增加去除率明显增大, 由 2.0 增加到 3.0 时, 增加幅度有限。分析原因: 回流比增加可为缺氧段提供更多的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 作为反硝化反应的电子受体, 有利于系统脱氮, 但当回流比增大时, 由硝化液携带进入缺氧段的氧也会增加, 增大到一定量时就

会抑制反硝化菌的活性。

2.4 混合液回流比对 TP 去除效果的影响

不同回流比下 TP 的去除效果见图 5 所示。

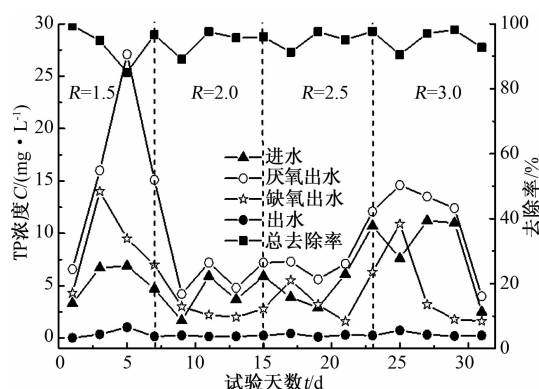


图 5 不同回流比下 TP 的去除效果图

Fig. 5 The diagram of TP removal effect on different reflux ratio

由图 5, 进水 TP 浓度在 $1.67 \sim 11.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 出水 TP 的平均浓度为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 93.62%, 最高去除率为 99.46%, 优于 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。

在回流比为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 时, 出水 TP 的平均浓度分别为 0.37, 0.19, 0.32, 0.46 mg/L , 平均去除率为 94.39%, 95.18%, 94.26%, 93.92%。随着回流比的增大, TP 的平均去除率先增大后减小, 在回流比为 2.0 时最大。分析原因: 回流比较大时, 回流液中含有大量硝酸盐, 因此引起反硝化菌的优势生长, 而释磷菌被淘汰, 影响厌氧区磷的释放, 同时 PHB 也不能生成导致缺氧区吸磷量降低。也有研究表明^[11]: 磷的去除效果在很大程度上取决于缺氧环境中的硝酸盐浓度, 硝酸盐浓度不足则磷的过量摄取受限, 硝酸盐浓度过高时带入厌氧段的硝酸盐会影响磷的释放。

3 结论

(1) 该集成工艺对混合型城市污水具有良好的脱氮除磷效果。系统正常运行情况下, COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 94.23%, 93.88%, 74.59%, 93.62%, 平均出水浓度分别为 26.22, 1.42, 9.51, 0.32 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各指标出水均优于 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。

(2) 混合液回流比对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 影响不大; 随着回流比的增大, TN 的平均去除率逐渐提高, 当回流比从 1.5 增加到 2.0 时, 随着回流比的增

加去除率明显增大,由 2.0 增加到 3.0 时,增加幅度有限;TP 的平均去除率随回流比先增大后减小,在回流比为 2.0 时 TP 平均去除率最大. 综合考虑系统能耗和去除效果,该工艺的最佳回流比为 2.0.

参考文献:

[1] ADHAM S,GAGLIARDO P,BOULOS L, et al. Feasibility of the membrane bioreactor process for water rec-lamation[J]. Water Science and Technology, 2001, 43(10):203-209.

[2] TRUSSELL R S,MERLO R P. HERMANOWICZ S W, et al. Influence of mixed liquor properties and aeration intensity on membrane fouling in a submerged mem-brane bioreactor at high mixed liquor suspended solids concentrations[J]. Water Res. , 2007, 41(5):947-958.

[3] 陈晓阳,薛智勇,肖景霓,等. 曝气强度对 AOA 膜生-物反应器脱氮除磷性能的影响[J]. 环境科学 , 2011,32(10):2979-2985.

[4] 李艳平,刘强,李思敏,等. 改良型氧化沟脱氮除磷-的正交试验研究[J]. 河北工程大学学报,2011,8

(3):42-46.

[5] 王伟,彭永臻,孙亚男,等. 污泥回流比对分段进水 A/O 生物脱氮工艺的影响[J]. 中国环境科学, 2008,28(2):116-120.

[6] 王朝朝,李军,陈瑜,等. 强化除磷膜生物反应器的-缺氧吸磷特性[J]. 中国给水排水,2011,27(19):1-5.

[7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:104-106.

[8] 陈永志,彭永臻,王建华,等. A2/O 一曝气生物滤池-工艺反硝化除磷[J]. 化工学报,2011,62(3):797-804.

[9] 王朝朝,李军,高金华,等. A2O/MBR 的抗冲击负荷-性能与脱氮除磷优化[J]. 中国给水排水,2010,26(21):38-42.

[10] 陆继来,程兵,任洪强,等. A/O MBR 同步脱氮除磷-技术研究[J]. 中国给水排水,2010,26(11):68-70.

[11] 刘爱萍,李开明,陈中颖,等. 膜生物反应器同步脱-氮除磷研究进展[J]. 工业水处理,2006,26(7):1-3.

Study on the Effect of Mixed Liquid Recycle Ratio on Membrane Process

WANG Su-lan, DUAN Sheng-jun, YU Jie, XING Chuan-hong

(School of Water Conservation and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to discuss the nitrogen and phosphorus removal effect under different reflux ratio in the process,the mixed municipal wastewater was used as the research object and the membrane bioreactor process of enhanced nitrogen and phosphorus removal was used to do the pilot study. The results show that,mixed liq-uid recycle ratio had little effect on COD,NH₃-N removal; when the reflux ratio increased,the average removal rate of TN increased gradually,while the reflux ratio increasing from 0.5 to 2,the removal rate increased signif-icantly,and while increasing from 2 to 3,the increased amplitude was limited. With reflux ratio increasing ,the average removal rate of TP increased first and then decreased,when the reflux ratio was 2,the average removal rate of TP was largest. On comprehensive consideration,the optimum reflux ratio of the process is 2.

Key words: membrane process; phosphorus removal and nitrogen removal; mixed liquid recycle ratio

文章编号:1671-6833(2014)01-0068-05

乙二胺硅胶材料固定床吸附铜离子的研究

范忠雷, 查会平, 王玲慧

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 合成了胺基含量为 1.35 mmol/g 的乙二胺硅胶材料(EDA/SiO₂), 考察了溶液流速、初始浓度、装填量对其动态吸附性能的影响, 研究了该体系 Thomas 模型参数与操作条件的关系. 结果表明 EDA/SiO₂ 能有效除去水中的铜离子, 随着溶液初始浓度的增大、流速的加快, 使穿透时间缩短, 实验发现溶液初始浓度和吸附剂装填量对 Thomas 模型参数的平衡吸附容量 q_0 影响显著, 流量 Q 对 k_{th} 的影响显著. 通过离子吸附剂比强度建立了模型参数 q_0 与 C_0/m 呈线性关系, 其方程式为: $q_0 = 0.0234C_0/m + 0.257$. 该关联方程能够描述吸附操作条件与穿透曲线的关系, 为该材料的应用提供一定的实验依据.

关键词: 乙二胺硅胶材料; 固定床吸附; Cu²⁺; Thomas 模型

中图分类号: TQ424.24

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.016

0 引言

工业生产中常产生大量的含铜废水, 不加治理则会对环境和生物体造成严重危害. 根据含铜废水的特点, 目前处理方法主要有化学沉淀、电解法、铁置换法、铁氧体法及其它综合的处理方法, 但这些方法后处理普遍复杂, 操作费用高, 有些方法对铜资源不能有效回收, 甚至会产生二次污染或难以处理低浓度的重金属废水^[1-3]. 多胺型硅胶材料由于表面负载大量的氨基, 可与低浓度重金属离子螯合而显示出优良的吸附性能和机械稳定性, 正被广泛应用于重金属离子的分离、富集及环境保护等方面^[4-8]. 如 Rosenberg 课题组^[5-6] 和 Gao 等^[7] 将聚乙烯亚胺接枝到硅胶表面合成的螯合材料对 Cu²⁺、Zn²⁺、Ni²⁺、Pb²⁺ 等重金属离子表现出优良的吸附和选择性能. 范忠雷等^[8] 合成的聚烯丙基胺硅胶材料对 Cu²⁺ 具有高的吸附容量和良好的稳定性, 但是这些聚胺电解质价格昂贵, 在一定程度上限制了这些材料的应用. 为了开发廉价的吸附材料, Sales 等^[9] 以含环氧基团的三甲氧基硅烷为偶联剂, 先用乙二胺对该偶联剂功能化, 再通过烷基化对硅胶表面进行改性, 合成了一类乙二胺改性硅胶材料. 其后, 笔者以氯丙基三氯硅烷为偶联剂, 通过先烷基化后接枝的方法将乙二胺接枝到硅胶表面(EDA/SiO₂)^[10-11]. 笔者在此基础上, 通过固定床系统对 EDA/SiO₂ 材料进行

了动态吸附实验, 考察了吸附操作条件对材料穿透曲线的影响, 利用离子/吸附剂比强度对 Thomas 模型的模型参数进行了关联, 得到该吸附体系的动态模型参数与操作条件的关系, 为其应用提供一定的实验依据.

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

乙二胺硅胶材料(EDA/SiO₂) 自制; 硫酸铜等所用试剂均为分析纯; 铜溶液由 CuSO₄ 与去离子水配制, 其 pH 值通过盐酸和氢氧化钠溶液调至 4.0 ± 0.1.

UV-2102PC 型紫外可见分光光度计, 上海尤尼柯仪器有限公司; PHS-3C 型酸度计, 上海大中分析仪器厂; BT-100-2J 恒流蠕动泵, 保定兰格恒流泵有限公司.

1.2 EDA/SiO₂ 的制备

按照文献[10]的方法, 用 1 mol/L 的硝酸对硅胶进行活化处理, 洗涤干燥后在室温下和氯丙基三氯硅烷反应 16 h 生成 CPTCS-SiO₂. 然后将 15 g CPTCS-SiO₂ 置于乙二胺甲醇溶液中, 333 K 反应 16 h 合成 EDA/SiO₂ 材料. 按照文献[10-11]的方法, 测定 EDA/SiO₂ 材料的胺基含量为 1.35 mmol/g.

1.3 固定床吸附实验

吸附柱为内径 12.5 mm、长约 60 mm 的带橡

收稿日期:2013-09-20; 修订日期:2013-11-20

基金项目:河南省重点科技攻关计划资助项目(112102210237); 郑州大学研究生教育支持基金

作者简介:范忠雷(1972-), 男, 河南沁阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事吸附功能材料研究, E-mail: zhlfan@zzu.edu.cn.

胶活塞的聚丙烯柱.采用干法装柱,吸附前用去离子水冲洗吸附柱赶去气泡.吸附过程中为减少溶液沟流,柱底部入口加装筛板和滤纸,柱上部出口垫一层脱脂棉.吸附操作时,用恒流泵将一定浓度的铜溶液自下而上通过吸附床,环境温度处于 15℃~20℃.定时取样,测定流出液中 Cu^{2+} 的浓度.规定流出液中铜浓度为进料液浓度的 10% ($C_t/C_0=0.1$) 时对应的时间为穿透时间 (t_a),具体数值通过线性内插法确定;50% 时对应的时间用 t_b 表示;90% 时对应的时间为耗竭时间 (t_c).

1.4 吸附模型

Thomas 吸附动力学模型^[12-13]常用来描述吸附柱的穿透曲线,并能计算出饱和吸附容量及吸附速率常数,其表达式为

$$C_t/C_0 = \frac{1}{1 + \exp[k_{Th}(q_0m - C_0V_{eff})/Q]} \quad (1)$$

式中: k_{Th} 是 Thomas 速率常数, $\text{L}/(\text{min} \cdot \text{mmol})$; q_0 是平衡时单位吸附剂吸附金属离子的量, mmol/g ; m 是柱中吸附剂的质量, g ; C_0 是吸附质的初始浓度, mmol/L ; C_t 是吸附质的流出浓度, mmol/L ; V_{eff} 是流出体积, L ; Q 是柱流速, L/min .

把 Thomas 模型线性化,化简后得到

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t} - 1\right) = k_{Th}q_0m/Q - k_{Th}C_0V_{eff}/Q = k_{Th}q_0m/Q - k_{Th}C_0t. \quad (2)$$

其简化形式为

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t} - 1\right) = At + B. \quad (3)$$

式中: $t = V_{eff}/Q$, 为流出时间, min ; 在给定的实验条件下, $A = -k_{Th}C_0$ 和 $B = k_{Th}q_0m/Q$ 为常数.

通过 Thomas 模型预测的吸附操作时间 t_{theo} 与实验吸附时间 t 的误差通过下式计算:

$$\varepsilon = \frac{t - t_{theo}}{t} \times 100\%. \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 溶液流量对穿透曲线的影响

在其他条件相同(固定床吸附剂装填量 1.0 g、操作温度室温、初始浓度为 5 mmol/L、pH 为 4.0 的硫酸铜溶液),改变铜溶液流量进行动态吸附试验,并以吸附时间 t 为横坐标,相对浓度 C_t/C_0 为纵坐标,绘制系统的穿透曲线,结果见图 1.以吸附时间为自变量, $\ln(C_0/C_t - 1)$ 为因变量,通过 Thomas 线性化模型对图 2 中数据进行拟合,得到拟合线性方程系数 A 和 B ,由此计算 EDA/SiO₂ 材料平衡吸附容量和吸附速率常数,结果见表 1(实验 1~4).

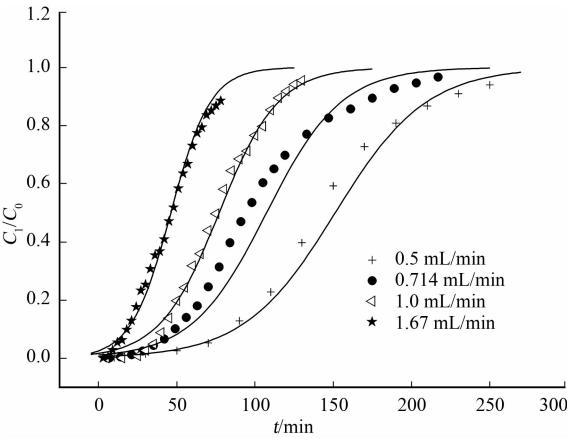


图 1 不同流速下的动态吸附曲线
Fig. 1 Breakthrough curves of Cu^{2+} at different flow rates

由图 1 可以知道,铜溶液流量为 0.5,0.714,1.0,1.67 mL/min 时,其穿透曲线的穿透时间 (t_a) 为 82.5,49,41.2 和 18.2 min,这表明 EDA/SiO₂ 材料对 Cu^{2+} 的穿透时间随着溶液流量的增加而缩短.表 1 则说明溶液流量增大,Thomas 速率常数逐渐增加,而饱和吸附量基本维持不变.分析认为增加流速,能有效减小材料表面液膜阻力,提高材料表观整合速率常数.由于 EDA/SiO₂ 材料以大孔硅胶为基体,且对铜离子整合的官能团全部位于基体表面,能迅速捕获靠近其表面的铜离子,因此其吸附量主要由材料表面官能团数量决定,即流速对材料吸附量的影响不显著.

2.2 溶液初始浓度对穿透曲线的影响

控制吸附剂量 1.0 g、溶液流量为 0.714 mL/min,考察铜溶液初始浓度对 EDA/SiO₂ 材料穿透曲线和吸附参数的影响.结果见图 2 和表 1 (实验 5~7).

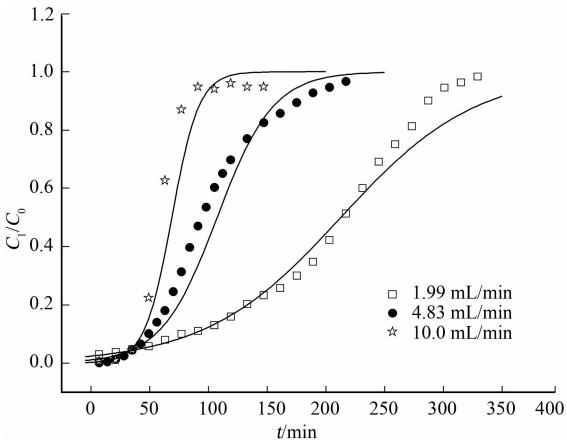


图 2 不同初始浓度铜溶液的穿透曲线
Fig. 2 Breakthrough curves of Cu^{2+} at different influent concentrations

表 1 不同操作条件下的 Thomas 动态吸附模型参数

Tab.1 The dynamic adsorption parameters of Thomas model at different operating conditions

编号	$Q/$ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	$C_0/$ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	m/g	A	B	R	$K_{\text{Th}}/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mmol}^{-1})$	$q_0/$ ($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$)
1	0.5	4.93	1.0	-0.032 7	4.951	0.992	0.006 6	0.373
2	0.714	4.83	1.0	-0.036 3	3.946	0.975	0.007 5	0.375
3	1.0	4.8	1.0	-0.064 0	5.068	0.981	0.013 3	0.380
4	1.67	4.8	1.0	-0.075 3	3.568	0.991	0.015 7	0.379
5	0.714	1.99	1.0	-0.021 1	4.048	0.978	0.010 6	0.272
6(2)	0.714	4.83	1.0	-0.036 3	3.946	0.975	0.007 5	0.375
7	0.714	10.0	1.0	-0.084 3	5.625	0.972	0.008 4	0.476
8(2)	0.714	4.83	1.0	-0.036 3	3.946	0.975	0.007 5	0.375
9	0.714	4.87	1.5	-0.038 7	5.945	0.987	0.007 9	0.356
10	0.714	4.86	2.0	-0.043 6	8.271	0.975	0.009 0	0.329
11	0.714	4.88	3.0	-0.029 7	7.070	0.965	0.006 1	0.277

从图 2 看出,在相同流速下,铜初始浓度为 1.99、4.83 和 10.0mmol/L 时,其穿透曲线的穿透时间为 77、49 和 39.3 min,而且穿透曲线在穿透至饱和阶段的曲线随初始浓度的增加而变得更为陡峭,这表明 EDA/SiO₂ 材料对 Cu²⁺ 的穿透时间随着溶液初始浓度的增加而缩短,材料对铜离子的吸附速度随溶液初始浓度的增加而增加. 表 1 的拟合结果表明,随着铜初始浓度增加,EDA/SiO₂ 材料的平衡吸附量逐渐增大.

2.3 吸附剂装填量对穿透曲线的影响

控制溶液流量为 0.714 mL/min,铜初始浓度相同条件下,考察吸附剂装填量对穿透曲线和吸附参数的影响. 结果见图 3 和表 1(实验 8~11).

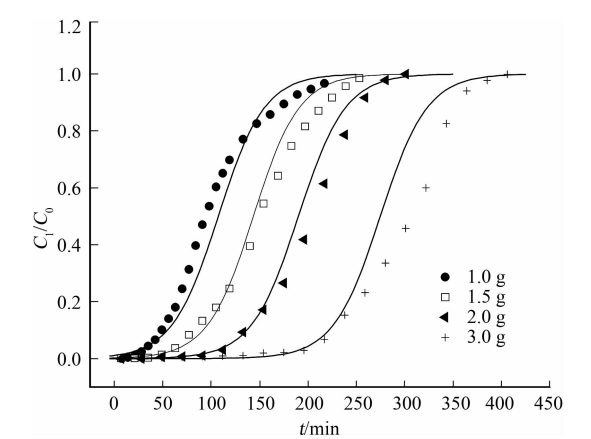


图 3 不同吸附剂装填量的穿透曲线
Fig.3 Breakthrough curves of Cu²⁺ at different amounts of adsorbent

由图 3 可知,EDA/SiO₂ 材料的装填量为 1.0、1.5、2.0 和 3.0 g 时,穿透曲线的穿透时间为 49、81.7、134.9 和 224.9 min,这表明 EDA/SiO₂ 材料对 Cu²⁺ 的穿透时间随着材料装填量的增加而延

长,且穿透时间与材料装填量呈线性相关. 对同一吸附柱,EDA/SiO₂ 装填量的增加也即吸附床高度的增加,这使得该材料吸附 Cu²⁺ 的吸附位点增多、停留时间延长,有利于 Cu²⁺ 的去除.

2.4 EDA/SiO₂ 对 Cu²⁺ 动态吸附模型的关联与预测

在给定的实验条件下,Thomas 吸附动力学模型能描述 EDA/SiO₂ 吸附柱的穿透曲线,并能计算出饱和吸附容量及吸附速率常数,拟合方程相关系数在 0.965 以上(见表 1). 从 Thomas 模型可知,式(1)中 m 、 C_0 和 Q 是初始操作条件,已知; C_t 是与吸附时间 t 对应的待测流出液浓度; k_{Th} 和 q_0 与吸附剂种类和操作条件密切相关,吸附剂确定后,二者由吸附操作温度、 m 、 C_0 和 Q 等因素决定. 因此如果能通过动态实验来求取系统的 k_{Th} 和 q_0 ,那么就可以根据 Thomas 吸附动力学模型来预测该动态吸附体系的穿透曲线和动态过程参数.

对 EDA/SiO₂ 固定床体系,由表 1 可见操作条件对模型参数(k_{Th} 和 q_0) 的影响是不同的,其中溶液初始浓度 C_0 和吸附剂质量 m 对 q_0 影响显著,流量 Q 的影响不显著,因此假定 q_0 是 m 和 C_0 的函数;在吸附操作范围内, k_{Th} 的变化范围不大,且流量 Q 对 k_{Th} 的影响最显著,因此假定 k_{Th} 仅是 Q 的函数. 在上述假定前提下,把表 1 数据按离子吸附剂比强度 C_0/m 的大小进行排序,结果见表 2.

由表 2 可以看出 q_0 是 m 和 C_0 的函数,与 Q 无关,且其大小与 C_0/m 呈线性关系,其线性关系式为 $q_0 = 0.023\ 4C_0/m + 0.257$,相关系数 R 为 0.957. 也发现 k_{Th} 随 C_0/m 的变化没有规律性,影响因素较多,但是其大小随 Q 的变化有一定规律性. 因此在假定前提下,仅考虑流量 Q 对 k_{Th} 的影

表 2 离子/吸附剂比对 Thomas 模型参数的影响

Tab.2 The dynamic adsorption parameters of Thomas model at different ion/adsorbent ratios									
编号	7	1	2	3	4	9	10	5	11
C_0/m	9.99	4.93	4.83	4.80	4.79	3.25	2.43	1.99	1.63
$K_{Th}/(L \cdot min^{-1} \cdot mmol^{-1})$	0.0084	0.0066	0.0075	0.0133	0.0157	0.0079	0.0090	0.0106	0.0061
$q_0/(mmol \cdot g^{-1})$	0.476	0.373	0.375	0.380	0.379	0.356	0.329	0.272	0.277

响时,由表 1(实验 1-4)数据可得到 k_{Th} 与 Q 的函数关系为: $k_{Th} = 0.008\ 1Q + 0.002\ 9$,相关系数 $R = 0.934$.

根据 k_{Th} 和 q_0 的拟合方程,建立了 EDA/SiO₂ 材料固定床 Thomas 模型与不同操作条件的联系,以此来预测吸附时流出液浓度与吸附时间的关系.根据拟合方程能求出的不同条件下的固定床系统的 K_{Ththeo} 和 q_{0theo} 值,见表 3.把 K_{Ththeo} 和 q_{0theo} 值和相应的吸附操作参数代入公式 3,可得到具体

吸附操作条件下的 Thomas 模型,利用这些模型可求得流出液浓度 C_t 与吸附操作时间 t 之间的关系,预测结果见图 1-图 3 中的拟合曲线.拟合曲线显示该模型能较好地预测不同溶液流量、溶液初始浓度和吸附剂装填量条件下吸附操作时间与流出液浓度之间的关系.为定量比较,选取流出液中 Cu²⁺ 为进料液浓度的 10%、50%、90% 时对应的时间与模型预测时间进行比较,所得结果见表 3.

表 3 Thomas 动态吸附模型参数与吸附时间预测结果

Tab.3 The dynamic adsorption parameters of Thomas model and predicted breakthrough times								
编号	$K_{Ththeo}/(L \cdot min^{-1} \cdot mmol^{-1})$	$q_{0theo}/(mmol \cdot g^{-1})$	t_a/t_{atheo}	t_b/t_{btheo}	t_c/t_{ctheo}	$\varepsilon_a/\%$	$\varepsilon_b/\%$	$\varepsilon_c/\%$
1	0.007 0	0.373	82.5/87.1	140.5/151.2	225.6/215.4	-5.55	-7.64	4.53
2	0.008 7	0.370	49/55.0	94.2/107.4	177.4/159.8	-12.28	-13.99	9.91
3	0.011 0	0.370	41.2/35.4	75.2/77.0	116.0/118.6	14.06	-2.46	-2.24
4	0.016 4	0.369	18.2/18.3	46.8/46.1	80.7/74.0	-0.66	1.45	8.33
5	0.008 7	0.304	77/86.8	215.0/214.0	287/341.1	-12.75	0.47	-18.86
6(2)	0.008 7	0.370	49/55.0	94.2/107.4	177.4/159.8	-12.28	-13.99	9.91
7	0.008 7	0.491	39.3/43.5	58.6/68.8	82.3/94.1	-10.73	-17.49	-14.36
8(2)	0.008 7	0.370	49/55.0	94.2/107.4	177.4/159.8	-12.17	-13.91	9.95
9	0.008 7	0.333	81.7/91.8	149.8/143.7	220.0/195.7	-12.32	4.06	11.06
10	0.008 7	0.314	134.9/128.9	204.7/181.0	256.4/233.1	4.42	11.60	9.09
11	0.008 7	0.295	224.9/202.4	307.3/254.2	356.7/306.0	10.03	17.27	14.19

由表 3 可知,用上述方法建立的 Thomas 模型能较好地预测吸附操作过程中流出液浓度 C_t 与吸附操作时间 t 之间的关系,预测的穿透时间 t_{atheo} 、 t_{btheo} 、和耗竭时间 t_{ctheo} 与实验测定值比较接近,最大误差小于 18.86%.

3 结论

- (1) 固定床中 EDA/SiO₂材料装填量、铜溶液流量和初始浓度对穿透曲线都有显著影响.在其它条件相同,随着吸附剂装填量的增加,固定床穿透时间延长;随铜溶液初始浓度的增大、流速的加快,穿透时间急剧缩短.
- (2) 用 Thomas 模型处理实验数据,发现流量 Q 对 k_{Th} 的影响显著,溶液初始浓度和吸附剂装填

- 量对平衡吸附容量 q_0 影响显著,且 q_0 与离子吸附剂比强度 C_0/m 呈线性关系,由此建立了 q_0 与操作条件 m, Q 和 C_0 的线性关系式为: $q_0 = 0.023\ 4C_0/m + 0.257$,相关系数 R 为 0.957.
- (3) 建立了 EDA/SiO₂材料在不同操作条件下 Thomas 模型的具体关联方程,方程能够描述该固定床体系操作条件与穿透时间的关系,预测误差小于 18.86%.
- 参考文献:
- [1] 王韬,李鑫钢,杜启云.含重金属离子废水治理技术的研究进展[J].化工环保,2008,28(4):323-326.

[2] 崔玉民,张颖,苏凌浩.从糖精废水中提取金属铜及废水综合利用[J].过程工程学报,2006,6(3):

- 418–422.
- [3] 刘蕾, 李亚林, 刘焕平, 等. 复合硫化法处理工业酸性含铜废水[J]. 工业水处理, 2009, 29(9): 54–57.
- [4] EL-NAHHAL I M, EL-ASHGAR N M. A review on polysiloxane-immobilized ligand systems: Synthesis, characterization and applications [J]. Journal of Organometallic Chemistry, 2007, 692(14): 2861–2886.
- [5] BEATTY S T, FISCHER R J, ROSENBERG E, et al. Comparison of novel and patented silica–polyamine composite materials as aqueous heavy metal ion recovery materials[J]. Separation Science and Technology, 1999, 34(14): 2723–2739.
- [6] HUGHES M A, NIELSEN D, ROSENBERG E, et al. Structural Investigations of Silica Polyamine Composites: Surface Coverage, Metal Ion Coordination, and Ligand Modification [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, 45: 6538–6547.
- [7] GAO Bao-jiao, AN Fu-qiang, ZHU Yong. Novel surface ionic imprinting materials prepared via couple grafting of polymer and ionic imprinting on surfaces of silica gel particles[J]. Polymer, 2007, 48(8): 2288–2297.
- [8] 范忠雷, 刘海龙, 慎金鸽. PAA/SiO₂ 材料对含铜废水吸附性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(4): 679–684.
- [9] SALES J A A, AIROLDI C. Epoxide silylant agent ethylenediamine reaction product anchored on silica gel-thermodynamics of cation-nitrogen interaction at solid/liquid interface[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2003, 330(1/3): 142–149.
- [10] 范忠雷, 王玲慧, 慎金鸽. 乙二胺接枝硅胶的合成研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(2): 83–86.
- [11] 范忠雷, 王玲慧, 慎金鸽. 乙二胺硅胶复合材料对 Zn²⁺ 的吸附特性[J]. 应用化学, 2010, 27(11): 1260–1264.
- [12] HAN Run-ping, ZOU Wei-hua, LI Hong-kui, et al. Copper(II) and lead(II) removal from aqueous solution in fixed-bed columns by manganese oxide coated zeolite[J]. Journal Hazardous Materials, 2006, 137(2): 934–942.
- [13] FUTALAN C M, KAN C C, DALIDA M L, et al. Fixed-bed column studies on the removal of copper using chitosan immobilized on bentonite[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 697–704.

Fixed Bed Adsorption of Copper Ions on Ethylenediamine-grafted Silica Gel

FAN Zhong-lei, ZHA Hui-ping, WANG Ling-hui

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

Abstract: Ethylenediamine-grafted silica gel(EDA/SiO₂), amino content of which was 1.35 mmol/g, was synthesized. The effects of solution flow rate, initial concentration of Cu²⁺ and the adsorbent amount on the breakthrough characteristics were determined and the relationship of Thomas model parameters and operating conditions of the fixed bed system was studied. The results showed that EDA/SiO₂ could remove Cu²⁺ from aqueous solution efficiently. The breakthrough time decreased with the initial concentration and flow rate of Cu²⁺ solution increasing and the adsorbent amount decreasing. It was also found that there were significant impact of initial concentration and the adsorbent amount on Thomas model parameters q_0 , and solution flow rate Q on the model rate constant k_{Th} . A linear equation, $q_0 = 0.0234C_0/m + 0.257$, was established between the model parameter q_0 and the operating conditions by the ratio of initial ion concentration to adsorbent quantity. With the reified Thomas model, the relationship of the operating conditions and the breakthrough curves can be well predicted, which are useful tools for the adsorption process design in fixed bed column.

Key words: ethylenediamine-grafted silica gel; fixed-bed adsorption; Cu²⁺; Thomas model

文章编号:1671-6833(2014)01-0073-04

二仲丁基二硫醚合成反应动力学研究

胡国勤, 吴培培, 谢帮海, 张素娟

(郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001)

摘 要:研究了氯代仲丁烷和二硫化钠溶液在相转移催化剂的作用下合成二仲丁基二硫醚的反应动力学,建立了动力学模型.该反应属于一级反应,其表观动力学方程: $r_A = -dc_A/dt = 47\ 098.67\exp(-5\ 153.99/T)c_A$,表观活化能为42.85 kJ/mol,介于一般化学反应活化能40~200 kJ/mol之间,属于化学反应控制过程,并对提出的动力学模型进行了实验验证,证实了该模型具有可靠性.

关键词:二仲丁基二硫醚;氯代仲丁烷;二硫化钠;动力学

中图分类号:TQ013.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.017

0 引言

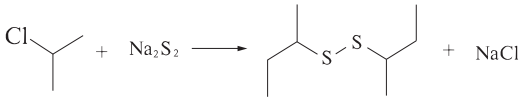
二仲丁基二硫醚是一种重要的精细化工中间体,在农药、生物学、材料、石油化工、染料和食品科学方面有着广泛的用途^[1].近几年,随着下游产品的拓展,二仲丁基二硫醚的市场需求量正在逐年增加,引起了国内外的广泛关注.目前,该产品国外生产企业分布在美国、日本等少数几个国家,而国内企业仅有三门峡奥科化工有限公司、南京康满林化工实业有限公司、江苏三益化工有限公司,产量小,我国二仲丁基二硫醚的使用主要依赖进口^[2].文献报道的二仲丁基二硫醚的合成路线大多采用仲丁硫醇^[3-5]为原料,产率高,但硫醇特别是低碳原子数的硫醇恶臭,对设备腐蚀性强,污染环境,很多国家严格限制其生产和使用,市场供应紧缺,价格高,不便于工业化生产.

鉴于此,本课题组开展了二仲丁基二硫醚的新合成工艺研究,开发了一条以氯代仲丁烷为原料,通过与新配置的二硫化钠溶液亲核取代反应,温和条件下相转移催化合成了二仲丁基二硫醚工艺路线.在研究溶剂对反应的影响时,实验结果表明溶剂的极性越大,产物收率越高,从而得出了极性溶剂对该反应有利的规律.由此初步推断该反应可能为单分子亲核取代反应,反应速度只与氯代仲丁烷的浓度有关.

笔者重点对二仲丁基二硫醚动力学进行了研

究,进一步了解二仲丁基二硫醚的合成过程,验证该反应的机理,为该工艺的工业化生产提供基本工程数据,同时为其它仲卤代烃的亲核取代反应提供基本的理论依据.

氯代仲丁烷和二硫化钠水溶液在催化剂的作用下发生亲核取代反应,反应方程式如下.



为方便起见,以A代表氯代仲丁烷,B代表二硫化钠,C代表二仲丁基二硫醚,D代表氯化钠,反应式可以简化表示为



生成二仲丁基二硫醚的动力学方程为

$r_A = -dc_A/dt = kc_A^a c_B^b$

如果在反应中保持或者看作c_B不发生变化(在反应中,控制B物质大大过量,A缓慢滴加,相对于B来说,滴加的A物质量很少,可看作c_B不发生变化),则上式可以简化为

$r_A = -dc_A/dt = kc_A^a$

为了验证机理及计算动力学数据,实验测定看不同条件下组分A含量随时间的变化关系.

1 实验部分

1.1 主要试剂及仪器

氯代仲丁烷(99%,三门峡奥科化工有限公

收稿日期:2013-09-01;修订日期:2013-11-13
基金项目:河南省科技攻关重点资助项目(112102210236)
作者简介:胡国勤(1967-),男,河南新郑人,郑州大学教授,博士,主要从事精细化工方面的研究,E-mail:huguoqin@zzu.edu.cn.

司);九水硫化钠、升华硫和四丁基溴化铵皆为市售的分析纯。

HH 恒温水浴(江苏金坛市中大仪器厂);GC 9800TFP 气相色谱仪(上海科创色谱仪器有限公司);微量注射器(1 μL , 宁波市镇海三爱仪器厂)。

1.2 实验步骤

在带有电动搅拌和温度计的 250 mL 的三口烧瓶中,加入 200 g 质量分数为 30% 的新配置二硫化钠溶液,23.13 g 氯代仲丁烷(0.25 mol),0.8 g 四丁基溴化铵,在指定的温度下反应,每隔 90 min 取样分析,每次用移液管取 1 mL 的样品.反应体系中,原料氯代仲丁烷和产物二仲丁基二硫醚是不溶于水的,而二硫化钠、四丁基溴化铵和氯化钠都是易溶于水的,所取样品经蒸馏水洗涤,有机相用气相色谱进样分析测定氯代仲丁烷的浓度。

1.3 分析方法

用气相色谱分析不同时间的样品,用面积归一法计算每个样品中氯代仲丁烷的质量百分含量,用氯代仲丁烷相对质量百分含量的变化,确定氯代仲丁烷浓度与时间的关系.色谱条件:柱箱温度为 180 $^{\circ}\text{C}$,汽化温度为 260 $^{\circ}\text{C}$,检测温度为 260 $^{\circ}\text{C}$,柱前压为 0.05 MPa,程序升温:初始温度 180 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min,以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率上升到 240 $^{\circ}\text{C}$,保温 2 min,降温至 180 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 影响因素的排除

在测定反应的本征动力学前,首先应该排除内外扩散对反应的影响^[6-7].该反应为非均相反应,内扩散对反应的影响主要是内扩散阻力,即反应物进入催化剂的内部所遇到的阻力.为了考察催化剂内扩散的影响,取不同量的催化剂用于该实验,实验结果表明当催化剂用量小于 4% 时,氯代仲丁烷的转化率不随催化剂的用量增加而增大,内扩散对反应的影响基本可以排除.通过改变搅拌速度来考察外扩散对反应的影响,经实验发现,搅拌速度大于 180 r/min,外扩散对反应的影响可以排除.每次只取样 1 mL,本反应过程中体积变化不大,因此可以忽略反应液体积的变化对反应的影响。

2.2 反应时间与氯代仲丁烷的关系

本实验测定了 5 种不同温度下氯代仲丁烷浓度与反应时间的关系,实验结果如表 1 所示,由氯

代仲丁烷对反应时间作图,见图 1,可以看出氯代仲丁烷的浓度对反应时间不具有线性相关性,因此该反应不是零级反应,即 $a \neq 0$ 。

假如 $a = 1$,即为一级反应,则

$$kt = -\ln(c_A/c_{A,0}) = -\ln(1 - x_A).$$

针对这种假设,用 $\ln(c_A/c_{A,0})$ 对时间 t 作图,见图 2,可以看出, $\ln(c_A/c_{A,0})$ 对 t 具有良好的线性关系,相关拟合系数如表 2 所示.因此该反应级数为一级假设成立.从而得出了该反应的速率只与氯代仲丁烷的浓度有关,验证了该反应的机理为单分子亲核取代反应。

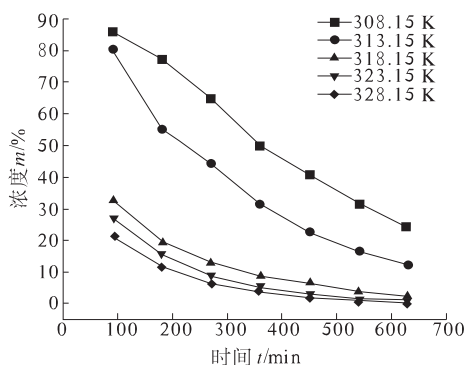


图 1 氯代仲丁烷的浓度与反应时间的关系图

Fig.1 Relation on 2-chlorobutane concentration and reaction time at different temperature

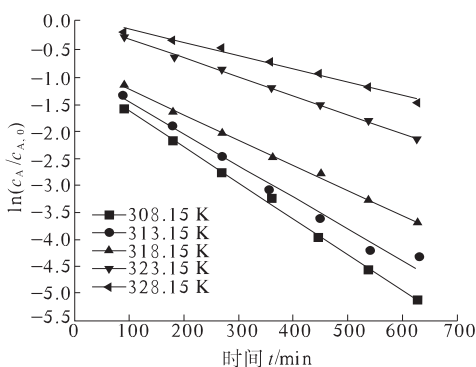


图 2 $\ln(c_A/c_{A,0})$ 与 t 线性关系图

Fig.2 Relation between $\ln(c_A/c_{A,0})$ and t

2.3 反应表观活化能的确定

为了考察反应温度对动力学方程的影响,由 $\ln(c_A/c_{A,0})$ 对 t 拟合出的动力学参数,计算出不同反应温度下表观的反应速率常数 k 值,见表 3,并由 $\ln k$ 对 T^{-1} 作图,如图 3 所示,可以看出, $\ln k$ 对 T^{-1} 良好的线性相关性.根据实验数据,用最小二乘法回归阿伦尼乌斯方程:

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A.$$

表 1 不同温度与时间下氯代仲丁烷的浓度

Tab.1 The result about concentration of 2-chlorobutane at different temperature and reaction time %

T/K	t/min						
	90	180	270	360	450	540	630
308.15	85.94	76.95	64.77	49.95	41.00	31.66	24.13
313.15	80.00	55.40	44.00	31.33	22.62	16.54	12.18
318.15	33.18	19.80	13.10	8.77	6.34	3.87	2.51
323.15	27.11	15.40	8.71	4.89	2.84	1.58	1.36
328.15	21.29	11.55	6.49	3.96	1.98	1.09	0.60

表 2 线性拟合方程

Tab.2 Linear regress equation

T/K	拟合方程	R ²
308.15	y = -0.002 4x + 0.148 4	0.984 4
313.15	y = -0.003 5x + 0.077 5	0.998 4
318.15	y = -0.004 7x - 0.765 7	0.997 0
323.15	y = -0.005 8x - 0.855 5	0.986 0
328.15	y = -0.006 6x - 0.946 0	0.998 7

得到了 ln*k* 与 *T*⁻¹ 的线性关系为

$$\ln k = -\frac{5\,153.99}{T} + 10.76.$$

代入求出活化能 *E*_a 和指前因子 *A*:

$$E_a = 5\,153.99 \times 8.314 = 42\,850.27 = 42.85\text{ kJ/mol},$$

$$A = e^{10.76} = 47\,098.67.$$

表 3 表观反应速率常数 *k* 与 *T*⁻¹ 之间的关系

Tab.3 Relation between the reaction ratio constant *k* and temperature *T*⁻¹

<i>k</i> /min ⁻¹	ln <i>k</i>	<i>T</i> /K	<i>T</i> ⁻¹ /K ⁻¹
0.002 4	-6.032	308.15	0.003 25
0.003 5	-5.666	313.15	0.003 19
0.004 7	-5.369	318.15	0.003 14
0.005 8	-5.146	323.15	0.003 09
0.006 6	-5.022	328.15	0.003 05

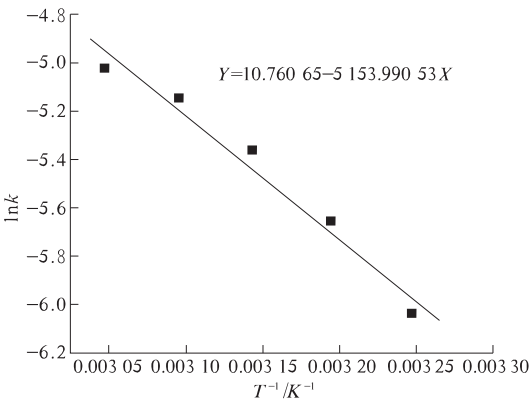


图 3 ln*k* 与 *T*⁻¹ 的线性关系图

Fig.3 Relation between ln*k* and *T*⁻¹

2.4 表观动力学方程的验证

根据以上分析,表观动力学方程可以表示为 $r_A = -dc_A/dt = 47\,098.67\exp(-5\,153.99/T)c_A$. 积分式为: $kt = -\ln(c_A/c_{A,0})$ 或 $c_A = c_{A,0}\exp(-kt)$.

其中: $k = 47\,098.67\exp(-5\,153.99/T)$.

为了验证表观动力学方程的可靠性,在反应温度为 310.15 K 下,用表观动力学方程求出不同反应时间下的氯代仲丁烷的浓度 *c*_{A,cal},与实验所测的浓度 *c*_{A,exp} 相比较,结果见表 4,可以看出,实验值与预测值相符,说明由本实验建立起的表观动力学方程是可靠的.

表 4 温度为 310.15 K 时动力学模型计算的氯代仲丁烷浓度与实验结果的比较

Tab.4 The calculated concentration compared with the experimental concentration for 2-chlorobutane at 310.15 K

序号	<i>t</i> /min	<i>c</i> _{A,cal}	<i>c</i> _{A,exp}	$\frac{c_{A,exp} - c_{A,cal}}{c_{A,exp}} \times 100\%$
1	90	77.32	81.01	4.55
2	180	59.79	59.45	-0.57
3	270	46.22	46.11	-0.24
4	360	35.74	35.31	-1.22
5	450	27.64	27.08	-2.07
6	540	21.37	21.56	0.88
7	630	16.52	16.37	-0.92

3 结论

(1) 通过测定不同反应温度下,氯代仲丁烷与二硫化钠溶液在四丁基溴化铵催化合成二仲丁基二硫醚的反应中各组分的浓度与反应时间的关系,结果表明反应速度只与氯代仲丁烷的浓度有关,且反应级数为一级,验证了该反应的机理为单分子亲核取代反应.

(2) 通过对实验数据进行的拟合,由阿伦尼乌斯方程推导出了该反应表观动力学方程: $r_A =$

$-dc_A/dt = 47\,098.67\exp(-5\,153.99/T)c_A$, 并对其进行了验证, 证实了该方程具有可靠性。

(3) 在反应温度为 308.15 ~ 328.15 K 内, 该反应的表观活化能为 42.85 kJ/mol, 介于一般化学反应活化能 40 ~ 200 kJ/mol 之间, 属于化学反应控制过程。

参考文献:

- [1] SONACANE S U, CHIDAMBARAM M, ALMOG J, et al. Rapid and efficient synthesis of symmetrical alkyl disulfides under phase transfer conditions [J]. Tetrahedron Letters, 2007, 48(34): 6048 - 6050.
- [2] 刘新奇, 谢帮海, 李雯, 等. 三相相转移催化合成二仲丁基二硫醚 [J]. 精细化工, 2012, 29(8): 813 - 815.
- [3] LEINO R, LONNQXIST J E. A very simple method

for the preparation of symmetrical disulfides [J]. Tetrahedron Letters, 2004, 45 (46): 8489 - 8491.

- [4] MONTAZEROZHORI M, JOOHARI S, KARAMI B, et al. Fast and highly efficient solid state oxidation of thiols [J]. Molecules, 2007, 12(3), 694 - 702.
- [5] SUPALE A, GOKAVI G. Oxidation of thiols to disulfides using H_2O_2 catalyzed by recyclable chromic potassium sulphate at room temperature [J]. Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 2008, 93 (1): 141 - 148.
- [6] 张珍, 李华. 异丙硫醇合成反应动力学研究 [J]. 化学试剂, 2009, 31(4): 292 - 294
- [7] 章亚东, 潘开林, 梁政勇. 正十八硫醇的合成反应动力学研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2012, 33 (2): 44 - 47.

Kinetic Study on Synthesis of Di-sec Butyl Disulfide

HU Guo-qin, WU Pei-pei, XIE Bang-hai, ZHANG Su-juan

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

Abstract: Kinetics for synthesizing di-sec butyl disulfide from 2-chlorobutane and sodium disulfide in the presence of phase transfer catalyst was studied in this experiment. And the reaction and the kinetics model of the whole process were established. It was proved to be a first order reaction and the chemical reaction kinetics characterization equation can be expressed as $r_A = -dc_A/dt = 47\,098.67\exp(-5\,153.99/T)c_A$. The activation energy was determined to be 42.85 kJ/mol in the Arrhenius equation. And the reaction of synthesizing di-sec butyl disulfide belonged to control production of chemical reaction because the apparent activation energy was in range of 40 ~ 200 kJ/mol. And to our satisfaction, through experimental verification, the kinetic model was proved to be valid.

Key words: di-sec butyl disulfide; 2-chlorobutane; sodium disulfide; kinetics

粘接界面弹塑性内聚力模型子程序开发

张 军¹, 贾 宏¹, 田 阳²

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 天津大学 化学工程学院, 天津 300072)

摘 要: 基于有限元分析软件 ABAQUS 内聚力单元, 采用自定义材料(VUMAT)编译二维平面状态下弹塑性内聚力模型子程序. 用所编写的弹塑性内聚力模型 VUMAT 子程序对薄板粘接结构的开裂进行模拟计算, 并与双线性内聚力模型、多项式内聚力模型的 VUMAT 子程序模拟结果及实验结果进行对比分析. 结果表明内聚力关系对粘接结构开裂过程的拉力变化影响较大, 对不同胶体的粘接结构应选择相应的内聚力模型.

关键词: 内聚力模型; 本构关系; 自定义材料

中图分类号: TQ340.1

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.018

0 引言

内聚力模型(CZM)是弹塑性断裂力学中一个被广泛应用与研究的计算模型, 近年来, 针对不同的材料性质或结构形式, 发展出各种不同形式的内聚力模型^[1], 使其广泛应用于研究裂纹尖端塑性变形、静力和疲劳条件下的蠕变开裂, 以及岩土材料及混凝土、金属与复合材料界面开裂、粘接结构开裂等问题^[2-3].

随着计算技术和计算机的快速发展, 内聚力模型被越来越多地应用于有限元计算中. 内聚力模型应用于通用有限元软件中时, 部分形式的内聚力模型已经被包含在有限元软件中, 其他形式的内聚力模型应用时必须进行有限元子程序开发. 笔者在大型有限元分析软件 ABAQUS 的平台上, 借用 ABAQUS 的 VUMAT 接口利用 FORTRAN 语言编辑了二维弹塑性内聚力模型, 并通过单元测试验证其准确性. 最后利用编辑的弹塑性内聚力模型对薄板粘接结构的开裂进行了模拟分析.

1 弹塑性内聚力模型 VUMAT 子程序开发

1.1 弹塑性内聚力模型介绍

弹塑性内聚力模型由 Tvergaard and Hutchinson^[4]提出, 模型描述了粘接界面的拉伸力与分离位移的关系, 如图 1 所示.

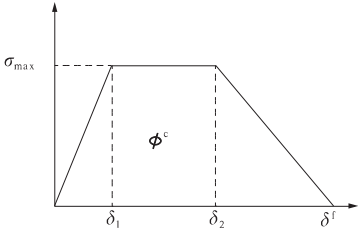


图 1 弹塑性张力-位移关系

Fig. 1 Relationship of elastic and plastic traction-displacement

其控制方程为

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}}{\delta_1} \cdot \delta, & \delta < \delta_1; \\ \sigma_{\max}, & \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2; \\ \frac{\sigma_{\max}}{\delta^f - \delta_2} \cdot (\delta^f - \delta), & \delta_2 \leq \delta \leq \delta^f; \\ 0, & \delta > \delta^f. \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 是粘接界面的张开应力; δ 是张开位移; σ_{\max} 是粘接界面开裂的最大应力; $\delta_1, \delta_2, \delta^f$ 分别为开裂时弹塑性关系的形状参数. 临界的断裂能值 (即张力位移曲线下包含的面积) 为

$$\phi^c = \frac{1}{2} \sigma_{\max} (\delta^f + \delta_2 - \delta_1). \quad (2)$$

1.2 编辑张力位移关系

在 ABAQUS 中, 弹塑性内聚力模型用户材料的子程序 VUMAT 编辑, 主要解决两方面的问题:

收稿日期:2013-10-16; 修订日期:2013-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972200)

作者简介:张军(1967-), 男, 黑龙江大庆人. 郑州大学副教授, 博士, 研究方向为粘接强度与断裂损伤, E-mail: zhang_jun@zzu.edu.cn.

编译张力位移关系和单元破坏的控制^[5-6]. 对于内聚力模型的张力位移关系,应力是通过位移的增加来实现更新,内聚单元分布在上下两层实体单元之间,其中一个单元,如图 2 所示. 图中给出了内聚力单元的节点与积分点分布. 在节点 1、3 之间设置有积分点 1,节点 2、4 之间为积分点 2. 各节点的位移值为: (U_1, V_1) 、 (U_2, V_2) 、 (U_4, V_4) 、 (U_3, V_3) , U 方向为法向, V 方向为切向.

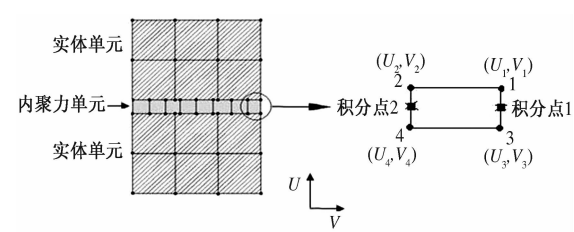


图 2 内聚力单元积分点与节点分布

Fig. 2 Integral points and nodes distribution of cohesive zone

在 VUMAT 中实现内聚力模型的张力 - 位移关系,必须由应变增量计算出界面的开裂位移值. 以积分点 1 为例,法向与切向的应变增量分别为 $(\partial \varepsilon_n, \partial \varepsilon_t)$,需要由 $(\partial \varepsilon_n, \partial \varepsilon_t)$ 计算出 $(\Delta U_{13}, \Delta V_{13})$. 根据内聚力单元应变与位移关系,在积分点的法向与切向应变计算式为

$$\begin{cases} \varepsilon_n = \frac{\Delta U}{T_0}; \\ \varepsilon_t = \frac{\Delta V}{T_0}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_0 为内聚力单元的初始计算厚度.

在 VUMAT 中的第 k 增量步,该步中的各向应变增量为 $(\partial \varepsilon_n^k, \partial \varepsilon_t^k)$,而上一步得到的应变值采用状态变量存储,并传递到该分析步为 $(\varepsilon_n^{k-1}, \varepsilon_t^{k-1})$,由此计算出此时的应变值 $(\varepsilon_n^k, \varepsilon_t^k)$ 为

$$\begin{cases} \varepsilon_n^k = \varepsilon_n^{k-1} + \partial \varepsilon_n^k; \\ \varepsilon_t^k = \varepsilon_t^{k-1} + \partial \varepsilon_t^k. \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)与(4),得到积分点 1 处由应变增量,计算各向位移的表达式为

$$\begin{cases} \Delta U = (\varepsilon_n^{k-1} + \partial \varepsilon_n^k) \cdot T_0; \\ \Delta V = (\varepsilon_t^{k-1} + \partial \varepsilon_t^k) \cdot T_0. \end{cases} \quad (5)$$

由(4)式得到应变增量,来计算各向应力的计算式:

$$\begin{cases} \sigma = f[(\varepsilon_n^{k-1} + \partial \varepsilon_n^k) \cdot T_0]; \\ \tau = g[(\varepsilon_t^{k-1} + \partial \varepsilon_t^k) \cdot T_0]. \end{cases} \quad (6)$$

在 VUMAT 子程序中,可通过设置状态变量

随应力、位移以及断裂能的变化关系. 通过考察状态变量值而控制内聚力单元的损伤与破坏. 通过设置状态变量 SDV11 和 SDV12 来实现单元破坏与控制. 其中状态变量 SDV11 值是根据能量定义的粘接界面破坏扩展失效准则得到的^[7].

$$SDV11 = \frac{\phi_1}{\phi_1^c} + \frac{\phi_2}{\phi_2^c}. \quad (7)$$

状态变量 SDV12 用来控制破坏失效单元的删除,其初始值为 1,当 SDV11 值增加到 1 时,SDV12 值由 1 变为 0,同时,主程序不可逆的删除破坏失效单元.

1.3 单元测试

首先在 ABAQUS/CAE 中创建 CAE 模型,上下基板 10 mm × 10 mm,为实体单元,中间设置一层内聚力单元,厚 1 mm. 如图 3 所示.



图 3 单元测试模型

Fig. 3 Geometry of element test

对下基板底部进行完全固定. 在上基板端部施加 7 mm 的位移载荷,进行纯拉伸测试;在上基板左端施加 4.5 mm 的位移载荷,进行纯剪切测试.

在拉伸测试和剪切测试的计算结果中,选择粘接区域任意一个单元,输出该单元上的张力与位移的关系;状态变量 SDV11、SDV12 与位移的关系如图 4 和 5 所示.

从图上可以看出,张力 - 位移关系 VUMAT 计算值与弹塑性模型解析值完全重合,由此说明 VUMAT 子程序完全复现了弹塑性内聚力模型的张力位移关系. 随着位移值的增加,表征单元破坏程度的状态变量 SDV11 由 0 逐渐增加,当其值增加为 1 时,控制单元删除的变量 SDV12 值由 1 变为 0,可实现单元删除功能.

2 薄板粘结结构开裂模拟计算

在 ABAQUS/CAE 创建薄板粘结结构模型,模型结构参照 Chen Jun 等^[8]的实验模型,为简化计算模型,本研究粘接结构只采用二维的模型. 边

界条件如图 6 所示。

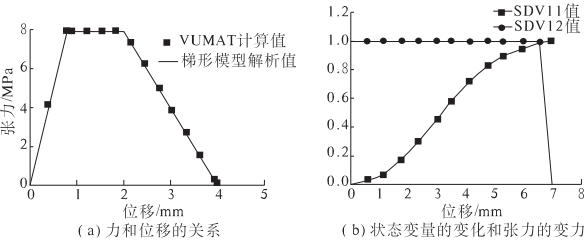


图 4 拉伸单元测试结果
Fig. 4 Result of the tensile element test

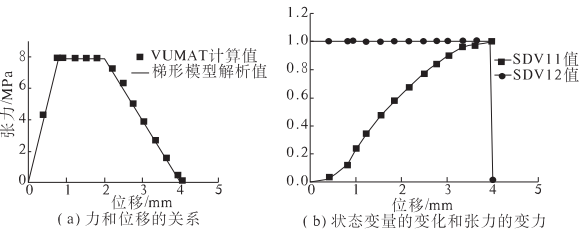


图 5 剪切单元测试结果
Fig. 5 Result of the shear element test



图 6 薄板粘接结构
Fig. 6 Structure of thin plate bonded

结构尺寸为上下基板长 100 mm,厚 0.59 mm. 粘接区域的厚度为 0.03 mm,在结构左端部上下两块基板各施加 11 mm 的位移,右端进行完全固定. 基板及粘接结构材料性质如下。

基板:弹性模量 202.3 GPa,泊松比 0.3;粘接材料:纯法向剥离最大应力 2.1 MPa,两个切向纯剪切的最大应力 7.9 MPa;断裂能为 840 J.

为了研究不同内聚力模型对基板上下拉力的影响,笔者分别采用弹塑性内聚力模型、双线性内聚力模型及多项式内聚力模型的 VUMAT 子程序对该薄板粘接结构的开裂进行模拟计算并与实验结果进行了对比. 三种内聚力模型界面本构关系的参数设置满足断裂能相等原则,具体参数设置如表 1~3 所示。

裂纹尖端的应力分布如图 7 所示. 3 种内聚力模型模拟结果及实验结果的比较,如图 8 所示。

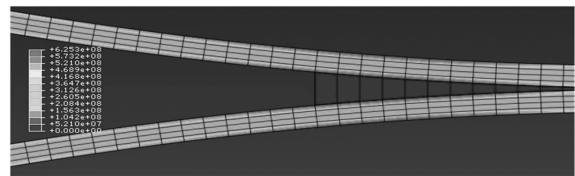


图 7 弹塑性模型模拟的裂纹尖端应力图
Fig. 7 Scheme of crack tip stress of elastic-plastic model simulation

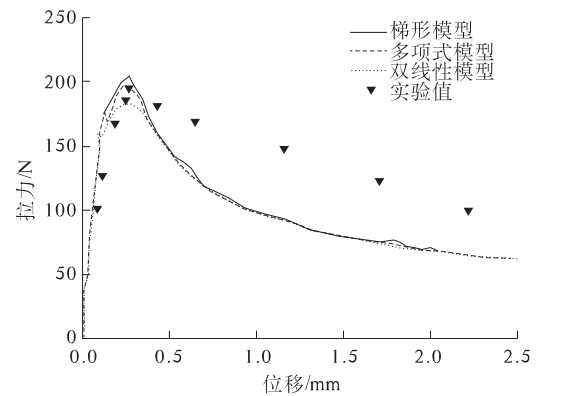


图 8 不同内聚力模型模拟的拉力 - 位移与实验结果对比
Fig. 8 Comparison of the different ZCMs simulation traction-displacement with test result

图中给出了模型计算过程中基板末端的拉力值随基板末端位移的变化. 通过该图可以看出,拉力值随位移变化的规律基本一致. 在最初的裂纹萌生阶段,拉力值随着末端位移的增加而增加,在裂纹增长阶段,随着裂纹的增长拉力进入持续卸载阶段. 这主要是由于随着开裂位移的持续加大裂纹增长,上下基板弯曲程度加大,通过裂纹尖端的应力云图可以看出,裂纹尖端基板上最大应力约为 630 MPa,远大于粘接材料开裂最大应力值 2.1 MPa,促进粘接材料的开裂,从而使拉力进入卸载阶段。

表 1 多项式模型参数
Tab. 1 Parameter of polynomial model

σ_{\max}/MPa	δ_n/mm	a
2.1	0.71	1.00

表 2 双线性模型参数
Tab. 2 Parameter of bilinear model

σ_{\max}/MPa	δ_n/mm	δ_{nl}/mm	τ_{\max}/MPa	δ_t/mm	δ_{tl}/mm
2.10	0.15	0.80	7.90	0.04	0.21

在拉力上升阶段,3 种内聚力模型子程序计算结果与实验测试值吻合良好;主要区别在于不同内聚力模型给出的最大拉力值不同:其中双线性内聚力模型计算的拉力最大值为 187 N,比实验值小,弹塑性内聚力模型计算的拉力最大值为 204.5 N,多项式内聚力模型计算的拉力最大值为 198 N,均比实验值得 191.9 N 值大. 在拉力卸载阶段,3 种内聚力模型子程序计算结果中拉力随位移的卸载曲线基本重合,但拉力随末端位移卸载速率均比实验值大,初步认为是程序所选取的单元失效判据造成的。

表 3 弹塑性模型参数
Tab. 3 Parameter of elastic-plastic model

σ_{\max}/MPa	δ_{n1}/mm	δ_{n2}/mm	δ_{nf}/mm	τ_{\max}/MPa	δ_{t1}/mm	δ_{t2}/mm	δ_{tf}/mm
2.1	0.15	0.30	0.65	7.9	0.04	0.00	0.17

通过上述分析可知,在相同断裂能的原则下,不同张力位移关系对粘接结构脱粘过程中拉力变化的宏观力学现象影响较大,主要表现为最大拉力值的不同.为了利用内聚力模型模拟粘接界面的微观力学行为来反应粘接结构脱粘过程中拉力变化的宏观力学现象,内聚力模型的选取是十分必要的.在此基础上,才能够准确地反应其宏观力学变化,准确预测粘接结构的破坏.

3 结论

笔者借助于 ABAQUS 软件,采用 VUMAT 子程序编辑了弹塑性内聚力模型的子程序,并对编辑的二维平面下的弹塑性内聚力模型子程序进行了单元测试.结果表明,内聚力模型的张力位移关系与内聚力单元相结合的方式,在 ABAQUS 中能够实现准确的模型计算.通过对薄板粘接结构的模拟计算,表明不同内聚力模型对预测粘接结构脱粘过程的影响较大,以此说明选取恰当的内聚力模型对准确计算粘接结构的开裂过程的重要性.

参考文献:

[1] 张军. 界面应力及内聚力模型研究[M]. 郑州: 郑州

大学出版社, 2011.

[2] 康颖安. 断裂力学的发展与研究现状[J]. 湖南工程学院学报, 2006, 16(1): 39-42.
[3] 贾宏, 黄刘刚, 孙维威, 等. 各向异性导电胶膜损伤破坏试验与数值分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2009, 30(2): 31-34.
[4] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1992, 40: 1377-1397.
[5] 杨曼娟. ABAQUS 用户材料子程序开发及应用[D]. 湖北: 华中科技大学桥梁与隧道工程, 2005.
[6] 黄刘刚. 内聚力模型的分析及有限元子程序开发[D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2010.
[7] NEEDLEMAN A. Micromechanical modeling of interfacial decohesion[J]. Ultramicroscopy, 1992, 40: 203-214.
[8] WANG Yong, CHEN Jun, TANG Bing-tao. Finite element analysis for delamination of laminated vibration damping steel sheet[J]. Trans Nonferrous Met. Soc. China, 2007, 17: 455-460.

Development of Subroutine for Elastic-plastic Cohesive Zone
Model of Bonded Interface

ZHANG Jun¹, JIA Hong¹, TIAN Yang²

(1. School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper proposes a way to compile a 2D elastic-plastic cohesive zone model based on the cohesive zone element through user-defined material subroutine (VUMAT) in ABAQUS. The delamination of thin plates is studied using the VUMAT subroutine of elastic-plastic cohesive zone model (CZM). The simulation results are compared with the result of the Bilinear CZM, the Polynomial CZM and the experiments. The results show that the cohesive zone models have great influence on the tensile forces in the progress of delamination, and to choose suitable CZMs for the various adhesives bonded joints.

Key words: cohesive zone model; constitutive relation; VUMAT

成型磁性污泥活性炭的制备与分析

徐正坦, 刘心中

(福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350108)

摘 要:以城市污泥为原料,经氯化锌活化-管式炉热解、活性炭/铁氧化物共沉淀及粘接挤压成型制得一种新型磁性污泥活性炭,并通过正交实验和 BET、SEM、IR 及磁强测定等方法对活性炭制备工艺、各步产物的微观形貌与性能进行了系统研究.结果表明:在氯化锌活化剂浓度为 3 mol/L、热解温度 650 ℃、热解时间 2 h、液固比 2:1 的制备条件下,所得污泥活性炭碘值达 334.6 mg/g,活性炭、磁化活性炭、成型磁化活性炭比表面积均 $\geq 300 \text{ m}^2/\text{g}$,由于该材料使用后可经磁铁方便分离,预期具有很好的实际应用前景.

关键词:污泥;活化;活性炭;成型;磁性

中图分类号: X7

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.019

0 引言

据国家环保部门统计,到 2015 年,我国城镇污水处理率将达到 60%,届时每年全国污泥产生量将达到 3 560 万 t,污水处理厂将达到 1 800 座.传统的污泥处理处置方式如填埋、焚烧、堆肥等对环境容易产生二次污染^[1],已不能满足环保的需求,寻求新的污泥处置方式已经成为热点.

活性炭具有比表面积大、孔结构高度发达、吸附能力强等优点,是一种微晶质碳,在环境治理、化学工业、食品工业等行业具有广泛的应用^[2-4].多年来的研究表明,利用污泥制备活性炭可大大降低成本,但由污泥制备的活性炭主要为粉末炭,其在实际应用中存在回收困难、使用寿命短、有粉尘污染的缺点,这些使得粉末炭在环境治理领域及其他方面的应用受到极大的限制^[5].与传统的过滤分离法相比,磁分离作为一种简单高效的分离方法,可分离磁性或可磁化的吸附剂、载体等物质.因此,近几年来磁性活性炭的制备方法及其应用成为国内外研究的热点.例如刘守新等^[6]利用常压浸渍法合成了磁性椰壳活性炭;Ivo 等^[7]用化学共沉淀法合成了磁性活性炭.针对粉末活性炭易造成粉尘污染、强度低等缺点,蜂窝状、毡状、纤维状等成型炭往往可以弥补这些不足^[8-10].成

型活性炭的主要制备方法是粘接成型法,制备时将粉末炭与粘结剂、水及其它成分按一定比例均匀混合,在模具中压制成型,再经过一定温度的热处理,提高成型活性炭的水固性及强度^[11].

本研究以污水处理厂脱水污泥为原料、氯化锌为活化剂,采用正交实验方法确定污泥制备活性炭的最佳工艺参数,并在此基础上将污泥活性炭赋磁和成型技术相结合,研发新颖的成型磁性活性炭,并对粉末污泥活性炭、磁性活性炭、成型磁性活性炭的比表面积、微光形貌、磁性能进行表征与分析.

1 污泥活性炭的制备

污泥取自福州市某污水处理厂污泥房中的脱水污泥(含水率是 84.33%).将烘至恒重的污泥进行破碎,过 0.15 mm 筛,封装待用.精确称取筛分后的干污泥,与氯化锌溶液按照一定的比例混合,在 85 ℃ 水浴中加热 1 h(浸渍、搅拌),并在室温下放置 8 h,置于管式电阻炉中于一定的温度下进行炭化活化(以 N_2 作为保护气),升温速率为 20 ℃/min.冷却后取出,先用 3 mol/L HCl 清洗热解产物,然后用蒸馏水多次洗涤,直至 pH 为 6 左右.最后将获得的热解产物干燥至恒重,并用 0.15 mm 尼龙筛筛出污泥活性炭粉末,封装待用.

收稿日期:2013-09-12;修订日期:2013-11-06

基金项目:福建省重大科技攻关计划资助项目(2011H6001)

作者简介:徐正坦(1955-),男,福建福州人,福建工程学院副教授,研究方向为环境工程,Email: xuzhengtan@

126.com.

1.1 粉末磁性活性炭的制备

采用张高生等^[12]报道的活性炭/铁氧化物共沉淀法制备磁性污泥活性炭. 具体操作步骤如下: 精确称取 19.5 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (19.5 g, 70 mmol) 和 11.4 g FeCl_3 (11.4 g, 70 mmol), Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 的摩尔比为 1:1, 将二者溶于 500 mL 去离子水中, 加入 16.5 g 污泥活性炭, 搅拌 30 min, 水浴锅中将溶液加热至 65 ℃; 快速搅拌下滴加 5 mol/L NaOH 溶液, 直至溶液呈碱性, 并产生黑色沉淀, 然后把混合物放在 93 ℃ 水浴中恒温陈化 4 h; 取出待其冷却至室温, 静置, 去其上层清液, 再用去离子水反复洗涤产物, 去除盐分和水溶性物质, 过滤; 将产物置于烘箱中 90 ℃ 下干燥 4 h, 即可得到活性炭/铁氧化物磁性复合吸附材料 (此处记为磁性活性炭).

1.2 成型磁性活性炭的制备

成型磁性活性炭的制备是以羧甲基纤维素 (CMC) 为粘结剂. 其制备方法如下: 称取一定量的 CMC 于适量的蒸馏水中, 强力搅拌 30 min, 溶解混合均匀之后, 加入一定量磁性活性炭, 搅拌 60 min; 然后将搅拌均匀的混合物置于 85 ℃ 烘箱中浓缩, 每 20 min 搅拌一次, 防止出现结块粘现象. 待烘至近干时取出, 在粒径为 2.5 mm 成球盘中挤压成球, 再经过一定温度下的炭化即可得成型磁性活性炭.

1.3 性能表征测定

1.3.1 微观形貌

污泥活性炭、粉末磁性活性炭的内部结构和表面形貌是采用扫描电镜 (S-3400N, 日本) 来表征. 扫描电镜的工作条件为: 电压 15 KV, 温度为 26 ℃.

1.3.2 比表面积及孔径分布

碘吸附值的测定按照国标 GB/T 12496.7—

90 进行. 比表面积及孔结构测试是通过北京精微高博、JW-BK 型的静态氮吸附仪上进行测得的, 测试前样品经 150 ℃ 真空脱附预处理 2 h, 然后用氮气作为样品的吸附气体, 测试温度为 77.4 K.

1.3.3 红外光谱分析

采用美国 Nicolet 公司型号为 AVAT-AR 360 型的 FT-IR 定性分析污泥活性炭、污泥基磁性活性炭和商品活性炭表面官能团的变化. 测试条件: 扫描累加次数为 20, 扫描谱的范围为 400 ~ 4 000 cm^{-1} , 测定光谱图, 并对其进行比较分析.

1.3.4 磁性能测试

成型磁性活性炭的磁性能是由振动样品磁强计 (VSM model 155) 测得的. 样品的磁性能是根据样品的磁滞回归线并加以一系列相关的运算所得, 其磁性能的表征参数为磁化强度和矫顽力.

2 制备污泥活性炭的最佳工艺条件

选取活化剂浓度、热解温度、热解时间、液固比 (体积: 质量) 4 个因素, 由于所制的活性炭孔径较大, 因此以碘值为考察评价指标, 判断所选因素对污泥活性炭吸附性能影响的强弱程度, 设计了 4 因素 3 水平正交实验. 正交实验水平表见表 1, 正交实验结果及分析见表 2.

表 1 制备污泥活性炭的正交实验因素水平表
Tab. 1 Factors and levels of orthogonal design of preparation for sludge activated carbon

水平	A 活化剂浓度 / B 热解温度 / C 热解时间 / D 液固比 /			
	($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	℃	h	($\text{ml} : \text{g}$)
1	1	450	1	1.5
2	2	550	1.5	2
3	3	650	2	3

表 2 制备污泥活性炭的正交实验结果

Tab. 2 Orthogonal experimental results of preparation for sludge activated carbon

编号	A	B	C	D	考察指标
	活化剂浓度 / ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	热解温度 / ℃	热解时间 / h	液固比 / ($\text{ml} : \text{g}$)	碘值 / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
1-1	1	450	1	1.5	261
1-2	1	550	1.5	2	294
1-3	1	650	2	3	324
1-4	2	450	1.5	3	308
1-5	2	550	2	1.5	305
1-6	2	650	1	2	325
1-7	3	450	2	2	328
1-8	3	550	1	3	312

续表 2

编号	A	B	C	D	考察指标
	活化剂浓度/(mol·L ⁻¹)	热解温度/℃	热解时间/h	液固比/(ml:g)	碘值/(mg·g ⁻¹)
1-9	3	650	1.5	1.5	327
K_{1j}	879	897	898	893	—
K_{2j}	938	911	929	947	—
K_{3j}	967	976	957	944	—
R_j	96	69	59	54	—
最优方案	A ₃	B ₃	C ₃	D ₂	—

由表 2 可知,对于碘值:第 A,B,C,D 列最大 K 值分别是: K_{3A} , K_{3B} , K_{3C} , K_{2D} ,所以得到各因素的最优水平组合为:A₃B₃C₃D₂,即活化剂浓度为 3 mol/L、热解温度为 650 ℃、热解时间为 2 h、液固比为 2:1. 极差 $R_A > R_B > R_C > R_D$,说明 4 个因素中对污泥活性炭碘吸附值影响程度最大的是活化剂浓度,其次是热解温度.

3 性能表征与分析

实验采用的污泥活性炭是以活化剂浓度为 3 mol/L、热解温度为 650 ℃、热解时间为 2 h、液固比为 2:1 等实验条件下制得的.

3.1 形貌分析

图 1 为粉末污泥活性炭(a)和粉末磁性活性炭(b)在电子扫描电镜下的微观形貌照片,从图片可以看出污泥活性炭上排列着不规则的孔洞.图 1(a)是污泥活性炭的表面结构,可以看到制得的污泥活性炭具有一个以炭为骨架形成的网状结构,孔洞较大.图 1(b)表示的是粉末磁性污泥活性炭,可发现活性炭孔洞较多,并且大孔壁上出现一系列的小孔,同时灰分的数量也有少许增加.

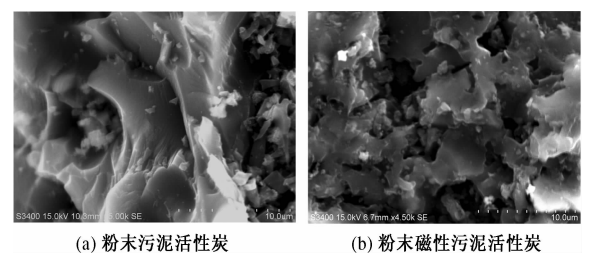


图 1 磁化前后的 SEM 微观照片
Fig.1 SEM microscopic photos

3.2 比表面积及孔径分布

将商品活性炭、污泥活性炭、磁性活性炭和成型磁性活性炭孔结构特征进行比较,结果见表 3. 由表 3 可见,商品活性炭的比表面积较大,孔径较小,而污泥活性炭以中孔为主,比表面积较小. 污泥活性炭赋磁后,由于磁粒子本身具有较小的比表面积和孔径,二者复合后减小了活性炭的比表

面积.

表 3 活性炭的孔结构特征

Tab.3 Hole structure characteristics of activated carbon

样品类型	$S_{BET}/$ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	总孔容/ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	平均孔径/ nm
商品活性炭	987.2	0.84	3.8
粉末活性炭	336.1	0.32	6.6
粉末磁性活性炭	312.4	0.40	6.1
成型磁性活性炭	325.1	0.43	5.4

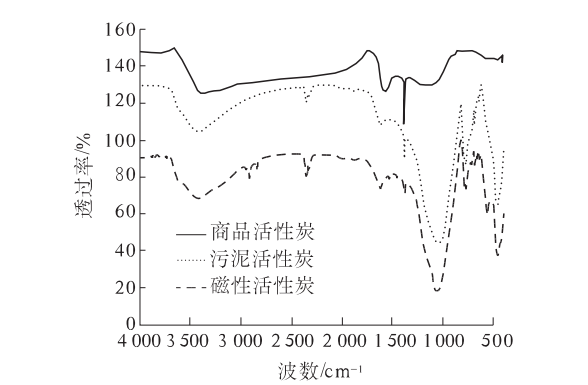


图 2 FT-IR 谱图
Fig.2 FT-IR spectra

3.3 红外光谱分析

从红外谱图 2 可以看出:商品活性炭的表面官能团数量种类较少,污泥活性炭的含氧官能团的数量和种类明显多于商品活性炭,使得污泥活性炭对重金属离子具有更强的吸附能力. 而由污泥制备的活性炭则含有丰富的活性基团. 在 3 300~3 500 cm^{-1} 处均存在吸收峰,主要是醇、酚的—OH 以及—NH,—NH₂ 的伸缩振动;邱宇平等^[13]研究表明 1 620 cm^{-1} 附近处的吸收峰主要是由苯环上的 C=C 和分子间或分子内形成氢键的内酯基、羰基或羧酸中的 C=O 的伸缩振动引起的,1 100 cm^{-1} 附近处的峰为酚类和氢氧基团中的 C=O 键伸缩振动产生的;磁性活性炭在 563.31 cm^{-1} 处出现了 Fe₃O₄ 的伸缩振动峰. 正是这些含氧基团的存在,特别是羟基、酚羟基使污泥

活性炭具有较好的吸附能力,使其表面具有商用活性炭没有的独特性质。

3.4 磁性能分析

图3中的(a)、(b)分别表示粉末磁性活性炭、成型磁性活性炭的磁滞回归线。由图可知,在一定范围内,磁化过程中磁性活性炭的磁化强度均随外加磁场的增大而增大,增至一定程度时趋向于饱和,当反向施加磁场时,磁性活性炭的比饱和磁化强度也反向趋于饱和,磁性活性炭的磁滞

回归线近似为“S”型。此外,实验测定粉末磁性活性炭的比饱和磁化强度为 25.439 1 emu/g,剩磁 3.436 2 emu/g,矫顽力 130.73 G;而成型磁性活性炭的剩磁为 2.301 5 emu/g,比饱和磁化强度为 32.051 2 emu/g,矫顽力为 47.59 G。表明粉末磁性活性炭成型之后磁力大小有所增加,具有超顺磁性,在使用过程中不会因为剩磁的作用而发生自团聚现象,使用永磁铁即可将磁性活性炭分离出来。

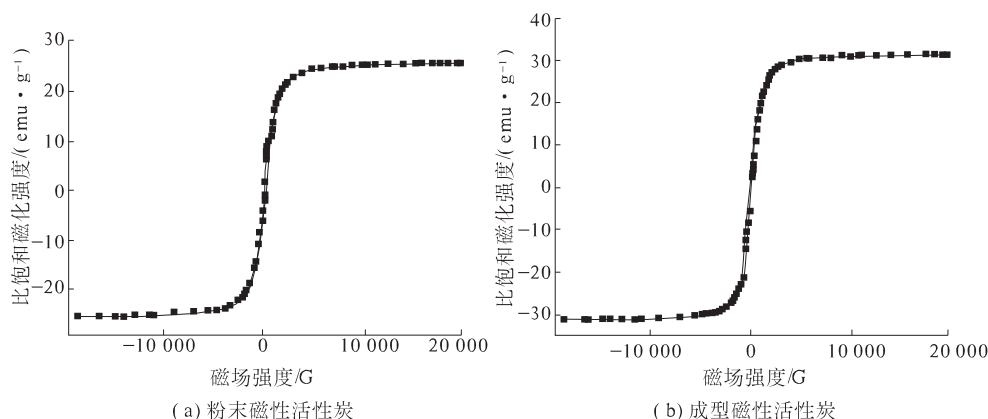


图3 VSM测定的磁性活性炭的磁滞回归线

Fig.3 Magnetization curve obtained by VSM for magnetic activated carbon

4 结论

以福州市某污水处理厂脱水污泥为原料,采用氯化锌活化—管式电阻炉热解制备活性炭。以碘值作为考察指标,确定了污泥活性炭的最佳制备条件:活化剂浓度为 3 mol/L、热解温度为 650 °C、热解时间为 2 h、液固比为 2:1,所制得的污泥活性炭碘值为 334.6 mg/g。

(2)通过扫描电镜可以看出,污泥经过炭化活化后,呈现出不规则的多孔结构,大孔孔径达十几微米。从图片中可看到导电性不强的高点为孔表面残留的少量氯化锌,这些无机物可通过充分清洗减少表面残留,提高吸附能力。

(3)由 BET 的测试分析可知,商品活性炭的比表面积较大,孔径较小,而污泥活性炭以中孔为主,比表面积较小。污泥活性炭赋磁后,由于磁粒子本身具有较小的比表面积和孔径,二者复合后减小了活性炭的比表面积。

(4)通过磁性能分析可知,粉末磁性活性炭、成型磁性活性炭的比饱和磁化强度分别为 25.439 1 emu/g、32.051 2 emu/g,这意味着使用永磁铁即可将磁性活性炭分离出来,因而具有一

定的工业实用性。

参考文献:

- [1] 张辰. 污泥处理处置技术与工程实例[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [2] 左宋林,刘军利,杨建校,等. 磷酸活化法活性炭性质对亚甲基蓝吸附能力的影响[J]. 林产化学与工业, 2010, 30(4): 1-6.
- [3] 卢辛成,蒋剑春,孙康,等. 活性炭比表面积、孔径对 TiO₂/AC 光催化活性的影响[J]. 林产化学与工业, 2010, 30(6): 29-34.
- [4] 刘晓敏,邓先伦,朱光真. 活性炭吸附挥发性有机物的影响因素研究进展[J]. 生物质化学工程, 2010, 44(6): 52-58.
- [5] 魏娜,赵乃勤,贾威,等. 活性炭的制备及应用研究进展[J]. 炭素技术, 2003(3): 29-33.
- [6] 刘守新,孙承林. 磁性椰壳活性炭的合成研究[J]. 新型炭材料, 2002, 17(1): 45-48.
- [7] IVO A, KONSANCA N, MIRKA S. Adsorption of water-soluble organic dyes on magnetic charcoal[J]. J Chem Tech Biotechnol, 1997, 169: 1-4.

(下转第 111 页)

受热不可压黏弹性圆柱体中空穴的动态增长

陈亚娟¹, 王钦亭¹, 尚新春²

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 4540003; 2. 北京科技大学 应用科学学院, 北京 100083)

摘 要:应用黏弹性有限变形理论,研究了不可压黏弹性圆柱体受到均匀温度场作用下的热空化问题. 分别对圆柱实体和预存微孔的圆柱体两种情形进行讨论,建立了问题的非线性数学模型. 数值计算结果证实了分叉问题可视为预存微孔半径生长的理想模型,得到了微孔半径随时间增长的动态变化曲线,并讨论了外界温度场、初始微孔半径、材料参数以及轴向伸长对微孔半径增长规律的影响.

关键词:热黏弹性体;圆柱体;有限变形;空穴;动态生长

中图分类号: O343 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.020

0 引言

材料断裂和损伤过程的起点是空穴的产生,目前,国内外学者对超弹性材料,以及弹性材料中受到外加载荷作用下产生空穴及动态增长问题,进行了大量的科学研究. 如 Lopez^[1]、Cohen^[2]、Volokh^[3]、尚新春^[4]、任九生^[5-9]、袁学刚^[10]等对超弹性球体以及圆柱体中的空穴问题进行了深入的研究. 对于弹性材料的不稳定性问题,尚新春研究了 Hooke 弹性体在只受到径向拉伸载荷作用下的空穴分岔解^[11],对于不考虑外加载荷,只考虑温度影响的空穴生成问题,尚新春^[12]得到了复合球体大变形热弹性膨胀的参数形式的解析解.

塑料、陶瓷、金属等工业材料,沥青、石油等地质材料,在高温或高压条件下会呈现出黏弹性,在遇到变形、失稳及破坏等问题时同样也会出现空穴现象. 笔者研究了不可压的黏弹性圆柱体在受到外界温度场作用下空穴的动态增长,求得了柱体中空穴半径随时间增长的动态变化曲线,并分析了各参数对空穴半径增长规律的影响. 同时对预存微孔情形进行了类似计算,得到了微孔半径与温度关系曲线,以及不同的初始微孔半径下微孔半径随时间的动态变化曲线.

1 问题的数学模型

考虑一个不可压缩黏弹性圆柱体在受到均匀温度场作用下的有限变形动力学问题,采用柱坐标系,变形前圆柱体中位于 (R, Θ, Z) 的点在时刻 t 运

动到 (r, θ, z) 位置,则圆柱体的运动可以表示为

$$\begin{cases} r = r(R, t), 0 \leq R \leq R_0; \\ \theta = \Theta; \\ z = \lambda_z Z. \end{cases} \tag{1}$$

由于材料具有的不可压缩性,得到

$$\begin{cases} r = \left(\frac{R^2}{\lambda_z} + \delta^2(t) \right)^{1/2}; \\ \delta(t) \geq 0; \\ t \geq 0. \end{cases} \tag{2}$$

$\delta(t)$ 是生成空穴的半径,它是时间 t 的待定函数. 采用对数应变来描述有限变形.

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \ln \frac{\partial r}{\partial R}; \\ \varepsilon_\theta = \ln \frac{r}{R}; \\ \varepsilon_z = \ln \lambda_z. \end{cases} \tag{3}$$

则对数应变满足

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{2} \ln \left(\lambda_z^{-1} \left[1 - \left(\frac{\delta(t)}{r} \right)^2 \right] \right); \\ \varepsilon_\theta = -\frac{1}{2} \ln \left(\lambda_z \left[1 - \left(\frac{\delta(t)}{r} \right)^2 \right] \right); \\ \varepsilon_z = \ln \lambda_z. \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_r = -\frac{\delta \dot{\delta}}{r^2}; \\ \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{\delta \dot{\delta}}{r^2}; \\ \dot{\varepsilon}_z = 0. \end{cases} \tag{5}$$

收稿日期:2013-10-14;修订日期:2013-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10772024)

作者简介:陈亚娟(1976-),女,河南开封人,河南理工大学副教授,博士研究生,主要研究方向为结构和材料的非线性力学计算,E-mail:juanzichen@hpu.edu.cn.

圆柱体采用 Kelvin-Voigt 微分型^[13-14] 热黏弹性本构, 柱坐标下的本构关系为

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda \left(1 + t_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) + 2\mu \left(1 + t_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) \varepsilon_r - \beta T; \\ \sigma_\theta = \lambda \left(1 + t_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) + 2\mu \left(1 + t_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) \varepsilon_\theta - \beta T; \\ \sigma_z = \lambda \left(1 + t_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) + 2\mu \left(1 + t_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) \varepsilon_z - \beta T. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 是径向、环向和轴向应力; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ 是径向、环向和轴向应变; λ, μ 是拉梅常数; t_0 是黏弹性体热松弛时间; $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha_t$, α_t 是线性热膨胀系数; T 是对于初始温度的改变量。

应力分量应满足的运动微分方程为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = \rho \ddot{r}. \quad (7)$$

对不受约束的空穴表面应有

$$\sigma_r(\delta, t) = 0. \quad (8)$$

最外层自由边界条件为

$$\begin{cases} \sigma_r(r_0, t) = 0; \\ r_0 = \left(\frac{R_0^2}{\lambda_z} + \delta^2(t) \right)^{1/2}. \end{cases} \quad (9)$$

式中: r_0 为圆柱体变形后的半径。

空穴半径的初始条件为

$$\begin{cases} \delta(t) = 0; \\ \dot{\delta}(t) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

因此, 现在的问题是对给定的温度 T , 求满足运动微分方程(7), 边界条件(8)、(9) 和初始条件(10) 的待定函数 $\delta(t) \geq 0$ 。

2 问题的求解

把式子(4)、(5) 代入到本构方程(7) 中,

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2\mu \ln \left[1 - \left(\frac{\delta(t)}{r} \right)^2 \right] - 4\mu t_0 \frac{\delta \dot{\delta}}{r^2}. \quad (11)$$

把不可压条件(2) 对 t 求微分后的结果和式子(11) 代入到运动方程(7) 中, 得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = & -\frac{1}{r} \left(2\mu \ln \left[1 - \left(\frac{\delta(t)}{r} \right)^2 \right] - 4\mu t_0 \frac{\delta \dot{\delta}}{r^2} \right) + \rho \frac{\delta \ddot{\delta}}{r} + \\ & \rho \left[\frac{1}{r} - \frac{\delta^2}{r^3} \right] \dot{\delta}^2. \end{aligned} \quad (12)$$

对式子(12) 中的 r 从 δ 到 r 进行积分, 并利用边界条件(8), 可得到热黏弹性区域的径向应力 σ_r 。

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \rho \delta \left(\ln \frac{r}{\delta} \right) \ddot{\delta} + \rho \left(\ln \frac{r}{\delta} + \frac{\delta^2}{2r^2} - \frac{1}{2} \right) \dot{\delta}^2 - \\ & 2\mu t_0 \delta \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{\delta^2} \right) \dot{\delta} - 2\mu \int_\delta^r \ln \left[1 - \left(\frac{\delta(t)}{r} \right)^2 \right] \frac{ds}{s}. \end{aligned}$$

(13)

联立边界条件(9) 和式子(7), 得到

$$\begin{aligned} \rho \delta \left(\ln \frac{r_0}{\delta} \right) \ddot{\delta} + \rho \left(\ln \frac{r_0}{\delta} + \frac{\delta^2}{2r_0^2} - \frac{1}{2} \right) \dot{\delta}^2 + \\ 2\mu t_0 \frac{\dot{\delta}}{\delta} - 2\mu \int_\delta^{r_0} \ln \left[1 - \left(\frac{\delta(t)}{r} \right)^2 \right] \frac{ds}{s} + \beta T - \\ \mu \ln \left(\lambda_z^{-1} \left[1 - \left(\frac{\delta}{r_0} \right)^2 \right] \right) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

式子(14) 是一个非线性变系数二阶常微分方程, 它给出了在某一给定的温度 T 下, 空穴半径 $\delta(t)$ 随时间变化的精确关系。因此, 称式子(14) 为空穴的生成运动方程。

采用无量纲变换 $w = \frac{\rho R_0^2}{\mu t_0^2}, \tau = \frac{t}{t_0}$,

$$T_0 = \frac{T}{\left(\frac{\mu}{\beta} \right)}, x = \frac{\delta}{R_0}, \text{ 引入 } \eta = \left(1 - \frac{\delta^2}{s^2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

令

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} = & \frac{1}{\tau'}, a(x) = \frac{w}{2} x \left(\ln \left(\frac{1}{\lambda_z x^2} + 1 \right) \right), b_1(x) \\ = & 4 \int_0^{(1+\lambda_z x^2)^{-\frac{1}{2}}} (\ln \eta) \left(\frac{\eta}{1-\eta^2} \right) d\eta - \ln \lambda_z - \\ & \ln(1 + \lambda_z x^2) - T_0 b_2(x) = \frac{2}{x}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_3(x) = & -\frac{w}{2} \left(\ln \left(\frac{1}{\lambda_z x^2} + 1 \right) - \frac{1}{(1 + \lambda_z x^2)} \right) y_1 = \\ & \tau', y_2 = \tau. \end{aligned}$$

式子(14) 可变为

$$\frac{dy_1}{dx} = -\frac{b_1(x)}{a(x)} y_1^3 - \frac{b_2(x)}{a(x)} y_1^2 - \frac{b_3(x)}{a(x)} y_1. \quad (15)$$

$$\begin{cases} y_1(0) = \infty; \\ y_2(0) = 0, y_2(x) = \int_0^x y_1(s) ds. \end{cases} \quad (16)$$

对(15) 式采用 Runge-Kutta 方法进行数值求解, 再求反函数就可以得到 $x = x(\tau)$ 的数值解。

3 预存微孔情形

设圆柱体中有一个半径为 ε 的预存微孔, 变形后微孔半径为 δ , 在柱体表面受到均匀温度场的作用, 因此关系式(17) 成立。

$$r(R, t) = \left(\frac{R^2}{\lambda_z} + \delta^2(t) - \varepsilon^2 \right)^{1/2}. \quad (17)$$

进行与前面类似的分析可得

$$\begin{aligned} \frac{w}{2} x \ln \left(\frac{1}{\lambda_z x^2} + 1 - \left(\frac{x_0}{x} \right)^2 \right) \frac{d^2 x}{d\tau^2} - \frac{2}{x} \frac{dx}{d\tau} + \ln \lambda_z + T_0 + \\ \frac{w}{2} \left(\ln \left(\frac{1}{\lambda_z x^2} + 1 - \left(\frac{x_0}{x} \right)^2 \right) + \frac{\lambda_z x^2}{(1 + \lambda_z x^2 - \lambda_z x_0^2)} \right) \end{aligned}$$

$$-1)\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2-4\int_{\frac{x_0}{x}}^{(1+\lambda_zx^2-\lambda_zx_0^2)^{-\frac{1}{2}}}(\ln\eta)\left(\frac{\eta}{1-\eta^2}\right)d\eta$$
$$+\ln(1+\lambda_zx^2-\lambda_zx_0^2)=0.$$

(18)

若 $\frac{dx}{d\tau}=0$, 则式子 (18) 变为

$$-4\int_{\frac{x_0}{x}}^{(1+\lambda_zx^2-\lambda_zx_0^2)^{-\frac{1}{2}}}(\ln\eta)\left(\frac{\eta}{1-\eta^2}\right)d\eta+\ln\lambda_z+\ln(1+\lambda_zx^2-\lambda_zx_0^2)+T_0=0.$$

(19)

4 结果分析

图 1 给出了外界温度场对空穴半径 x 增长快慢的影响曲线. 可以看出温度越高, 空穴半径增长得越快. 图 2 给出了材料参数 w 对空穴半径 x 增长快慢的影响曲线. 材料参数 w 越大, 空穴半径增长得越慢, 由 $w=\frac{\rho R_0^2}{\mu t_0^2}$ 可知, 当材料参数 ρ, μ, t_0 一定时, w 与 R_0^2 成正比. 当 w 是 $1\,000w_0$ 与 $100\,000w_0$ 时, 两条曲线几乎重合在一起, 从而推知, 可以用 $1\,000w_0$ 的柱体来模拟无限大柱体中的空穴增长规律. 图 3 给出了轴向伸长 λ_z 对空穴半径 x 增长快慢的影响曲线. 可以看出 λ_z 越大, 空穴半径增长得越慢.

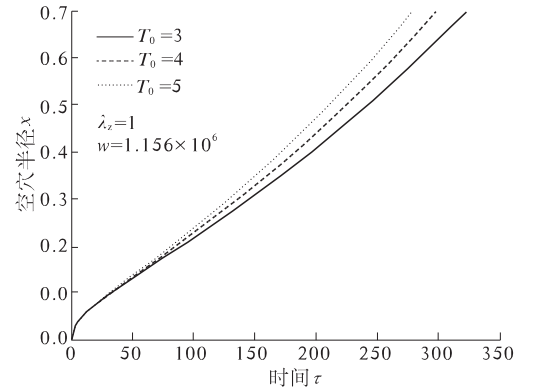


图 1 不同温度下空穴半径 x 随时间 τ 变化曲线

Fig.1 Cavity radius x vs time t under different temperature

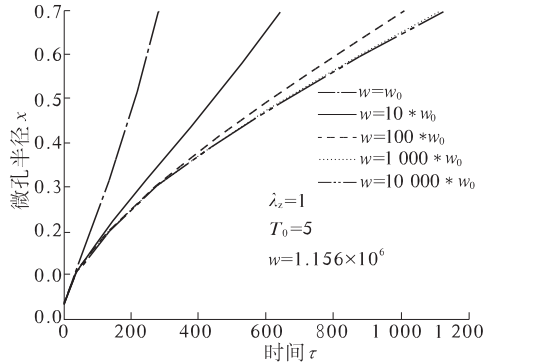


图 2 不同材料参数 w 下微孔半径 x 随时间 τ 变化曲线

Fig.2 Variation curves of microvoid radius x with time τ under different material parameter w

由式子 (19) 得到预存微孔热黏弹性圆柱体在静态下微孔半径 x 与温度 T_0 的关系曲线, 见图 4 所示. 当轴向伸长 λ_z 一定时, 初始微孔 x_0 为零, 即为圆柱实体, 若外界温度超过临界温度, 空穴会突然生成, 空穴半径随着温度的升高而迅速增加. 初始微孔 x_0 越小, 微孔半径增长得越慢, 越接近于圆柱实体的空穴分岔曲线, 这说明, 空穴的生成问题可以看作是微孔生长的理想模型.

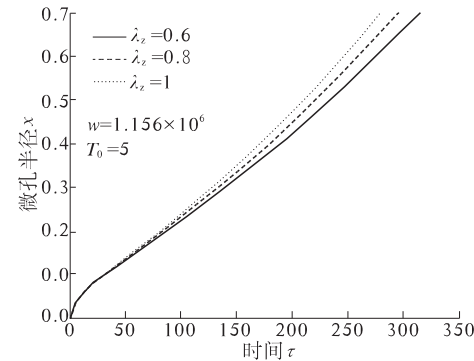


图 3 不同 λ_z 时微孔半径 x 随时间 τ 变化曲线

Fig.3 Variation curves of microvoid radius x with time τ under different λ_z

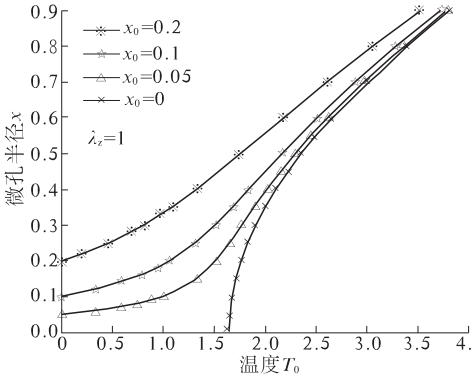


图 4 微孔半径 x 与温度 T_0 的关系曲线

Fig.4 Curves of microvoid radius x with temperature T_0

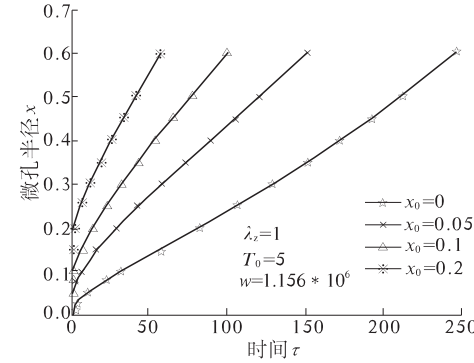


图 5 不同的初始微孔半径下微孔半径 x 随时间 τ 变化曲线

Fig.5 Variation curves of microvoid radius x with time τ under different initial microvoid radius

由式子(18)得到不同的初始微孔时微孔半径 x 随时间 τ 的动态变化曲线,其他参数一定时,初始微孔越大,微孔半径增长得越快.而且,预存微孔的圆柱体内微孔半径随时间的动态增长同圆柱实体情况一样,受到外界温度 T_0 、材料参数 w 和轴向伸长 λ_z 的影响.

5 结论

(1)外界温度 T_0 越大,材料参数 w 越小,轴向伸长 λ_z 越小,达到相同的空穴半径,需要的时间越短.

(2)初始微孔越小,达到同样的微孔半径,需要的外界温度越高.

(3)初始微孔越小,受热后微孔半径动态增长得越慢,越接近实心柱体.笔者运用非线性动力学理论来解决具有广泛实际工程背景的黏弹性材料和结构的不稳定性问题,对于进一步研究材料的损伤和断裂具有重要的意义.

参考文献:

- [1] LOPEZ-PAMIES O. Onset of cavitation in compressible, isotropic, hyperelastic Solids[J]. Journal of Elasticity, 2009, 94(2): 115 - 145.
- [2] COHEN T, DURBAN D. Cavitation in elastic and hyperelastic sheets[J]. International Journal of Engineering Science, 2010, 48(1): 52 - 66.
- [3] VOLOKH K Y. Cavitation instability in rubber[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2011, 3(2): 299 - 311.
- [4] SHANG Xin-chun, CHENG Chang-Jun. Exact solution for cavitated bifurcation for compressible hyperelastic materials[J]. International Journal of Engineering Science, 2001, 39(10): 1101 - 1117.
- [5] 任九生,程昌钧.热超弹性圆筒的不稳定性[J].力学学报, 2007, 39(2): 283 - 288.
- [6] 任九生.周期载荷下超弹性圆柱壳的动力响应[J].应用数学与力学, 2008, 29(10): 1199 - 1207.
- [7] 任九生.热超弹性圆柱壳的振动与破坏[J].振动与冲击, 2008, 27(12): 36 - 39.
- [8] 任九生.热超弹性材料的不稳定性问题[J].力学学报, 2009, 39(5): 566 - 575.
- [9] 袁学刚,魏凤伦.一类可压缩超弹性圆柱体轴线上的空穴现象[J].固体力学学报, 2011, 32(S): 115 - 119.
- [10] 任九生,沈佳铖,袁学刚.周期载荷下不可压超弹性材料的空穴动生成[J].振动与冲击, 2012, 31(18): 10 - 13.
- [11] 尚新春,程昌钧.弹性固体材料中的空穴萌生与增长[J].北京科技大学学报, 2002, 24(3): 380 - 382.
- [12] SHANG Xin-chun, ZHANG Rui, REN Hui-lan. Analysis of cavitation problem of heated elastic composite ball[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2011, 32(5): 587 - 594.
- [13] BANERJEE S, ROYCHOUDHURI S K. Spherically symmetric thermo-visco-elastic waves in a visco-elastic medium with a spherical cavity[J]. Computers math Applic, 1995, 30(1): 91 - 98.
- [14] KAR A, KANORIA M. Generalized thermo-visco-elastic problem of a spherical shell with three-phase-lag effect[J]. Applied Mathematical Modeling, 2009, 33(8): 3287 - 329.

Dynamical Growth of Cavity in a Heated Incompressible Viscoelastic Cylinder

CHEN Ya-juan¹, WANG Qin-ting¹, SHANG Xin-chun²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Department of Applied Mechanics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Applying the visco-elastic finite deformation theory, the cavitation problem of incompressible visco-elastic cylinder was researched under the case of uniform temperature field. Both the solid cylinder and the pre-existing microvoid cylinder were discussed respectively, and the nonlinear mathematical models were established. The numerical results illustrated that the bifurcation problem could be regarded as the idealized model of microvoid growth, the dynamical variation curves of microvoid radius with time were obtained, and the influences of external temperature, the initial microvoid radius, the material parameter and the axial stretch on microvoid radius were also discussed.

Key words: thermo-visco-elasticity; cylinder; finite deformation; cavity; dynamical formation and growth

文章编号:1671-6833(2014)01-0089-05

配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土柱抗震性能研究

李艳艳^{1,2}, 李泽高¹, 刘 坤³, 张彦平^{1,2}

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 河北工业大学 校园规划处, 天津 300401)

摘 要: 对 4 根配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱进行了低周反复试验, 分析了 HRB500 钢筋和与之匹配的高强混凝土 T 形截面异形柱的破坏形态, 承载能力及延性, 刚度退化, 滞回特性, 耗能能力等抗震性能指标, 讨论了配箍特征值和轴压比对 T 形截面柱的抗震性能的影响. 研究表明: 配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱钢筋与高强混凝土协同工作较好, 具有较高的承载能力, 其延性性能和耗能能力等抗震性能指标良好, 能够在强震区的异形柱结构中使用.

关键词: HRB500 钢筋; T 形截面柱; 低周反复; 抗震性能

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.021

0 引言

近年来, 钢筋混凝土异形柱结构体系作为一种新型结构体系越来越多地被应用于工程中, 而低强度钢筋、普通混凝土作为钢筋混凝土结构主材制约了异形柱结构体系的进一步推广应用. HRB500 钢筋因其强度高、延性好、社会经济效益显著等一系列优点, 在工程实际中的应用日益普遍^[1]. 目前针对普通钢筋混凝土异形柱的研究已较为完善^[2-4], 而对配置 HRB500 高强钢筋混凝土异形柱结构的性能研究尚未涉及, JGJ 149—2006《混凝土异形柱结构技术规范》^[5]及 GB 50011—2010《建筑结构抗震规范》^[6]也尚未列入. 因此, 为推广 HRB500 钢筋在异形柱结构中的应用, 笔者对配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱进行了拟静力试验, 研究轴压比和配箍特征值对 T 形截面柱抗震性能的影响, 为 JGJ 149—2006《混凝土异形柱结构技术规程》的修编提供试验依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验采用 1/3 缩尺设计试验构件, 考虑不同轴压比和配箍特征值两个因子共制作 4 个 T 形截

面混凝土异形柱构件, 肢宽肢厚比均为 2.9. 柱端设置高为 300 mm, 截面尺寸为 350 mm × 350 mm 的方形加载头, 固定底座高 450 mm. 设计两种箍筋间距: 60 mm, 90 mm, 配箍率分别为 2.69%, 1.97%. 混凝土强度等级 C50, 保护层 15 mm. 柱截面纵筋采用 16, 箍筋 8, 试件几何尺寸及配筋情况见图 1, 试件参数见表 1, 钢筋及混凝土的力学性能见表 2.

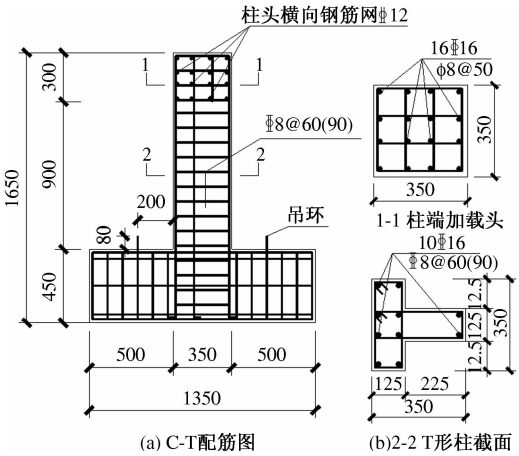


图 1 模型试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Dimensions and reinforced details of specimens

1.2 加载方案

本次试验采用液压加载装置, 竖向力采用竖

收稿日期:2013-08-30; 修订日期:2013-10-19

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(12JCYBJC14100); 河北省建设科技研究计划项目(20122027); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(Q2012083)

作者简介: 李艳艳(1979-), 女, 广西上林人, 河北工业大学副教授, 博士, 主要从事结构工程研究, E-mail: nicole_820@163.com.

向千斤顶在柱顶施加恒定压力,水平力通过反力墙上的水平液压伺服作动器作用在柱端加载头,加载装置如图 2 所示,试验加载采用力-位移混合控制加载制度,如图 3 所示,加载直至荷载下降至极限荷载的 85% 后,认为试件破坏,停止加载.

表 1 试件参数
Tab. 1 Parameters of specimens

编号	纵筋	箍筋	试验轴压比
C-TX60	10 Φ 16	Φ 8@ 60	0.132
C-TX90	10 Φ 16	Φ 8@ 90	0.132
C-TD60	10 Φ 16	Φ 8@ 60	0.264
C-TD90	10 Φ 16	Φ 8@ 90	0.264

表 2 实测钢筋和混凝土的力学性能
Tab. 2 Properties of reinforcing bars and concrete

规格	钢筋			混凝土		
	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ $\times 10^5$ MPa	立方体抗压 强度/MPa	轴心抗压 强度/MPa	弹性模量/ $\times 10^4$ MPa
HRB500(8mm)	520	800	1.78	51.6	31.6	3.35
HRB500(16mm)	586	743	—			

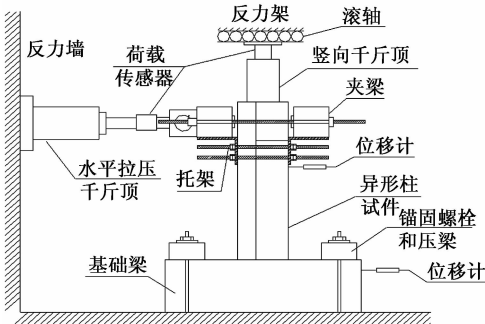


图 2 加载装置示意图
Fig. 2 Test set-up

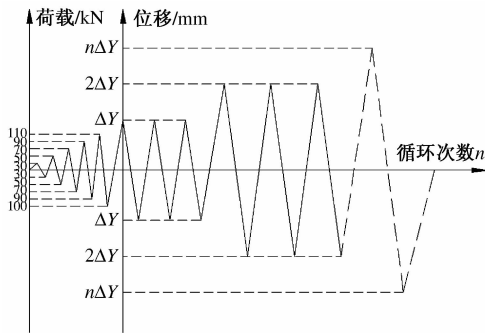


图 3 加载制度
Fig. 3 Loading system

破坏前,各试件的塑性变形发展较为充分,柱的塑性铰域主要发生在腹板柱底向上 30 ~ 250 mm 范围内,最终破坏形态为弯剪型破坏.

(2) C-TX60 和 C-TX90 腹板弯剪裂缝及剪切

2 试验结果分析

2.1 试验现象及破坏形态分析

各试件都经历了完整的加载过程.图 4 反映了配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱在反复荷载作用下的破坏形态.

试验结果表明:

(1)屈服前,试件的水平裂缝较多,随着反复加载的进行,水平裂缝在柱底贯通,弯剪裂缝和斜裂缝迅速发展,剪切裂缝在柱底相交.加载后期,腹板柱底出现竖向裂缝,混凝土压溃剥落,纵筋和箍筋外露,纵筋屈曲外鼓,强剪弱弯性相对较强.

斜裂缝数量较多,宽度大,最终破坏时腹板剪切裂缝贯通.C-TD60 和 C-TD90 腹板剪切裂缝多产生在构件的中部,裂缝总体数量少,宽度小,剪切裂缝未贯通,加载后期翼缘背面出现较多的微小次斜裂缝.可见,随着轴压比的提高,试件破坏受剪力的影响也越大.

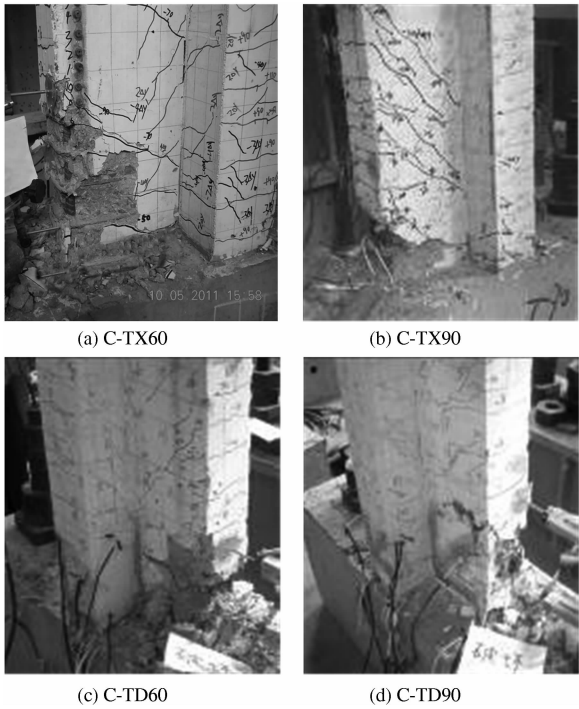


图 4 试件的破坏形态

Fig. 4 Failure mode of the specimens

(3)配箍率较高的 C-TX60 与 C-TD60 的塑性较域较大,发展的更为充分,表现出更优越的耗能性能.

2.2 承载力和位移延性

构件的位移延性系数表示为 $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$. 其中: μ_{Δ} 为位移延性系数; Δ_u 为破坏时对应的位

移,取骨架曲线下降到 $0.85P_{max}$ 时对应的位移,对于无明显下降段的取其最大位移; Δ_y 为屈服时对应的位移,对于无明显屈服点的构件,利用骨架曲线采用等效面积法来确定^[7]. 各主要阶段结果及位移延性系数列于表 3.

表 3 承载力、位移及延性系数
Tab. 3 Loading, displacement and ductility coefficient of T-shaped columns

试件编号		P/kN				Δ /mm				μ_{Δ}
		P_{cr}	P_y	P_{max}	P_u	Δ_{cr}	Δ_y	Δ_{max}	Δ_u	
C-TX60	正向	165.62	205.97	234.20	200.50	7.89	14.14	23.59	29.50	2.16
	反向	80.00	135.00	159.70	134.10	1.33	13.17	25.65	44.98	3.42
	均值	122.81	170.49	196.95	167.30	4.61	13.81	24.62	37.24	2.79
C-TX90	正向	109.70	188.78	210.34	178.79	6.84	12.38	23.38	28.52	2.30
	反向	58.67	140.92	171.38	154.62	1.56	11.85	22.51	39.29	3.32
	均值	84.19	164.85	190.86	166.71	4.20	12.12	22.95	31.91	2.81
C-TD60	正向	112.40	192.34	222.76	189.33	2.70	7.67	12.91	23.29	3.04
	反向	105.30	170.62	209.07	199.31	3.78	13.18	28.90	31.03	2.35
	均值	108.85	181.48	215.92	194.32	3.24	10.43	20.91	27.16	2.70
C-TD90	正向	86.67	219.92	258.60	219.83	2.46	11.62	21.38	27.81	2.40
	反向	69.30	126.67	152.07	143.76	2.80	10.43	20.50	33.65	3.23
	均值	77.99	173.30	205.34	181.80	2.63	11.03	20.94	30.73	2.81

注: P_{cr} 为试件开裂荷载, P_y 为试件屈服荷载, P_{max} 为试件极限荷载, P_u 为试件破坏荷载; Δ_{cr} 为与 P_{cr} 对应的开裂位移, Δ_y 为与 P_y 对应的屈服位移, Δ_{max} 为与 P_{max} 相对应的极限荷载下的位移, Δ_u 为与 P_u 对应的破坏位移.

分析表 3 可知:

(1)由于 T 形截面柱正负向性能的迥异,正向加载时的开裂、屈服和极限荷载均较负向有不同程度的提高. 在较大轴压比下,当正向荷载下降至 $0.85P_{max}$ 时,反向荷载仍未下降至反向的 $0.85P_{max}$. 因此,正向荷载作用下的的力学性能和抗震指标成为衡量 T 形截面柱性能的决定因素. 在小轴压比范围内,随着轴压比的增大,试件极限承载力提高了 9.63% 和 7.59%,极限位移减小,主要原因是由于轴压比增大,使截面混凝土受压面积增大,改善了骨料咬合作用,提高了纵筋的销栓作用,从而提高构件的极限承载力. 但随着轴压比的增大,构件腹板受压时,延性系数略微有所提高,翼缘受压时,延性系数显著下降. 可见,适当提高轴压比可以提高构件极限承载力,但会降低构件整体延性;

(2)轴压比一定下,配箍特征值增大使试件的初始开裂荷载分别提高了 45.87% 和 39.57%,极限荷载提高 3.09% 和 5.15%,表明增大配箍率可以增强核心区混凝土抵抗横向变形的能力,约束混凝土斜裂缝开展,起到套箍约束的作用.

2.3 刚度退化

试件的等效刚度随弹塑性位移角变化的“刚度—位移角”关系曲线见图 5,可以看出加载全过程构件整体刚度的变化有以下特点.

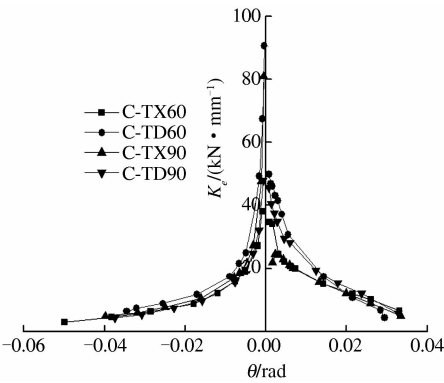


图 5 刚度 - 位移角关系曲线
Fig. 5 Curves of rigidity and displacement angle

(1)试件的正负向初始刚度有一定的差别, C-TD60 与 C-TD90 的初始正向刚度较 C-TX60 和 C-TX90 的大,分别提高了 44.3% 和 108.2%,表明适当增大轴压比可以提高构件正向初始刚度,这主要是因为 T 形柱本身的不对称性. 此外,随

着反复加载的不断进行,裂缝的开展与闭合引起的截面削弱,钢筋的 Bauschinger 效应,钢筋混凝土之间的锚固滑移等的作用使构件的正负向刚度趋于一致。

(2)试件反向刚度衰减情况类似,正向刚度随轴压比的不同出现差异。C-TD60 与 C-TD90 位移角为 1/80 时刚度开始缓降,而 C-TX60 与 C-TX90 在位移角达到 1/50 时刚度出现缓降,表明轴压比较小的试件后期抗震性能更加稳定。

2.4 滞回特性

实测 T 形截面柱的 $P-\Delta$ 滞回曲线及骨架曲线如图 6 和图 7 所示,曲线反映出 T 截面柱的显著特性—不对称性,其特点如下:

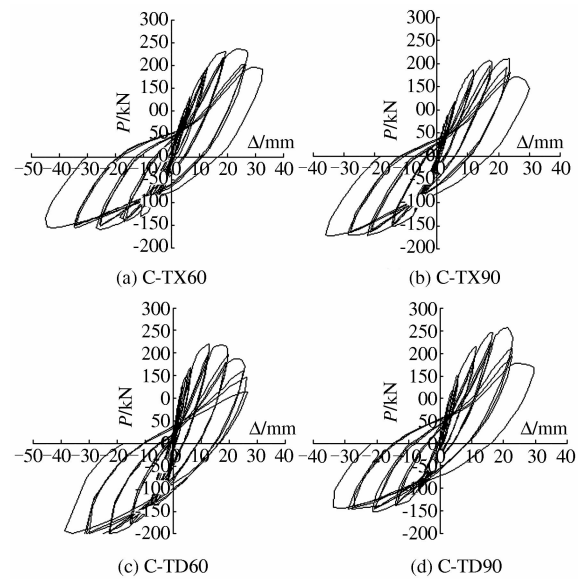


图 6 试件的滞回曲线
Fig. 6 Hysteretic loops of specimens

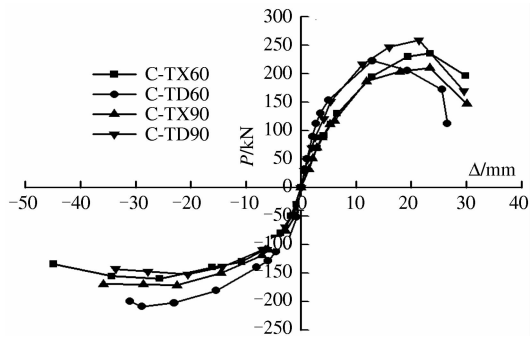


图 7 各试件的 $P-\Delta$ 骨架曲线
Fig. 7 Skeleton curves of specimens

(1)循环加载初期,试件处于弹性阶段,滞回曲线基本成直线,卸荷及变形恢复都比较充分;构件屈服后,随着位移幅值的增大及循环次数的增多,滞回环从梭形逐渐过渡到弓形,最后略呈反 S 形,曲线斜率随循环次数的增多而减小,滞回环面

积增大并向位移轴倾斜,加载后期呈现轻微“捏缩”现象,反映出剪切及钢筋的锚固滑移影响。

(2)同一滞回圈中正向水平荷载的衰减早于反向,且衰减速率较大,随着位移幅值的增大,衰减速率趋于一致,表明构件的变形和承载能力较好,刚度和强度退化比较平缓,后期延性性能良好。

(3)轴压比一定情况下,C-TX60 与 C-TD60 曲线相对更为饱满,变形更为充分,表现出较好的延性性能。

2.5 耗能能力

采用等效黏滞阻尼系数 h_e 来衡量试件的耗能能力,试件各主要阶段的等效黏滞阻尼系数 h_e 如表 4 所示,等效粘滞阻尼系数—位移变化曲线如图 8 所示。

表 4 等效黏滞阻尼系数
Tab. 4 Results of equivalent viscous damping coefficient

试件编号	等效黏滞阻尼系数 h_e			
	开裂	屈服	极限	破坏
C-TX60	0.087 1	0.171 3	0.338 9	0.435 5
C-TX90	0.054 4	0.089 4	0.133 8	0.211 3
C-TD60	0.096 2	0.101 8	0.164 7	0.242 6
C-TD90	0.081 4	0.097 7	0.145 9	0.227 7

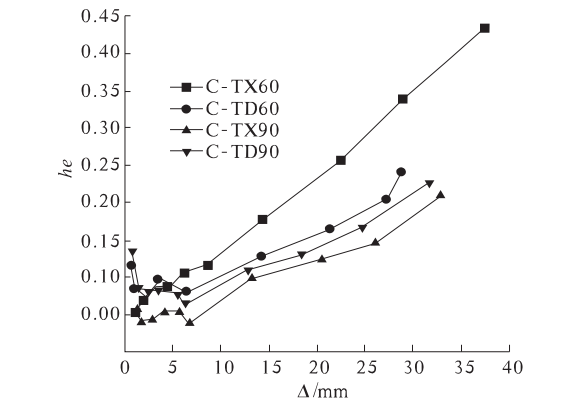


图 8 等效黏滞阻尼系数曲线
Fig. 8 Curves of equivalent viscous damping coefficient

分析表 4 和图 8 可知

(1)构件的的等效黏滞阻尼系数在屈服前均较小,屈服后增速较快,主要是由于加载后期,随着裂缝的不断开展,裂缝的张开与闭合要耗散大量能量,同时柱底塑性铰的形成和发展使塑性变形增大,耗能能力迅速增大。

(2)C-TD60 与 C-TX60 的较高,构件屈服前,C-TD60 与 C-TD90 的 h_e 较高,表明增大配箍率可以显著提高构件的耗能能力,适当增大轴压比,可

以改善构件屈服前的耗能性能,但对大变形后的影响不大.

3 结论

(1)配置 HRB500 钢筋的 T 形截面混凝土异形柱具有良好的延性,钢筋与混凝土协同工作较好,钢筋锚固滑移影响较小.增大配箍特征值可以显著提高异形柱的承载能力及后期耗能能力.

(2)在小轴压比(0.1~0.3)下,随着轴压比的增大,构件腹板受压时初始抗侧刚度略有提高,但构件整体延性有所下降.

(3)在小轴压比和适宜肢宽肢厚比情况下,配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱承载力退化较慢,延性性能和耗能能力等抗震性能指标较好,能够在强震区的异形柱结构中使用.

参考文献:

[1] 李艳艳,杜闯,陈向上,等. HRB500 钢筋的锚固设计及可靠度分析[J]. 广西大学学报,2012,4(37):808

-813.

[2] RONG Xian, ZHANG Jian-xin, LI Yan-yan. Experimental research on seismic behavior of interior joints of specially shaped columns reinforced by fiber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94-96 :551-555.

[3] 王铁成,赵海龙. 纤维增强异形柱节点受剪承载力分析[J]. 江苏大学学报,2011,32(5):602-606.

[4] 吴波,荆亚涛. 高温下钢筋混凝土异形柱空间框架的试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(6):129-135.

[5] 中华人民共和国建设部. JGJ 149—2006,混凝土异形柱结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.

[6] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[7] 中国建筑科学研究院. JGJ 101—96,建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

Research on Seismic Behavior of HRB500 Reinforced Concrete T-shaped Section Columns

LI Yan-yan^{1,2}, LI Ze-gao¹, LIU Kun³, ZHANG Yan-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China; 3. Campus Planning Office of Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Based on the tests of four HRB500 RC T-shaped section columns under axial compression and low cyclic reversed lateral load, the failure mode, bearing capacity, ductility performance, rigidity degradation, hysteretic behavior, energy dissipation and cumulative damage of the specimens were studied systematically. The influence of reinforcement characteristic value and axial compression ratio on the seismic behavior was discussed in the investigation. Experimental results indicate that, under certain width-thickness ratio and appropriate axial compression ratio, the member's bearing capacity, ductility and energy dissipation are improved dramatically with the increasing of the reinforcement characteristic value. It has been revealed that the HRB500 RC T-shaped section columns have excellent seismic performance, which can be used in the structure with specially shaped columns in meizoseismal regions.

Key words: HRB500 reinforced bar; T-shaped section column; low cyclic reversed loading; seismic behavior

以改善构件屈服前的耗能性能,但对大变形后的影响不大.

3 结论

(1)配置 HRB500 钢筋的 T 形截面混凝土异形柱具有良好的延性,钢筋与混凝土协同工作较好,钢筋锚固滑移影响较小.增大配箍特征值可以显著提高异形柱的承载能力及后期耗能能力.

(2)在小轴压比(0.1~0.3)下,随着轴压比的增大,构件腹板受压时初始抗侧刚度略有提高,但构件整体延性有所下降.

(3)在小轴压比和适宜肢宽肢厚比情况下,配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土异形柱承载力退化较慢,延性性能和耗能能力等抗震性能指标较好,能够在强震区的异形柱结构中使用.

参考文献:

[1] 李艳艳,杜闯,陈向上,等. HRB500 钢筋的锚固设计及可靠度分析[J]. 广西大学学报,2012,4(37):808

-813.

[2] RONG Xian, ZHANG Jian-xin, LI Yan-yan. Experimental research on seismic behavior of interior joints of specially shaped columns reinforced by fiber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94-96 :551-555.

[3] 王铁成,赵海龙. 纤维增强异形柱节点受剪承载力分析[J]. 江苏大学学报,2011,32(5):602-606.

[4] 吴波,荆亚涛. 高温下钢筋混凝土异形柱空间框架的试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(6):129-135.

[5] 中华人民共和国建设部. JGJ 149—2006,混凝土异形柱结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.

[6] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[7] 中国建筑科学研究院. JGJ 101—96,建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

Research on Seismic Behavior of HRB500 Reinforced Concrete T-shaped Section Columns

LI Yan-yan^{1,2}, LI Ze-gao¹, LIU Kun³, ZHANG Yan-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China; 3. Campus Planning Office of Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Based on the tests of four HRB500 RC T-shaped section columns under axial compression and low cyclic reversed lateral load, the failure mode, bearing capacity, ductility performance, rigidity degradation, hysteretic behavior, energy dissipation and cumulative damage of the specimens were studied systematically. The influence of reinforcement characteristic value and axial compression ratio on the seismic behavior was discussed in the investigation. Experimental results indicate that, under certain width-thickness ratio and appropriate axial compression ratio, the member's bearing capacity, ductility and energy dissipation are improved dramatically with the increasing of the reinforcement characteristic value. It has been revealed that the HRB500 RC T-shaped section columns have excellent seismic performance, which can be used in the structure with specially shaped columns in meizoseismal regions.

Key words: HRB500 reinforced bar; T-shaped section column; low cyclic reversed loading; seismic behavior

文章编号:1671-6833(2014)01-0099-05

基于迭代分析的多塔悬索桥合理成桥状态确定方法

周云岗^{1,2}

(1. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于传统悬索桥成桥状态计算方法, 应用有限元法, 提出了一种基于 ANSYS 有限元分析的确定多塔悬索桥主缆成桥线形的迭代算法. 在此基础上, 进行了 3~6 塔悬索桥试设计, 针对试设计方案的合理成桥状态进行了算例分析, 并与重力刚度理论计算结果进行了对比. 算例表明, 利用该方法可以准确地得到多塔悬索桥的成桥线形和内力. 该方法不仅可以应用于平面缆索体系的成桥状态分析, 同样也适用于空间缆索体系.

关键词: 桥梁工程; 多塔悬索桥; 合理成桥状态; 主缆线形; 有限元法; 几何非线性分析

中图分类号: U448.225 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.023

0 引言

悬索桥合理恒载状态的求解不仅是悬索桥设计时的一项重要内容, 也是施工控制计算的核心^[1-2].

在分析悬索桥这种柔性结构时, 一种方法是采用能考虑结构大位移和初应力影响的非线性有限元法^[3], 另一种方法是根据主缆自身的平衡条件自动考虑各种非线性影响因素的数值解析法^[4-5], 或者将两种方法结合起来^[6]. 数值解析法的优点是可以比较简单地处理有限元难以处理的诸如主缆与鞍室的接触问题和鞍室顶推问题等, 且输入数据少, 计算速度快, 但是只有吊索力确定时, 其解答才是精确的. 有限元法的优点是具有通用性, 可考虑加劲梁的影响, 且能采用多个梁单元或杆单元来模拟鞍室及其顶推, 但是计算比较复杂.

与传统悬索桥相比, 多塔悬索桥结构柔度更大, 几何非线性效应更加显著, 特别是中塔处于自由状态, 成桥状态的计算精度要求更高. 进行悬索桥设计时, 吊索力无法精确确定, 数值分析法不可避免产生误差, 由于多塔悬索桥跨数较多, 误差累积效应^[7]会更加显著, 而传统有限元分析法多将缆索与梁塔分开考虑, 忽略了系统之间的相互影响.

笔者基于传统悬索桥成桥状态计算方法, 以全桥模型为对象, 以几何控制参数为目标, 提出了一种基于 ANSYS 有限元分析的确定多塔悬索桥主缆成桥线形的迭代算法.

1 计算模型

1.1 结构计算模型

笔者以主跨为 1 400 m 的三塔悬索桥试设计方案为对象, 如图 1 所示, 详细介绍多塔悬索桥合理成桥状态的确定思路及优化算法.

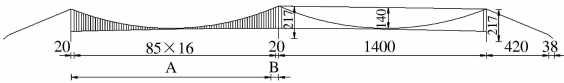


图 1 三塔悬索桥立面布置

Fig. 1 Elevation of three-town suspension bridge

试设计方案采用(420 m + 1 400 m + 1 400 m + 420 m)的两跨连续结构. 主梁为封闭式流线型扁平钢箱梁, 箱梁中心线处高 3.5 m, 桥塔为门式, 边塔为混凝土塔, 中塔为钢塔, 全高为 217 m, 桥面以上高度为 147 m. 中塔横向等宽. 主缆垂度为 140 m, 矢跨比为 1/10. 采用竖直吊索, 全桥共有 344(86 × 4)根.

结构的材料参考已有工程实例确定.

采用单主梁模式建立 ANSYS 分析模型, 如图 2 所示. 主梁和索塔采用空间梁单元(Beam44)模

收稿日期:2013-09-17;修订日期:2013-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008223)

作者简介:周云岗(1980-),男,江苏淮安人,工程师,博士,主要从事大跨度桥梁设计理论研究,E-mail:0710020026

@tongji.edu.cn.

拟,吊索与主梁之间通过刚性杆相连,吊索采用只受拉杆多段杆单元(link10)模拟.塔、梁之间耦合横向自由度.



图2 三塔悬索桥计算模型

Fig. 2 Analysis model of three-town suspension bridge

进行成桥状态计算时,结构荷载设计值参照苏通长江大桥、泰州长江大桥和舟山连岛工程等大型桥梁的设计条件确定.

1.2 几何非线性效应

《公路悬索桥设计规范》(报批稿)中建议尽量采用有限位移理论进行设计计算分析,《特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南》(报批稿)中明确指出“总体计算应采用有限位移理论”,本质上均是要求计入结构的非线性影响.悬索桥的几何非线性影响来源于:结构的大位移效应、主缆的恒载初始内力效应及缆索的自重垂度效应.

1.2.1 结构的大位移效应

多塔悬索桥呈超柔度结构特征,外荷载作用下结构变形大,结构在变形后的状态下实现平衡.因此,平衡方程必须建立在变形后的位置上.可以用基于 TL 列式(总体坐标法)、UL 列式(拖动坐标法)和 CR 列式法的有限位移理论来考虑. ANSYS 中采用大位移刚度矩阵考虑结构的大位移效应.

1.2.2 主缆恒载初始内力效应

主缆恒载初始内力效应是指结构初始内力引起的结构刚度变化对后期荷载响应的影响问题.该效应本质上与梁柱效应的性质是相同的.前者为轴拉力,使结构刚度增大;后者为轴压力,使结构刚度减小.经典计算方法为稳定函数法^[8]. ANSYS 中采用初应力刚度矩阵考虑 $P-\Delta$ 效应.

1.2.3 缆索的自重垂度效应

缆索的垂度效应分析普遍采用有限元法.当前主要有 4 种模拟方法:等效模量法、多段杆单元法、多节点曲线索单元法、悬链线索单元法.数值解析法和有限元法^[9]是分析悬索桥力学状态的两种重要方法.应用数值解析法计算时,一般采用悬链线索单元法模拟;建立有限元模型进行总体分析时,可采用多段杆单元法模拟.

2 确定方法

2.1 基本方法

针对多塔悬索桥结构柔度大,非线性效应显

著的特点,提出了一种基于 ANSYS 有限元分析的确定多塔悬索桥主缆成桥线形的迭代算法,称为有限单元迭代法.该方法根据拟定的理想状态,建立有限元分析模型,其中主缆线形根据几何控制参数初拟为抛物线,其内力按挠度理论估算,索塔和主梁线形按设计线形确定,通过非线性迭代获得理想线形.

2.2 确定目标

2.2.1 合理成桥状态的确定准则

桥梁的合理成桥状态必须包括内力状态和线形状态.对于悬索桥来说,内力状态应包括主梁、索塔和吊索的受力状态;线形状态主要是主梁的成桥线形、索塔的纵向变形和主缆的几何线形.理想成桥状态下,悬索桥的内力和线形应满足以下各要求.

(1) 索塔弯矩:索塔轴心受压,塔根弯矩为零.

(2) 吊索轴力:索力分布均匀,且基本相等.由于索塔附近自由梁段较长,允许塔区索力有突变.

(3) 主梁弯矩:主梁弯矩呈刚性支承连续梁分布.

(4) 主缆线形:几何控制点满足设计要求,包括 IP 点、垂度点等.

(5) 塔梁线形:主梁竖向线形位于设计位置,索塔纵向变形为零.

2.2.2 目标状态

结构的目标状态就是指采用有限元方法迭代计算多塔悬索成桥状态时,判定结构内力和变形达到理想状态的收敛条件.根据合理成桥状态的确定准则和有限元迭代法的特点,可确定结构内力和线形的收敛条件为:(1)主缆、主梁、索塔的变形趋于零;(2)主梁弯矩分别均匀,呈刚性支承连续梁分布;(3)索塔的弯矩趋于零;(4)吊索索力分布均匀.

2.3 计算流程

有限单元迭代法的基本思想是先以设计线形为初态建立有限元模型,初步估算主缆内力,然后迭代修正结构的初始状态,直至结构的恒载线形与理想线形之间的误差满足容许误差.

采用有限元法进行非线性迭代计算的步骤如图 3 所示.图中, $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$ 为容许误差,可按期望精度设定.该方法的本质是通过迭代计算,不断修正结构的初始状态,最终使其与理想状态一致.可见,该方法的核心是修正结构初始状态,包括主缆

的线形和内力、吊索的内力、主梁的线形和索塔的变位.主缆线形和内力修正的目标是在恒载作用下主缆所有节点的位移为零.其中,主缆垂度点通过修正主缆内力来实现.若主缆垂度误差为 Δf ,则主缆初始张力调整值为

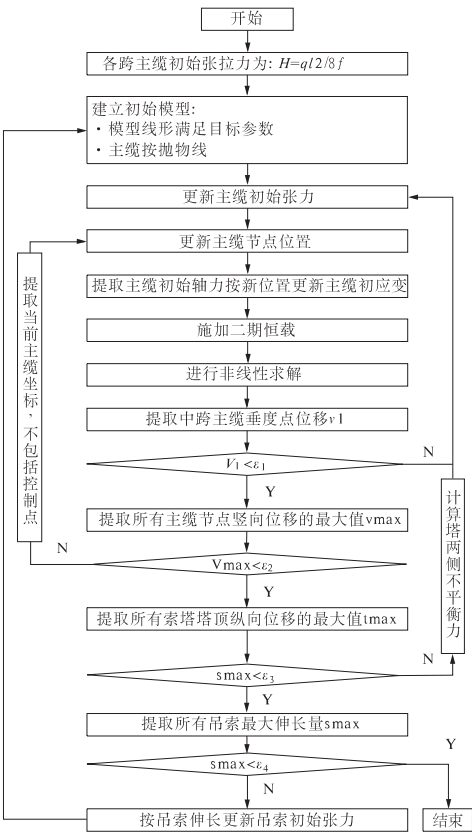


图 3 有限单元迭代法计算流程

Fig. 3 Iteration process of the finite element analysis

$$\Delta H = -\Delta f \cdot Q_q \cdot L^2 / 8f^2.$$

式中: Q_q 为恒载集度; L 为主跨跨径; f 为主缆垂度.其他节点通过更新初始位置来修正.吊索内力修正的目标是在恒载作用下主梁的挠度为零,保证主梁的线形满足设计要求.索塔变位修正的目标是索塔纵向变形为零,保证在恒载作用下塔根不出现弯矩.

3 计算成果

应用 ANSYS 二次开发功能,编制有限单元迭代的计算程序,计算前节拟定的三塔悬索桥试设计方案的合理成桥状态,如图 4 所示.

恒载作用下,单根主缆轴力 306 MN,应用重力刚度理论,可得主缆轴力为 308 MN,两者误差为 0.6%,表明文中所提方法的计算结果准确可靠.成桥状态下,缆索系统及加劲梁竖向位移在 $-6 \sim 2$ mm 之间;主梁弯矩分布均匀且弯矩最大

值仅为 33 MN,呈刚性支承连续梁状态;吊索力基本相等,中塔两侧第一根吊索力突变与主梁布置有关.该位置主梁连续通过中跨,自由段很长,故吊索承担的梁段荷载也较大,这也是主梁弯矩突变的原因.边塔塔根弯矩为 32 MN,对应的弯曲应力为 0.2 MPa,十分微小;中塔弯矩最大值不超过 0.2 MN,基本可以忽略.

上述分析表明,结构内力状态及线形满足既定的合理成桥状态指标.

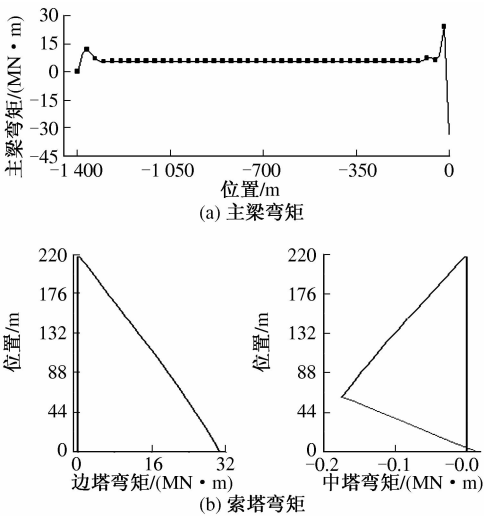


图 4 三塔悬索桥合理成桥状态内力

Fig. 4 Internal force under reasonable design state

4 多塔算例

下面应用文中方法确定 3~6 塔悬索桥的合理成桥状态,进一步论证所提方法的有效性和适应性.多塔悬索桥各方案立面布置如图 5 所示.

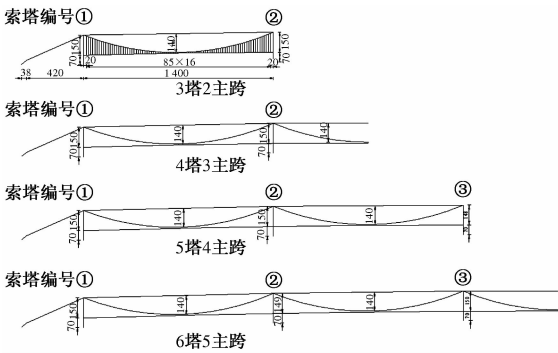


图 5 多塔悬索桥立面布置

Fig. 5 Elevation of multi-town suspension bridge

考虑到结构对称性,图中仅示出左半桥.结构参数同 1.1 节.各方案桥面纵坡统一取为 1.5%,所有索塔总高度及桥面以上高度相同.索塔编号由左向右依次为①、②、③...,主跨跨径编号为该

跨左侧索塔编号. 结构约束条件:主缆在锚碇处固结,在塔顶处与索鞍耦合平动自由度;索塔底部固结;在边塔处,主梁与索塔下横梁耦合竖向、横向和扭转自由度,而在中塔处,主梁与索塔下横梁耦合横向和扭转自由度.

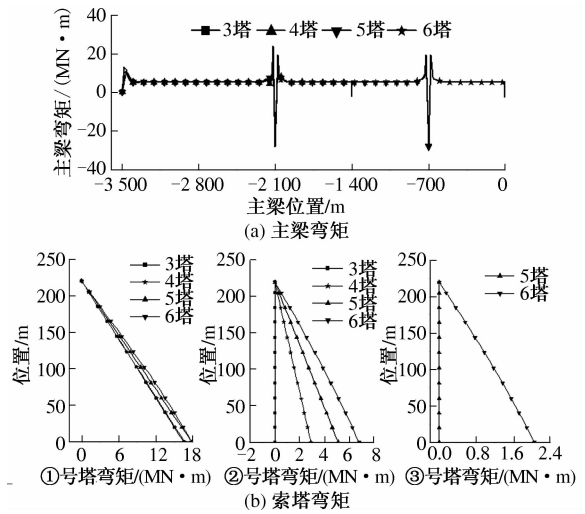


图 6 多塔悬索桥合理成桥状态内力
Fig.6 Internal force under reasonable design state of multi-town suspension bridge

应用文中方法确定各方案的合理成桥状态,计算结果如图 6 所示,主梁弯矩仅示出左半桥,坐标原点为 6 塔悬索桥的对称中心,其他方案对位绘制.由图可知,主梁弯矩分布均匀,基本呈刚性支承连续梁分布;①号塔塔根弯矩小于 18 MN·m,②号塔塔根小于 7 MN·m,③号塔塔根小于 3 MN·m.

在恒载作用下,各方案主梁和吊索的最不利内力和变形如表 1 所示,索塔的最不利内力和变形如表 2 所示,表中应力均为弯矩产生的弯曲应力.

由表中数据可知,各方案的主梁最大挠度约为 0.04 m,塔顶纵向位移最大约为 0.01 m;主梁弯矩最大约为 -28.2 MN·m,弯曲应力最大约为 11.4 MPa;吊索轴力最大约为 4 MN,吊索应力约为 357 MPa;塔根弯曲应力均小于 0.1 MPa. 分析表明,结构内力状态及线形满足既定的合理成桥状态指标.

表 1 主梁和吊索的恒载受力状态
Tab.1 Internal force of hangle and beam

方案	构件 项目	主 梁				吊 索	
		挠度/ m	弯矩/ (MN · m)	上缘应力/ MPa	下缘应力/ MPa	轴力/ MN	应力/ MPa
3 塔	极大值	0.001	20.4	8.2	13.3	3.9	357.3
	极小值	-0.036	-26.0	-10.5	-17.0	1.5	145.8
	普遍值	±0.003	5.0	2.0	3.3	1.9	282.9
4 塔	极大值	0.004	23.6	9.6	15.4	4.1	355.9
	极小值	-0.036	-27.3	-11.0	-17.8	1.5	131.9
	普遍值	±0.004	5.1	2.1	3.3	1.9	281.9
5 塔	极大值	0.009	18.3	7.4	11.9	3.7	336.2
	极小值	0.040	-28.2	-11.4	-18.4	1.7	139.3
	普遍值	±0.008	5.1	2.1	3.3	1.9	281.5
6 塔	极大值	0.001	19.1	7.7	12.5	3.8	321.3
	极小值	-0.039	-27.5	-11.1	-17.9	1.6	141.7
	普遍值	±0.003	5.1	2.1	3.3	1.9	281.1

表 2 索塔的恒载受力状态
Tab.2 Internal force of town

方案	①号塔塔根			②号塔塔根			②号塔塔根		
	弯矩/ (MN · M)	应力/ MPa	位移/ m	弯矩/ (MN · M)	应力/ MPa	位移/ m	弯矩/ (MN · M)	应力/ MPa	位移/ m
3 塔	16.5	0.1	0.009	0.0	0.0	0.000	—	—	—
4 塔	16.6	0.1	0.009	2.9	0.1	0.002	—	—	—
5 塔	17.8	0.1	0.004	5.1	0.2	0.002	0.0	0.0	0.000
6 塔	17.7	0.1	0.010	6.8	0.3	0.004	2.1	0.1	0.001

5 结论

- (1)有限单元迭代法容错性强,考虑了结构的几何非线性效应,可以最大限度地接近理想目标.
- (2)有限单元迭代法将结构作为整体进行分析,考虑了主缆、索塔、加劲梁及吊索之间的相互影响.
- (3)有限单元迭代法可借助 ANSYS 软件予以实施,具有较好的计算精度和分析效率.

参考文献:

[1] 张志国,邹振祝,赵玉成. 确定悬索桥主缆成桥线形的参数方程法[J]. 计算力学学报, 2005, 22(3): 305-309.

[2] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆. 悬索桥理想恒载状态的计算方法研究[J]. 桥梁建设, 2008(4): 31-35.

[3] 景天虎,李青宁. 悬索桥主缆成桥线形确定的有限

元新算法[J]. 世界桥梁. 2012, 40(1): 42-46.

[4] 周勇,张峰,李术才.等. 悬索桥空间主缆恒载线形分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010, 34(5): 1036-1039.

[5] 彭苗,卢哲安,文建华. 悬索桥空间主缆找形分析的一种迭代算法[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(2): 87-89,100.

[6] 罗喜恒. 悬索桥缆索系统的数值分析法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2004(04): 441-446.

[7] 景天虎,李桅,李青宁,等. 悬索桥主缆线形确定的常用精确解析算法比较及电算高效实现方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2011, 43(6): 821-830.

[8] FLEMING J F. Nonlinear Static analysis of cable-stayed bridge structures[J]. Computers and Structures, 1979, 10(4): 621-635.

[9] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆. 悬索桥施工过程精细化分析研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 76-80.

Determination Method of Reasonable Finished Dead State Of Multi-Town Suspension Bridges Based on Iterative Analysis

ZHOU Yun-gang^{1,2}

(1. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to calculate the cable shape of multi-span suspension bridge under dead load, a 3-diomen-tional analysis model is used and an iterative analysis method based on the finite element theory is proposed on the basis of analysis method for classical suspension bridge. It is simple to realize by using the finite element analysis soft ANSYS. Based on this, some trial designs, including three-town, four-town, five-town and six-town suspension bridge, are carried out. Taking these bridges as examples, the proposed method is verified, and the results are compared with gravity stiff theory. By comparison, it is shown that the proposed method can achieve the cable shape and internal force under dead load and be shown of high accuracy, efficiency and convenience. This method can be used to calculate the cable shape with plan cable and spatial cable.

Key words: bridge engineering; multi-span suspension; reasonable design state; cable shape; finite element method; geometrical nonlinearity analysis

文章编号:1671-6833(2014)01-0104-04

考虑界面影响的钢纤维混凝土细观力学等效性能研究

程站起, 夏乃凯

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 钢纤维与混凝土基体之间的界面对钢纤维混凝土(SFRC)发挥其增强、增韧作用具有重大影响,故为了考证其微观结构特征,探讨 SFRC 微观结构与其宏观性能之间的关系.考虑了在无限各向同性平面内分布的圆形钢纤维,采用超奇异积分方程和复变函数等方法建立纤维、界面和基体上的应力、应变和位移等的分析模型.采用 Galerkin 积分方法和 Gauss-Seidel 迭代方法获得在平面应变条件下具有不同体积率和界面层厚度的钢纤维混凝土等效参数,讨论了钢纤维体积率以及界面层厚度对材料等效参数的影响,并通过与相同条件下宏观试验得出的结果相比较,结果表明,本模型能够较为准确地分析钢纤维混凝土的宏观弹性参数.

关键词: 钢纤维混凝土;界面;细观力学;等效弹性模量

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.024

0 引言

纤维增强复合材料广泛运用于工程实际,在这类材料中界面存在于纤维和基体之间.尽管界面层厚度很小,但是界面对纤维增强复合材料的微观和宏观力学性能具有重要的影响^[1-3].已有文献研究界面性能对材料性能的影响,一般采用数值分析方法,比如有限元法^[4]和解析单元法^[5]等方法,然而这些方法都需要经过很复杂的计算过程,并且不能真实反映界面性能.笔者通过采用超奇异积分方程和复变函数,针对纤维、基体和界面上的应力、应变和位移建立数学模型,模拟界面的受力情况,并采用 Gauss-Seidel 迭代法计算未知变量,进而计算出钢纤维混凝土的等效弹性模量.本计算过程操作方便,计算结果与宏观试验条件下得出的结果基本吻合,由此验证了该模型的精确性和适用性.

1 基本参数和方程

考虑在无限各向同性平面内,包含 N 根钢纤维的平面承受在无穷远处的双轴应力场,如图 1 所示.其中基体的剪切模量为 μ ,泊松比为 ν ;纤维

的剪切模量为 μ_1 ,泊松比为 ν_1 ;这里假设界面为均匀界面,且界面的剪切模量为 μ_2 ,泊松比为 ν_2 .首先考虑单根纤维的二维平面,如图 1 所示.钢纤维和界面的中心点在同一点 z 点,其中 R_1, L_1 分别为纤维的半径和纤维与界面的边界; R_2, L_2 分别为界面外边界的半径和界面与基体的边界.规定 L_1, L_2 以逆时针方向为正方向,单位法向量 n 指向边界方向的右侧,单位切向量 s 指向边界绕行方向.在双轴应力作用下,每根纤维($J = 1, \dots, N$)模型处于应力平衡状态,即应力和弯矩在界面和边界上的合力为 0,则其数学表达式为^[6]

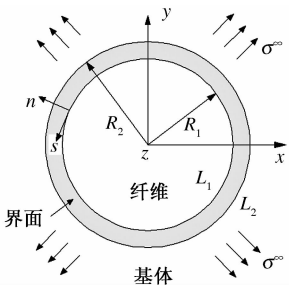


图 1 二维平面模型

Fig. 1 Two dimensional model

收稿日期:2013-09-15;修订日期:2013-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10802078);河南省优秀青年骨干教师资助项目(2010GGJS-023);郑州大学研究生科学研究基金资助项目(111L00903)

作者简介:程站起(1973-),男,河南西华人,郑州大学副教授,博士,研究方向为新型材料的力学性能研究,E-mail:zqcheng@zzu.edu.cn.

$$\begin{cases} \int_{L_{kj}} \sigma_{kj}(\tau) d\tau = 0, \quad k = 1, 2; \\ Re \int_{L_{kj}} \tau \bar{\sigma}_{kj}(\tau) d\bar{\tau} = 0, \quad k = 1, 2. \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\sigma_{kj}(z) = \sigma_{kjn}(z) + \sigma_{kjs}(z)$, $\sigma_{kjn}(z)$, $\sigma_{kjs}(z)$ 分别为沿边界 L_{kj} 上的法向应力和切向应力, $z = x + iy$ 是平面坐标系 (xOy) 中任意一点 z 的复坐标. 在边界 L_{kj} 上, 由超奇异积分方程可得边界积分方程^[6]:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^2 \left[(2a_{1kj} - a_{2kj}) \int_{L_{kj}} \frac{\sigma_{kj}(\tau) d\tau}{\tau - t} + (a_{1kj} - a_{3kj}) \int_{L_{kj}} \sigma_{kj}(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} K_1(\tau, t) d\tau + a_{1kj} \int_{K_{jk}} \bar{\sigma}_{kj}(\tau) \times \frac{\partial}{\partial \tau} K_2(\tau, t) d\bar{\tau} \right] = 2\pi i \left[\frac{a_{2k}}{2} \sigma(t) + \sigma^\infty(t) \right]. \quad (2)$$

其中, $t \in (L_{1j} \cup L_{2j})$, $k = 1, 2$.

$$\begin{aligned} a_{11j} &= \frac{1}{2u_{1j}} - \frac{1}{2u_{2j}}; & a_{21j} &= \frac{1 + k_{1j}}{2u_{1j}} + \frac{1 + k_{2j}}{2u_{2j}}; \\ a_{31j} &= \frac{1 + k_{1j}}{2u_1} - \frac{1 + k_{2j}}{2u_2}; & a_{12j} &= \frac{1}{2u_{2j}} - \frac{1}{2u}; \\ a_{22j} &= \frac{1 + k_{2j}}{2u_{2j}} + \frac{1 + k}{2u}; & a_{32j} &= \frac{1 + k_{2j}}{2u_{2j}} - \frac{1 + k}{2u}. \end{aligned}$$
$$\sigma^\infty(t) = -\frac{k+1}{4\mu} \left[\sigma_{xx}^\infty + \sigma_{yy}^\infty + \frac{d\bar{\tau}}{d\tau} (\sigma_{yy}^\infty - \sigma_{xx}^\infty - 2\sigma_{xy}^\infty) \right]. \quad (3)$$

其中 $\sigma_{xx}^\infty, \sigma_{yy}^\infty, \sigma_{xy}^\infty$ 为无穷远处所施加的应力; 在平面应变中 $k = 3 - 4\nu$, 在平面应力中 $k = \frac{3 - \nu}{1 + \nu}$, 超奇异积分核 $K_1(\tau, t) = \ln \frac{\tau - t}{\bar{\tau} - \bar{t}}, K_2(\tau, t) = \frac{\tau - t}{\bar{\tau} - \bar{t}}$; 纤维和基体中任意一点的位移可用公式 $u(z) = u_x(z) + iu_y(z)$ 表示, 其中应力和位移可以用下式表示^[7]

$$\begin{cases} 2\mu u(z) = k\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{\psi(z)}; \\ \sigma_{yy} - \sigma_{xx} + \sigma_{xy} = 2[z\varphi''(z) + \psi'(z)]; \\ \sigma_{xx} + \sigma_{yy} = 4\varphi'(z). \end{cases} \quad (4)$$

在公式 (4) 中的复变函数 $\varphi(z), \psi(z)$ 可表示如下^[7]:

$$\begin{cases} \varphi(z) = -\frac{\mu_s}{\pi i(k_s + 1)} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^2 a_{1kj} \int_{L_k} \sigma_{kj}(\tau) \times \ln(\tau - t) d\tau + \varphi^\infty(z); \\ \psi(z) = \frac{\mu_s}{\pi i(k_s + 1)} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^2 \left[a_{1kj} \int_{L_k} \sigma_{kj}(\tau) \frac{\tau d\tau}{\tau - z} + (a_{3kj} - a_{1kj}) \int_{L_k} \bar{\sigma}_{kj}(\tau) \ln(\tau - t) d\bar{\tau} \right] + \psi^\infty(z). \end{cases} \quad (5)$$

当 $|z - z_s| \leq R_{1s}$ 时, μ_s 和 k_s 为纤维内的弹性常量; 当 $R_{1s} \leq |z - z_s| \leq R_{2s}$ 时, μ_s 和 k_s 为界面内的弹性常量; 当点 z 为基体内的一点时 $\mu_s = \mu, k_s = k$.

2 数学模型的建立

为了求解方程 (2) 笔者提出一个在边界 L_{kj} 上的未知应力 $\sigma_{kj}(\tau)$, 其级数表达式为^[6]

$$\sigma_{kj}(\tau) = \sum_{m=1}^M B_{-mkj} F_{mkj} + \sum_{m=0}^M B_{mkj} / F_{mkj}, \quad \tau \in L_{kj}, \quad k = 1, 2. \quad (6)$$

其中 $F_{mkj} = \left(\frac{R_{kj}}{\tau - t} \right)^m$, 系数 $B_{-mkj} (m = 1, \dots, M)$ 和 $B_{mkj} (m = 0, \dots, M)$ 均为待定未知量, M 为傅里叶级数的项数. z 为纤维在直角坐标系中的复坐标, $z = x + iy$. 将 (6) 式代入到 (2) 式中, 可知 $B_{-1kj} = 0$, 且 B_{0kj} 为实数. 对方程 (2) 两边同时乘以表达式 $(t - z_s)^p$, 其中 $p = -(M + 1), -M, \dots, -1, 1, 2, \dots, M - 1$, 可以得到一系列关于未知系数 B_{-mkj} 和 B_{mkj} 的方程.

一般情况下, 相对于 n 根纤维的情形, 计算应力应变时的未知系数 B_{-mkj} 和 B_{mkj} 可以结合方程 (1) ~ (3) 和方程 (6) 计算出来, 但为了方便进一步的研究, 该连乘过程可以以矩阵形式表达, 获得相应的线性代数方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{ss} \mathbf{X}_s &= \mathbf{D}_s, \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

子矩阵 $\mathbf{A}_{ss} (s = 1, \dots, N)$ 是一个 $n = 2(4M - 1)$ 维的方阵, $\mathbf{A}_{sj} (s \neq j)$ 是一个 $n_i \times n_j$ 维矩阵, 表示第 s 根纤维对第 j 根纤维力学性能的影响; 未知矩阵 \mathbf{X} 可以通过高斯赛德尔迭代公式计算得出, 在这个迭代公式中, 令

$$\mathbf{X}^{(k)} = [X_1^{(k)}, X_2^{(k)}, \dots, X_N^{(k)}]^T, \quad k = 0, 1, \dots, n.$$

表示在迭代过程中第 k 次迭代近似值, 由高斯赛德尔迭代公式可得矩阵 \mathbf{X} 的第 $k + 1$ 次迭代表达式^[6]:

$$\mathbf{X}_s^{(k+1)} = \mathbf{A}_{ss}^{-1} \left[\mathbf{D}_s - \sum_{j=1}^{s-1} \mathbf{A}_{sj} X_j^{(k+1)} - \sum_{j=s+1}^N \mathbf{A}_{sj} \times X_j^{(k)} \right], \quad s = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

在迭代过程中, 当 $\|\mathbf{X}_s^{(k+1)} - \mathbf{X}_s^k\| \leq \delta_1, (s = 1, 2, \dots, N)$ 时迭代终止, δ_1 为设定的迭代误差限.

3 计算等效弹性模量

根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[8]

知:混凝土的泊松比 $\nu = 0.2$, 弹性模量 $E_c = 3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 剪切模量 μ 为 0.4 倍的弹性模量, 即 $\mu = 1.2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$; 钢筋的泊松比 $\nu_F = 0.3$, 钢筋的弹性模量 $E_s = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 剪切模量 $\mu_1 = 8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$; 根据材料的界面特性^[9], 取界面的泊松比和剪切模量分别为 $\nu = 0.15, \mu_2 = 0.48 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$. 因此, 在平面应变条件下, 可得平面应变系数 $k = 2.2, k_1 = 1.8, k_2 = 2.4$. 在无无穷远处分别施加应力 $\sigma_{xx}^\infty = 1 \text{ MPa}, \sigma_{yy}^\infty = 0, \sigma_{xy}^\infty = 0$. 根据公式(4), (6) 和(8) 可以算出在纤维、界面和基体内任一点 z 的应力 $\sigma_{xx}(z), \sigma_{yy}(z)$ 和位移 $\mu_x(z), \mu_y(z)$.

在该无限平面内取一个计算单元, 如图 2 所示, 采用文献[10] 中的方法, 通过公式(4) 计算在该单元模型 AB 边上的平均应力和沿 Ox 轴方向和沿 Oy 轴方向的应变

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L \sigma_{xx}(L, y) dy. \tag{9}$$

$$\bar{\varepsilon}_x u_x / (2L) \bar{\varepsilon}_y = u_y / (2L). \tag{10}$$

在沿 Ox 轴方向的等效弹性模量为: $E'_x = \bar{\sigma}_x / \bar{\varepsilon}_x$, 在平面应变条件下的有效泊松比为 $\nu'_{xy} = -\bar{\varepsilon}_y / \bar{\varepsilon}_x$. 则该单元的弹性模量可表示如下^[10]

$$E_x = \frac{1 + 2\nu'_{xy}}{(1 + \nu'_{xy})^2} E'_x. \tag{11}$$

从细观力学的角度出发, 混凝土的代表性体积单元(RVE)的尺寸可以选为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$. 选取等效直径为 0.9 mm , 长度为 30 mm 圆形钢纤维, 体积率分别为 $0.5\%、1.0\%$ 和 1.5% 的钢纤维混凝土作为研究对象. 根据文献[9] 中界面厚度的表示, 钢纤维与基体之间的界面厚度一般取 0.05 mm 左右, 在此取界面层的厚度分别为 $0.040, 0.045, 0.050, 0.055$ 和 0.060 mm , 计算具有不同界面层厚度的钢纤维混凝土等效弹性模量, 图 2~4 分别给出了体积率分别为 $0.5\%、1.0\%$ 和 1.5% 时的钢纤维混凝土的等效弹性模量值 E .

从图 2~4 可以得出以下结果.

1) 等效弹性模量值 E 随着纤维根数的增加而减小, 最终趋于接近某一个定值, 这是由于纤维的根数增多时界面层占有体积在基体中所占的比重增加, 又因界面是钢纤维混凝土中的薄弱环节, 其强度普遍低于混凝土, 故增加钢纤维的根数时则材料的等效弹性模量值减小;

2) 当纤维的根数一定时, 等效弹性模量值 E

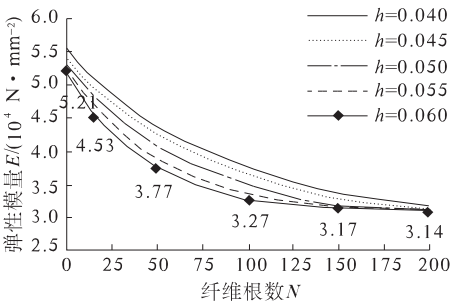


图 2 $\rho_f=0.5\%$ 时的等效弹性模量值 E
Fig. 2 Equivalent elastic modulus E of $\rho_f=0.5\%$

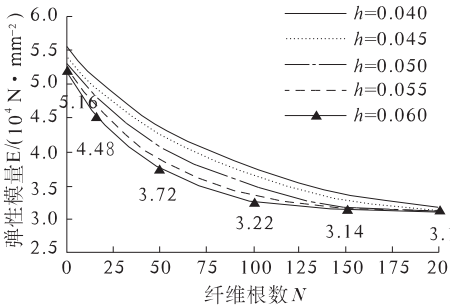


图 3 $\rho_f=1.0\%$ 时的等效弹性模量值 E
Fig. 3 Equivalent elastic modulus E of $\rho_f=1.0\%$

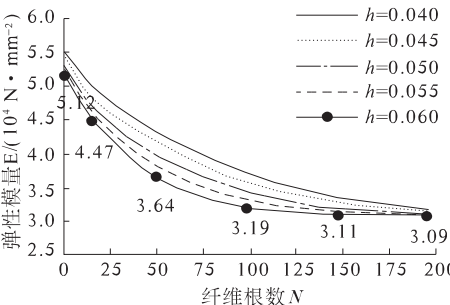


图 4 $\rho_f=1.5\%$ 时的等效弹性模量值 E
Fig. 4 Equivalent elastic modulus E of $\rho_f=1.5\%$

随着界面厚度的增大而逐渐减小, 这是因为界面层的弹性模量小于基体混凝土的弹性模量, 增大界面层厚度就削弱了钢纤维和混凝土之间的粘结强度;

3) 对比图 2~4 可以得出, 当纤维根数和界面层厚度一定时, 钢纤维混凝土的等效弹性模量随着体积率的增大而有所减小. 这是因为掺入了钢纤维以后增多了混凝土内部的界面薄弱层, 并且掺入钢纤维的体积率越大界面薄弱层就越多, 因而弹性模量也有所减小.

4) 结合图 2、图 3 和图 4 可以看出, 通过本模型计算得出的钢纤维混凝土的等效弹性模量值在 $E = 3.11 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 左右; 与文献[11] 中试验测得的钢纤维混凝土的弹性模量值基本相等, 从

而验证了本模型的有效性.

4 结论

笔者采用了超奇异积分方程与 Galerkin 积分方法获得考虑界面层影响的钢纤维混凝土等效弹性模量,考察了纤维体积率、界面层厚度对钢纤维混凝土等效模量的影响,结果表明纤维体积率与界面层厚度均对钢纤维混凝土的宏观弹性模量有显著影响.并通过与实验结果对比验证了该模型的有效性.

参考文献:

[1] ACHENBACH J D, ZHU H. Effect of interphases on micro and macromechanical behavior of hexagonal-array fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1990, 57(4):956-963.

[2] YE H J R. The effect of interface on the transverse properties of composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 1992,29(20):2493-505.

[3] GOSZ M, MORAN B, ACHENBACH J D. On the role of interphases in the transverse failure of fiber composites[J]. International Journal of Damage Mechanics, 1994, 3(2):357-377.

[4] NASSCHI V, DHILLON J, MASCIA L. Finite element simulation of the micromechanical characterization of interface layerpolymer/fiber composite: a study of the in-

teractions between the reinforcing phases[J]. Composite Science and Technology, 1993, 37(2):349-358.

[5] STRACK O D L. Principles of the analytic element method[J]. Journal of Hydrology, 1999, 226(1):128-138.

[6] MOGILEVSKAYA S G, CROUCH S L. A galerkin boundary integral method for multiple circular elastic inclusions [J]. International Journal for Numerical Methods in engineering, 2001, 52(10):1069-1106.

[7] MOGILEVSKAYA S G, CROUCH S L. A galerkin boundary integral method for multiple circular elastic inclusions with uniform interphase layers[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(5/6):1285-1311.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010,混凝土结构设计规[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[9] 郑建军,吕建平,吴殖民. 考虑不均匀界面时混凝土弹性模量预测[J]. 复合材料学报,2008, 25(5):141-146.

[10] LIU Yi-jun, XU Nan. Modeling of interphases in fiber-reinforced composites under transverse loading using the boundary element method[J]. Journal of Applied Mechanics, 2000, 67(1):41-49.

[11] 楼志辉. 钢纤维再生混凝土基本力学性能和断裂性能试验研究[D]. 郑州大学土木工程学院,2007.

Micromechanics Equivalent Performance Study of Steel Fiber Reinforced Concrete with Interface Layers

CHENG Zhan-qi, XIA Nai-kai

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

Abstract: The interfaces between fiber and matrix have significant effect on the toughness and strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC). Therefore, a model is built, that is to investigate the character of its micro-structure of SFRC and the relationship between its microstructure and its macroscopic properties, by using hyper-singular integral equations and complex function. This model is about the unknown stress, strain and displacement on the boundary of fiber, matrix, and interface with considering that fibers randomly distribute in an infinite and isotropic plane. The equivalent elastic modulus of SFRC under plane strain conditions is obtained by using the Galerkin integral method and Gauss-Seidel iterative algorithm method. The influence of the the thickness of interface and the volume fraction of the steel fiber on the elastic modulus is investigated. The numerical results show that both thickness of interface and volume fraction of steel fiber have significant effects on the elastic modulus of the steel fiber reinforced concrete. Then the accuracy, efficiency, and versatility of the model are demonstrated by comparing the numerical results with the results from the test with the same conditions.

Key words: steel fiber reinforced concrete; interface; micromechanics; equivalent elastic modulus

基于块衰落信道的 turbo 码一致界

张卫党, 王姣姣, 陈泽先

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450000)

摘 要: 块衰落信道是应用广泛的一种信道模型, 它接近无线通信系统特性. 利用一致界技术推导出 turbo 码在块衰落信道中的误比特率上界, 针对不同的分组长度和信噪比进行了仿真, 结果表明, 在分组长度小、高信噪比条件下具有优良的性能, 并与 M&L 界、DS2 界进行比较.

关键词: Turbo 码; 块衰落信道; 一致界

中图分类号: TN918.1 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.025

0 引言

由于 Turbo 码的信道容量极限的差错纠正能力^[1], 其性能引起了国际信息论与编码界的广泛关注, Turbo 码的分析与设计成了当前热门的研究课题. Turbo 码在加性白高斯噪声(AWGN)信道下的设计与性能分析已经进行了大量的研究^[2], 在给定信息序列长度和编码速率条件下, 随着信噪比的增加, 不同约束长度的 Turbo 码的性能区别开始增加, 当信噪比较小时, 约束长度小的 Turbo 码的性能要优于约束长度大的 Turbo 码. 对于大多数信道来说, 平稳噪声的 AWGN 信道模型是比较合适的, 而实际的无线传输信道要复杂的多, 传输信号的信道是衰落的, 而且是非平稳的, 其信道增益是一随机过程. 在这种情况下块衰落信道引起了人们的关注, 块衰落信道接近无线通信系统模型, 经常被用来模拟 FH-SS 系统^[3]、TDM 系统、OFDM 系统. 块衰落是处理时间选择性衰落的一种简单方式, 在这个模型中码字被分成 M 块, 每块长为 L , 且增益衰减在每一块中被看成是常量^[4].

在块衰落信道模型中推导码字系统的性能界有很多种方法, 如 M&L 界^[5]、DS2 界^[6]. M&L 界实质上是加拉格界的一个巧妙使用, 但 M&L 界有两个缺点. 第一, 计算度很复杂, 因为牵扯到多维积分; 第二, 对于近遍历块衰落信道, 如果所取分块长度 L 较小, 得不到好的性能界. 而 DS2 界是目前公认的比较好的界, 即使在分块长度 L 较小

的情况下, 它的缺点也是计算度很复杂. 笔者用一致界技术来计算 turbo 码在块衰落中的性能界. 笔者首先建立系统模型, 然后推导出 Turbo 码在块衰落信道中的一致界, 并针对不同的分块长度 L , 特别是 L 较小的情况进行仿真, 然后与 M&L 界、DS2 界进行比较.

1 系统模型

图 1 给出了系统模型. 发送端包括编码器、一个随机交织器和调制器. 输入的信息比特经过编码, 变成码率为 R_c 的二进制线性分组码 C' , 其中 $R_c = K/N$, K 和 N 分别表示输入和输出比特长度. 然后再进行信道交织, 经过交织的分组码可以被看做分组码 C , 它仍然是线性的. 为了简便起见, 这里只考虑二进制相移键控调制(BPSK). 在块衰落信道中, 第 j 个传输信号 s_j 经过信道后可得到^[6]:

$$y_j = \tilde{\alpha}_m \sqrt{\gamma_s} s_j + \tilde{z}_j, \quad (j = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1).$$

式中: 高斯变量 $\tilde{\alpha}_m$ 为信道增益, 在每一块中被看做常量, 且在各块中的变化是相互独立的; \tilde{z}_j 是均值为零的加性高斯噪声, 方差 $E\{|\tilde{z}_j|^2\} = 1$; $\gamma_s = E_s/N_0 = R_c \cdot E_b/N_0$, 表示信噪比(SNR). 假设码字总长度为 N , 在块衰落信道中被分为 M 块, 那么每块中的码字长度为 $L = N/M$.

令 $\tilde{\alpha} = (\tilde{\alpha}_0, \tilde{\alpha}_1, \dots, \tilde{\alpha}_{M-1})^T$ 表示信道增益的列向量, 那么 $\tilde{\alpha}$ 的概率密度函数为

收稿日期:2013-10-11; 修订日期:2013-11-05

基金项目:河南省教育厅自然科学研究项目(2010B510020)

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

$$f(\tilde{\alpha}) = \frac{1}{\pi^M} \exp(-|\tilde{\alpha}|^2) = \frac{1}{\pi^M} \exp(-\tilde{\alpha}^H \tilde{\alpha}). \quad (2)$$

这里 $(\cdot)^H$ 表示厄米特转置.

笔者假设采用相关检测,因此,复杂的信道模型可以被简化成下边的实信道模型

$$y_j = \alpha_m \sqrt{2\gamma_s} s_j + z_j. \quad (3)$$

式中: $y_j = R(\sqrt{2} \tilde{r} \cdot \tilde{\alpha}_m^* / |\tilde{\alpha}_m|)$, $R(x)$ 为 x 的实部, $(x)^*$ 为 x 的共轭, z_j 为高斯噪声的实部,并且 $\alpha_m = |\tilde{\alpha}_m|$ 的概率密度函数为

$$p(\alpha_m) = 2\alpha_m \exp(-\alpha_m^2), \alpha_m \geq 0. \quad (4)$$

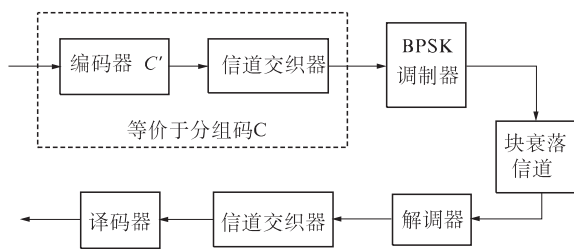


图1 系统模型

Fig.1 System model

2 公式推导

这部分,将利用一致界技术推导出turbo码在块衰落信道中的误比特率.对于turbo码来说假设有 k 个输入比特,那么它的比特错误概率的上界为^[7]

$$p_b \leq \frac{1}{k} \sum_{d=d_{\min}}^N w_d p(d). \quad (5)$$

式中: d_{\min} 为码字的最小距离; $p(d)$ 为非条件成对错误概率,假设传输的为全零码字,那么在接收端收到的是码重为 d 的码字的概率,即 $p(d)$; $w_d = \sum_{i=1}^N i A_{i,d}$ 是输出码重为 d 的码字个数,其中 $A_{i,d}$ 表示输入重量为 i 而输出重量为 d 的码字个数.在有交织器的情况下求码重分布是很困难的,所以在这里我们采用均匀交织.下面就着重分析在块衰落信道下的非条件成对概率 $p(d)$.

在块衰落信道下, $p(d)$ 即为 d 个非零比特在 M 个衰落块中的分布函数.这里定义 f_v 为码重是 v 的衰落块数,并令 $w = \min(L, d)$,那么衰落块的重量分布为 $f = \{f_v\}_{v=0}^w$,则

$$\begin{cases} M = \sum_{v=0}^w f_v; \\ d = \sum_{v=1}^w v f_v. \end{cases} \quad (6)$$

令 $F = M - f_0$,表示重量非零的块数.

那么, $p(d)$ 可表示成

$$p(d) = \sum_{L=\lfloor d/m \rfloor}^d \sum_{f_1=0}^{F_1} \sum_{f_2=0}^{F_2} \cdots \sum_{f_w=0}^{F_w} P_u(d|f) p_d(f). \quad (7)$$

其中:

$$F_v = \min \left\{ F - \sum_{r=1}^{v-1} f_r, \frac{d - \sum_{r=1}^{v-1} r f_r}{v} \right\}, 1 \leq v \leq w. \quad (8)$$

$$p_d(f) = \frac{\binom{L}{1}^{f_1} \binom{L}{2}^{f_2} \cdots \binom{L}{w}^{f_w}}{\binom{LM}{d}} \cdot \frac{M!}{f_0! f_1! \cdots f_w!}. \quad (9)$$

式中: $p_d(f)$ 表示有 d 个非零比特在 M 个衰落块中的分布概率.

下面着重求 $p_u(d|f)$,首先要利用在 $\tilde{\alpha}$ 条件下,码字 c 被译为 \hat{c} 的条件成对错误概率 $p_c(d|f)$.

$$p_c(d|f) = Q \left(\sqrt{\frac{\gamma_s}{2}} d_E^2(c, \hat{c} | \tilde{\alpha}) \right). \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } d_E^2(c, \hat{c} | \tilde{\alpha}) &= \sum_{m=0}^{M-1} |\tilde{\alpha}_m|^2 \sum_{l=0}^{L-1} |s_{mL+l} - \hat{s}_{mL+l}|^2 \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} 4 |\tilde{\alpha}_m|^2 h_m = 4 \tilde{\alpha}^H D(h) \tilde{\alpha}. \end{aligned} \quad (11)$$

$h = (h_0, h_1, \dots, h_{M-1})^T$, $D(h) = \text{diag}(h_0, h_1, \dots, h_{M-1})$; h_m 表示在第 m 个衰落块中码字 c 与 \hat{c} 之间的汉明距离.其中^[8],

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp \left(-\frac{x^2}{2 \sin^2 \theta} \right) d\theta. \quad (12)$$

对 $\tilde{\alpha}$ 的所有情况取均值即可求得 $P_u(d|f)$,

$$P_u(d|f) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \prod_{v=0}^w \left(1 + \frac{\gamma_s}{\sin^2 \theta} h_m \right)^{-f_v} d\theta. \quad (13)$$

将公式(13)代入公式(7)中,即可得到 $p(d)$,最后将 $p(d)$ 代入公式(5)中即可得到误比特率.

3 仿真结果及分析

笔者对turbo码在块衰落信道下的一致界进行了估算.采用码率为1/3的turbo码、BPSK调制和ML译码,并对不同的分块长度 L 进行估算.在高信噪比情况下,低码重的分布决定了码字的性能,所以笔者只考虑码重低于22的情况.

图2给出了 $L=2, 4$ 这两种情况下的一致界和仿真结果.从图2系列结果可以看出:在信噪比较小的情况下,得不到较好的界,这是因为在低信噪比下,码字性能由高、低码重分布共同决定,而笔者只考虑了低码重部分,但是随着信噪比的增

加,计算得到的一致界渐渐接近仿真结果. 并且对于不同的分块长度 L , 其结果也不一样, $L = 2$ 时得到的性能界要好于 $L = 4$ 的情况, 并且分块长度越小得到的界也越好, 因为分块长度越小, 越接近实际情况, 计算越精确, 得到的一致界也越接近仿真结果.

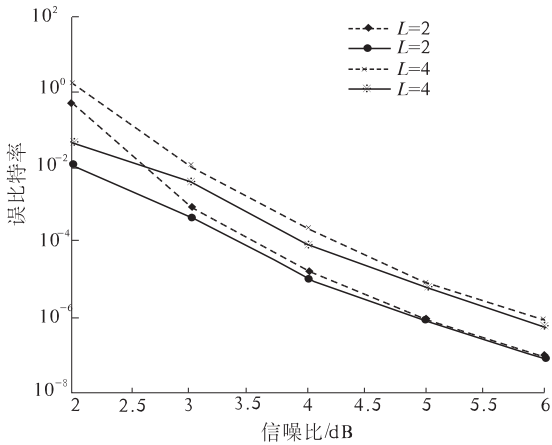


图2 码率为 1/3 的 turbo 码在
分块长度 $L = 2, 4$ 时的一致界
Fig.2 The union bound of a rate-1/3
Turbo code with block lengths $L = 2, 4$

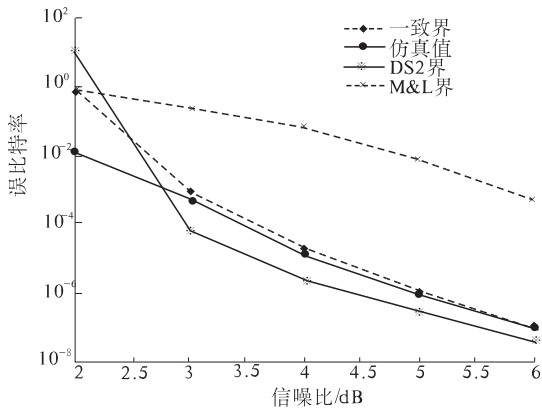


图3 码率为 1/3 的 turbo 码在块衰落信道下
的一致界与 M&L 界、DS2 界的比较
Fig.3 Comparison of the M&L bound、DS2 bound
and union bound for the rate-1/3 Turbo code

在图 3 中, 采用码率为 1/3 的 turbo 码、BPSK 调制和 ML 译码, 在块衰落信道中对一致界和 M&L 界、DS2 界进行了比较. 从图中可以得出一致界要明显好于 M&L 界, 因为在分块长度 L 较小的情况下得不到很好的 M&L 界, 而 DS2 界有个迅速下降的“瀑布区”(即误比特率有一个迅速下降的区域), 然后变成“错误平层”(误比特率曲线趋于平缓), 一致界随着信噪比的增加也迅速下

降, 但没有 DS2 界那么明显. 然而在高信噪比下两条界之间的差距在慢慢缩小.

4 结论

笔者推算出了 turbo 码在块衰落信道下的一致界, 一致界的计算度并不复杂. 并就不同的分块长度和信噪比情况对结果进行了仿真. 从结果得出在码率、调制和译码方法一样的情况下, 当分块长度 L 越小计算出来的一致界越好, 并随着 L 的增加, 差距也会增加. 与 M&L 界、DS2 界比较的结果表明, 一致界要明显好于 M&L 界, 但却没有 DS2 界下降速度快, 但是随着信噪比的增加, 两者的差距在不断缩小, 并且一致界的计算度最简单. 所以一致界算法在块衰落信道下是有一定优势的, 特别是在分块长度 L 较小的情况下.

参考文献:

[1] SHANNON C E. A Mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27 (7): 379 - 423, 623 - 656.

[2] ABHISHEK K S, CHAKRABARTI S. Performance evaluation of asymmetric turbo codes using log-MAP decoding technique [C]//Devices and Communications. Mesra, 2011.

[3] STARK W E. Coding for frequency-hopped spread-spectrum communication with partial band interference-Part I: Capacity and cutoff rate [J]. IEEE Trans. Commun., 1985, 33(10): 1036 - 1044

[4] ASYHARI A T, FABREGAS A G I. Nearest neighbor decoding in MIMO block-fading channels with imperfect CSIR [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2012, 58 (3): 1483 - 1517.

[5] SRINIDHI N, DATTA T, CHOCKALINGAM A, et al. Layered tabu search algorithm for large-MIMO detection and a lower bound on ML performance [J]. IEEE Trans. on Commun., 2011, 59(11): 2955 - 2963.

[6] DUMAN T M, SALEHI M. New performance bounds for turbo codes [J]. IEEE Trans Commun., 1998, 46 (6): 717 - 723.

[7] WU Xiao-fu. XIANG Hai-ge. New gallager bounds in block-fading channels [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2007, 53(2): 684 - 694.

[8] SIMON M K, ALLUINI M S. Digital Communication Over Fading Channels [M]. New York: Wiley, 2000.

Union Bound of Turbo Codes on Block-Fading Channels

ZHANG Wei-dang, WANG Jiao-jiao, CHEN Ze-xian

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

Abstract: Block-Fading is a popular channel model that approximates the behavior of different wireless communication systems. In this paper, we propose the upper bound on the error performance of Turbo codes over block-fading channel by employing union bound techniques, several simulations are conducted with different block sizes and different SNRs on block-fading channels. The simulation results show that Turbo codes have good performance with small block size and high SNR, and comparisons with the M&L bound and the DS2 bound were made.

Key words: Turbo code; block-fading channel; union bound

(上接第 84 页)

[8]

STOECKLI F, CENTENO T A, FUERTES A B, et al. Porous structure of polyarylamide-based activated carbon fibres[J]. Carbon, 1996, 34(10) : 1201 – 1206.

[9]

YATES M, BLANCO J, AVILA P, et al. Honeycomb monoliths of activated carbons for effluent gas purification[J]. Microporous and Meso-porous Materials, 2000, 37(1/2) : 201 – 208.

[10]

LOZANO-CASTELL D, CAZORLA-AMOR S D, LINARES-SOLANO A. Activated carbon monoliths for methane storage. Influence of binder [J]. Carbon, 2002, 40(15) : 2817 – 2825.

[11]

程晓波,尹柄奎. 污泥碳化制备活性炭[J]. 化工环保, 2010, 430(5) : 446 – 448.

[12]

张高生,曲久辉,刘会娟,等. 活性炭/铁氧化物磁性复合吸附材料的制备及去除水中酸性橙 II 的研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11) : 1763 – 1768.

[13]

QIU Yu-ping, CHENG Hai-yan, CHAO Xu, et al. Surface characteristics of crop-residue-derived black carbon and lead(II) adsorption[J]. Water Research, 2008, 42(3) : 567 – 574.

The Preparation and Analysis of Shaped Magnetic Sludge Activated Carbon

XU Zheng-tan, LIU Xin-zhong

(College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A kind of shaped magnetic sludge activated carbon was prepared via ZnCl₂ activation-tubular furnace pyrolysis, activated carbon/iron oxide co-precipitation and module-shaped technics. The optimization of preparation process, as well as the micromorphology and properities of the activated carbon materials, was investigated by orthogonal experiments, BET, SEM, IR and magnetization measurements. The experimental results showed that the iodine number and specific surface area of sludge activated carbon were over 330 mg/g and 300 m²/g at ZnCl₂ concentration 3 mol/L, reaction time 2 h, temp. 650 ℃, and liquid-solid ratio 2: 1. Because the magnetic sludge activated carbon could be easily removed from the medium by a simple magnetic procedure, it was expected to have a fine application prospect.

Key words: sludge; activation; activated carbon; shaped; magnetic

一种新的 OFDM-OQAM 的信道估计方法

范文兵, 范程龙, 李海涛, 邢军阳

(郑州大学 信息工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要: OFDM/OQAM 系统由于不需要插入保护间隔,有更高的频谱效率,可以同时抵抗符号间干扰和信道间干扰等特点,已成为传统 OFDM 系统的一种替代方案. 基于新的导频序列结构和 OFDM/OQAM 的系统特点,分析了系统相邻子载波之间的相关性,提出了一种新的基于导频序列结构的信道估计方法,通过计算相邻子载波的相关系数,有效降低干扰和噪声对信道估计的影响. 仿真结果表明,这种导频结构有利于降低噪声对信道估计的影响,从而提高系统的性能.

关键词: OFDM/OQAM;信道估计;滤波器;导频

中图分类号: TM614 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.026

0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术能够有效对抗多径衰落的多载波技术,因其具有大容量、高速率通信等特点,成为当前和未来无线通信的标准和重要基础. 但传统 OFDM 系统需要插入保护间隔,以牺牲频谱的利用效率为代价来消除符号间干扰(Inter-symbol Interference, ISI);OFDM 的另一个缺点是 OFDM 系统中的时域矩形窗对频率偏移敏感,导致系统的频谱边带较高.

正交频分复用/偏移正交幅度调制(OFDM/Offset QAM, OFDM/OQAM)系统作为 OFDM 的一种改进的替代方案,不需要插入保护间隔,具有更高的频谱效率. 采用良好的时-频特性成形滤波器,可以同时抵抗符号间干扰(ISI)和信道间干扰(ICI). 传统的 OFDM 系统以一定的速率发送复数符号,而 OFDM/OQAM 系统需要将复数符号实虚部以半个符号周期为间隔分开发送,所以两个系统有相近的符号发送速率. 发送信号经过多径信道后,幅度和相位都会发生变化,如果没有进行数据均衡,接收符号会严重的失真. 因此信道估计是一项很重要的工作,其性能严重地影响系统的性能. 然而由于 OFDM/OQAM 的正交性条件只在实数域上成立,OFDM/OQAM 发送的实数符号相

互之间会造成虚部干扰,所以已有的 OFDM 信道估计方法不能直接用于 OFDM/OQAM 系统. 文献[1]提出了一种基于序列的信道估计方式,文献[2]提出了两种基于序列的信道估计方式,前一种方法 IAM 需要三列导频,后一种方法 POP 需要两列训练序列,它节省了导频开销,然而信道估计的性能相比于第一种方法有所下降. 文献[3-4]提出了一种基于离散导频的信道估计方法和一种新的基于离散导频方法,通过对导频点周围数据的线性组合,它有更小的导频能量损耗.

笔者提出了一种新的导频序列结构,相比文献[2]中提出的两种导频序列结构,这种序列结构能够进一步降低噪声对信道估计的影响,提高信道估计的性能.

1 OFDM/OQAM 系统模型

正交频分复用/偏移正交幅度调制系统基带发送信号可以表示为

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} a_{m,n} g(t - n\tau_0) e^{j2\pi n F_0 t} e^{j\phi_{m,n}}.$$

(1)

式中: $a_{m,n}$ 是实数符号,通过分别取复数符号的实部和虚部得到. 实部和虚部间隔周期为 $T/2$; m, n 分别为数据的频域和时域序号; $g(t)$ 是系统滤波器,它是一个对称的实滤波器; M 为 OFDM/

收稿日期:2013-09-01;修订日期:2013-11-09
基金项目:河南省教育厅自然科学基金项目(2010A510014);郑州市科技攻关项目(0910SCYG25229-6)
作者简介:范文兵(1969-),男,河南周口人,郑州大学教授,博士,主要从事信号与信息处理、射频识别技术、图像处理等方面的研究,E-mail:iewbfan@zzu.edu.cn.

OQAM 系统子载波的个数; F_0 是 OFDM/OQAM 系统子载波间隔; $\phi_{m,n}$ 为系统的旋转相位.

$$F_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\tau_0}.$$

(2)

$$\phi_{m,n} = \phi_0 + \frac{\pi}{2}(m+n) \pmod{\pi}.$$

(3)

式中: ϕ_0 可以取任意值,取 $\phi_0 = 0$.

OFDM/OQAM 发送端系统框图如图 1 所示.

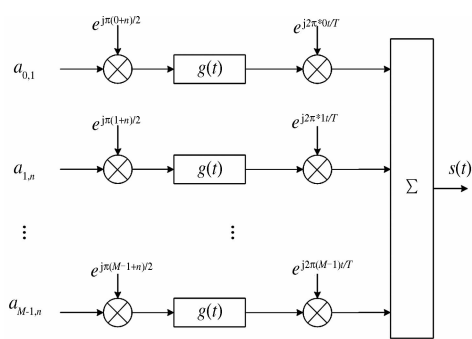


图 1 OFDM/OQAM 系统发送端框图

Fig. 1 Diagram of the OFDM/OQAM system semder

为方便说明,定义 OFDM/OQAM 系统的基发送信号的核函数为

$$g_{m,n}(t) = g(t - n\tau_0) e^{j2\pi m F_0 t} e^{j\phi_{m,n}}.$$

(4)

OFDM/OQAM 系统的正交性条件为

$$R \{ g_{m,n}(t) g_{p,q}^*(t) dt \} = \delta_{m,p} \delta_{n,p};$$

(5)

$$E_{m,n}^{p,q} = \int g_{m,n}(t) g_{p,q}^*(t) dt.$$

(6)

式中: $E_{m,n}^{p,q}$ 的大小仅 $m-p$ 与 $n-q$ 和的值有关. 当 $(m,n) = (p,q)$ 时, $E_{m,n}^{p,q} = 1$; 当两个差值不同时为 0 时, $E_{m,n}^{p,q}$ 是一个纯虚数,其取值如表 1 所示.

表中给出了 9 个位置的 $E_{m,n}^{p,q}$ 值,当 $(m-p) > 1$ 或者 $(n-q) > 1$ 时, $E_{m,n}^{p,q}$ 很小.

OFDM/OQAM 系统的发送信号通过一个多径信道,它的冲激响应为 $h(t)$,同时信道受到高斯白噪声 $\eta(t)$ 的干扰,则接收端收到的信号为

$$y(t) = s(t) \cdot h(t) + \eta(t).$$

(7)

式中, $y(t)$ 为接收端收到的信号.

表 1 $E_{m,n}^{p,q}$ 的数值

Tab. 1 The value of $E_{m,n}^{p,q}$

$E_{m,n}^{p,q}$		$m-p$		
		1	0	1
$n-q$	-1	-0.000 0 -0.250 1i	-0.000 0 -0.318 3i	-0.000 0 -0.250 1i
	0	0.000 0 +0.500 4i	0.999 7 -0.000 0i	0.000 0 -0.500 4i
	1	0.000 0 -0.250 1i	-0.000 0 +0.318 3i	0.000 0 -0.250 1i

解调后的接收信号为

$$y_{m,n} = \int y(t) g(t - n\tau_0) e^{-j2\pi m F_0 t} e^{-j\phi_{m,n}} dt.$$

(8)

上式可以重写为

$$y_{m,n} = H_{m,n} (a_{m,n} + ja_{m,n}^c) + \eta^c.$$

(9)

式中: $a_{m,n}^c$ 为 $a_{m,n}$ 周围的导频点对它的干扰; $H_{m,n}$ 为信道的频率响应.

η^c 离散形式可以写为

$$\eta^c = \sum_{k=0}^{\infty} \eta(k) g(k - n \frac{M}{2}) e^{-j2\pi m k/M} e^{-j(m+n)\pi/2}.$$

(10)

所以 OFDM/OQAM 的信道估计为

$$H_{m,n} = \frac{y_{m,n}}{a_{m,n} + ja_{m,n}^{(*)}} + \frac{\eta^c}{a_{m,n} + ja_{m,n}^{(*)}}.$$

(11)

2 信道估计导频序列设计分析

对于 OFDM/OQAM 系统所用的升余弦滤波器, $a_{m,n}$ 周围 8 个导频点对它的影响很大,其余导频点的影响相比很小,如果考虑这些导频点,就要增加系统开销,而对系统信道估计的性能影响不

大,所以,这些导频点的影响我们忽略不计. OFDM/QOAM 系统的导频序列一般使用三列数据,时频数据块如图 2 所示.

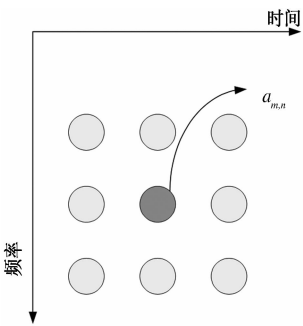


图 2 时频数据块

Fig. 2 Date block of time-frequency

文献[2]中提出了两种 OFDM/OQAM 的导频序列结构 IAM1 和 IAM2. 图 3 为 OQAM 系统的一种帧结构,导频序列 $a_{m,n}$ 是独立同分布随机参数,等概率随机取 $\frac{\sqrt{3}}{3}$ 和 $-\frac{\sqrt{3}}{3}$. 另一种帧结构 IAM2 如图 4 所示.

由信道估计的公式知道, $a_{m,n} + ja_{m,n}^{(*)}$ 幅值越大, 噪声对信道估计的影响越小, 而 $a_{m,n}$ 周围 8 个点对它的影响, 分别是一个固定的虚数见表 1, 所以打破导频序列 IAM1 数据正负的随机性, 就可以增大 $a_{m,n}^{(*)}$ 的值. 通过导频设计来增大 $a_{m,n} + ja_{m,n}^{(*)}$ 的幅值, 从而提高信道估计的性能. 据此笔者提出了一种新的导频序列结构 IAM3.

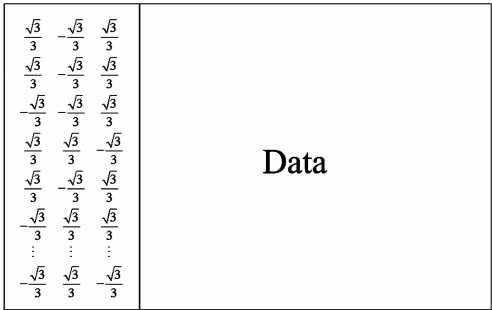


图 3 IAM1 帧结构

Fig. 3 IAM1 frame structure

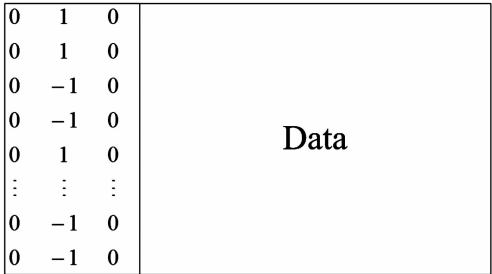


图 4 IAM2 帧结构

Fig. 4 IAM2 frame structure

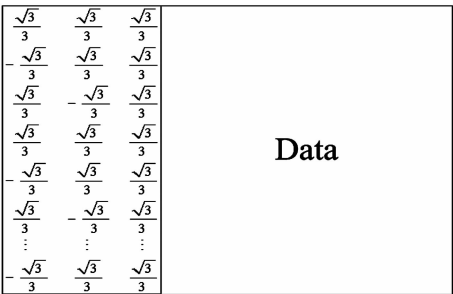


图 5 IAM3 帧结构

Fig. 5 IAM3 frame structure

如图 5 所示, 为了使 IAM3 所使用的导频总能量和 IAM2 相同, 因为 IAM2 导频部分能量为 M , 为了保证新设计的导频能量不变, 由如下公式计算导频点值:

$$a_{m,n}^{(*)} = E_{m,n}^{m-1,n-1} a_{m-1,n-1} + E_{m,n}^{m,n-1} a_{m,n-1} + E_{m,n}^{m+1,n-1} a_{m+1,n-1} + E_{m,n}^{m-1,n} a_{m-1,n} + E_{m,n}^{m+1,n} a_{m+1,n} + E_{m,n}^{m-1,n+1} a_{m-1,n+1} + E_{m,n}^{m,n+1} a_{m,n+1} + E_{m,n}^{m+1,n+1} a_{m+1,n+1}$$

可知每个时频点的幅值都是 $\sqrt{3}/3$. 以 3×3 数据块为单位做一个导频块, 中间的导频点数值为 $\sqrt{3}/3$,

其他的导频点都有固定的导频值. 由表 1 所示, 导频块 8 个点对中间点的影响都是虚数, 而且正负号都是固定的, 所以 $E_{m,n}^{p,q}$ 的正负号是固定的. 如果要使 $a_{m,n}^{(*)}$ 具有最大的绝对值, 那么导频序列必须设计成如下形式.

$$\begin{matrix} \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{matrix}$$

3 仿真结果

考虑一个 IEEE802.22 标准的信道模型来比较 OFDM 和 OFDM/OQAM 的系统. 仿真中系统的参数如下: 采样率为 9.14 MHz, 信道的路径个数为 6, 各个路径的功率剖面为: -6.0, 0.0, -7.0, -22.0, -16.0, -20.0, 延时剖面为: -3, 0, 2, 4, 7, 11, 子载波个数为 2 048, 调制方式为 QPSK, 编码方式为卷积编码 ($K = 7, g_1 = (133)_8, g_2 = (171)_8$, 编码率为 0.5), 帧长为 41 个 OFDM 符号, OFDM 保护间隔为 14.22 μ s.

图 6 为不同导频序列下的系统性能仿真. 4 种导频序列的能量相等. 从仿真结果可以看出, OFDM/OQAM 系统 IAM1 序列的信道估计性能比 OFDM 差, 而 OFDM/OQAM 系统 IAM2 序列的信道估计性能比 OFDM 好. 笔者提出的导频序列的信道估计性能优于 IMA2 大约 1 dB.

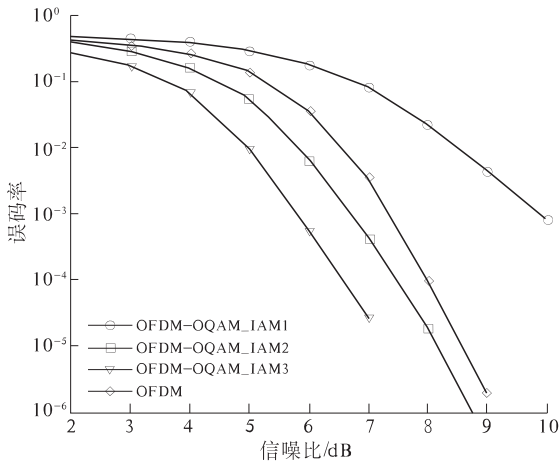


图 6 不同导频序列的性能估计

Fig. 6 Assessment of performance in different pilot frequency sequence

4 结论

笔者研究了 OFDM/OQAM 的信道估计问题,提出了一种新的导频结构,以使得在导频能量有限的情况下,增大 $a_{m,n} + ja_{m,n}^{(*)}$ 的模值,减小噪声对信道估计的干扰. 与传统的 OFDM 系统相比,OFDM/OQAM 系统需要 1.5 个 OFDM 符号开销. 在相同的导频能量下,OFDM/OQAM 系统的信道估计性能要好于 OFDM,这是因为 OFDM/OQAM 系统子载波之间的虚部非正交性,所以子载波的上下两个子载波上的导频能量对它的信道估计也有贡献. 通过仿真发现,IAM3 的信道估计的性能要好于已有的 IAM2 的性能,因此 IAM3 是一种有效的序列导频结构.

参考文献:

[1] KWAK, K, LEE, S, HONG D. et al. A new dFT - based channel estimation approach for oFDM with virtual subcarriers by Leakage Estimation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7 (6) :2004 - 2008.

[2] LELE C, JAVAUDIN J P, LEGOUABLE R, et al. Channel estimation methods for preamble-based OFDM/OQAM modulations [J]. European Transactions on Telecommunications,2008,19(7) : 1750.

[3] JAVAUDIN J-P, LACROIX D. ROUXEL A. Pilot-aided channel estimation for OFDM/OQAM [C]//57th

IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference. South Korea: Jeju, 2003 : 22 - 25.

[4] KWAK K, LEE S, MIN H, et al. New OFDM Channel Estimation with Dual - ICI Cancellation in Highly Mobile Channel [J]. IEEE transactions on wireless communications,2010,9(10) :3155 - 3165.

[5] YING Yin-di, YU Xin-wei. ML-Based Channel Estimations for Non-Regenerative Relay Networks with Multiple Transmit and Receive Antennas [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30 (8) :1428 - 1439.

[6] HARIS G, MIKA S, FUMIYUKI A, et al. Performance Analysis of Analog Network Coding with Imperfect Channel Estimation in a Frequency-Selective Fading Channel[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2012,11(2) :742 - 750.

[7] PREMKUMAR M, SENTHILKUMARAN V N, THIRVVENGADAM S J, et al. BLUE-Based Channel Estimation Technique for Amplify and Forward Wireless Relay Networks[J]. ETRI Journal,2012,34(4) : 511 - 517.

[8] 程国兵,肖丽霞,肖悦,等. 一种改进的 OFDM/OQAM 系统信道估计算法[J]. 电子与信息学报, 2012,34(2) :427 - 432.

[9] 詹朝武. 一种基于导频的 OFDM 信道估计优化算法[J]. 电视技术,2010,34(11) :16 - 18.

[10] 张继东,郑宝玉. 基于导频的 OFDM 信道估计及其研究进展[J]. 通信学报,2003, 24(11) :116 - 124.

A New OFDM-OQAM Channel Estimation Method

FAN Wen-bing, FAN Cheng-long, LI Hai-tao, XING Jun-yang

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

Abstract: It is not necessary for the OFDM/OQAM system to insert the guard interval, with a higher spectral efficiency can be resistance to inter-symbol interference and inter-channel interference characteristics at the same time, the legacy OFDM system has become an alternative. This paper is based on the new pilot sequence structure and the system features of the OFDM / OQAM, the system analyzes the correlation between adjacent sub-carriers, a new channel estimation method based on the pilot sequences structure, by calculating the adjacent the correlation coefficient of subcarriers reduce the interference and noise on the channel estimation. The simulation results show that the structure of this pilot will help reduce the impact of noise on the channel estimation to improve the performance of the system.

Key words: OFDM/OQAM; channel estimation; filter; pilot

文章编号:1671-6833(2014)01-0116-04

基于规则推理的继电保护动作行为评价的新方法研究

徐 敏¹, 陈 全¹, 张锦文², 柯朝辉², 姚 斌², 冯 超²

(1. 南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 湖北省咸宁供电公司, 湖北 咸宁 437000)

摘 要: 基于规则推理方法的专家系统理论, 结合故障录波数据、保护装置的整定数据、保护装置的运行数据等各项数据信息, 根据调度人员以及继电保护运行专家多年经验总结出的各种规则进行推理, 对地区电网继电保护装置的動作行为进行分析与评价. 不仅包括差动保护, 相间距离保护和接地零序方向保护之内的一整套线路保护装置的工作原理, 还结合实际的保护动作情况, 进行动作行为的分析与评价. 通过 VC++ 的界面设计形成一个分析软件系统, 应用于地区电网.

关键词: 专家系统; 继电保护装置动作行为分析; 规则推理; 评价; 分析软件

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.027

0 引言

目前各厂家的保护装置的保护功能随着技术的发展已经变得越来越规范和完善, 但是在一些情况下, 继电保护装置的不正确动作依然存在. 保护装置的不正确动作势必会对电力系统的稳定运行产生影响, 因而对继电保护装置的動作行为分析评价, 显得尤为重要^[1-2]. 笔者采用 VC++ 编程, MFC 界面技术和数据库技术结合专家系统的理论和保护装置的运行原理, 研究与 SCADA 系统、继电保护装置的整定信息系统以及录波数据相结合的继电保护装置動作行为的评价分析.

1 评价分析原理概述

在电网运行中, 有很多难以预料的运行方式, 如将分析结果同实际的動作跳闸数据进行对比, 结合基于规则推理方法的专家系统原理的推理机制, 便能给出该保护装置的动作行为评价.

1.1 知识库的组成原理

该程序用到保护配置的数据可形成四种框架, 包括参数表、线路保护動作信息表、故障录波数据表、保护装置整定信息表. 这 4 种框架又会以不同元件(线路、变压器和母线)而有一定的差别.

(1) 设备参数表: 包括设备名称、电压等级、

设备型号等, 其中线路信息还包括线路长度、每公里的电阻值和电抗值等; 变压器信息还包括各侧额定电压、接线组别和额定容量等.

(2) 保护動作信息表: 包括保护装置名称、保护类型、動作情况、動作相别、是否重合闸以及重合方式. 同时还包含故障状态信息, 如故障类型、故障相别、故障性质、故障时间等等.

(3) 故障录波实时数据表: 包括故障点故障测距、设备各相电压、设备各相电流以及采样时间. 其中, 电压和电流都包含幅值以及相位角.

(4) 保护装置整定信息表: 由各元件上配置的保护装置的定值清单提供, 包括保护整定值信息和保护运行数据信息.

根据 SCADA 系统、故障录波器及继电保护装置所提供的数据, 按照各厂家提供的各系列保护装置的说明书, 对保护装置的動作情况进行分析. 该分析软件所涉及到的数据, 均以数据库的形式进行存储, 为专家系统知识库提供基础信息^[3].

1.2 基于 RBR 专家系统的原理

专家系统是一个基于规则和知识的人工智能推理系统, 基于规则推理(Rule Based Reasoning, RBR)的专家系统方法是根据以往专家诊断的经验, 将其归纳成规则, 通过启发式经验知识进行推理. 它具有明确的前提, 得到确定的结果. 它由 3

收稿日期: 2013-09-01; 修订日期: 2013-11-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(207274006)

作者简介: 徐敏(1963-), 女, 江西南昌人, 南昌大学副教授, 博士, 主要从事电力系统分析、电力系统运行与控制的研究, E-mail: xumin_8660@163.com.

部分框架组成.

(1) 严格的数学公式和精确的算法组成的知识库:利用 SCADA 系统、故障录波器及继电保护装置所提供的数据及逻辑原理形成知识库.

(2) 以经验知识以及专业规则组成的规则库:规则中的知识都是来自知识库,以产生式规则的形式来表示成“模式-动作”对.这些规则表示十分自然简洁,可以改造它们,也可以增加删减,对规则库的人工删减有很大的优点.

(3) 推理机制和控制策略的实现:采用正向推理方式实现推理机制和控制策略,执行循环替换的交互式程序,搜索规则表直到找到一个其前提与事实或状态相匹配的规则为止,然后使用或激活这个规则,断言新的事实,规则一旦被使用,它就不能在同一搜索中再次使用,因为激活该规则所得到的事实已经加入到知识库中^[4-5].

2 基于 RBR 的专家系统的评价系统设计

2.1 知识库的设计

专家系统的基础是知识库,也是建立专家系统的关键.采用面向对象 VC++ 技术实现的专家系统,需要用面向对象技术的知识库.

知识库的设计过程如图 1 所示.

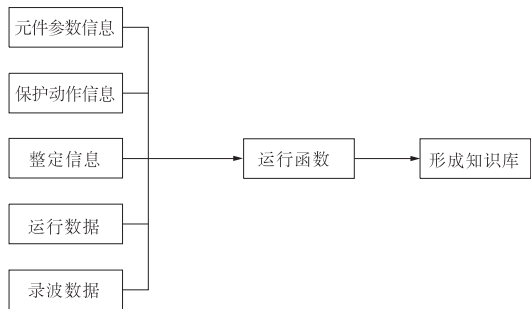


图 1 知识库的设计过程
Fig. 1 Design process of knowledge base

其中运行函数部分按照保护装置的逻辑原理实现^[6].

2.2 规则库的设计

规则库由两部分组成,即前提库与结论库.前提库来自知识库,在保护装置逻辑原理的运行过程中,形成其中各个模块的运行情况,如启动模块、选相模块、差动继电器模块、距离元件模块、零序元件模块,这些模块的运行情况,加入前提库中.结论库来自继电保护运行的各个规程以及各运行工作人员的经验知识.产生规则库后,本系统以产生式规则的形式来表示规则,即表示成“模

式-动作”对,规则将所一一对应的前提和结论在数组中的编号以两个数组(规则前提数组和规则结论数组)的形式存储,供推理机使用^[7-8].

2.3 正向推理方式的推理机设计

推理机以正向推理的方式来实现的,它用于断言那些与规则的前提相匹配的事实,并用于进一步推断事实.正向推理的详细处理过程如下.

- (1) 断言一个事实;
- (2) 使事实与某个规则的前提相匹配;
- (3) 完成事实和前提的合一替换;
- (4) 把替换应用于规则的结论;
- (5) 断言结果,并用于进一步的推理.

按照上面的查询匹配后,若该条规则成立,则输出该条规则所对应的结论;若不成立,则查询匹配下一条规则,直至规则中的前提数组为空为止^[9-11].

专家系统应用于动作行为评价的设计过程,结合了 VC++ 的 MFC 界面设计技术和数据库的技术.知识库中各类参数都可以形成界面输入或者文件导入的形式,存储于数据库中,并经数据库的转换为运行函数实现;规则库的设计可以在界面上进行添加与删除,及时更新规则库,以保证动作行为分析评价的正确性和全面性;推理机设计中的查询与匹配过程可以形成友好直观的界面选择,加强推理机的灵活性.

3 实例的应用实现

3.1 继电保护装置逻辑知识处理

以南瑞 RCS-931 数字式线路保护装置为例,形成一系列数据处理的类和函数.按照上文知识库的形成原理中所介绍,元件参数类、保护动作信息类、整定信息类和运行信息类被定义并获取,通过故障录波器的数据以及南瑞 RCS-931 数字式线路保护装置的逻辑原理,生成逻辑信号运算函数、分析结果的产生函数以及结论输出函数.

3.2 专家系统理论的实现

如上介绍形成知识库后,存入规则前提库中.按照各类规程和专家知识形成规则结论库,并形成规则前提数组和规则结论数组.该部分程序包含前提类,结论类和规则类,以存储规则前提库,规则结论库,规则以及实现推理咨询匹配的过程.

(1) 规则.根据国家能源局颁布的《电力系统继电保护及安全自动装置运行评价规程》以及多年以来工作人员总结的电力系统继电保护

典型事故经验知识^[12],形成一系列可增减的规则库.

规则一:IF B 相启动元件启动 AND B 相差动继电器启动 AND 选相元件选 B 相 AND B 相发动作允许信号

THEN B 相高频保护的通信通道破坏

规则二:IF A 相启动元件启动 AND A 相差动继电器启动 AND 选 A 相 AND A 相发动作允许信号 AND A 相保护出口 AND 三相跳闸

THEN 单相接地短路误跳三相

.....

规则库以产生式规则来表示.

(2) 规则前提类和结论类. 规则前提类和结论类以链表的形式定义. 前提类与结论类不同之处在于,前提类多了一个激活和断言的标志. 这个标志在规则类中的推理函数中使用.

(3) 规则类. 规则类存储规则的前提数组和结论数组,并给出推理机的主要部分——推理函数.

3.3 系统主程序的实现

以南瑞 RCS - 931 数字式线路保护装置为例,该分析软件的主程序包括以下几个部分:保护装置信息读取程序,专家系统实现程序,以及动作判断程序.

(1) 保护装置信息读取程序. 利用上述形成的各个保护装置信息类和数据库技术,读取安装该保护装置的元件参数信息,整定数据信息以及运行数据信息等,供数据运行函数使用.

(2) 专家系统实现程序. 基于 RBR 规则推理方法的专家系统实现程序需要先存储知识库以及规则库. 在存储完知识库与规则库之后,开始询问用户,并同知识库和规则库进行匹配查询,最后得到结果.

(3) 动作判断主程序. 该部分程序是本系统软件的主程序,以故障测距为判断,分别分析并评价主保护,相间后备保护和接地后备保护的动作为(包括正确动作,误动和拒动)^[13]. 该部分程序流程图如图 2 所示.

3.4 运行结果显示

该系统设计了友好的人机界面,进入评价界面后,点击“评价”按钮进入左侧推理界面;点击“保存”按钮对当前评价结果保存;点击“导出”形成评价报告. 在界面中的运行结果显示如图 3 和图 4 所示.

4 结论

笔者采用专家系统理论知识,与 SCADA 系统、继电保护装置的整定信息系统以及故障录波器的录波数据相结合,以正向推理的方式,对故障线路上发生动作的继电保护装置进行动作的行为进行分析评价,并设计了友好的操作界面. 以南瑞 RCS - 931 数字式线路继电保护装置为例,对继电保护装置进行评价,结论正确.

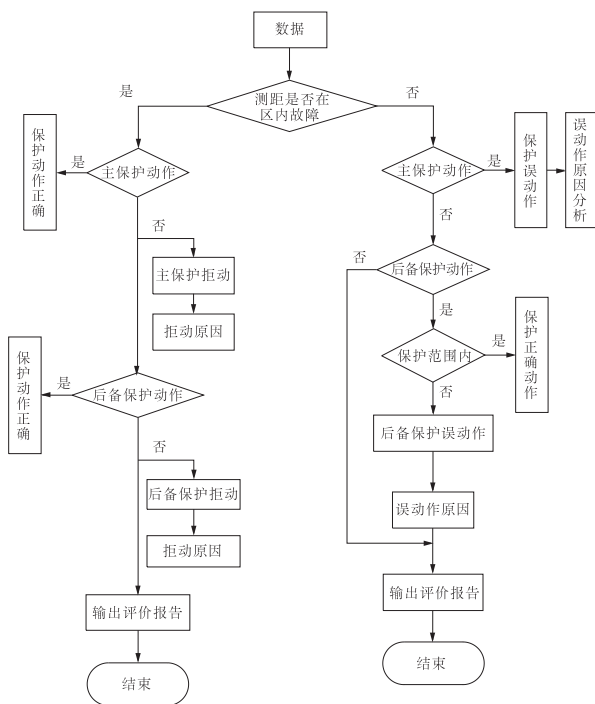


图 2 动作判断主程序流程图

Fig. 2 Flow chart of main program of action judgment

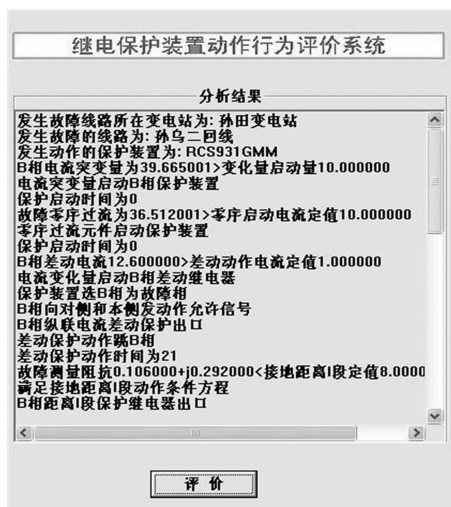


图 3 南瑞 RCS - 931GMM 继保装置动作过程的分析结果

Fig. 3 The analysis result of the action process of protection device of NARI RCS - 931GMM

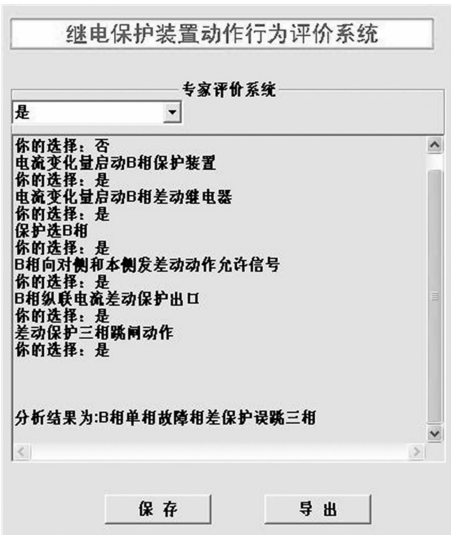


图 4 南瑞 RCS-931GMM 继保装置动作行为专家评价系统

Fig.4 The evaluation expert system of the action of protection device of NARI RCS-931GMM

参考文献:

[1] 戴志辉,王增平. 继电保护可靠性研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):161-167.

[2] 孙建波,廖永红,权宪军,等. 继电保护的现状与思考. 电力系统保护与控制,2010,38(12):77-79.

[3] 文正其. 电力机车电气系统故障诊断专家系统研究与设计[D]. 中南大学信息科学与工程学院,2011:10-11.

[4] 程慧霞,曹先彬,李龙澍,等. 用 C++ 建造专家系统[M]. 北京:电子工业出版社,1996:45-100.

[5] 王家林,夏立,吴正国,等. 电力系统故障诊断研究现状与发展[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(18):210-216.

[6] 李志兴,蔡泽祥,许志华,等. 继电保护装置动作逻辑的数字仿真系统[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):97-101.

[7] 吴泉源,刘江宁. 人工智能与专家系统[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1995:116-152.

[8] 李炜. 继电保护故障信息系统中的故障分析专家系统的设计思路[J]. 继电器,2005,33(10):53-56.

[9] GIARRATANO J C, RILEY G D. Expert Systems: Principles and Programming[M]. Third Edition. PWS Publishing Company, 1998:97-157.

[10] BIAGETTI T, SCIUBBA E. Automatic diagnostics and prognostics of energy conversion processes via knowledge-based systems [J]. Energy, 2004,29(12/15):2553-2572.

[11] ACOSTA G, CURTIH H, CALVO O, et al. A knowledge-based approach for an AUV path planner development [J]. WSEAS Transon Systems, 2006,5(6):1417-1424.

[12] 王平. 电力系统继电保护最新实用技术及检验标准规程规范实用手册[M]. 吉林:吉林音像出版社,2004:794-980.

[13] 刘学军. 继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社.2009.

Research on a New Method of Relay Protection Action Evaluation
Based on Rule Based Reasoning

XU Min¹, CHEN Quan¹, ZHANG Jin-Wen², KE Chao-hui², YAO Bin², FENG Chao²

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Jiangxi Nanchang 330031, China; 2. Hubei Xianning Electric Power Supply Company, Xianning 437000, China)

Abstract: In this paper, an expert system based on rule based reasoning is presented. Combined with the data of fault waveform recorder, setting and operation data, it makes inference according to the various rules of scheduling personnel and experts with years of experience summed up, and then make the analysis and evaluations of the relay protection equipment action for regional power grid. By the principle of differential protection, inter-phase distance protection and zero-sequence directional protection, the actual action is combined to make an analysis and evaluation. Lastly, an analysis software system is developed with VC++ interface design to be applied to the regional power grid.

Key words: expert system; relay protection equipment action analysis; rule based reasoning; evaluation; analysis software

文章编号:1671-6833(2014)01-0120-04

小型化超宽带(UWB)功分器的模拟与设计

惠晓威, 姜 瀚

(辽宁工程技术大学 电信学院 辽宁 葫芦岛 123000)

摘 要:对 UWB 功分器进行了研究,研制了一个工作频段在 3.75~9.5 GHz 的宽带功分器,该功分器通过安装一对双阶梯阻抗和平行耦合线为对称的两个输出端.实现了功分器频带的展宽.这种功分器只有一个隔离电阻,减少了隔离电阻对功分器隔离度的影响.仿真结果表明,功分器在如此宽的频带范围内仍能满足良好的性能指标,在 3.75~9.5 GHz 频带范围内,隔离度均在 -10 dB 以下,输入、输出端口均达到良好的匹配.实现 UWB 的小型化,提高了频带的展宽,降低了加工难度.

关键词:宽带 Wilkinson 功分器,隔离阻抗,串联阻抗变换器.

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.028

0 前言

功分器是一个在许多微波电路和子系统上使用的关键元件.用的最多的功分器是威尔金森功分器,有两个输出端口之间的隔离电阻^[1],但是它带宽很窄.随着短距离无线通信快速增长,需要使用超宽带元器件,要求是工作频段在 3.1~10.6 GHz.为了满足其在超宽带范围内工作,科研工作者做了大量的探索,研制了很多种宽带功分器^[2-7].通常,宽带功分器可以通过多段级联来实现,但是,这种方法需要多个电阻隔离.根据分析,至少采用三段 $\lambda/4$ 和三个隔离电阻才能实现.文献[8]提出 UWB 功分器在两个输出端口处引入了平行耦合线段和阶梯阻抗组成的传输线来实现功分器的宽带特性,这种功分器只有一个隔离电阻,减少了隔离电阻对功分器隔离度的影响,但是它的每一个支节的长度为半波长,而且末端耦合线段之间的间距只有 0.06 mm,增大了实现和加工的难度.文献[9]提出采用分形理论来加工耦合线,达到更好的耦合效果,实现了滤波器小型化.笔者提出把分形理论加工耦合线的方法引入到功分器的制作,使耦合间距达到 0.1 mm,实现 UWB 的小型化,提高频带的展宽,降低功分器的加工难度.笔者设计的 UWB 功分器采用 RT/迪鲁

瓦 6010 为基板板,介电常数为 10.2,厚度为 0.635 mm.

1 功分器的原理及设计

如图 1 所示,表示超宽带功分器的示意图.端口 1 作为一个信号端口,可以满足在高频条件下,把功率等分给端口 2 和端口 3.传统的 UWB 功分器采用三节 $\lambda/4$ 和三个隔离电阻组成,一对平行耦合线和阶梯阻抗是在传统的 UWB 功分器的基础上做出的改进,达到了功分器小型化的目的.文献[10]提到,在 UWB 工作频带中,可以产生多个传输极点.

此外,为了达到更好的隔离度效果,减少端口 2 和端口 3 之间的信号传输,安装一个电阻 R .基于偶数和奇数模式分析,它的超宽带特性可以用 S 参数分析^[11].

图 2 显示了两个端口电路模型为图 1 中的 UWB 功分器的奇模激励条件下.端口 1 可以被简单地视为短路,自这个端口的带状导体接地.

所以,该模型为一个端口网络,端口 2 输入阻抗的计算公式为

$$Z_{in2}^o = \frac{2Z_+ \cot(\theta) + jY_t^o Z_-^2 \csc^2(\theta) - jY_t^o Z_+^2 \cot^2(\theta)}{4j + 2Y_t^o Z_+ \cot(\theta)} \quad (1)$$

收稿日期:2013-09-03;修订日期:2013-10-06

作者简介:惠晓威,(1958-),男,辽宁阜新人,辽宁工程技术大学教授,研究生导师,研究方向为信号与信息系统.

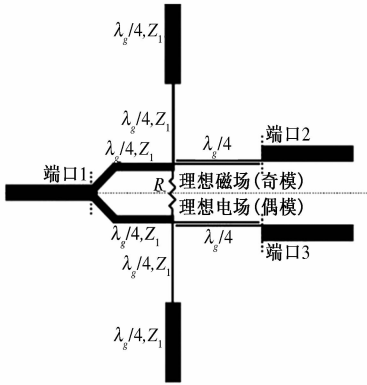


图 1 超宽带功分器示意图

Fig. 1 Schematic of the proposed UWB power divider on microstrip line

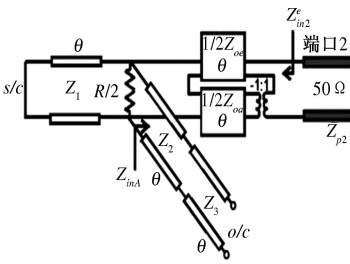


图 2 偶模状态

Fig. 2 Odd-mode circuit model

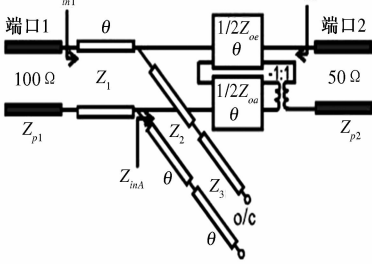


图 3 奇模状态

Fig. 3 Even-mode circuit model

满足

$$Z_{-}=Z_{oe}-Z_{oo}, Z_{+}=Z_{oe}+Z_{oo};$$
$$Z_{inA}=jZ_2(Z_2\tan(\theta)-Z_3\cot(\theta))/(Z_2+Z_3).$$

式中: Z_{oe}, Z_{oo} 分别是偶模和奇模阻抗的耦合线。

在图 2 和图 3 中, Z_{p1}, Z_{p2} 分别表示位于端口 1 和端口 2 的特性阻抗。

在端口 2 中, $Z_{in2}^o=Z_{p2}=50\ \Omega$,在 $\theta=\pi/2$ 的约束下,公式(1)可简化为

$$R=\frac{Z_{-}^2}{2Z_{p2}}. \tag{2}$$

这提供了一个简单的指标关于选择 R . 例如,如果选择的 $R=100\ \Omega$,则 $Z_{-}=100\ \Omega$. 偶模激励下,图中的功分器可以表示为一个二端口网络,如图 3. 形成一个理想的且对称平面磁场和特性阻抗在 1 端口是双 Z_{p1} ,或 $100\ \Omega$. 因此,在端口 1 和端口 2 的输入阻抗可以推导出。

$$Z_{in1}^e=Z_1\frac{1+jY_{e1}^eZ_1\tan(\theta)}{Y_{e1}^eZ_1+j\tan(\theta)}.$$
$$Z_{in2}^e=\frac{2Z_{+}\cot(\theta)+jY_{e2}^eZ_{-}^2\csc^2(\theta)-jY_{e2}^eZ_{+}^2\cot^2(\theta)}{4j+2Y_{e2}^eZ_{+}\cot(\theta)}.$$

(4)

另外

$$Y_{e1}^e=\frac{4jZ_{p2}+2Z_{+}\cot(\theta)}{2Z_{p2}Z_{+}\cot(\theta)+jZ_{-}^2\csc^2(\theta)-jZ_{+}^2\cot^2(\theta)}$$
$$+\frac{1}{Z_{inA}}Y_{e2}^e=\frac{Z_1+jZ_{p1}\tan(\theta)}{Z_1(Z_{p1}+jZ_1\tan(\theta))}+\frac{1}{Z_{inA}}$$

良好的阻抗特性在端口 1 和端口 2 匹配的约束下,可以满足 $Z_{in1}^e=Z_{p1}, Z_{in2}^e=Z_{p2}$. 一个可以简化(3)和(4)作为一个统一的表达 $\theta=\pi/2$.

$$Z_1^2=\frac{Z_{p1}Z_{-}^2}{4Z_{p2}}. \tag{5}$$

由于 $Z_{p1}=Z_{-}=100\ \Omega$ 和 $Z_{p2}=50\ \Omega$,从公式(5)可以确定 $Z_1=70.7\ \Omega$. 可以得出结论,(2)和(5)是唯一能够准确的 $\theta=\pi/2$,它们会随着 θ 的衰减偏离 $\pi/2$. 另一方面,安装的阶梯阻抗和耦合线如图 1 所示,可以产生 4 个传输极点,每边两个 $\theta=\pi/2$. 因此,如果这些极点达到合理分配,良好的阻抗匹配可以做到在整个 UWB 范围内实现。

3 个输入阻抗来自(1),(3)和(4). 因此, S_{11} 和 S_{22} 可以简单计算. 为了证明超宽带分压器性能,上/下截止频率的通带可以导出在定义的 -3dB S_{11} 和 S_{22} 大小. 这两个截止频率被发现上升和下降,分别为比率 Z_2/Z_3 ,从 0.6 增加到 9. 图 4 绘制确定分频器的工作带宽满足 $Z_2/Z_3=2.25(a-a')$. 如果 $Z_2=90\ \Omega$,则 $Z_3=40\ \Omega$ [8].

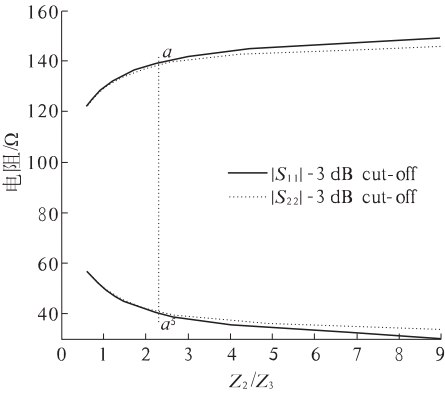


图 4 开路短截线上/下 $-3\ \text{dB}$ 电长度截止频率与阻抗比

Fig. 4 Electrical length (θ) of open-circuited stubs at the lower/upper $-3\ \text{dB}$ cut off frequencies against impedance ratio

2 新型 Koch 岛分形结构的设计

分形理论是由德布罗特于 1975 年首次提出. 目前分形理论广泛用于天线设计和耦合线设计. 分形是一种具有自相似特性的现象、图像或者物理过程. 常用的分形结构有科赫雪花型分形结构、Cantor 分集、Sierpinski 垫片和 Hilbert 分形结构等^[9].

通常情况下, 凡是具有分形结构的物体都有比例自相似性和空间填充性这两大特点, 因此, 如

果把分形的这两大特点应用到耦合线设计上, 能够达到提高耦合性能, 使功分器结构更加紧凑等效果, 从而促进功分器的性能提高和尺寸小型化, 降低加工难度.

笔者提出的新型 Koch 岛分形结构如图 5 所示, 水平方向的截去长度为 0.25 倍的 l , 垂直方向的截去长度为 0.2 倍的 l , 截去的三角形的宽度均为 0.3 倍的 l . 迭代次数为 0, 1, 2 次的迭代示意图如图 5 所示, 其中 Koch0 表示第 0 次迭代, Koch1 表示第 1 次迭代. Koch2 表示第 2 次迭代.

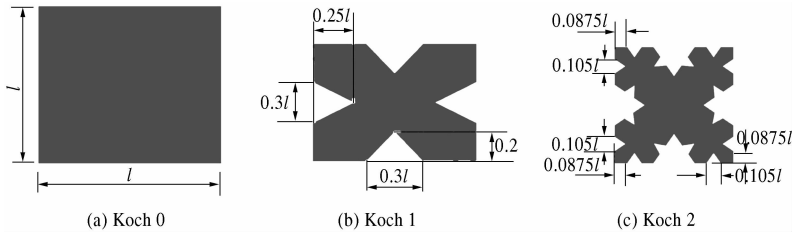


图 5 新 Koch 岛分形结构示意图
Fig. 5 Koch island type

根据图 1, 把该结构应用于耦合微带线上, 可以得出相应的基于 Koch 岛分形结构的耦合微带

线, 其单节结构如图 6 所示.

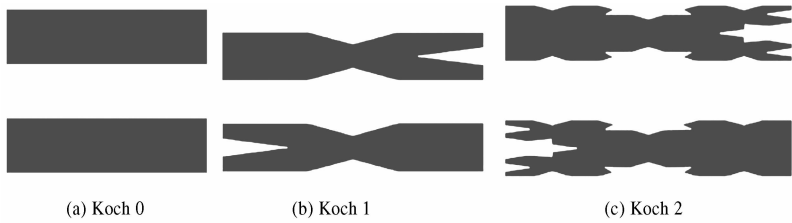


图 6 基于 Koch 岛分形结构的耦合微带线
Fig. 6 Koch island type couped line

把分形理论应用到功分器的耦合线, HFSS 仿真如图 7, 根据分形理论, 制作的 KOCH 岛型耦合线如图 8 所示.

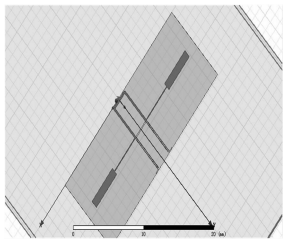


图 7 功分器整体仿真图像
Fig. 7 Ensemble simulation picture

3 仿真结果

在 3.75 ~ 9.5 GHz 的范围内, 在测得的 S_{11} 小于 10 dB 时, $S_{21} = -3$ dB. 特别是, 在模拟图像中, 能看得非常明显. 在推出了两个截止频率附近的波形有着明显的表现. 相比较文献[8]里面的提到的功分器, 笔者用分形理论可以实现把耦合线

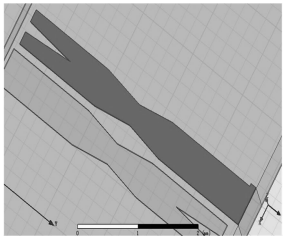


图 8 科赫岛型耦合线仿真图
Fig. 8 Koch island tupe carpet coupet line simulation

之间的间距从 0.06 mm 提高到 0.1 mm, 极大程度上降低了加工难度. 图 9(b) 显示仿真的 S_{22} 、 S_{23} . 图像显示 S_{22} 在 4 ~ 9 GHz 之间小于 -10 dB. 在隔离度上, S_{32} 低于 -10 dB.

4 结论

笔者对 UWB 功分器进行了研究, 所设计的功分器采用单节 $\lambda/4$ 阻抗和一个电阻并设计了工作频带在 3.75 ~ 9.5 GHz 的宽带功分器. 仿真数据表明, 采用分形理论加工耦合线是可行的. 在加

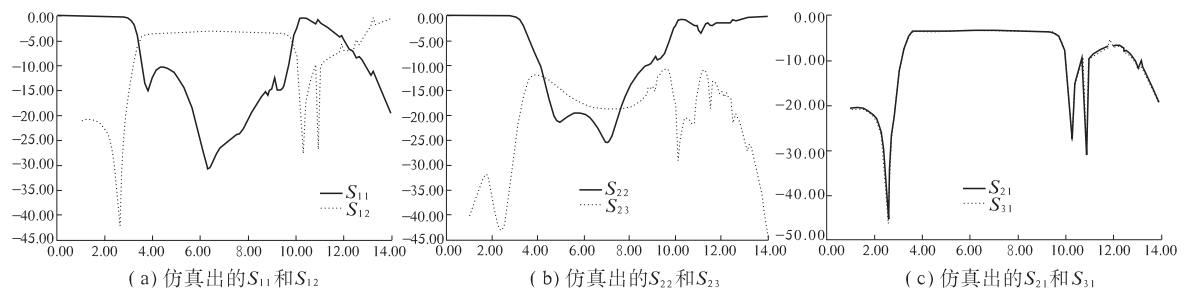


图 9 仿真结果
Fig.9 Simulation result

大耦合间距的同时,功分器的幅度、隔离度、驻波等指标可以完全达到要求.实现了 UWB 的小型化,提高了频带的展宽,又降低了加工的难度.

参考文献:

[1] WILKINSON E. An N-way hybrid power divider [J]. IRE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1960,8(1):116 – 118.

[2] LEE S W, KIM C S. A general design formula of multi-section power divider based on singly terminated filter design theory [J]. IEEE MTT-S Int, 2001, 12 (2):1297 – 1300.

[3] CHIU L, YUM T Y, CHAN C H. A wideband compact parallel-strip 180 Wilkinson power divider for push – pull circuitries [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006,16(1):49 – 51.

[4] SHARIFI H O. Design and optimization of broadband asymmetrical multisection wilkinson [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2006,54 (5): 2220 – 2231.

[5] BIALKOWSKI M E, ABBOSH A M. Design of a compact UWB out-of-phase power divider [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17

(4):289 – 291.

[6] ABBOSH A M. A compact UWB three-way power divider [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(8):598 – 600.

[7] SHAMAN H, HONG Jia-sheng, A novel ultra-wideband (UWB) bandpass filter (BPF) with pairs of transmission zeroes [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(2):121 – 123.

[8] WONG Sai-wai, ZHU Lei. Ultra-Wideband Power Divider With Good In-Band Splitting and Isolation Performances [J]. IEEE Micro-wave and Wireless Components Letters, 2008, 18(8):518 – 520.

[9] 李天鹏,王光明,梁建刚. 新型 Koch 岛分形耦合微带线带通滤波器 [J]. 电讯技术, 2011, 51 (3):21 – 25.

[10] ZHU Lei, SUN Sheng. Ultra-wideband (UWB) band pass filters using multiple-mode resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15 (11):796 – 798.

[11] ZYSMAN G I, JOHNSON A K. Coupled transmission line networks in an inhomogeneous dielectric medium [J]. IEEE Trans on Micro-wave Theory and Techniques, 1969, 17(10): 753 – 759.

Simulation and Design of Miniaturized UWB Power Divider

HUI Xiao-wei, JIANG Han

(Electronic Information Engineering College, Liaoning Project Technology University, HuLuDao 123000, China)

Abstract: This paper introduces a novel method of broadening the frequency range of a power divider. A power divider with the frequency range from 3.75 GHz to 9.5 GHz is designed. This divider is formed by installing a pair of stepped-impedance open-circuited stubs and parallel-coupled lines to two symmetrical output ports. This power divider is only one isolation resistance, and reduces the isolation resistance effect of isolation on power, The performance of the power divider over the a wide band is simulated. produces satisfactory results of more than 10 dB isolation between two output ports and a good match at both input and output ports. To achieve the miniaturization of UWB can reduce the processing difficulty.

Key words: broadband Wilkinson power divider; cascaded impedance convertor; isolation resistance

文章编号:1671-6833(2014)01-0124-05

机场集装箱/板升降平台车桥平台的设计与研究

李霞^{1,2}, 张志显¹, 张三川¹, 刘剑²

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州新大方重工科技有限公司, 河南 郑州 450064)

摘要: 设计机场集装箱/板升降平台车的桥平台结构, 对桥平台的关键受力部件上台面和剪叉臂进行静力学分析, 并校核其强度. 对桥平台处于最高位置时进行模态分析, 提取运算结果. 桥平台前五阶固有频率集中在 3~17 Hz 的低频阶段, 各阶振型主要表现为上台面和剪叉臂摆动、扭曲. 桥平台的静力学及模态分析结果为桥平台的设计提供了理论依据.

关键词: 机场集装箱/板升降平台车; 桥平台; 静力学分析; 模态分析

中图分类号: TH137.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.029

0 引言

机场集装箱/板升降平台车是机场用来装卸集装箱或者集装板的一种专用车型^[1]. 近年来, 随着我国民航运输业的发展, 集装箱/板升降平台车的需求量不断增加, 而且伴随大型飞机出现的加大加重集装箱对升降平台车承载能力要求更高. 此外, 我国现有飞机集装箱/板升降平台车大多是 90 年代中期购买的, 目前已进入更新换代密集期^[2]. 新建机场及原有机场的改扩建对升降平台车的新增需求和机场现有升降平台车的更新需求为集装箱升降平台车的发展带来了契机.

桥平台作为整车中的重要一部分, 起着与飞机舱门对接, 在飞机舱门和主平台间水平传送飞机集装箱/板的作用^[1], 桥平台的使用避免了主平台在重载下完成举升的同时需不断与飞机舱门实现对接造成平台车与飞机碰撞等危险发生.

笔者根据设计目标通过分析、计算设计机场集装箱/板升降平台车桥平台的结构, 然后利用 ANSYS 软件对两个重要的承载部件——上台面、剪叉臂进行静力学分析, 最后分析桥平台处于最高位置时的振动频率及振动模态.

1 机场集装箱/板升降平台车简介

机场集装箱/板升降平台车主要由桥平台、主平台、操作台、底盘总成、动力总成、液压总成、电

气总成及爬梯等辅助件组成, 如图 1 所示.

底盘总成为平台车提供支撑, 主平台将集装箱/板提升或下降到装卸高度, 然后通过桥平台将其送上或从飞机上取下前(后)剪撑借助自带的液压缸提升和降下桥(主)平台.



图 1 双平台式升降平台车

Fig.1 Lifting loader with double table

2 桥平台的结构设计

本论文是 40 t 双平台式机场集装箱升降平台车研究的一部分, 要求桥平台能够承载一个 3 175 mm×2 438 mm 的集装板, 所能承载的航空货物的重量为主平台的 1/2, 即 20 t.

根据设计目标桥平台应能够承载一个 3 175 mm×2 438 mm 的集装板, 使一个 3 175 mm 宽的

收稿日期:2013-09-01; 修订日期:2013-11-09

基金项目:河南省科技攻关计划资助项目(2011B460014); 郑州市科技攻关项目(10TTGS483-4).

作者简介:李霞(1973-), 女, 山东郓城人, 郑州大学讲师, 博士, 研究方向为非公路汽车设计与分析, E-mail: jennyhit@163.com.

集装箱通过.考虑平台车操纵台位于桥平台上.桥平台长度设计为 4 460 mm,宽度为 4 500 mm.

1)剪叉结构.

剪叉的结构形式主要有单级剪叉和双级剪叉^[3-5]两种,如图 2 所示.单级剪叉式结构简单、运行稳定,但支反力比较大,安装所占的纵向空间较大.双级剪叉式结构紧凑,但相对复杂.由于桥平台纵向结构尺寸较小,且举升高度大,采用双级剪叉式结构更加合适.

8 根剪叉臂的主体部分选用截面边长为 140 mm、厚度为 8 mm 的方管,两端设计专门的连接头,用于方管与上下台面或滚轮连接,方管与连接头焊接在一起,焊后经退火处理去除残余应力.成副的剪叉臂之间在其中点由销轴连接,剪叉臂的连接头通过销轴分别于桥平台的上下台面或滚轮连接.剪叉臂采用 Q345B 低合金结构钢.

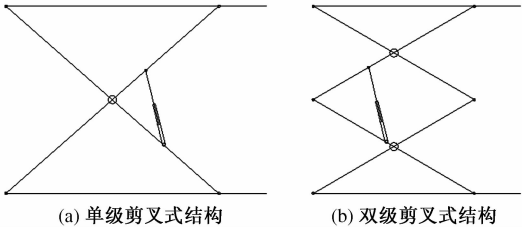


图 2 桥平台两种结构形式

Fig. 2 Two structure of the bridge table

2)上台面及剪叉臂运动导向装置.上台面的 4 根纵梁和两根横梁均采用截面边长为 180 mm、厚度为 18 mm 的方管,材料为 Q345B 低合金结构钢.剪叉臂运动的导向装置选用型号为 14a 的热轧槽钢.导向槽钢与车架纵梁或上台面纵梁焊接在一起,然后退火处理去除焊接应力.

3)液压缸安装方式.传统的提升系统利用液压缸活塞作用在剪叉臂上实现平台升降(如图 1),由于液压缸的输出力与其体积直接相关,要想实现单个单级液压缸推力的提升,液压缸的体积势必增大,但剪叉下的空间有限,液压缸体积受限,其最大提升力也受到限制.为提升剪撑提升系统的最大提升力,笔者采用一组多级液压缸直接支撑桥平台上平台面框架实现桥平台的升降.多级相对于单级液压缸可有效提升其最大提升力,且液压缸活塞杆直接支撑上台面框架,增大了液压缸活塞杆的伸缩的有效空间.

利用 Solidworks 软件建立桥平台的三维模型,如图 3 所示.

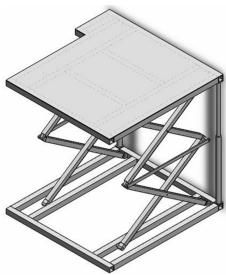


图 3 桥平台三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of the bridge table

3 桥平台关键部件的静力学分析

3.1 桥平台上台面的静力学分析

桥平台工作时,需升降并固定在一个较高的位置,承受着集装箱或者集装板带来的压力,强度必须满足条件才能正常工作.桥平台结构复杂,利用力学相关知识验证上台面及剪叉机构是否满足强度要求,工作困难且复杂,使用有限元分析软件进行分析,则简单的多^[6-7].

桥平台上台面由方管、辊筒、万向转动装置、滚轮导向槽、与剪叉臂的连接件等零部件组成,其中辊筒、万向转动装置、滚轮导向槽起辅助作用,主要承载力部件是由 4 根纵向方管和横向方管组成的上台面框架.对上台面进行分析时主要考虑其主体框架的结构强度.主平台的上台面属于组合结构,建立其三维模型并导入 ANSYS,建立其有限元模型. Q345B 力学特性^[8]如表 1 所示.

表 1 平台车材料属性及力学特性				
Tab.1 Material properties and mechanical properties of the Lifting Loader				
材料	弹性模量/ Pa	泊松比	密度/ (kg · m ⁻³)	屈服极限/ MPa
Q345B	2E11	0.3	7 800	345

上台面单元类型选用实体单元 solid185 ,solid185 单元有 8 个节点,每个节点有 3 个沿着 xyz 方向平移的自由度.自由网格划分,网格划分后的有限元模型如图 4 所示.

桥平台上台面一端与剪叉机构铰接,另一端通过滚轮导向槽与滚轮接触,静力分析时对上台面施加以下约束:上台面与剪叉机构铰接部位,限制除绕销轴轴线方向转动的自由度以外的所有自由度;上台面与滚轮连接部位,只限制其竖直方向的自由度.

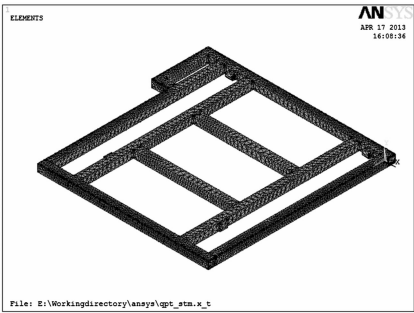
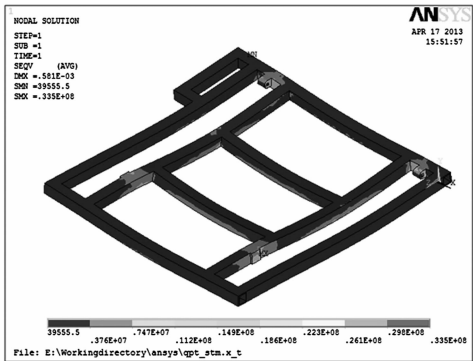
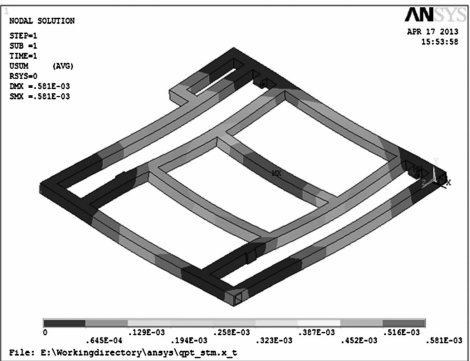


图 4 上台面的有限元模型
Fig. 4 Finite model of the up table



(a) 应力云图



(b) 应变云图

图 5 上台面应力应变云图
Fig. 5 Strain and stress cloud chart of the up table

上台面材料 Q345B 屈服强度为 345 MPa,安全系数 n 取 1.5,计算可得:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} = \frac{345 \times 10^6 \text{ Pa}}{1.5} = 230 \text{ MPa}. \quad (1)$$

根据式(1)可知,上台面的最大应力 33.5 MPa 小于材料的许用应力,因此由截面边长为 180 mm,厚度为 18 mm 的方管组成的桥平台上台面的强度满足材料要求.

3.2 剪叉机构的静力学分析

桥平台的剪叉机构由方管、连接头和销轴组成,建立其三维模型并导入到 ANSYS 建立有限元模型.解除上台面及车架的约束,用相应力和约束代替.剪叉机构单元类型选用 Solid185,材料 Q345,材料参数如表 1 所示,其有限元模型如图 6 所示.

根据实际情况对其进行施加约束和载荷.在剪叉结构的右下端限制除绕销轴轴线方向旋转的自由度外的所有自由度,在剪叉机构左下端限制其除 z 方向的移动自由度外的所有自由度.在对剪叉结构左上和右上端的销轴孔处分别施加相应的 y 轴方向的载荷.

对剪叉机构进行静力学分析,提取其等效应力云图和位移图,如图 7 所示.

上台面的上表面受到的载荷来自航空货物的压力,可近似看作均布力.为便于对上台面加载,把上台面上的辊筒、万向转动结构简化成一个薄板,加载时均布力加载到薄板的表面.

对上台面进行有限元静力学分析,提取上台面的应力应变分布云图,如图 5 所示.

由图 5 可知:上台面最大等效应力为 33.5 MPa,发生在上台面与剪叉臂的铰接部位.最大的应变为 0.583 mm,在上台面的中间部位.

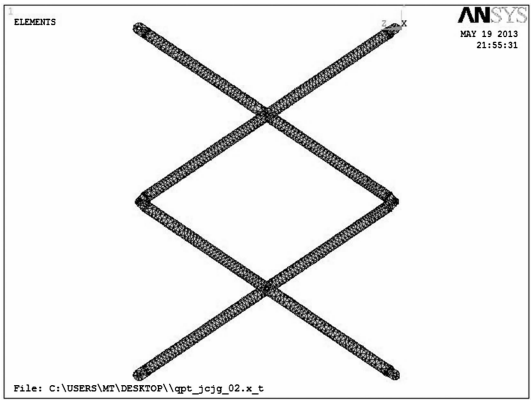


图 6 剪叉机构的有限元模型
Fig. 6 Finite model of the fork mechanism

由图 7 可知:剪叉机构的最大等效应力为 179 MPa,在右中部位的销轴上.剪叉臂的中间变形最大,为 9.717 mm,在剪叉机构的左上端.

剪叉机构材料 Q345B 屈服强度极限为 345 MPa,安全系数 n 为 1.5.根据式(1)可知,剪叉臂的最大应力 179 MPa,在材料许用应力范围内,因此该剪叉机构满足材料强度要求.

4 桥平台模态分析

桥平台工作时通常被固定在较高位置,此位置对桥平台的稳定性要求比较高,计算此位置桥

平台的振型及固有频率^[9]. 根据分析结果可知桥平台对激振力的响应,从而对桥平台的设计方案

进行评价. 为提高运算效率,对分析结果影响不大的结构进行简化,如下处理.

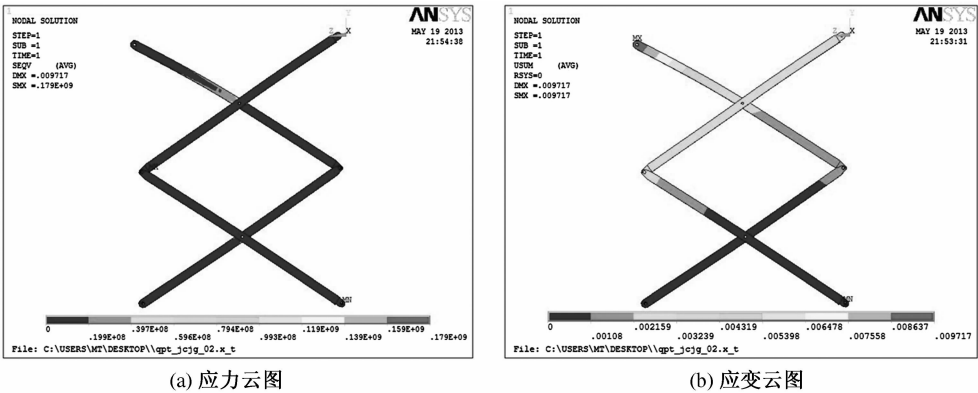


图 7 剪叉机构的应力应变云图

Fig.7 Strain and Stress cloud chart of the fork mechanism

- (1) 去除辊筒、万向传动部件、螺栓等零部件,用覆盖在上台面主体框架上的平板代替.
- (2) 对销轴、液压缸等零部件做适当简化.
- 桥平台模态分析时单元类型选用 Solid185,材料为 Q345,材料参数如表 1 所示.

采用 Block Lanczos 法进行模态分析,提取桥平台前五阶固有频率及振动模态,如图 8、图 9 所示.

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	3.0093	1	1	1
2	5.0265	1	2	2
3	5.5045	1	3	3
4	11.539	1	4	4
5	16.123	1	5	5

图 8 桥平台处于最高位置时前 5 阶固有频率

Fig.8 First five natural frequencies of the bridge platform in the highest position

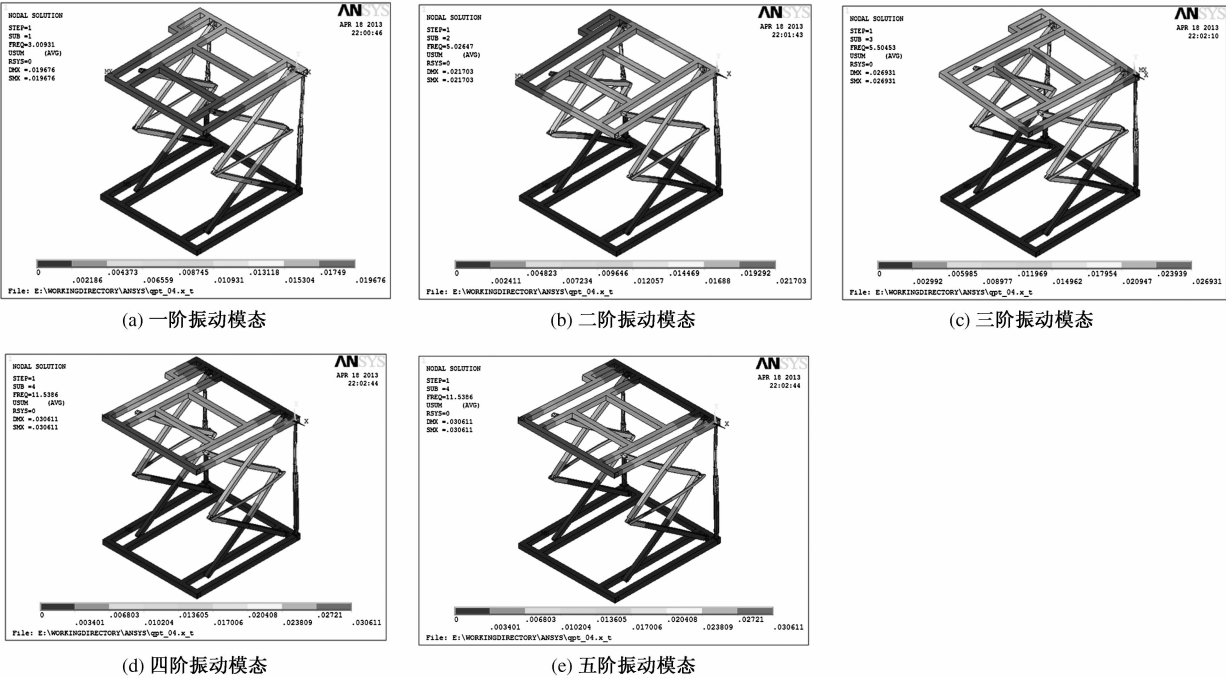


图 9 桥平台处于最高位置时前五阶振动模态

Fig.9 First five vibration mode of the bridge platform in the highest position

由图 9 可知,桥平台处于最高位置时的前五阶固有频率主要分布在 3 ~ 17 Hz 以内,处于较低的

频率段且分布较为密集.其振动模态主要为平台上台面的弯曲变形以及剪叉臂的弯曲及扭转变形.

5 结论

在机场集装箱/板升降平台车介绍的基础上,针对其桥平台进行设计,并应用 ANSYS 软件从静态和动态两个方面对所设计桥平台的上台面和剪叉臂进行了较为系统的分析. 分析结果表明,桥平台上台面和剪叉臂均满足材料强度要求,桥平台前五阶振动频率集中在 3 ~ 17 Hz 的低频阶段,各阶振型主要表现为上台面和剪叉臂弯曲及扭转,设计时应尽量避开这些共振频率,以上分析结果对平台车的优化设计及产业化开发具有重要的指导意义.

参考文献:

- [1] 中国民用航空局机场司. GB/T 23423—2009, 宽体飞机主舱集装箱、集装板装载机功能要求[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会, 2009.
- [2] 曹蕾. 关注航空货运中的重要设备—升降平台车[J]. 中国招标, 2010(22):26-27.
- [3] 孙光旭, 袁端才. 液压剪叉式升降台的动力学仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2650-2653.
- [4] 胡小舟, 胡军科, 何国华. 剪叉式举升机构建模及关键参数的研究[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(4):84-85.
- [5] 李鄂民, 齐文虎, 王滨, 等. 液压缸双梁铰接式剪叉机构动力学及运动学分析[J]. 机床与液压, 2011, 39(22):34-37.
- [6] REN G D. An investigation on the dynamic stability of scissor Lift [J]. Open Journal of Safety Science and Technology, 2012, 2(1): 8-15.
- [7] 张三川, 彭楠, 李霞. 两轮自平衡电动车的结构设计与有限元分析[J]. 郑州大学学报:工学版, 2011, 32(1):30-33.
- [8] 成大先, 王德夫, 姬奎生, 等. 机械设计手册—常用机械工程材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [9] 解本铭, 郭海乐. 叉剪式液压平台车结构模态有限元分析[J]. 中国民航大学学报, 2007, 25(2):25-27.

Research and Design of the Airport Container/pallet Lifting Loader

LI Xia^{1,2}, ZHANG Zhi-xian¹, ZHANG San-chuan¹, LIU Jian²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou New Dafang Heavy Industry Science & Technology Co., LTD, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: The bridge platform's structure of airport container/pallet lifting loader is designed. Static analysis on up table and fork arm which are key mechanical parts of bridge platform is carried out to verify the structural strength. The modal analysis on bridge platform is, the result show that the first 5 frequency is concentrated in 3 ~ 17 Hz low-frequency phase, vibration mode appears on the swing and twist on the up table and fork arm. The static and modal analysis results of the bridge platform provide a theoretical basis for the design of the bridge platform.

Key words: airport container/pallet lifting loader; bridge platform; static analysis; modal analysis