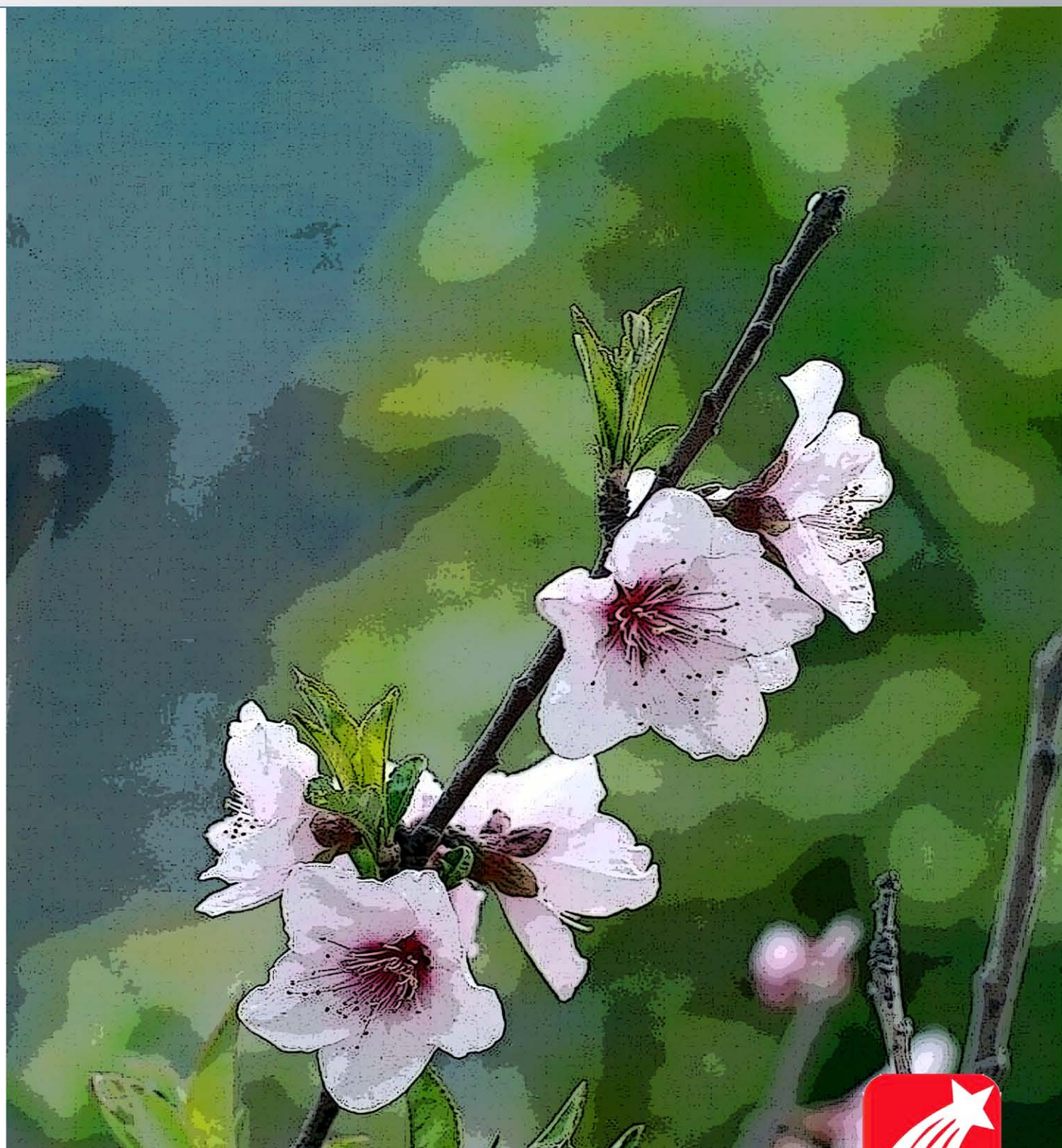


郑州大学学报

(工学版)

第36卷 第1期 2015年1月



目 次

电气工程

- 基于状态空间模型的神经元动态相关性研究..... 师 黎, 许昆峰, 牛晓可(1)
 基于遗传算法的背靠背换流站控制系统参数优化..... 蒋建东, 王 忆, 张灵娟, 赵育辉(6)
 杂草算法在城市交通用户平衡问题中的应用..... 曾庆山, 刘 巍(10)
 蛇型 DGS 微带滤波器的设计 王 克, 陈小强(15)
 一种求解连续空间约束优化问题的蚁群算法..... 焦留成, 邵创创, 程志平(20)
 双三相永磁同步电动机一相绕组短路故障性能分析 齐 歌, 白左霞, 刘宪林, 师 黎(24)

化工与材料工程

- 基于 Aspen Plus 的煤气化副产物粗酚的分离精制
 李惠萍, 李焕新, 李雪平, 张 丹, 梁淑琴, 梁学博(28)
 由化纤厂废碱液制备羧甲基纤维素..... 周彩荣, 徐敏强, 王晓松, 王海峰(33)
 高效液相色谱法同时测定反应液中的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑
 赵建宏, 张梅梅, 程相林, 王建设, 王留成, 宋成盈, 张家丽(37)
 煤炭自燃阻化剂的试验研究..... 王要令, 池吉安, 陈 铎(41)
 900 MW 压水堆稳态热工水力特性数值研究 王为术, 郭会军, 梁诚胜, 徐维晖(45)
 汽轮机叶型的三维数值模拟及优化..... 周俊杰, 王梅玲, 郭朋飞, 王定标(49)
 引流介质充填强化旋流 - 静态浮选过程的研究..... 张 敏, 沈家华, 刘东云(54)
 FeSiCP 系软磁非晶合金的研究 李福山, 李杏瑞, 李育洛, 营成志(57)

工本与交通工程

- 张弦梁结构张拉力确定方法研究..... 李静斌, 洪彩玲, 张 哲, 李素洁(61)
 混凝土开裂部位氯离子渗透试验研究..... 唐先习, 尹月西, 国 伟(66)
 大跨连续梁桥桩基础的减隔震分析..... 郭红梅, 周 燕, 张 凯, 李 宇(70)
 CEEMD-FFT 在滚动轴承故障诊断中的应用 陆森林, 王 龙(75)
 基于第二主应力的沥青混合料强度试验研究..... 锁利军, 王秉纲, 郑传超(79)
 测试条件对 SBS 改性沥青表观黏度影响研究 徐鸥明, 韩 森, 牛冬瑜, 刘亚敏(83)
 工程翻新轮胎多元复合层型及力学模型的构建..... 王 强, 齐英杰(87)

信息工程

- 基于离散电视频带的频谱接入策略研究..... 陆彦辉, 张 帅, 穆晓敏, 杨守义(92)
 基于改进的小波核主元分析故障检测..... 张端金, 汪爱娟(97)
 对流层波导中电波传播的抛物方程法及误差分析..... 杨明珊, 邱志勇, 杜晓燕(101)
 电力电缆循环加热试验中热力学工态研究
 王光斌, 杨海马, 杨 晖, 陆 峻, 金智勇, 马 生, 黄影平(105)
 拟周期激励下非线性半车模型的混沌振动研究..... 杨智勇, 梁 山, 周 桐(110)

环境与机械工程

- 基于 GIS 的滑坡地质灾害预警预测系统研究..... 李小根, 王安明(114)
 立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺及设备..... 马胜钢, 何宗海, 刘晓瑞, 董攀辉(119)
 书籍自动翻页扫描装置的设计与应用..... 裴东杰, 秦营周, 张 峥(122)
 单层球形网壳结构的分析及实验研究..... 马泳涛, 陈天跃, 李 伟, 袁 涛(125)

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY (ENGINEERING SCIENCE)

Vol. 36 No. 1

Jan. 2015

CONTENTS

【Electrical Engineering】

- The Analysis of Dynamic Correlation Between Neurons Based on State-space Log-linear Model SHI Li, XU Kun-feng, NIU Xiao-ke (1)
- Parameter Optimization of Control System for Back to Back Converter Station based on Genetic Algorithm JIANG Jian-dong, WANG Yi, ZHANG Ling-juan, ZHAO Yu-hui (6)
- Application of Invasive Weed Optimization Algorithm to the User Equilibrium Problem of the Urban Traffic ZENG Qing-shan, LIU Wei (10)
- Design of Snake DGS Microstrip Filter WANG Ke, CHEN Xiao-qiang (15)
- Ant Colony Algorithm for Solving Continuous Space Constrained Optimization Problems JIAO Liu-cheng, SHAO Chuang-chuang, CHENG Zhi-ping (20)
- Analysis Of One-Phase Short-Circuit Performances of Dual Three-Phase Permanent Magnet Brushless Ac Motor QI Ge, BAI Zuo-xia, LIU Xian-lin, SHI Li (24)

【Chemical and Material Engineering】

- Separation of Gasification Byproducts Crude Phenol Based on Aspen Plus LI Hui-ping, LI Huan-xin, LI Xue-ping, ZHANG Dan, LIANG Shu-qin, LIANG Xue-bo (28)
- Preparation of Carboxymethyl Cellulose (CMC) Using the Waste Liquor of the Viscose Fiber Industry ZHOU Cai-rong, XU Min-qiang, WANG Xiao-song, WANG Hai-feng (33)
- The Simultaneous Determination of Benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazole in the Reaction Liquid by High Performance Liquid Chromatography ZHAO Jian-hong, ZHANG Mei-mei, CHENG Xiang-lin, WANG Jian-she, WANG Liu-cheng, SONG Cheng-ying, ZHANG Jia-li (37)
- Experimental Research on Inhibitors of Coal Spontaneous Combustion WANG Yao-ling, CHI Ji-an, CHEN Duo (41)
- Numerical Study of Thermal hydraulics Characteristics of 900 MW PWR WANG Wei-shu, GUO Hui-jun, LIANG Cheng-sheng, XU Wei-hui (45)
- Three-Dimensional Numerical Simulation and Optimization of Steam Turbine Blade ZHOU Jun-jie, WANG Mei-ling, GUO Peng-fei, WANG Ding-biao (49)
- Research of Guiding Fluid Packed Media Enhanced Cyclone-static Flotation Process ZHANG Min, SHEN Jia-hua, LIU Dong-yun (54)
- The Research of FeSiCP Soft Magnetic Amorphous Alloy ... LI Fu-shan, LI Xing-rui, LI Yu-luo, JIAN Cheng-zhi (57)

【Civil and Transportation Engineering】

- The Inquiry of Tension Method for the Beam String Structure LI Jing-bin, HONG Cai-ling, ZHANG Zhe, LI Su-jie (61)
- Experimental Study of the Chloride Ion Penetration on the Crack Parts of Concrete TANG Xian-xi, YIN Yue-you, GUO Wei (66)
- Aseismic Isolation for Pile Foundation of Long-span Continuous Girder Bridge GUO Hong-Mei, ZHOU Yan, ZHANG Kai, LI Yu (70)
- Application of CEEMD-FFT in Roller Bearing Fault Diagnosis LU Sen-lin, WANG Long (75)
- Experiment on Strength of Asphalt Mixture Based on Second Principal Stress SUO Li-jun, WANG Bing-gang, ZHENG chuan-chao (79)
- On the Effect of Testing Conditions on the Apparent Viscosity of SBS Modified Asphalt XU Ou-ming, HAN Sen, NIU Dongyu, LIU Yamin (83)
- Construction of Multiple Composite Layer Type and Mechanical Model of Engineering Retreated Tire WANG Qiang, QI Ying-jie (87)

【Information Engineering】

- Dynamic Spectrum Access Strategies in the Cognitive Radio Network Based on the Discrete TV Band LU Yan-hui, ZHANG Shuai, MU Xiao-min, YANG Shou-yi (92)
- Fault Detection Based on Improved Wavelet Kernel Principal Component Analysis ZHANG Duan-jin, WANG Ai-juan (97)
- Troposphere Radio Waves Propagation in Duct of Parabolic Equation Method and Error Analysis YANG Ming-shan, QIU Zhi-yong, DU Xiao-Yan (101)
- The Research of Power Cable Cyclic Heating Thermodynamic WANG Guang-bin, YANG Hai-ma, YANG Hui, LU Ling, JIN Zhi-yong, MA Sheng, HUANG Ying-ping (105)
- Research on Chaotic Vibration Characteristics of Nonlinear Half Vehicle Model under Quasi-Periodic Excitation YANG Zhi-yong, LIANG Shan, ZHOU Tong (110)

【Environment and Mechanical Engineering】

- The Research of the Early Warning System About the Geological Disasters Based on GIS LI Xiao-gen, WANG An-ming (114)
- Grinding Fly Ash Process and Equipment with Vertical Milling Machine MA Sheng-gang, HE Zong-hai, LIU Xiao-rui, Dong Pan-hui (119)
- Design and Application of an Automatic Page Turning and Scanning Device PEI Dong-jie, QIN Ying-zhou, ZHANG Zheng (122)
- Single-Layer Spherical Shell Structure Analysis and Experimental Study MA Yong-tao, CHEN Tian-yue, LI Wei, YUAN Tao (125)

文章编号: 1671-6833(2015)01-0001-05

基于状态空间模型的神经元动态相关性研究

师 黎, 许昆峰, 牛晓可

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 神经元间相关性的研究是深入理解神经元集群信息传递与编码机理的基础. 首先, 采用状态空间对数线性模型初步估计神经元间的动态相关性, 针对输入数据特征对模型估计置信区间的影响, 提出了通过筛选数据优化置信区间来提高模型估计精度. 然后, 通过提取动态相关性的特征, 分析神经元间相关性在不同朝向光栅刺激下的动态特性, 进而研究了神经元间同步作用对视觉刺激信息的编码作用. 最后, 在麻醉的 Long Evens (LE) 大鼠初级视觉皮层上进行了实验验证. 结果表明: 采用剔除发放率偏小的序列的数据筛选方案能够有效地提高模型估计值的精度; 神经元间的锋电位同步作用对朝向光栅刺激信息具有一定的编码作用.

关键词: 状态空间对数线性模型; 动态相关性; 信息编码; 同步作用

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.001

0 引言

视觉是哺乳动物接收外界信息的主要途径, 初级视觉皮层 (Primary Visual Cortex, V1 区) 是大脑皮层中主要负责视觉信息处理的部分^[1]. 大脑的信息处理是通过神经元在网络层次的动态相互作用实现的^[2]. 神经元相关性的动态变化是神经网络信息传递的基础^[3]. 因此, 神经元动态相关性的研究是神经科学领域的关键问题之一, 对于揭示动物视觉系统信息编码机制具有重要意义^[4-6].

对于神经元相关性的研究主要分两类: 一类是侧重于衡量神经元间相关性的总体水平, 另一类则侧重于估计相关性的动态变化过程. 2006 年, J. M. Samons 等^[7]等采用互相关图法研究了猫初级视觉皮层神经元间的相关性, 该方法通过互相关函数的峰值大小来反映神经元间相关性的强弱. 2007 年, M. Fernando 等^[8]采集了麻醉猕猴 V1 区神经元对在不同方向正弦光栅刺激时的响应, 采用移位预测改进互相关图法获取了神经元之间的相关性, 该方法能够获取由刺激引发的相关性. 以上研究所采用的方法仅侧重于计算神经元间的相关性强度, 忽略了神经元间相关性的动态变化

趋势. 2012 年, J. L. Reed 等^[9]采用联合刺激后时间直方图法, 研究了麻醉猴子初级躯体感觉皮层神经元间相关性强度与手指刺激点间距之间的关系, 该方法能够获取单次实验下相关性的动态变化, 但多次实验得到结果的重复性较差. 2012 年, H. Shimazaki 等^[10]将状态空间对数线性模型应用于猴子运动皮层神经元间的动态相关性研究, 作者针对运动皮层的神经元响应信号, 采用 Bayes 统计方法估计模型输出值及其置信区间, 没有对输入数据特征对模型置信区间的影响进行研究.

因此, 针对上述问题, 笔者分析了神经元锋电位数据特征对动态相关性模型输出置信区间的影响, 提出了提高模型估计值精确度的方法, 进而研究了朝向光栅刺激下神经元间动态相关性与信息编码的关系.

1 材料与方法

1.1 材料

实验对象为 LE 大鼠, 体重在 200 ~ 300 g 之间, 眼睛无异常. 使用乌拉坦 (20%, 0.6 mL/100 g) 对大鼠进行麻醉, 然后, 根据大鼠脑组织谱图, 进行开颅手术, 将铂铱合金材质的 2 × 8 MicroProbe 电极阵列植入 V1 区, 深度约为

收稿日期: 2014-08-25; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1304602); 河南省重点科技攻关计划资助项目 (122102210102)

作者简介: 师黎 (1964-), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士生导师, 研究方向为智能检测, 生物信号处理, E-mail: shili@zzu.edu.cn.

900 mm.

刺激图为具有不同朝向的全屏正弦调制光栅,如图 1 所示.

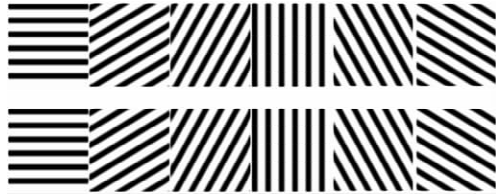


图 1 具有不同朝向的漂移光栅

Fig. 1 Drifting gratings with different orientations

在一组刺激实验中,每间隔 1s 随机转换一个朝向,每个朝向出现 40 次. 经论证与试验,视觉刺激显示器距离大鼠眼睛的最佳距离为 20 cm.

实验数据的采集用 Black Microsystems 公司的 Cerebus 多通道神经信号采集系统,共 16 个通道. 在本研究中,采用主元分析和改进 K 均值相结合的锋电位分类方法^[12].

1.2 方法

首先,采用状态空间对数线性模型估计神经元对在刺激下的动态相关性,初步确定置信区间. 其次,采用线性回归模型的方法,分析输入数据特征对相关性估计值置信区间的影响. 然后,针对置信区间的影响因素,提出对模型输入数据的筛选方案,并对置信区间进行优化. 最后,提取相关性曲线的动态特征,分析神经元间相关性动态变化与朝向光栅刺激之间的关系.

1.2.1 神经元对相关性的估计

采用状态空间的线性模型初步估算神经元对的动态相关性,具体计算原理和步骤如下.

N 个神经元的锋电位序列可以用伯努利过程建模,每一个神经元在重复 n 次试验时可以获取 n 个序列,每一个序列用长度为 Δ 的时间窗可以划分为 T 个时间段. 那么第 l 次试验的第 t 段的 N 维二值变量可以表示为 $X^{t,l} = (X_1^{t,l}, X_2^{t,l}, \dots, X_N^{t,l})$, $X^{t,l}$ 的值为 1, 表示窗口内有锋电位, 值为 0 表示没有锋电位. 用 Ω_k 代表具有 N 个元素的集合中的所有 k 位元素子集: $\Omega_1 = \{(1, 2, \dots, N)\}$; $\Omega_2 = \{(1, 2), (1, 3), \dots\}$ 等. 那么 γ 阶相关性的对数线性模型就可以定义为

$$\log p_i^{(\gamma)}(x) = -\psi_i + \sum_{i \in \{\Omega_1, \dots, \Omega_\gamma\}} \theta_i' F_i(x). \quad (1)$$

式中: ψ_i 是标准化参数; $F_i(x) = x_i, F_{ij}(x) = x_i x_j, F_{ijk}(x) = x_i x_j x_k$ 且 $(1 \leq i < j < k \leq N)$; θ_i' 表示下标 i 所代表的变量之间相互作用的自然参数. 该参数在统计学文献中被称为效应^[13], 可以

反映神经元与其相关神经元一起活跃的趋势. 保持其他 θ 值不变, 而只增加 θ_i 的值, 表示使神经元 i 活跃的程度增加. 保持其他 θ 值不变, 而只增加 θ_{ij} 的值, 表示神经元 i 和神经元 j 同时发放的概率增加.

采用 Expectation-Maximization (EM) 算法^[10] 计算模型的参数, 可以获取 $\theta_i = [\theta_i', \dots, \theta_{i'_{12}}, \dots, \theta_{i'_{1...r}}, \dots]^T$ 的值, 得到各个阶次的相关性曲线. 研究神经元对的相关性, 模型阶次 $r = 2$.

1.2.2 置信区间的优化

在 EM 算法计算模型参数的过程中, 递归的贝叶斯滤波器给出了对数线性参数的后验分布, 后验分布提供了参数 θ 的最优估计值, 根据参数 θ 的后验分布, 可以计算 θ 落在区间 $[a, b]$ 内的后验概率(置信水平), 譬如 $1 - \alpha$, 即

$$P(a \leq \theta \leq b | y) = 1 - \alpha. \quad (2)$$

若给定置信水平为 $1 - \alpha$, 确定一个区间 $[a, b]$ 使式(2)成立, 则该区间为估计值 θ 置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间.

置信区间反映了贝叶斯估计值的可信范围, 置信区间过大会降低模型估计值的精确度^[14]. 置信区间受输入数据的波动性和发放率均值的影响:

1) 发放率的波动性. 神经元发放率的波动性采用标准差来衡量, 对于神经元对, 发放率的标准差定义为两个神经元发放率标准差的均值.

2) 发放率均值. 对于一个神经元对, 某个朝向光栅下的发放率均值定义为两个神经元在刺激下的平均发放率.

1.2.3 相关性曲线的动态特性提取

笔者提取曲线的增减性和波动性特征, 分析视觉刺激期间相关性曲线动态过程.

1) 相关性曲线的增减性. 采用线性回归方法, 提取曲线拟合直线的斜率作为衡量曲线增减性的特征. 拟合斜率为正值, 表示刺激期间神经元间的同步作用逐渐增强, 反之亦然.

2) 相关性曲线的波动性. 相关性曲线的波动性通过计算构成曲线的 1 000 个 θ 值的方差来衡量:

$$s^2 = \frac{1}{1\,000} \sum_{i=1}^{1\,000} (\theta_i - \bar{\theta}). \quad (3)$$

方差越大, 神经元对的相关性曲线变化越剧烈, 表明在刺激期间神经元间的同步作用变化的幅度越大, 反之亦然.

1.2.4 神经元对的共同朝向响应强度

笔者根据共同朝向响应强度对光栅进行排序,为研究动态相关性特征与朝向光栅间的关系提供依据.

共同朝向响应强度反映了两个神经元在同一朝向下的响应特性,计算方法为

$$RS_{ij\varphi} = \sqrt{\bar{r}_{i\varphi} \cdot \bar{r}_{j\varphi}}. \quad (4)$$

式中: $\bar{r}_{i\varphi}$ 、 $\bar{r}_{j\varphi}$ 分别表示神经元 i 和 j 在朝向角度为 φ 时的发放率; $RS_{ij\varphi}$ 表示神经元 i 和 j 在朝向角度为 φ 时的共同响应强度. 根据 $RS_{ij\varphi}$ 对神经元对的光栅由强到弱排序,记为 $RS = \{1, 2, \dots, N\}$. 通过引入共同朝向响应强度,为研究动态相关性特征与朝向的关系提供依据.

2 实验结果和分析

从郑州大学实验平台 2012 年 7 月到 2013 年 7 月的实验数据中选取 4 只大鼠(分别用 A 鼠、B 鼠、C 鼠、D 鼠表示),从每只大鼠选取 5 个刺激有效响应神经元(以数字 1~5 进行编号),则来自每只大鼠的神经元对有 10 对,4 只大鼠共 40 对神经元.

2.1 置信区间的优化

按照 1.2.2 节的方法,对输入数据特征和置信区间宽度做回归分析,其中置信水平 $1 - \alpha = 0.95$,如图 2 所示.

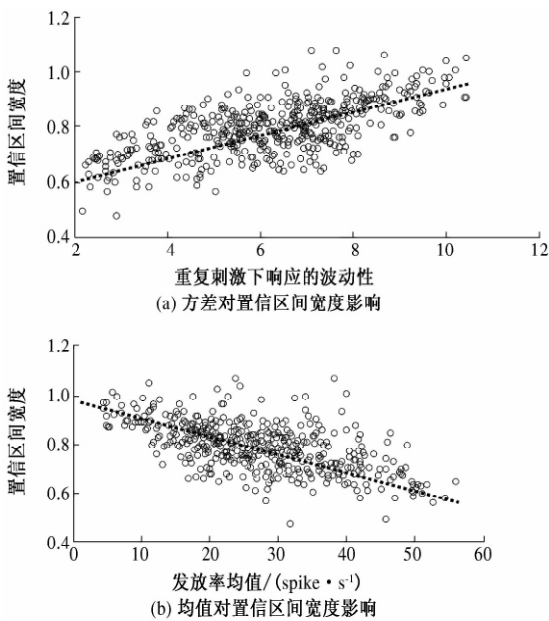


图 2 模型输入数据特征对置信区间宽度的影响

Fig. 2 The influence of features of input data on the width of confidence interval

图 2(a) 表示置信区间宽度 $|a - b|$ 与重复刺

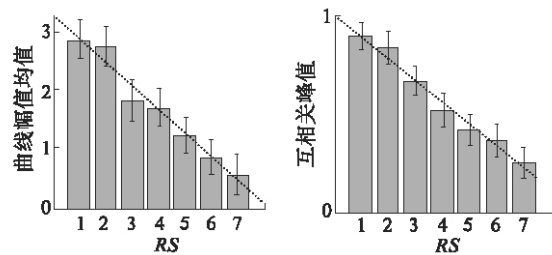
激下神经元响应波动性 $\bar{\sigma}$ 之间的关系;图 2(b) 表示置信区间宽度 $|a - b|$ 与神经元对发放率均值 \bar{r} 之间的关系. 从图中可以看出,当神经元对的发放率波动性较小时,置信区间宽度也比较小. 发放率均值 \bar{r} 较高的输入数据,置信区间宽度较小.

因此,笔者对数据筛选的方案为:通过对重复实验下获取的数据的发放率进行分析,剔除发放率偏小的数据序列,实现对模型输入数据的筛选,有效地减小了置信区间的宽度,提高了模型估计值的精确度.

2.2 不同朝向光栅刺激下的动态相关性

朝向角度差为 180° 的光栅具有一定的空间对称性,为了提高不同朝向光栅下的神经元发放的差异性,对每一对神经元,选取实验 12 个朝向中连续的 7 个朝向,并按照共同朝向响应强度对每个神经元对的 7 个朝向由强到弱排序. 选取 40 对神经元在光栅刺激下采集的锋电位发放序列,利用筛选后的数据作为模型的输入数据.

首先,研究不同朝向刺激下神经对的相关性强度的变化. 分别采用状态空间对数线性模型和常规互相关图法,计算不同朝向光栅下相关性曲线的幅值均值和互相关图的峰值,并按照朝向排序 RS ,对相应排序下的 40 个神经元对的幅值均值和峰值叠加平均,如图 3(a)、(b) 所示.



(a) 模型法的结果 (b) 互相关图法的结果

图 3 神经元对采用两种方法计算的相关性强度

Fig. 3 Correlation values of paired neurons acquired by two different methods

对比图 3(a) 和图 3(b) 发现,两种方法的计算结果具有一致性: 对于一个神经元对,它在不同朝向光栅下的相关性强度随着共同响应强度的减小而减小. 这说明了该模型能够有效地估计神经元间的相关性,同时表明神经元间的同步作用强度能够有效地编码光栅刺激信息.

然后,分析不同朝向光栅刺激下相关性曲线的增减性. 利用筛选后的数据,计算 40 对神经元在各自 7 个朝向刺激下的相关性曲线的拟合斜率(共 280 个值,拟合优度确定系数 $R = 0.7830 \pm$

0.056 4, 标准差 $E = 0.263 7 \pm 0.040 9$), 正负值分布统计结果如图 4 所示。

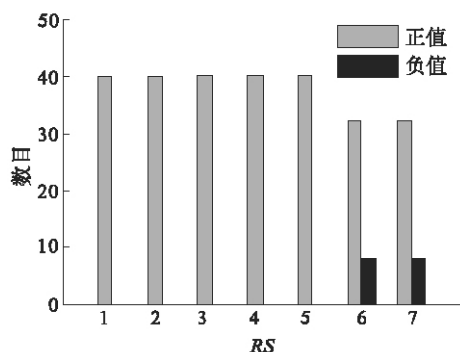


图 4 神经元对在排序朝向下斜率正负值统计图

Fig. 4 Statistical chart of fitting slopes from paired neurons under 7 sorted orientations

图 4 中, 横轴表示按照 RS 排列的朝向光栅, 纵轴表示对应排序朝向光栅下拟合斜率正值和负值的统计个数, 其中 94.3% (264/280) 的斜率值为正。从图 4 可知, 在朝向光栅刺激期间, 大部分神经元对的相关性逐渐增强, 即同步作用逐渐增强。在共同响应强度较小 (RS 排序靠后) 时, 共有 16 种情况下的神经元对的相关性逐渐减弱, 通过分析构成这些神经元对的两个神经元的最优朝向角度差 $\Delta\alpha$, 发现 $\Delta\alpha$ 均为 90° , 即两个神经元的最优朝向正交。

最后, 分析不同朝向光栅下相关性曲线的波动性, 如图 5 所示。横轴表示按照 RS 排列的朝向光栅, 纵轴表示对应排序朝向光栅下 40 个神经元对的相关性曲线方差的均值和标准差, 虚线表示方差均值的拟合直线。

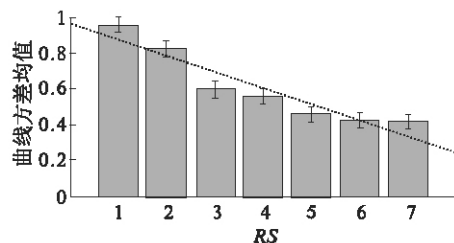


图 5 40 个神经元对在排序朝向下曲线方差均值

Fig. 5 Mean of variances of curves for 40 paired neurons

从图 5 可知, 对于一个神经元对, 它在不同朝向光栅下的同步作用波动的幅度随着共同响应强度的减小而减小。

3 结论

(1) 模型估计值置信区间受到输入数据发放

率波动性和均值的影响, 采用剔除发放率偏小的数据序列的筛选方案, 能够有效地缩小置信区间的宽度; (2) 对于一个神经元对, 它在不同朝向光栅下的相关性强度随着共同响应强度的减小而减小; (3) 在刺激期间, 神经元间的同步作用的增减性对朝向刺激信息具有编码作用, 当神经元的最优朝向正交且受到共同响应强度较弱的朝向光栅的刺激时, 神经元对的同步性会逐渐降低, 而在其他情况下, 神经元对的同步性增强; 同时, 笔者还发现一个神经元对在不同朝向光栅下的同步作用波动的幅度随着共同响应强度的减小而减小, 这说明神经元对同步作用的波动幅度也编码了朝向光栅刺激信息。

由于时间的关系, 笔者只研究了成对神经元之间动态相关性的变化规律, 进一步的工作还需要研究更高阶次的神经元间的相关性。

参考文献:

- [1] 寿天德. 视觉信息处理的脑机制 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 18.
- [2] BERENS P, ECKER A S, COTTON R J, et al. Fast and simple population code for orientation in primate V1 [J]. the Journal of Neuroscience, 2012, 32(31): 10618 - 10626.
- [3] BRUNO B AVERBECK, DAEYEOL L. Coding and transmission of information by neural ensembles [J]. Trends Neurosci, 2004, 27(4): 225 - 230.
- [4] PICADO-MUIÑO D, BORGELT C, BERGER D, et al. Finding neural assemblies with frequent item set mining [J]. Frontiers in Neuroinformatics, 2013, 7(9): 1 - 15.
- [5] RATTERÉ S, HONG S, DESCHUTTER E, et al. Impact of neuronal properties on network coding: roles of spike initiation dynamics and robust synchrony transfer [J]. Neuron, 2013, 78(5): 758 - 772.
- [6] BHARMAURIA V, BACHATENE L, CATTAN S, et al. Synergistic activity between primary visual neurons [J]. Neuroscience, 2014, 268: 255 - 264.
- [7] SAMONS J M, ZHOU Zhi-yi, BERNARD M R, et al. Synchronous activity in cat visual cortex encodes col-linear and cocircular contours [J]. Journal of Neurophysiology, 2006, 95(4): 2602 - 2616.
- [8] FERNANDO M, SMITH K A, MATTHEW A. et al. The role of correlations in direction and contrast coding in the primary visual cortex [J]. Neuroscience, 2007, 27(9): 2338 - 2348.
- [9] REED J L, POUGET P, QI Hui-Xin, et al. Effects of spatiotemporal stimulus properties on spike timing cor-

- relations in owl monkey primary somatosensory cortex [J]. *J Neurophysiol*, 2012, 108(12): 3353.
- [10] SHIMAZAKI H, AMARI S-I, BROWN E N, et al. State-space analysis of time-varying higher-order spike correlation for multiple neural spike train data [J]. *PLoS Comput Biol*, 2012, 8(3): 233–239.
- [11] 师黎,杨振兴,王志忠,等. 基于 PCA 和改进 K 均值算法的动作电位分类 [J]. *计算机工程*, 2011, 37(16): 182–187.
- [12] 万红,郜丽赛,牛晓可. 基于匹配小波变换的初级视皮层神经元锋电位分类 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2011, 32(3): 90–95.
- [13] MARTIGNON L, DECO G, LASKEY K, et al. Neural coding: higherorder temporal patterns in the neurostatistics of cell assemblies [J]. *Neural Comput*, 2000, 12(11): 2621–2653.
- [14] 陶靖轩,李秀兰. 贝叶斯区间估计 [J]. *中国计量学院学报*, 2002, 13(2): 103–108.

The Analysis of Dynamic Correlation Between Neurons Based on State-space Log-linear Model

SHI Li, XU Kun-feng, NIU Xiao-ke

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

Abstract: The research on correlation between neurons is the foundation to understand the mechanism of information transmission and coding of neuronal population. A novel method called state-space log-linear model was used to estimate the dynamic correlation between paired neurons, and data sieving methods were proposed to improve the accuracy of model results for the effects of input data characteristics on the confidence interval of the model estimated values. By extracting the characteristics of dynamic correlation curves, changing characteristics of paired neurons' correlation was analyzed and then the effect on information coding of visual stimulus from synchronization between paired neurons was studied. Experimental verification was carried out in the primary visual cortex of anesthetized rats. The results show that: the accuracy of the estimated value of the model can be improved by removing the data with small firing rates, and synchronization between paired neurons encodes the information of different grating stimuli.

Key words: state-space log-linear model; dynamic correlation; information coding; synchronization

文章编号: 1671-6833(2015)01-0006-04

基于遗传算法的背靠背换流站控制系统参数优化

蒋建东¹, 王 忆¹, 张灵娟², 赵育辉³

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国家电网河南省电力公司技能培训中心, 河南 郑州 450001; 3. 中色科技股份有限公司, 河南 洛阳 471002)

摘 要: 背靠背换流站控制系统参数优化能够有效改善系统的运行性能. 在研究背靠背换流站控制系统的工作原理后, 推导出定电流、定电压、定熄弧角和定功率控制方式下系统的数学模型. 把时间与绝对误差乘积的积分函数作为遗传算法的适应度函数, 即控制系统参数优化的目标函数. 给出了遗传算法用于参数优化的寻优过程及其参数的确定方法. 最后, 以灵宝背靠背换流站控制系统为例, 给出了参数的优化结果, 分析了换流站交流侧故障时直流系统的暂态过程. 结果证明了遗传算法用于背靠背换流站控制系统参数优化的可行性和有效性.

关键词: 背靠背换流站; 控制系统参数; 优化; 遗传算法

中图分类号: TM721.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.002

0 引言

背靠背直流输电工程具有整体造价低, 控制系统响应速度比常规直流工程快等优点, 在系统非同同步联网方面得到了越来越多的应用. 同时由于没有直流线路, 交流侧或直流侧的故障或异常运行对背靠背系统的影响更直接, 暂态过程中各种电气量的变化也更迅速. 所以选择合适的控制器参数对背靠背系统的无功功率控制、电压恢复等显得十分重要.

目前, 国内外的背靠背系统的控制器多采用结构简单的 PI 控制器. 在实际工程中往往采用试凑法对 PI 控制器的参数进行整定, 这种做法带有一定的盲目性, 在改善系统某个指标的同时会引起其他指标的恶化^[1]. 在有关直流系统控制参数优化的文献中, 文献 [2] 根据 Bode 图求出 HVDC 系统 PI 控制器参数范围后, 按一定步长得到样本集, 利用电力系统仿真软件 PSCAD 内置的寻优模块计算出每个样本的性能指标, 得到全局最优参数. 该方法基于实际工程模型, 具有良好的优化结果, 但存在前期计算量大、步长选择不同会导致结果的不确定问题. 文献 [3] 提出了采用临界比例法对 PID 控制参数进行优化的方法, 该方法存在

硬件装置要求高、操作复杂等问题. 另外, 文献 [4] 和文献 [5] 提出了基于粒子群算法的 PI 参数优化方法.

遗传算法具有大概率得到全局最优解、鲁棒性能好等优点, 可以方便地用于传统方法难以解决的复杂非线性问题. 目前, 在电力系统的应用也越来越广泛, 主要应用有 HVDC 整流器自抗扰控制器设计^[6], VSC-HVDC 的优化控制设计^[7], 直流输电系统中混合交流滤波器的优化设计^[8], 二次曲面提取技术研究^[9] 等, 并且取得了较好的效果. 基于遗传算法对背靠背换流站控制系统的参数进行优化, 能够有效地提高系统的运行性能. 笔者分析了背靠背换流站控制系统的工作原理, 给出了控制系统的数学模型. 在此基础上, 给出了遗传算法进行参数优化的目标函数、寻优过程和参数的确定方法. 对灵宝背靠背换流站暂态过程进行了分析, 结果表明该方法能够有效改善系统的运行性能.

1 背靠背换流站系统的数学模型

换流站的控制方式有定电流控制、定熄弧角控制、定电压控制和定功率控制. 通常情况下, 整流器采用定电流、逆变器采用定电压或定熄弧角

收稿日期: 2014-07-28; 修订日期: 2014-09-30

基金项目: 河南省科学技术研究重点项目(14A470002)

作者简介: 蒋建东(1975-), 男, 河南南阳人, 郑州大学教授, 博士, 研究方向为电力系统监测与运行分析, E-mail: jd-jiang@zzu.edu.cn.

控制方式. 由于背靠背换流站需要实现潮流逆转, 所以整流侧、逆变侧控制系统构成完全相同.

1.1 定电流控制方式系统的数学模型

定电流控制方式下系统的数学模型如图 1 所示. 该模型由 4 部分组成, 分别是 PI 控制器环节、换流器环节、平波电抗器和测量环节.

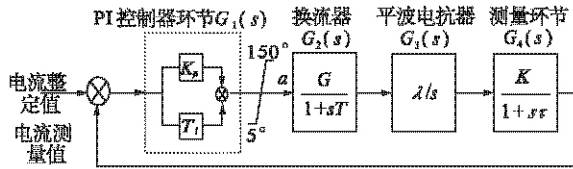


图 1 定电流控制方式系统的数学模型

Fig.1 System model of constant current mode

由图 1 可知, 定电流控制方式下系统的开环传递函数为

$$G(s) = -G_1(s) G_2(s) G_3(s) G_4(s). \quad (1)$$

式中: $G_1(s)$ 为 PI 控制器环节; 参数 K_p 是比例环节的增益; T_i 是积分时间常数. 当实际电流值与整定值出现偏差时, 控制器动作, 调整触发角的大小, 使直流电流恢复到整定值. $G_2(s)$ 为换流器环节, 增益 $G = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \sin \alpha_0$, α_0 为换流器稳定运行时的触发角, U 为换流器交流侧线电压的有效值; 当 12 脉冲桥工作在工频 50 Hz 时, 时间常数为 $T = 1.67 \text{ ms}$; $G_3(s)$ 为平波电抗器环节, 电感值为 0.12 H; $G_4(s)$ 为测量环节, K 将实际电流变换为无量纲的标幺值, τ 为反应测量设备的响应时间, 对于电流测量通常取 0.001 2 s.

1.2 定熄弧角控制方式系统的数学模型

定熄弧角控制方式下系统的数学模型如图 2 所示. 该模型由 3 部分组成, 分别是 PI 控制器环节、换流器环节和测量环节.

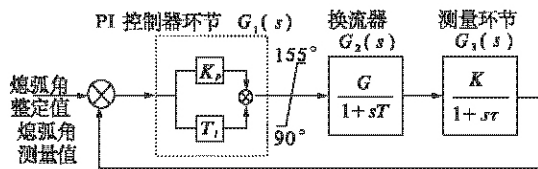


图 2 定熄弧角控制方式系统的数学模型

Fig.2 System model of constant extinction angle mode

由图 2 可知, 定熄弧角控制方式下系统的开环传递函数为

$$G(s) = -G_1(s) G_2(s) G_3(s). \quad (2)$$

定熄弧角控制方式系统的数学模型中不包括平波电抗器环节, 其他各个控制环节的系数计算方法与定电流控制方式相同.

1.3 定电压控制方式系统的数学模型

定电压控制方式下系统的数学模型如图 3 所示. 该模型由 3 部分组成, 分别是 PI 控制器环节、换流器环节和测量环节.

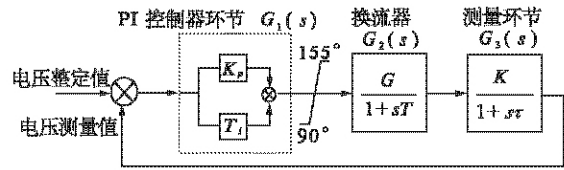


图 3 定电压控制方式系统的数学模型

Fig.3 System model of constant voltage mode

由图 3 可知, 定电压控制方式下系统的开环传递函数为

$$G(s) = -G_1(s) G_2(s) G_3(s). \quad (3)$$

定电压控制方式系统的数学模型中不包括平波电抗器环节, 其他各个控制环节的系数计算方法与定电流控制方式相同.

1.4 定功率控制方式系统的数学模型

定功率控制方式的系统数学模型是定电流控制方式和定电压控制方式的结合, 其数学模型如图 4 所示. 控制系统根据设定的功率和电压值得到定电流控制方式的整定电流值.

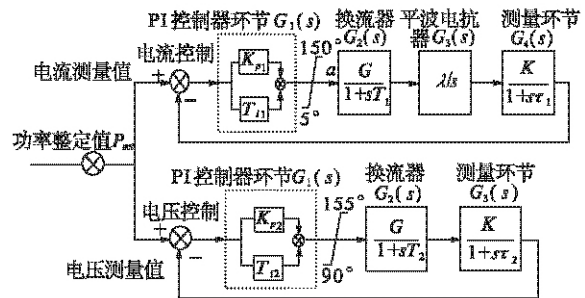


图 4 定功率控制方式系统的数学模型

Fig.4 System model of constant power mode

2 基于遗传算法的参数优化

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程的随机化搜索最优解的方法, 其主要特点是直接对结构对象进行操作, 不存在求导和函数连续性的限定, 具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力. 该算法采用概率化的寻优方法, 能自动获取和指导优化的搜索空间, 自适应地调整搜索方向, 不需要确定的规则. 在组合优化、信号处理、自适应控制等方面得到了越来越广泛的应用. 应用遗传算法进行参数优化, 涉及到目标函数的确定和寻优

过程控制参数的确定.

2.1 目标函数

背靠背换流站常采用的两种控制方式如下.

控制方式 1: 整流侧采用定电流控制方式, 逆变侧采取定熄弧角控制方式;

控制方式 2: 整流侧采取定电流控制方式, 逆变侧采取定电压控制方式.

控制方式 1 的优化目标函数设定为: 整流侧直流电流和逆变侧熄弧角的实际值与其各自整定值的偏差之和最小. 目标函数为

min_{(K_p, K_i) \in \Omega} = Min [\int_0^\infty |I_{ord} - I_{dr}| t dt + \int_0^\infty |\gamma_{ord} - \gamma_{dr}| t dt]. \tag{4}

控制方式 2 的优化目标函数设定为: 整流侧直流电流和逆变侧直流电压的实际值与其各自整定值的偏差之和最小. 目标函数为

min_{(K_p, K_i) \in \Omega} = Min [\int_0^\infty |I_{ord} - I_{dr}| t dt + \int_0^\infty |U_{ord} - U_{dr}| t dt]. \tag{5}

2.2 遗传算法的寻优过程

基于遗传算法的参数优化过程如图 5 所示.

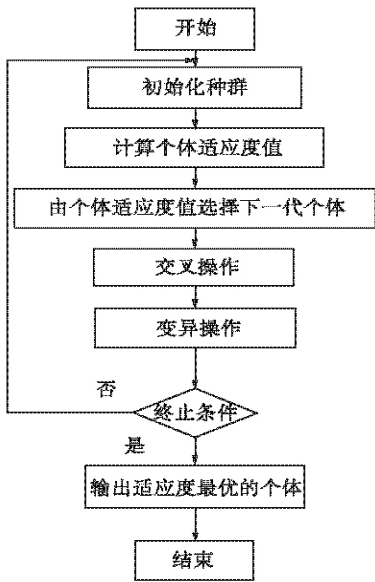


图 5 遗传算法参数优化的流程图

Fig. 5 Flowchat of Genetic Algorithm

遗传算法进行优化的具体步骤如下:

(1) 根据问题选择相应的编码方法, 随机产生一个初始化种群;

(2) 根据目标函数计算种群中每个个体的适应度值, 按照由适应度值所决定的某个准则来判断个体的优劣, 选择适应性强的个体进入下一代个体;

(3) 按照一定的交叉概率将父代部分基因进行交换, 从而产生组合父辈个体特性的新一代个体;

(4) 在群体中随机选择一定数量个体, 对于选中的个体以一定的概率随机地改变串结构数据中某个基因的值;

(5) 迭代次数达到最大或者迭代结果满足适应度值要求时则转入步骤(6), 否则转入步骤(2)进行下一次迭代;

(6) 得到最优的 PI 控制器参数.

本研究中遗传算法的基本控制参数: 种群规模为 40, 迭代次数为 100, 交叉概率为 0.40 ~ 0.99, 变异概率为 0.001 ~ 0.010.

2.3 灵宝换流站控制系统参数优化结果

笔者利用遗传算法对灵宝背靠背换流站控制方式 1 情况下整流侧定电流控制器的 PI 控制器参数 K_{p1}, T_{i1} , 逆变侧定熄弧角控制器 K_{p2}, T_{i2} 进行了优化, 其结果如表 1 所示.

表 1 控制系统参数优化结果

Tab. 1 Results of control parameter optimization

| 参数 | 最小值 | 最大值 | 优化前 | 优化值 |
|----------|---------|---------|---------|----------|
| K_{p1} | 0.700 0 | 1.200 0 | 0.989 4 | 1.098 70 |
| T_{i1} | 0.001 0 | 0.100 0 | 0.012 7 | 0.010 95 |
| K_{p2} | 0.500 0 | 1.000 0 | 0.645 6 | 0.750 80 |
| T_{i2} | 0.001 0 | 0.100 0 | 0.052 3 | 0.054 30 |

3 参数优化效果仿真分析

笔者在电力系统暂态仿真软件 PSCAD 中搭建了灵宝换流站系统的模型, 控制系统的控制器分别采取优化前与优化后的参数. 表 2 给出了系统分别发生以下 4 种故障时直流电流暂态指标的对比. 故障 1 为整流侧交流电网单相接地故障、故障 2 为逆变侧交流电网单相接地短路、故障 3 为整流侧换流变压器两相短路故障、故障 4 为逆变侧换流变压器两相短路故障.

表 2 优化前后换流站的直流电流暂态特性对比

Tab. 2 Transient characteristics of station parameter optimization before and after

| 故障类型 | 最大超调量/% | 超调范围/% | 调整时间/ms |
|------|---------|--------|-----------|
| 1 | 优化前 | 61 | +61 ~ -33 |
| | 优化后 | 39 | +39 ~ -10 |
| 2 | 优化前 | -50 | +47 ~ -50 |
| | 优化后 | -40 | +21 ~ -40 |
| 3 | 优化前 | 50 | +50 ~ -29 |
| | 优化后 | 30 | +30 ~ -12 |
| 4 | 优化前 | -60 | +45 ~ -60 |
| | 优化后 | -39 | +20 ~ -39 |

由表2可知,优化前后的控制参数都满足对控制系统暂态性能的要求. 控制系统参数优化后,背靠背换流站的暂态性能明显改善,降低了交流侧故障对直流系统的运行造成的影响,提高了整个系统的暂态性能.

4 结论

笔者提出了遗传算法用于背靠背换流站控制系统参数优化的方法,以换流站交流侧故障为例,证明了遗传算法用于背靠背换流站控制系统参数优化的可行性和有效性. 该方法克服了传统直流输电PI控制器试凑法的盲目性和一些仿真软件内置优化模块的局限性,能够有效地提高背靠背换流站的暂态特性,对于换流站的稳定运行具有重要意义.

参考文献:

- [1] YONG J, ZHEN R, KAIJIAN O, et al. Parameter estimation of regulators in Tian-Guang HVDC transmission system based on PSCAD/ EMTDC [C] //Proceeding of 2002 International Conference on Power System Technology. Kunming, 2002: 538 - 541.
- [2] 杨汾艳,徐政,张静. 直流输电比例 - 积分控制器的参数优化[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 15 - 20.
- [3] 赵成勇,张一工,施惠,等. 直流输电控制系统参数优化[J]. 中国电力, 1999, 32(1): 32 - 34.
- [4] 周孝法,陈陈,宋正强,等. 基于改进 PSO 算法的 HVDC PI 控制器优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 408 - 411.
- [5] 胡江,魏星. 基于自适应粒子群算法的直流输电 PI 控制器参数优化[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 71 - 74.
- [6] 康忠健,王清伟,黄磊,等. 基于遗传算法的 HVDC 整流器自抗扰控制器设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 16 - 22.
- [7] 陈蔓,陆继明,毛承雄,等. 基于遗传算法的优化控制在 VSC - HVDC 中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(4): 19 - 23.
- [8] 任震,曾坚永,张勇军. 基于遗传算法的直流输电系统中混合交流滤波器的优化设计[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 22 - 26.
- [9] 王长明,聂建军. 基于遗传算法的二次曲面提取技术研究[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2013, 45(1): 65 - 68.

Parameter Optimization of Control System for Back to Back Converter Station based on Genetic Algorithm

JIANG Jian-dong¹, WANG Yi¹, ZHANG Ling-juan², ZHAO Yu-hui³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan Skills Training Center, Zhengzhou 450001, China; 3. China Nonferrous Metals Processing Technology Co., Ltd, Luoyang 471002, China)

Abstract: Parameters optimization of control system for back to back converter station is a effective way to improve system operating performance. This paper researches the work theory of control system, derivates mathematical model of control system mode, such as constant current mode, constant extinction angle mode, constant voltage mode and constant power mode. Choosing ITAE performance index as genetic algorithm (GA) adaptive function and the value of objective function for parameters optimization, also is the process of parameters optimization. Parameters determining method for GA is provided in this paper. Basing on this method, using Lingbao back to back converter station as an example, the results of final optimizing parameters are given. According to performance in transient process when AC side is in fault, genetic algorithm provided in parameters optimization for back to back converter station is effective and feasible.

Key words: back to back converter station; control system; optimization; genetic algorithm

杂草算法在城市交通用户平衡问题中的应用

曾庆山, 刘巍

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 根据城市交通中用户平衡状态的演化特征, 提出了一种求解用户平衡问题的新方法. 该方法通过逐步添加最短路径以保证所有阻抗最小路径均被使用, 并通过改进入侵杂草算法(IWO)来分配各路径上的流量, 以实现交通网络上的用户平衡. 通过求解单个复杂交通网络上的用户平衡问题, 验证了该方法的有效性. 在求解多个复杂交通网络上的用户平衡问题上, 与连续平均法(MSA)进行对比, 表明该新算法能更好地解决城市交通网络用户平衡问题.

关键词: 城市交通; 演化特征; 用户平衡; 杂草入侵算法; 连续平均法

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.003

0 引言

交通分配问题是交通管理与交通规划中的重要问题. 交通用户平衡状态是基于 Wardrop 第一出行原则(UE)的网络流状态^[1]. 在该原则下, 交通起讫点(ORIGIN-DESTINATION, O-D)间的所有出行者都试图寻找最短路径出行, 并最终达到平衡状态, 在该状态下, 任一 O-D 对间的所有出行者的出行时间均相等且最短.

由于在城市交通网络中, 各 O-D 对间的出行者只能沿着特定的路径出行, 且各路径流量之间、路径流量与路径阻抗之间需满足特定的关系, 使得难以直接将智能算法应用于求解城市交通用户平衡问题. 笔者根据用户平衡状态的演化过程中出行者间的非合作博弈行为, 提出一基于入侵杂草智能算法实现用户平衡的方法, 并将该算法与连续平均法进行对比.

1 用户平衡配流模型

在用户平衡配流模型中, 每个出行者都力图使自己的出行时间最小, 而不考虑对其他出行者的影响, 其实质是博弈论中的纳什均衡^[2].

Wardrop 平衡配流原则描述如下: 在起止点间所有可供选择的各条路径中, 使用者所利用的各条路径上的出行费用全都相等, 且不大于未被利用

路径上的出行费用.

Beckmann 采用下式描述 Wardrop 平衡状态

$$u^{rs} - c_k^{rs} = \begin{cases} = 0, & f_k^{rs} > 0; \\ \leq 0, & f_k^{rs} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: u^{rs} 为平衡状态下, O-D 对 $r-s$ 之间的路径阻抗; c_k^{rs} 为 $r-s$ 间第 k 条路径上的阻抗; f_k^{rs} 为 $r-s$ 间第 k 条路径上的流量.

通常用路段走行时间表示路段阻抗, 采用美国公路局开发的 BPR 函数

$$t_{ij}(Q_{ij}) = t_{ij}(0) \left[1 + \alpha \left(\frac{Q_{ij}}{e_{ij}} \right)^\beta \right]. \quad (2)$$

式中: $t_{ij}(0)$ 为路段 (i, j) 上流量为零时车辆自由形式所需的时间; e_{ij} 为路段 (i, j) 单位时间内可通过的最大车辆数; α, β 为模型参数, 一般的 $\alpha = 0.15, \beta = 4$; Q_{ij} 为路段 (i, j) 上的车流量.

求解用户平衡配流模型的方法很多, 一般用 Frank-Wolfe 方法或者连续平均法^[3-4]. 连续平均法是 Frank-Wolfe 方法的变种算法, 在实际应用中, 具有广泛的应用性.

2 智能算法求解用户平衡问题

在城市交通网络中, 由于出行者出行路径受限, 出行者下一出行路段必须与当前所在路段直接相连, 路径阻抗随着路径流量变化等多种条件限制, 使得应用智能算法求解用户平衡问题的研

收稿日期: 2014-08-07; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划资助项目(132300410420)

作者简介: 曾庆山(1963-), 男, 湖北武汉人, 郑州大学教授, 博士, 主要研究方向为智能控制理论、复杂系统的建模与控制、分数阶微分控制等, E-mail: qszeng@126.com.

究成果并不多,且计算量往往过大。

文献[5]应用蚂蚁算法求解用户平衡问题,通过将 O-D 对间的蚂蚁以一定方式行动,寻找较优路径并实现流量分配,以达到用户平衡状态。但在复杂的交通网络中,因可选路径往往较多,故需要在每个 O-D 对间均配置大量的蚂蚁,其计算量是极为庞大的。同时在该方法中,蚂蚁的出行行为受路段阻抗影响较多,使得蚂蚁有可能错过较优路径,而不能达到真正的用户平衡状态。

文献[6]应用粒子群算法求解随机用户平衡问题,其将所有 O-D 对间的所有路径流量构成一个解,而后采用粒子群算法求得满足适应度函数最小的粒子,其解的维度与 O-D 对数及 O-D 对间的路径数成正比。随着网络规模的增大,其解的维度成几何数的增大,且每次迭代均需求得所有粒子对应的目标函数值,计算量极为庞大。

导致上述两种方法计算量过大的原因主要在于 O-D 对间路径的选择上。为解决该问题,通过模拟用户平衡状态的演化过程,在 O-D 对间逐步添加出行路径,并通过智能算法分配各路径间的流量,最终实现用户平衡状态。

3 入侵杂草算法求解用户平衡问题

3.1 入侵杂草算法

入侵杂草算法是 Mehrabian 和 Lucas 于 2006 年提出一种智能优化算法^[7]。具有结构简单、参数少、易于理解和编程的特点。目前,入侵杂草算法已被应用于天线阵列设计问题^[8]、神经网络优化^[9]等多个领域。

在杂草入侵算法中,用杂草表示所求问题的可行解,杂草按适应度值的大小分配其产生的种子数目,种子按照一定的规则在父代杂草附近的空间内扩散,发育成杂草。当种群中的杂草数目达到预先设定的最大值时,杂草便在种群内产生竞争,找到适应度最高的杂草,即最优解。

步骤(1) 初始化。在搜索空间按均匀分布的方式产生 N 个初始解。

步骤(2) 繁殖子代。每个杂草按适应度大小产生子代,子代数目按下式计算

$$weed = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}(s_{\max} - s_{\min}) + s_{\min} \quad (3)$$

式中: f, f_{\max}, f_{\min} 分别对应父代杂草适应度、种群最大适应度和最小适应度值; s_{\max}, s_{\min} 分别表示每个杂草所能产生的最大和最小种子数。

步骤(3) 空间分布。每个父代杂草产生的种

子按平均值为 0,标准差为 σ 的正态分布,分布到父代杂草周围, σ 按如下公式计算

$$\sigma = \frac{(iter_{\max} - iter)^n}{(iter_{\max})^n}(\sigma_{\text{init}} - \sigma_{\text{final}}) + \sigma_{\text{final}} \quad (4)$$

式中: $iter$ 和 $iter_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数; $\sigma_{\text{init}}, \sigma_{\text{final}}$ 分别为标准差的初始值和最终值; n 为非线性调和因子,一般取 $n = 3$ 。

步骤(4) 竞争淘汰。若杂草数量达到种群规模上限 P_MAX ,则取适应度较高的前 P_MAX 个个体,返回步骤(2),进行下一次迭代。

3.2 求解用户平衡问题中的具体步骤

在用入侵杂草算法求解用户平衡问题时,目标是将每个 O-D 对间的路径阻抗相等且最小,而非寻找某个使得目标函数最小的解,故需对入侵杂草算法进行修改。

将一个 O-D 对视为一个杂草群体,O-D 对间的每条已用路径视为一个父代,路径阻抗的相反数视为该父代的适应度,即路径阻抗越高,父代适应度越低。每个父代按式(3)产生子代,且子代分布在父代对应的路径上,数目按下式计算

$$Path_k^{rs_weed}_{n+1} = \omega \cdot Path_k^{rs_weed}_n + weed_k^{rs} \quad (5)$$

式中: $Path_k^{rs_weed}_n$ 表示第 n 次迭代时,O-D 对 $r-s$ 间路径 k 上的杂草总数,且 $Path_k^{rs_weed}_0 = 0$; $weed_k^{rs}$ 表示 O-D 对 $r-s$ 间路径 k 上新产生的杂草数; ω 为衰减因子,用于控制求解速度和精度,迭代次数较小时,当 $\omega = 0.8$ 时,往往能取得较优解,而迭代次数较大时,当 $\omega = 1$ 时,往往能取得较优解。即 $\omega = 0.8$ 时,收敛速度较快, $\omega = 1$ 时,求解精度较高。故采用下式计算 ω 值

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{(iter_{\max} - iter)^n}{(iter_{\max})^n}(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (6)$$

式中: ω_{\min} 和 ω_{\max} 分别为 ω 的最小值和最大值; $iter$ 和 $iter_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

路径流量按下式计算

$$Path_k^{rs_flow} = \frac{Path_k^{rs_flow} \cdot Path_k^{rs_weed}_n}{\sum_{i=1}^{Path_{rs_num}} Path_i^{rs_weed}_n} \quad (7)$$

式中: $Path_k^{rs_flow}$ 表示 O-D 对 $r-s$ 间路径 k 上的流量; $Path_k^{rs_flow}$ 表示 O-D 对间的总流量; $Path_{rs_num}$ 表示 O-D 对 $r-s$ 间的已用路径数。

式(3) 保证阻抗较小的路径,即适应度较高的父代能够产生较多的子代,式(5)、(7) 通过累加杂草的方式,实现路径上流量的平滑转移,并保证杂草数量较多的路径能够获得较多的交通流

量,随着迭代次数增加,总杂草数目增多,每次迭代转移的流量逐步减少,求解精度逐步提高。

采用竞争淘汰机制删除已存在的不适合出行的路径.当 O-D 对间的最大阻抗路径满足以下条件时,删除该路径。

$$\begin{cases} T_{\max}^{rs} > T_{\min}^{rs}; \\ \frac{\text{flow}_{T_{\max}}^{rs}}{\text{flow}_{\max}^{rs}} < \varepsilon_f \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T_{\max}^{rs}, T_{\min}^{rs}$ 分别为 O-D 对 $r-s$ 间路径阻抗的最大值和最小值; $\text{flow}_{T_{\max}}^{rs}$ 为 O-D 对间最大阻抗路径上的流量; flow_{\max}^{rs} 为 O-D 对间路径流量的最大值; ε_f 为一极小值。

即若 O-D 对间的某条路径通过极小流量时,该路径阻抗仍大于其它路径阻抗,则认为该路径无意义,删除该路径。

步骤(1) 初始化. 使用全有全无分配法分配交通流量,最大迭代次数为 N ,当前迭代次数 $n = 1$, O-D 对间的路径总数 $\text{Path}^{rs}_{\text{num}} = 1$, $\text{findPath}^{rs} = 0$, $\text{balance}^{rs} = 0$, 记录路径 Path_1^{rs} 及路径流量 $\text{Path}_1^{rs}_{\text{flow}}$ 。

步骤(2) 增加新路径. 寻找每个 O-D 对间的最短路径 $\text{Path}^{rs}_{\text{new}}$, 若能找到 $\text{Path}_k^{rs} = \text{Path}^{rs}_{\text{new}}$, $1 \leq k \leq \text{Path}^{rs}_{\text{num}}$, 令 $\text{findPath}^{rs} = 1$; 否则令 $\text{Path}^{rs}_{\text{num}} = \text{Path}^{rs}_{\text{num}} + 1$, $\text{Path}_a^{rs} = \text{Path}^{rs}_{\text{new}}$, 其中, $a = \text{Path}^{rs}_{\text{num}}$, 令 $\text{findPath}^{rs} = 0$ 。

步骤(3) 判断路径阻抗是否相等. 计算路径阻抗 T_k^{rs} , 若对于任意 r, s , 满足以下条件, 则路径阻抗相等, $\text{balance}^{rs} = 1$; 否则, $\text{balance}^{rs} = 0$ 。

$$\frac{(T_{\max}^{rs} - T_{\min}^{rs})}{T_{\min}^{rs}} < \varepsilon_T \quad (9)$$

式中: $T_{\max}^{rs}, T_{\min}^{rs}$ 分别为 O-D 对 $r-s$ 间最大、最小路径阻抗; ε_T 为一极小值。

步骤(4) 判断是否达到用户平衡状态. 若对任意 r, s , 存在 $\text{findPath}^{rs} = 1$, $\text{balance}^{rs} = 1$, 则其满足式(1)平衡状态, 结束迭代. 否则, 转向步骤 5。

步骤(5) 删除路径. 若 O-D 对 $r-s$ 间的路径总数 $\text{Path}^{rs}_{\text{num}} > 1$, 则按式(8)删除无意义路径。

步骤(6) 分配路径流量. 计算路径阻抗 T_k^{rs} , 按式(3), (5), (7) 分配路径流量, $n = n + 1$. 若 $n = N$, 结束迭代; 否则, 转向步骤 2。

3.3 算例

通过对图 1 所示双层城市交通网络进行用户平衡配流, 验证算法的有效性。

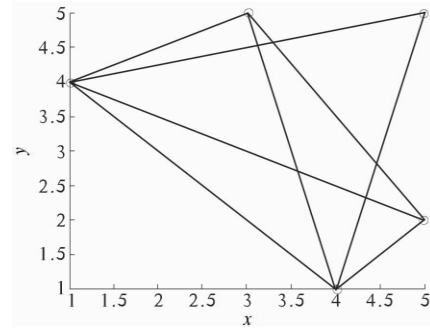


图 1 双层城市交通网络

Fig. 1 The double layered traffic network

图 1 中, 上层为居民出行网络, 其为一个含有 5 个节点, 10 条边的网络, 每条边对应一个 O-D 对, 共有 10 个 O-D 对, 令每个 O-D 间的流量均为 3, 且居民只能沿道路网络出行。

下层为城市道路网络, 其为一个 5×5 的网格, 共有 25 个节点, 40 条边, 每个节点对应一个交叉路口, 每条边对应一个路段, 令路段的通行能力均为 5, 车辆平均自由行走时间为 1。

采用下式来判断交通网络接近平衡状态的程度

$$\sigma^{rs} = \sqrt{\frac{1}{K^{rs}} \sum_{k=1}^{K^{rs}} \left(1 - \frac{c_k^{rs}}{u^{rs}}\right)^2}, \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_r \sum_s \sigma^{rs}. \quad (11)$$

式中: σ^{rs} 为 O-D 对 $r-s$ 之间所有已选路径阻抗除以平均值后的均方差; u^{rs} 为平衡状态下, $r-s$ 之间的路径阻抗; c_k^{rs} 为 $r-s$ 间第 k 条路径上的阻抗; K^{rs} 为 $r-s$ 间已选择路径总数; σ 为所有 O-D 间均方差的平均值, N 为 O-D 数。

显然, σ^{rs} 越小, O-D 对 $r-s$ 间各已选路径阻抗越为接近; σ 越小, 交通网络越接近用户平衡状态。

采用入侵杂草算法对图 1 所示网络进行用户平衡配流, 取 $s_{\max} = 100$, $s_{\min} = 0$, $\omega_{\max} = 1$, $\omega_{\min} = 0.8$, $\varepsilon_f = 0.02$, $\varepsilon_T = 0.005$, $N = 100$. 经过 61 次迭代后, 满足平衡条件。

采用 Beckmann 等学者提出的满足 Wardrop 准则的数学规划模型验证算法有效性, 模型为

$$\min_x Z(Q) = \sum_{(i,j)} \int_0^{q_{ij}} t_{ij}(q) dq, \quad (12)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_k f_k^{rs} = x_{rs}, \quad \forall r, s, \quad (13)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall r, s, k, \quad (14)$$

$$q_{ij} = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{ij,k}^{rs}, \quad \forall i, j. \quad (15)$$

式中: t_{ij} 为路段 (i, j) 上的阻抗; q_{ij} 为路段 (i, j) 上的

流量; f_k^s 为 O-D 对 $r-s$ 间路径 k 上的流量; x_{rs} 为 O-D 对 $r-s$ 之间的交通需求量; $\delta_{ij,k}^s$ 满足若路段 (i,j) 在 O-D 对 $r-s$ 之间的路径 k 上,其值为 1,否则为 0.

将 $Z(Q)$ 作为目标函数,绘制每次迭代过程中的函数值,如图 2 所示.通过计算发现,所有 O-D 中,阻抗均方差最大为 0.002 2,均方差平均值为 $\sigma=0.000\ 6$.即已被使用的路径阻抗均大致相等,即满足了 Wardrop 平衡配流原则.

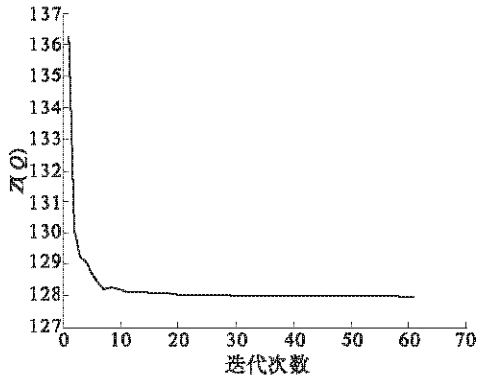


图 2 $Z(Q)$ 函数值
Fig. 2 The value of $Z(Q)$

4 入侵杂草算法与连续平均法对比

考虑到城市道路交通网络具有无标度性和流量集中性^[10-11],在 10×10 网格上随机产生含有 10 个节点的小型无标度网络,分别采用入侵杂草算法和连续平均法对其进行用户平衡配流,比较两者的运行时间和计算精度.两种算法中,迭代次数对目标函数值下降量的边际贡献均是不断减少的,当迭代次数达到一定值后,目标函数值基本保持不变,令两种算法均迭代 100 次.

令各路段通行能力 $e=5$,各路段上车辆平均自由行走时间 t 为 $1 \sim 1.2$ 单位时间内的随机数,分别令各 O-D 对间的车流量 f 为 1 和 3,对 5 个无标度出行网络进行用户平衡配流,将 $Z(Q)$ 和 σ 作为目标函数值,计算结果如表 1 所示.

由表 1 可以看出,入侵杂草算法运行时间略高于连续平均法.当 O-D 对间车流量 $f=1$ 和 $f=3$ 时,经过 100 次迭代后,入侵杂草算法在 4 个网络中的 $Z(Q)$ 值小于连续平均法,而 σ 值在 5 个网络中均远小于连续平均法,即 O-D 对间的各路径阻抗更为接近,证明了新算法的有效性.

表 1 两种算法对比
Tab. 1 The comparison of two algorithm

| 算法 | f | 性能指标 | 出行网络 | | | | |
|--------|-----|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 入侵杂草算法 | 1 | 运行时间 t/s | 6.658 08 | 5.433 43 | 7.498 81 | 4.414 66 | 6.830 98 |
| | | $Z(Q)$ | 131.311 3 | 103.788 3 | 137.851 0 | 93.552 2 | 131.490 0 |
| | | σ | 0.000 129 | 0.000 006 | 0.000 242 | 0.000 000 | $7.1e-7$ |
| | 3 | 运行时间 t/s | 6.911 17 | 5.816 94 | 7.763 83 | 5.084 09 | 7.118 35 |
| | | $Z(Q)$ | 401.562 3 | 320.432 8 | 422.667 3 | 285.457 3 | 403.459 0 |
| | | σ | 0.004 5 | 0.005 1 | 0.005 6 | 0.002 1 | 0.008 5 |
| 连续平均法 | 1 | 运行时间 t/s | 6.596 95 | 5.444 55 | 7.458 73 | 4.394 07 | 6.763 34 |
| | | $Z(Q)$ | 131.477 1 | 103.510 6 | 138.046 3 | 93.593 5 | 132.297 1 |
| | | σ | 0.004 4 | 0.002 8 | 0.005 6 | 0.000 917 | 0.005 7 |
| | 3 | 运行时间 t/s | 6.713 79 | 5.738 20 | 7.528 40 | 4.994 98 | 6.937 35 |
| | | $Z(Q)$ | 402.057 7 | 320.558 8 | 422.300 8 | 285.709 2 | 403.572 1 |
| | | σ | 0.016 1 | 0.057 3 | 0.018 5 | 0.019 5 | 0.021 2 |

5 结论

基于城市交通网络中,用户平衡状态的演化过程,提出一种采用杂草算法求解用户平衡问题的方法.通过在每次迭代过程中计算并添加最短路径,保证所有较优路径均能被使用,同时通过模拟杂草繁殖竞争的过程实现交通流量的分配,最终达到 Wardrop 原则下的用户平衡状态.

分别通过求解一个双层城市交通网络上的用户平衡问题以及与连续平均法在多个交通网络上进行对比,证明了新算法的有效性.

因杂草算法在每次迭代过程中,需采用一定规则分配各路径流量,故计算时间略长于连续平均法.相对于连续平均法,智能算法求解出各路径间的路径阻抗更加接近,即更为接近用户平衡状态.

参考文献:

- [1] WARDROP J G. Some theoretical aspects of road traffic research [J]. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II, 1952, 1-2: 325-378.
- [2] MACKO M, LARSON K, STESKAL L. Braess's paradox for flows over time [J]. Theory Of Computing Systems, 2013, 53(1): 86-106.
- [3] 吴建军, 高自友, 孙会君, 等. 城市交通系统复杂性 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] 吴先宇, 袁振洲, 李艳红, 等. 用户平衡算法中目标函数值与迭代次数关系研究 [J]. 交通与计算机, 2007, 25(6): 8-12.
- [5] 杜波, 邵春福. 基于蚂蚁算法的用户平衡分配方法研究 [J]. 物流技术, 2009, 28(12): 155-157.
- [6] 度巍, 王先甲, 黄崇超. 求解随机用户平衡问题的粒子群演化算法 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2010, 34(3): 616-619.
- [7] MEHRABIAN A R, LUCAS C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. Ecological Informatics, 2006, 1(4): 355-366.
- [8] ROY G, DAS S, CHAKRABORTY P, et al. Design of non-uniform circular antenna arrays using a modified invasive weed optimization algorithm [J]. IEEE Transactions On Antennas & Propagation, 2011, 59(1): 110-118.
- [9] 彭斌, 胡常安, 赵荣珍. 基于混合杂草算法的神经网络优化策略 [J]. 振动测试与诊断, 2013, 33(4): 634-639.
- [10] PORTA S, CRUCITTI P, LATORA V. The network analysis of urban streets: a dual approach [J]. Physica A, 2006, 369(2): 853-866.
- [11] JIANG B. A topological pattern of urban street networks: universality and peculiarity [J]. Physica A, 2007, 384(2): 647-655.

Application of Invasive Weed Optimization Algorithm to the User Equilibrium Problem of the Urban Traffic

ZENG Qing-shan, LIU Wei

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

Abstract: Based on the evolutionary character of user equilibrium of the urban traffic, a new method which can solve the user equilibrium problem is presented. This method ensures all paths which have the minimum resistance are used by adding the shortest path step by step, and realize the user equilibrium of the urban traffic by distributing the flow of paths based on improved invasive weed optimization algorithm(IWO). The effectiveness is verified by solving the user equilibrium problems of one complex urban traffic network. It proves that the new algorithm can get better solution of the user equilibrium problem after comparing it with the method of successive algorithm(MSA) in solving the user equilibrium problems of some complex urban traffic networks.

Key words: urban traffic; evolutionary character; user equilibrium; invasive weed optimization algorithm; method of successive algorithm

蛇型 DGS 微带滤波器的设计

王 克, 陈小强

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 提出了一种将哑铃型 DGS 中的长方形缝隙变为蛇形缝隙的蛇型 DGS, 建立了等效电路模型并进行参数推导. 基于控制变量法分析参数变化对蛇型 DGS 结构频率特性及等效电路参数的影响. 将该结构应用于低通滤波器的设计, 分别在 HFSS 和 MATLAB 环境下对设计的滤波器及其等效电路模型进行仿真, 两种方法的仿真结果具有很好的一致性. 结果表明, 该结构可在不增加缺陷面积的情况下得到更低的衰减频率和更多的谐振频率点.

关键词: 缺陷接地结构; 等效电路; 低通滤波器

中图分类号: TN817

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.004

0 引言

近年来, 不同结构的 PBG (Photonic Band Gap) 光子带隙结构和 DGS (Defected Ground Structure) 缺陷接地结构的设计研究已经成为热点课题. 和光子带隙结构 (PBG) 类似, 缺陷接地结构 (DGS) 也是在金属接地平面上蚀刻出缺陷的图案. 通过改变电路衬底材料有效介电常数的分布, 从而改变微带线的有效电感和有效电容, 使得由 DGS 结构构成的微带线具有慢波特性和带阻特性^[1-4]. 和 PBG 结构相比较, DGS 结构仅由 1 个缺陷单元构成, 它的带隙中心频率仅由该缺陷单元结构决定, 而 PBG 结构是由若干个缺陷单元组成的缺陷阵列, 它的带隙中心频率由缺陷阵列间距、排列方式和几何结构等诸多因素决定. 因此, DGS 结构具有结构简单, 易于电磁场理论分析和等效电路建模分析, 更适于集成电路实际应用的显著优点. 已广泛应用于微波和毫米波的设计中.

笔者提出蛇型 DGS 微带线的等效电路模型. 利用 HFSS 和 MATLAB 分别对蛇型 DGS 单元及其等效电路模型进行仿真分析, 研究蛇型 DGS 单元各参数变化时对其频率特性的影响. 通过 DGS 结构的微带滤波器的设计来证明等效电路模型的正确性.

1 蛇型 DGS 的频率特性及等效电路

1.1 蛇型 DGS 的结构组成和频率特性

如图 1 所示, 蛇型 DGS 是由 2 个矩形和它们之间的 1 个蛇形缝隙组成^[5-6]. 选取文献 [1] 和 [7] 中提出的 DGS 单元相同的参数, 介质厚度为 $h = 0.7874 \text{ mm}$, 介电常数 $\epsilon_r = 2.2$, 尺寸分别是 $w = 2.4 \text{ mm}$, $a = b = 5 \text{ mm}$, $n = 6$, $g = 0.38 \text{ mm}$. 利用 HFSS 对图 1 中的 DGS 结构进行仿真, 并与文献 [1] 中哑铃型 DGS 仿真结果对比如图 2 所示.

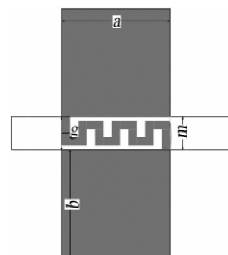


图 1 蛇型 DGS 单元示意图

Fig.1 Schematic view of snake DGS unit

对比同一软件下两种不同结构的仿真结果可知, 蛇型 DGS 结构微带线两侧的矩形缺陷面积和形状都与哑铃型 DGS 结构一致, 在只改变缝隙 g 的情况下就可使原哑铃型 DGS 传输线产生更低的带隙中心频率, 在同样带宽范围内, 产生的谐振频率点更多; 蛇型 DGS 结构与文献 [7-8] 提出的

收稿日期: 2014-09-30; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51167009/E0703); 铁道部重点资助项目 (2011X008-D)

通信作者: 陈小强 (1966-), 男, 甘肃天水人, 兰州交通大学教授, 博士, 主要从事计算电磁学、计算机仿真与控制方面的研究, E-mail: xqchen@mail.lzjtu.cn.

螺旋型 DGS 结构比较,在缺陷所占的面积不变的情况下同样能产生两个谐振频率点,但设计参数减少,结构简单,易于电路的加工设计。

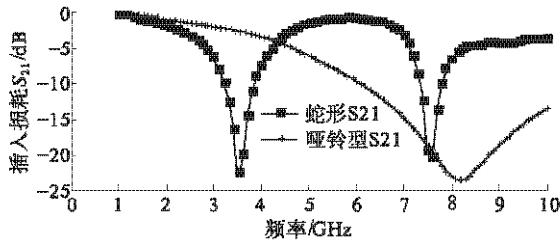


图2 蛇型 DGS 与哑铃型 DGS 单元的仿真结果

Fig. 2 The simulation results of snake DGS and dumbbell DGS unit

1.2 蛇型 DGS 结构的等效电路的模型及参数的提取

哑铃型 DGS 结构与 LC 并联电路相似,具有单极点低通滤波器的带阻特性。笔者提出的蛇型 DGS 单元具有两个谐振频率点。因此,利用两个 LC 并联电路的串联电路来等效文中蛇型 DGS 单元,每个谐振点由一个 LC 并联电路来等效。将实际微带线和介质本身的损耗及电磁波辐射等因素考虑在内,应取两个 RLC 串联电路来等效^[9-10],如图 3 所示。利用式(1)、(2)计算得等效电路的参数,电阻 R 由式(3)得出^[10]。蛇型 DGS 单元的电磁仿真与等效电路的仿真如图 4 所示。

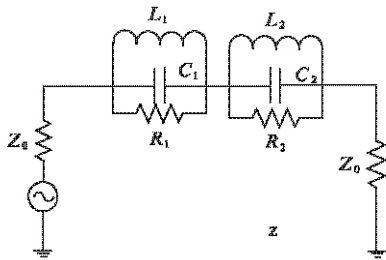


图3 蛇型 DGS 单元的等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of snake DGS unit

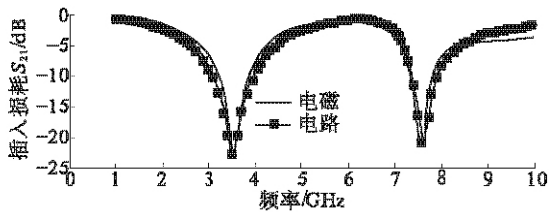


图4 蛇型 DGS 单元电磁仿真与等效电路的仿真

Fig. 4 Simulation of electromagnetic and equivalent circuit of snake DGS unit

$$C = \frac{1}{w_0 Z_0 g_1 \left(\frac{w_0}{w_c} - \frac{w_c}{w_0} \right)} \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (2)$$

$$R = \frac{2Z_0}{\sqrt{\frac{1}{|S_{11}(w)|^2} - (2Z_0(wC - \frac{1}{wL}))^2} - 1} \quad (3)$$

2 蛇型 DGS 参数变化对频率特性的影响

由文献[2,3,5,11-13]可知,影响 DGS 微带线阻带特性的参数是微带线两侧矩形的长 a 、宽 b 和蛇型缝隙的宽 g 、U 形拐点数 n 。下面讨论蛇型 DGS 参数变化对频率特性的影响。改变 DGS 单元的参数,然后利用 HFSS 三维电磁仿真软件进行仿真分析,通过仿真结果得出两个阻带各自的 3 dB 截止频率和谐振频率并求出对应的等效电感值和电容值,分析参数变化对等效电路的影响。

2.1 方格对蛇型 DGS 的影响

基于图 1 所示的蛇型 DGS 结构,取导带宽为 $w = 2.4$ mm、方格的宽 $b = 5$ mm、蛇型缝隙的宽度 $g = 0.38$ mm、U 形拐点数 $n = 6$,改变方格的长 a ,分别取 $a = 3, 4, 5, 6$ 和 7 mm 对应的仿真结果如图 5 所示。随着方格长 a 的增大,截止频率和谐振频率相应地减小,且减幅越来越小。利用公式(1)、(2)计算得等效电路的电感值随 a 的增大而增大,电容值基本保持不变,其中等效电感值 L_1 增幅明显。

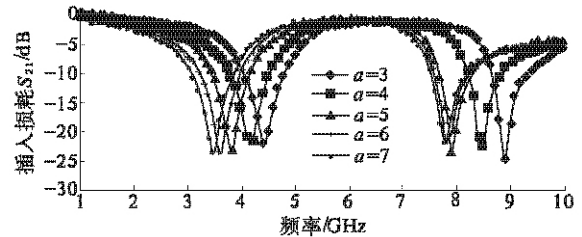


图5 方格长 a 对蛇型 DGS 的影响

Fig. 5 Effect of square long (a) on snake DGS

取导带宽为 $w = 2.4$ mm、方格的长 $a = 5$ mm、蛇型的宽度 $g = 0.38$ mm 和 U 形拐点数 $n = 6$,改变方格的宽 b ,分别取 $b = 3, 4, 5, 6, 7$ mm 对应的仿真结果如图 6 所示。随着方格宽度 b 的增大截止频率和谐振相应地减小,第二个阻带基本不变,主要影响第一个阻带。利用公式(1)、(2)计算得等效电路的电容值随 b 的增大而减小,相反电感值随之增大,其中电感值 L_1 和电容值 C_1 变化明显。

2.2 缝隙对蛇型 DGS 的影响

基于图 1 所示的蛇型 DGS 结构,取导带宽为 $w = 2.4$ mm、方格的长 $a = 5$ mm、宽 $b = 5$ mm 和蛇

型的 U 形拐点数 $n=6$, 改变蛇型的宽 g , 分别取 $g=0.2, 0.29, 0.38, 0.47, 0.56$ mm, 对应的仿真结果如图 7 所示. 随着 g 的增大, 截止频率和谐振频率相应地增大, 其中截止频率 f_{cl} 增幅不明显. 利用公式 (1)、(2) 计算得等效电路的电容值随 g 的增大而减小, 电感值随 g 的增大略微增大, 其中电容值 C_2 减幅明显.

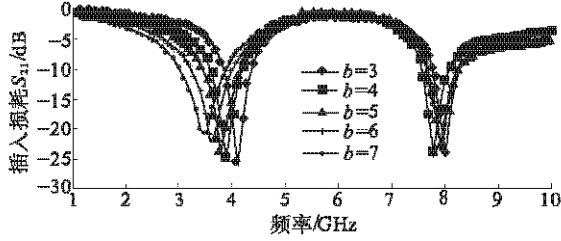


图 6 方格宽 b 对蛇型 DGS 的影响

Fig. 6 Effect of square distance (b) on snake DGS

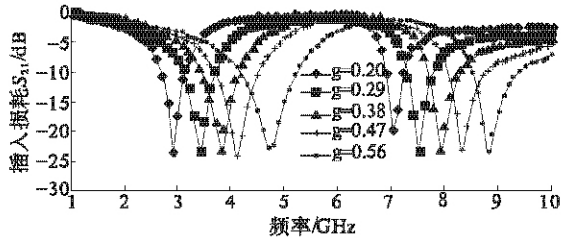


图 7 缝隙宽对蛇型 DGS 的影响

Fig. 7 Effect of gap distance on snake DGS

2.3 拐点数对蛇型 DGS 的影响

取导带宽为 $w=2.4$ mm、方格的长 $a=5$ mm、宽 $b=5$ mm 和蛇型宽 $g=0.38$ mm, 改变蛇型的 U 形拐点数 n , 分别取 $n=2, 4, 6, 8$, 对应的仿真结果如图 8 所示. 随着 U 形拐点数 n 的增大, 截止频率和谐振频率相应的减小而幅度较小. 利用公式 (1)、(2) 计算得等效电路的电感值 L_2 随 n 的增大而减小, 电容值变化随之增大, 其中电容值 C_2 增幅明显.

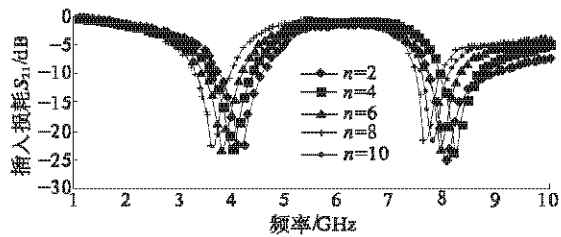


图 8 U 型拐点数 n 对蛇型 DGS 的影响

Fig. 8 Effect of U-shaped inflection point number (n) on snake DGS

综上所述, 可以通过改变蛇型 DGS 结构的参数 a, b, g 和 n 来实现不同要求的带隙中心频率,

在后面的滤波器设计中我们可以通过有目的调节参数 a, b, g 和 n , 实现滤波器的优化设计, 从而确定 DGS-LPF 中 DGS 的尺寸.

3 DGS 低通滤波器的设计

LPF 与 DGS 结构的等效电路相似, 都是由集总等效元件组成. 因此, 基于 DGS 结构的等效电路法设计的 LPF 可进行电路分析^[9,14-15]. 笔者提出含有 DGS 缺陷结构的低通滤波器 LPF 来验证等效电路法的正确性与可行性. 如图 9 所示, 低通原型滤波器由串并联电容电感组合而成, 笔者设计滤波器时, 串联电感用 DGS 结构来实现, 而并联电容由大范围补偿的传输线来实现, 即图 10 中 $w_2=15$ mm. 以 DGS-LPF 为例验证设计方法的正确性, 采用图 1 提出的蛇形 DGS 结构, 参数分别设为 $a=b=5$ mm, $n=6$, $g=0.38$ mm, $w_1=2.4$ mm. 通过等值代替得出 DGS-LPF 的等效电路如图 11 所示. 其中, 4 阶 LPF 的等效电路中的两个并联的 LC 串联电路用 DGS 结构代替, 并联电容 C_1 和 C_2 由低阻抗传输线代替, 从而得出 DGS-LPF 的结构示意图如图 10 所示. 根据文献 [8] 中滤波器的设计原理, 将原型 LPF 转化成集总元件表示, 并利用公式 (4)、(5) 表示出电感值与电容值. 其中 Z_0 为负载阻抗、 g_n 为低通原型滤波器的反归一化参数 ($n=1, 2$).

$$L_n = \frac{g_n Z_0}{w_{cn}}; \quad (4)$$

$$C_n = \frac{g_n}{Z_0 w_{cn}}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{w_{cn} L_n} = - \left(w_{cn} C_{kn} - \frac{1}{w_{cn} L_{kn}} \right). \quad (6)$$

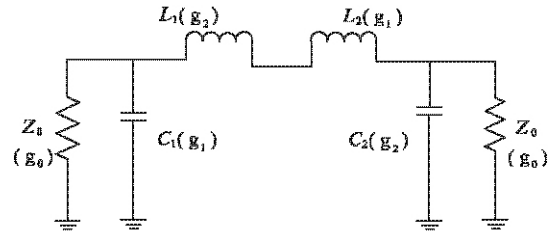


图 9 DGS-LPF 原型电路

Fig. 9 The prototype circuit of DGS-LPF

用图 1 中所示的蛇型 DGS 结构代替图 9 中电感 L_1, L_2 , 利用式 (4)、(5) 和 (6) 计算出集总元件 w_{cn}, L_n, C_n 的值. 由公式 (7) 求出宽为 15 mm、电容值分别为 C_1 和 C_2 的低阻抗传输线的长度 $l_1=4.7324$ mm、 $l_2=1.4600$ mm. 其中 λ_g 和 Z 分

别为 15 mm 传输线对应的电长度和阻抗值. 同时, 由于微带线存在额外等效电感 L_a , 因此, 利用公式(8)将额外的电感考虑在等效电路的 LC 电路中, 最终确定等效电路的各个参数值. 在 HFSS 和 MATLAB 环境下分别对含有 DGS 的 LPF 进行电磁仿真和等效电路仿真, 结果如图 12 所示.

$$l_n = \frac{\lambda g}{2\pi} \arcsin w_{cn} Z C_n, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\frac{1}{w_{cn} L'_{kn}} - w_{cn} C'_{kn}} = \frac{1}{\frac{1}{w_{cn} L_{kn}} - w_{cn} C_{kn}} - w_{cn} L_a. \quad (8)$$

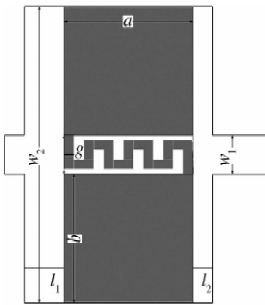


图 10 DGS-LPF 示意图

Fig. 10 Schematic view of DGS-LPF

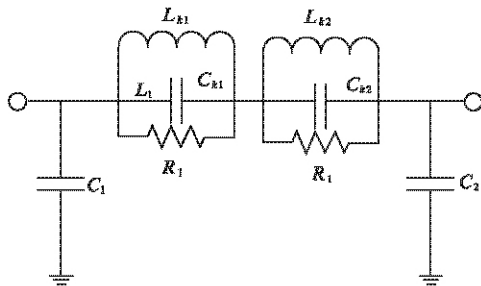


图 11 DGS-LPF 等效电路模型

Fig. 11 Equivalent circuit model of DGS-LPF

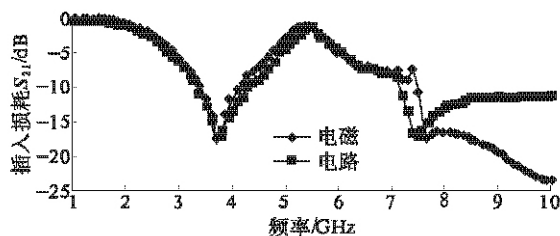


图 12 DGS-LPF 的电磁仿真与等效电路仿真

Fig. 12 Simulation of electromagnetic and equivalent circuit of DGS-LPF

由图 12 可知, 提出的等效电路合理地考虑了蛇型 DGS 单元的两个谐振频率, 使基于等效电路的 LPF 的设计更符合实际. 该滤波器在 3.2 GHz 和 7.5 GHz 处产生两个阻带, 能有效地截止高次谐波. DGS 低通滤波器的等效电路的电路仿真与

电磁仿真结果在谐振 w_{01} 之前拟合良好, 且计算结果 $w_{c1} = 2.202$ GHz, 与仿真结果 $w_{c1} = 2.247$ GHz 相差也不是很大, 证明了该设计方法的正确性. 同时, 在现实设计中可以根据不同的频率要求选取蛇型 DGS 的具体参数.

4 结论

笔者在哑铃型 DGS 结构的基础上提出了一种蛇型缺陷接地结构, 并给出了其等效电路模型. 与传统哑铃型 DGS 相比, 该结构在不增加缺陷面积的情况下获得的衰减频率更低, 产生的谐振频率点更多. 结果表明, 随着方格面积的增大, 截止频率降低; 随着缝隙宽度 g 的增大, 截止频率升高; 随着 U 形拐点数 n 的增加, 截止频率降低. 采用蛇型 DGS 设计的 LPF 等效电路的 MATLAB 仿真与 HFSS 电磁仿真结果相吻合. 证明了该设计方法的正确性.

参考文献:

- [1] PARK J I, KIM C S, KIM J, et al. Modeling of a photonic bandgap and its application for the low-pass filter design [C] // Asia-Pacific Microwave Conference. Singapore, 1999: 331 - 334.
- [2] 林强, 张祖荫, 郭伟. DGS 微带线滤波器设计 [J]. 现代雷达, 2005, 27(6): 52 - 54.
- [3] 刘海文, 李征帆, 孙晓玮, 等. 一种新颖的蝴蝶结形缺陷接地结构微带线 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(6): 431 - 345.
- [4] DAL A, PARK J S, KIM C S, et al. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Tech, 2001, 49(1): 86 - 93.
- [5] 顾继慧, 杨一飞, 周虹, 等. 新型缺陷接地结构带通滤波器研究 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(6): 763 - 766.
- [6] PARK J-S, YUN J-S, PARK C S. DGS resonator with interdigital capacitor and application to bandpass filter design [J]. Electronics Letters, 2004, 40(7): 433 - 434.
- [7] KIM C S, LIM J S, NMA S, et al. The equivalent circuit modeling of defected ground structure with spiral shape [J]. IEEE Electronics Letters, 2002, 38(9): 2125 - 2128.
- [8] 曹锐, 孙振鹏. DGS 结构特性分析及其改善微波放大器谐波 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 29(11): 1380 - 1383.
- [9] LIM J, KIM C S, AHN D, et al. Design of low-pass

- filters using defected ground structure [J]. IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech, 2005, 53(8): 2539 – 2545.
- [10] INSIK C, BOMSON L. Design of defected ground structures for harmonic control of active microstrip antenna [C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002(2): 852 – 855.
- [11] 丁勇. 基于 SGS 的 UWB 滤波器设计 [J]. 电子元件与材料, 2013, 32(9): 42 – 44.
- [12] KHAN M T, ZAKARIYA M A, SAAD M N M, et al. Parametric effect of defected ground structure (DGS) on frequency of a bandpass filter [C]//IEEE International RF and Microwave Conference, 2013: 184 – 188.
- [13] KUMAR A, VERMA A K. Control of stop band using spur line resonators of DGS based low pass filter [C]//IEEE Students' Technology Symposium. 2011: 61 – 64.
- [14] LIM J S, KIM C S, JEONG Y C, et al. An advanced equivalent circuit of spiral-shaped defected ground structure [C]//34th European Microwave Conference. Amsterdam, 2004: 1357 – 1360.
- [15] LIM J S, KIM C S, LEE Y T, et al. A new type of low pass filter with defected ground structure [C]//Microwave Conference. European, 2002: 1 – 4.

Design of Snake DGS Microstrip Filter

WANG Ke, CHEN Xiao-qiang

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

Abstract: A snake DGS defect structure which uses snake-like gap instead of rectangular gap into the dumb-bell DGS is introduced. An equivalent circuit is built, meanwhile, the relevant circuit parameters are derived. Control variate method is used to analyze the influence of parameters variation to frequency characteristics and circuit characteristics of the snake DGS defect structure. Furthermore, this kind of structure is put into the design of low-pass filter, simulation of the designed filter and its equivalent circuit model is done separately by MATLAB and HFSS. The results of these two methods are coincident. So it can be drawn that the structure has lower attenuation frequency and more resonant frequency in the case of maintaining the area of the defects.

Key words: defected ground structure; equivalent circuit; low-pass filter

文章编号: 1671-6833(2015)01-0020-04

一种求解连续空间约束优化问题的蚁群算法

焦留成, 邵创创, 程志平

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 借鉴蚁群算法和惩罚函数的思想提出了一种用于求解连续空间约束优化问题的蚁群算法. 应用自适应调整惩罚因子的惩罚函数法将约束优化问题转化为无约束优化问题, 再结合自适应调整全局选择因子和信息素挥发系数的连续域蚁群算法, 求解连续空间约束优化问题. 通过对基准测试函数进行编程求解, 对比采用固定参数的蚁群算法求解结果, 验证了所提改进算法的正确性和有效性.

关键词: 连续空间; 约束优化; 蚁群算法; 惩罚函数

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.005

0 引言

蚁群算法是一种采用分布式控制, 通过群体搜索策略和群体之间的信息交换寻找最优路径的优化方法^[1]. 并已在旅行商问题、二次分配问题和调度问题等一系列离散优化问题上获得了成功应用^[2]. 该算法的寻优过程不依赖于优化问题本身的严格数学性质, 对目标函数无解析性要求^[3]. 因此, 可以将本质上离散的蚁群算法应用于求解连续空间的约束优化问题, 近年来也取得了一些成果^[4]. 但这些研究大多是针对无约束或者约束条件仅为自变量取值范围的优化问题, 而对约束条件一般的等式约束和不等式约束的研究很少. 笔者借鉴蚁群算法和惩罚函数的思想设计了一种可以求解约束优化问题的连续域蚁群算法. 并通过对基准测试函数的编程求解, 验证了算法能以很高的概率寻找到最优解, 误差率很低.

1 约束优化问题

约束优化问题一般可以表达如下.

$$\min f(\mathbf{X}). \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} g_i(x) \leq 0, i=1, 2, \dots, q; \\ h_j(x) = 0, j=q+1, q+2, \dots, m; \\ l_t \leq X_t \leq u_t, t=1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n) \in \mathbf{R}^n$ 为 n 维向量; f 为

待优化函数; g_i, h_j 为约束函数. 约束优化问题的本质是寻找到既满足约束条件又能使目标函数值达到最小的变量 X^* 及其所对应的函数值 $f(X^*)$.

2 连续域蚁群算法

(1) 初始化. 依据具体问题设定蚂蚁数目 m 、最大迭代次数 K , m 只蚂蚁随机分布在函数定义域内, 并将各自位置作为其寻优的起点. 设各自变量 $\mathbf{X} (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的取值范围为 $[a, b] = \{[a_1, b_1], [a_2, b_2], \dots, [a_n, b_n]\}$. 第 i 只蚂蚁的初始位置为 $X(i) = (X_1^i, X_2^i, \dots, X_j^i, \dots, X_n^i)$, 其中:

$$X_j^i = a_j + (b_j - a_j) \cdot \text{rand}(1). \quad (3)$$

设定蚂蚁 i 所处位置对应的信息素强度为

$$T_0(i) = \exp(-f(X_i)). \quad (4)$$

(2) 全局搜索. 所有蚂蚁在完成一次搜索后, 将会有一只蚂蚁搜索到本次循环的最优解, 然后其它蚂蚁在各自的下一轮搜索中便会以一定的概率和步长转向该处蚂蚁. 其转移概率和步长分别为

$$P(i, b) = \begin{cases} \frac{\exp(r)}{\exp(T(b))}, & i \neq b; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (5)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i + \lambda(X_b - X_i), & P(i, b) < P_0; \\ X_i + \text{rand}(-1, 1) \cdot L(i), & \text{else.} \end{cases} \quad (6)$$

收稿日期: 2014-09-18; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61075071); 河南省教育厅自然科学基金资助项目(14A413008); 郑州市科技局资助项目(131PPTGG409-5)

通信作者: 程志平(1974-), 男, 河南商水人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事直线电机建模与控制研究, E-mail: zpcheng@zzu.edu.cn.

$$P_0 = \begin{cases} 0.9 \cdot \exp((k/K) \cdot 2 \cdot \ln(1/2)), & k \leq (K/2); \\ 0.225 \cdot \exp((k/K) \cdot 2 \cdot \ln(2)), & \text{else.} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $r = T(b) - T(i)$; $\lambda = 1/k$ 为全局转移步长参数; k 表示当前迭代次数; P_0 为全局选择因子, 将其设为迭代次数 k 的函数, 迭代初期 P_0 取较大值, 那么非最优解蚂蚁 $X(i)$ ($i = 1, 2, \dots, m, i \neq b$) 向最优解蚂蚁 $X(b)$ 转移时, 就会以较大概率选择步长 $X_i + \lambda(X_b - X_i)$, 可加快算法寻优, 迭代中期 P_0 取较小值, 蚂蚁会以较大概率选择步长 $X_i + \text{rand}(-1, 1) \cdot L(i)$, 会增强步长选择的随机性, 进而能扩大搜索的解空间, 迭代后期为加快搜索速度, P_0 还取较大值。

(3) 局部搜索. 上一轮循环中找到最优解的蚂蚁继续在一个小邻域内进行局部搜索, 以期望能找到更优解. 假设蚂蚁新找到的解 $X(u)$ 其信息素强度为 $T(u)$, 比较新解和原来解的信息素强度, 若新解比原来解的信息素强度大, 则用新解位置取代原来解位置; 否则, 仍保留原来最优解. 表达式如下。

$$X(b) = \begin{cases} X(u), & T(u) > T(b); \\ X(b), & \text{else.} \end{cases} \quad (8)$$

$$X(u) = \begin{cases} X(b) + w \cdot \text{step}, & \text{rand}(1) < 0.5; \\ X(b) - w \cdot \text{step}, & \text{else.} \end{cases} \quad (9)$$

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \cdot \frac{k}{K}. \quad (10)$$

式中: step 为局部搜索的初始步长; w 为局部搜索步长, 将其取为迭代次数的函数, 随迭代次数增加而减小, 这样在迭代后期步长就会变小以便能搜索到更精确解. 式中 w_{\max} 和 w_{\min} 分别为步长更新参数上下限, 其值一般取范围为 (1, 1.4) 和 (0.2, 0.8) 的常数^[5].

(4) 信息素更新. 蚂蚁完成一次全局搜索和局部搜索后, 将对其信息素进行更新, 更新规则如下。

$$T(i) = (1 - \rho) T(i) + \Delta T(i). \quad (11)$$

$$\rho = 0.1 \cdot \exp((k/K) \cdot \ln(9)). \quad (12)$$

式中: $\Delta T(i) = \exp(-f(X_i))$; ρ 为信息素挥发系数, 将 ρ 设定为迭代次数的函数, 迭代早期, ρ 取较小值可以提高搜索的随机性和全局搜索能力, 随着搜索的进行, 蚁群会越来越向最优解蚂蚁聚集, 这时需要减少搜索的随机性, 加快收敛速度, 那么, 增大 ρ 的取值, 增强信息的正反馈作用可以达到此目的。

3 惩罚函数法处理约束条件

3.1 经典惩罚函数法

常用的惩罚函数法表达形式如下。

$$p_i(X) = \sum_{i=1}^l g_i(X). \quad (13)$$

$$g_i(X) = (h_i(X))^2, i = 1, 2, \dots, p. \quad (14)$$

$$g_{i+p}(X) = \begin{cases} 0, & g_i(X) \leq 0; \\ (g_i(X))^2, & g_i(X) > 0. \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

$$F(X, M_k) = f(X) + M_k \sum_{i=1}^l g_i(X). \quad (16)$$

其中, 式(14)、(15)分别为等式和不等式约束条件, 式(16)表示新构造的适应度函数, $l = p + m$, $M_k > 0$ 为惩罚因子. 当约束条件被破坏时, 至少会有一个 i ($1 \leq i \leq l$), 使 $g_i(X) > 0$, 从而 $p(X) > 0$. 且约束条件被破坏得越厉害, $p(X)$ 取值就会越大, 在 M 取为一定值时, $F(X, M) = f(X) + Mp(X)$ 也就越大, 惩罚也就越厉害, 体现了对于约束条件被破坏时的惩罚. 反之, 当 x 满足约束条件时, 则 $g_i(X) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, l$), $p(X) = 0$, 这时不管 M 取值多大, 都有 $F(X, M) = f(X)$, 即惩罚函数对原目标函数的求解无影响。

3.2 自适应惩罚函数法

惩罚函数法因其方法简单, 易于编程实现而得到广泛应用. 但也存在着一个主要缺陷: 惩罚因子对收敛速度影响较大^[6]. 若选取过小, 则对不可行解的惩罚力度不够, 算法不易进入可行域甚至可能收敛到不可行解; 若选取过大, 则惩罚力度过大, 会降低算法的搜索效率. 为了解决该问题, 这里将惩罚因子设置为自变量的函数. 构造惩罚函数如下。

$$p(X) = \sum_{i=1}^m S_i(X) |h_i(X)| + \sum_{j=1}^p M_j(X) \max\{0, g_j(X)\}. \quad (17)$$

$$S_i(X) = \frac{|h_i(X)|}{\sum_{i=1}^p |h_i(X)| + \sum_{j=1}^m \max\{0, g_j(X)\}}, \quad i = 1, 2, \dots, p. \quad (18)$$

$$M_j(X) = \frac{\max\{0, g_j(X)\}}{\sum_{i=1}^p |h_i(X)| + \sum_{j=1}^m \max\{0, g_j(X)\}}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (19)$$

构造适应度函数如下。

$$G(X) = f(X) + C(X) p(X). \quad (20)$$

$$C(X) = 1 + \frac{|f(X)|}{1+p(X)}. \quad (21)$$

惩罚因子 $S_i(X)$ 和 $M_j(X)$ 随着约束函数 $h_i(X)$ 和 $g_j(X)$ 的变化而变化,即惩罚因子会随着算法迭代的进行做自适应调整.这能实现在违反约束程度大的段给予较大的惩罚,对违反程度小的段给予较小的惩罚,进而能提高算法的求解效率.

4 算法求解步骤

结合上文连续域蚁群算法和自适应惩罚函数法,求解连续空间约束优化问题的具体步骤如下.

(1) 根据具体问题确定最大循环次数 K 、蚂蚁数目 m 、收敛精度 ε 、步长更新参数上下限 w_{\max} 和 w_{\min} 、局部搜索时的初始步长 $step$ 、各变量取值范围,按式(3)初始化蚁群位置.

(2) 根据式(17)~(21)将约束优化问题转化为无约束优化问题,并构造适应度函数.

(3) 根据式(4)计算各蚂蚁所在位置对应的信息素强度、适应度值,找出信息素强度最大的蚂蚁 $X(b)$.

(4) 根据式(5)~(7)各蚂蚁进行全局搜索,更新各个蚂蚁位置.

(5) 最优解蚂蚁按式(8)~(10)进行局部搜索,更新当前最优解蚂蚁位置.

(6) 所有蚂蚁在完成本次循环后按式(11)、(12)进行信息素更新,并保存当前最优解.

(7) 如果所求的最优解满足要求或已经达到最大迭代次数,则算法迭代结束,否则转向步骤2继续迭代运算.

5 仿真实验及数据结果分析

笔者选取如下标准测试函数利用 MATLAB 软件进行算法的仿真实验.

$$f(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2. \quad (22)$$

约束条件为 $x_1 + x_2^2 \geq 0$, $x_1^2 + x_2 \geq 0$, $x_1 \in [-0.5, 0.5]$ 和 $x_2 \leq 1.0$. 已知最优解为 $x^* = (0.5, 0.25)$, 此时有 $f(x^*) = 0.25$.

由于该函数为开口向上的曲面,如果直接求解该函数的最小值,则蚂蚁都会分布在曲面底部,被曲面遮盖,故笔者采用求解 $-f(x_1, x_2)$ 最大值的方式,这样蚂蚁的最初和最终位置分布都会覆盖在曲面上,对比更明晰.将采用固定参数蚁群算法对比改进后自适应调整参数值的蚁群算法用 MATLAB 软件分别编程求解.采用同样的蚂蚁个

数 $m = 100$, 最大迭代次数 $K = 1\ 000$. 改进前固定参数 $p_0 = 0.2$, $\rho = 0.8$, $m = 100$, 改进后自适应调整参数的步长更新参数上下限分别取 $w_{\max} = 1.2$ 和 $w_{\min} = 0.6$, 局部搜索的初始步长 $step = 0.1 \cdot \text{rand}(1)$. 分别运行该算法程序 30 次,求得蚂蚁最初分布位置、最终分布位置、最优函数值随迭代次数的变化趋势如图 1~3 所示. 分别记录每次迭代时间和求得的解,取其中最优解、获得最优解次数、最差解、获得最差解次数和计算的平均解、平均时间以及误差率制作表 1.

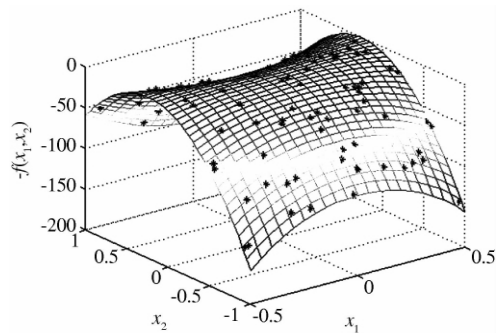


图1 蚂蚁的最初分布位置

Fig.1 Initial location of ants

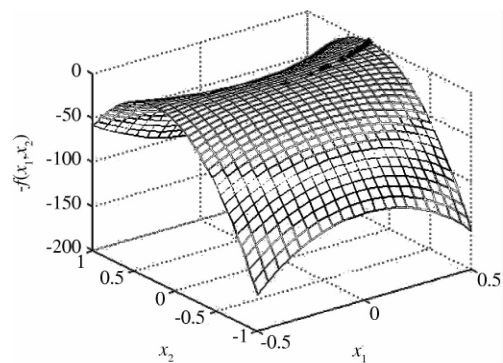


图2 蚂蚁的最终分布位置

Fig.2 Final location of ants

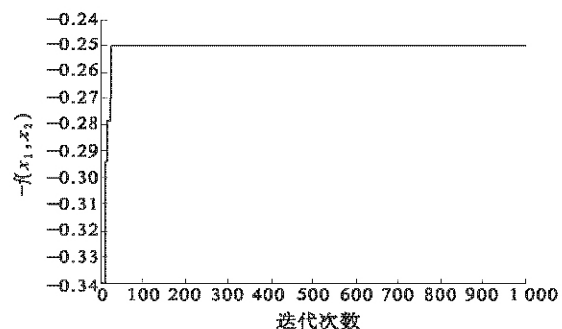


图3 最优函数值随迭代次数变化趋势

Fig.3 The optimal function values of chang trends with the iteration

表 1 蚁群算法优化结果
Tab.1 Ant colony algorithm results

| 项目 | 改进前 | 改进后 |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 最优解 | $-f(0.5, 0.25) = -0.250\ 0$ | $-f(0.5, 0.25) = -0.250\ 0$ |
| 最优解的个数 | 10 | 25 |
| 最差解 | $-f(0.485\ 8, 0.269\ 2) = -0.374\ 6$ | $-f(0.498\ 6, 0.251\ 2) = -0.251\ 4$ |
| 最差解的个数 | 1 | 1 |
| 平均解 | $-f = -0.289\ 6$ | $-f = -0.250\ 6$ |
| 平均时间 | 7.367 2 | 5.096 1 |
| 平均误差率 | 3.27% | 0.24% |

由上表可知,笔者设计的蚁群算法在求解基准测试函数所求各结果明显优于改进前采用固定参数的蚁群算法. 蚂蚁最初比较分散地分布在解空间内,程序运行结束后会比较明显地聚集在最优解附近,对比明晰. 改进后算法求得平均解 $-f = -0.250\ 6$,即求得的满足约束条件的函数最小值为 $f = 0.250\ 6$,平均误差率很低.

6 结论

在借鉴前人研究蚁群算法求解优化问题的基础上,设计了一种用于求解连续空间约束优化问题的蚁群算法,并给出了算法的较详细步骤. 在 MATLAB 软件上分别编程采用固定参数的蚁群算法和采用自适应调整参数的蚁群算法求解一个基准测试函数,对比求得的结果,验证了改进后的算法具有更强的寻优能力.

参考文献:

[1] 原思聪,刘道华,江祥奎,等. 基于蚁群算法的多维

有约束函数优化研究[J]. 计算机应用研究,2008, 25(6): 1682 - 1684.

[2] 刘喜恩. 用于连续空间寻优的一种蚁群算法[J]. 计算机应用,2009,29(10): 2744 - 2747.

[3] 李朝辉,梁昔明. 连续域蚁群算法的改进研究及在参数估计中的应用[D]. 长沙: 中南大学信息科学与工程学院,2011.

[4] SOCHA K, DORIGO M. Ant colony optimization for continuous domains [J]. European Journal of Operational Research (S0377 - 2217), 2008, 185(3): 1155 - 1173.

[5] 贾延臣,刘长良. 基于连续空间优化问题的蚁群算法及其应用研究[D]. 保定: 华北电力大学控制与计算机工程学院,2008.

[6] 雷韵平,成良玉. 一种改进的蚁群算法及其在电机优化设计中的应用研究[D]. 广州: 中山大学信息科学与技术学院,2010.

Ant Colony Algorithm for Solving Continuous Space Constrained Optimization Problems

JIAO Liu-cheng, SHAO Chuang-chuang, CHENG Zhi-ping

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

Abstract: With ideas of ant colony algorithm and penalty function, an ant colony algorithm, which can solve continuous space constrained optimization problems, was proposed. We adopted the penalty function method of adjusting its value of adaptively to transform the constrained optimization problems into unconstrained optimization problems, and then combined with the continuous domain ant colony algorithm of adjusting its global selection factor and the value of the pheromone evaporation factor adaptively to solve the continuous space constrained optimization problems. And through programming solution of one benchmarking function, we compared the results with those of using fixed parameters ant colony algorithm, it was verified with correctness and effectiveness.

Key words: continuous space; constrained optimization; ant colony algorithm; penalty function method

文章编号: 1671-6833(2015)01-0024-04

双三相永磁同步电动机一相绕组短路故障性能分析

齐 歌, 白左霞, 刘宪林, 师 黎

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 对双三相永磁同步电动机发生一相短路故障时的磁场分布、磁链、电流以及输出转矩等电磁性能进行分析, 并与传统三相电机进行比较. 结果表明, 双三相电机相与相之间的耦合较弱, 故障相几乎不影响非故障相的正常运行, 电机依然能够在可接受的范围内继续工作, 具有一定的容错能力, 适用于对电机连续运行有特殊要求的场合.

关键词: 双三相; 永磁电机; 容错性能; 一相短路;

中图分类号: TM351

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.006

0 引言

在航空航天、军事应用、矿井轧钢等对电机可靠性要求较为苛刻的领域中, 人们对电机本体容错性能的要求也越来越高^[1-2], 即要求电机在系统某部分故障时仍具有一定的工作能力. 目前研究较多的容错电机是多相永磁电机. 所谓多相电机^[3-4]是指随着电力电子技术日新月异的发展, 使得电机驱动系统和定子槽中的相数也不拘于传统三相. 与传统三相永磁电机相比, 多相电机凭借定子中多增的绕组使其更有优势, 比如适用于低压大功率场合、电磁转矩脉动小、效率高、转矩密度高、拥有更多的设计自由度、容错能力更强等优点^[5]. 双三相永磁同步电机是多相电机中的一种, 它是把两套传统三相绕组分别作为两个独立模块, 并按一定相移嵌放在同一台电机本体中. 两套三相绕组之间的相移可以根据实际工作中的需要来调节, 现研究较多的是双三相电机中两套三相绕组之间相移 30°的情况. 与传统三相电机相比较, 由于双三相电机中两套三相绕组存在 30°电角度的相移, 使得电机具有更高绕组系数, 进一步提高了电机的输出转矩; 并且双三相电机两套三相绕组各产生的电磁转矩叠加后正好消除了 6 次和 18 次谐波, 有效地减小了电机转矩脉动^[6].

笔者采用有限元分析方法, 对双三相相移

30°永磁同步电动机在故障工况下的运行性能进行分析, 与其在正常工况下的性能进行比较, 并与传统三相电机进行了比较分析.

1 双三相电机模型的建立

根据电机的具体参数, 利用 Ansoft Maxwell 2D 软件建立双三相永磁同步电动机的仿真模型^[7-8]. 与此同时, 建立一个传统三相电机模型, 其反电动势和定子铜耗均与双三相电机相同, 以便在同等条件下进行性能比较. 两种电动机的基本参数如表 1 所示.

表 1 表贴式 12 槽 10 极永磁电机参数

Tab.1 Parameters of 12-slot 10-pole surface-mounted of PM motor

| 参数 | 三相电机 | 双三相电机 |
|----------------|---|---|
| 定子相数 | 3 | 6 |
| 额定电流 / A | 10 | 5 |
| 额定转矩 / (N · m) | 5.5 | 5.5 |
| 定子外径 / mm | 100 | 100 |
| 定子内径 / mm | 57 | 57 |
| 气隙长度 / mm | 1 | 1 |
| 永磁体材料性能 | $B_r = 1.2 \text{ T}$, $\mu_r = 1.05$ | $B_r = 1.2 \text{ T}$, $\mu_r = 1.05$ |
| 定转子铁心材料 | transil300_16T | ransil300_16T |

收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-11-06

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目(122102210098); 中国博士后科学基金面上资助项目(2011M501188); 河南省博士后项目启动经费资助项目(2010024)

作者简介: 齐歌(1982-), 女, 河南郑州人, 郑州大学讲师, 博士, 主要研究方向新型永磁电机的设计与性能分析, E-mail: qige@zzu.edu.cn.

2 双三相电机相隔离分析

在电机内部,相与相之间的相互影响主要表现在相绕组中电流产生的磁场与其他相的匝链.在双三相相移 30° 电机中,定子槽中的两套三相绕组分别为 A1、B1、C1 和 A2、B2、C2,这两套绕组在空间上相差 30° 电角度,而每套绕组中各相之间间隔 120° 电角度.双三相电机的相磁势星形图和相绕组在电机中的实际分布如图 1 所示.

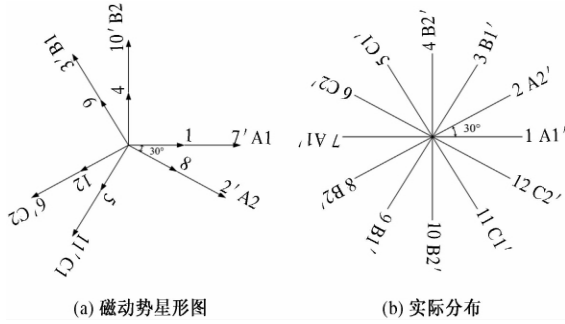


图 1 双三相电机各相电枢线圈分布

Fig. 1 The armature coil distribution of each phase of dual three-phase motor

为了探讨电机中各相绕组之间的相互影响,笔者对两种电机仅一相绕组加激励时的磁场分布情况进行分析,如图 2 所示.

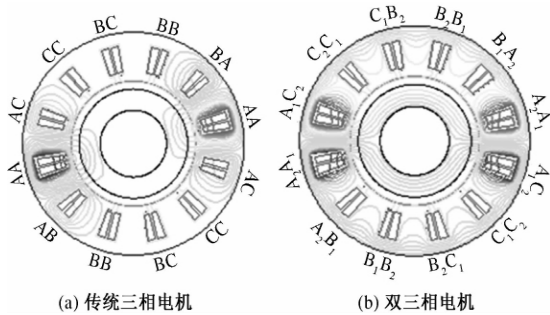


图 2 两种电机的磁力线分布

Fig. 2 Distribution of the magnetic field lines of two kinds of motor

从图 2(a) 中可以看出,传统三相电机 A 相激励产生的磁力线除了与自身相匝链外,在很大程度上也影响与其相邻的 B、C 两相.而在图 2(b) 中,双三相电机 A1 相激励产生的磁力线除了与自身相匝链之外,还主要影响与其相邻的 A2 和 C2 相,但这种影响的程度显然弱于前述的传统三相电机,A2 和 C2 相附近的磁力线分布较为稀疏.同时,从图中可以看出,A1 相激励对其余三相的影响更加微弱.分析结果说明,与传统三相电机相比,双三相电机相与相之间的耦合程度较弱,一相运行与否以及故障与否对其他相的影响也就较小,因此故障相可以作为一个独立的模块退出整

个系统的运行,并不会导致电机中途瘫痪,进而导致整个系统崩溃.

3 一相绕组短路故障性能分析

在实际运行中,电机定子绕组在热、电、机械摩擦等共同交互作用下,不可避免地会发生一相绕组短路故障.笔者研究的一相绕组短路故障可以看成是一种特殊的绕组匝间短路故障,即发生百分之百匝间短路故障^[8-11].

3.1 各相绕组磁链波形

笔者对双三相电机故障前后各相绕组磁链波形进行分析,并与传统三相电机进行比较,如图 3 和图 4 所示.

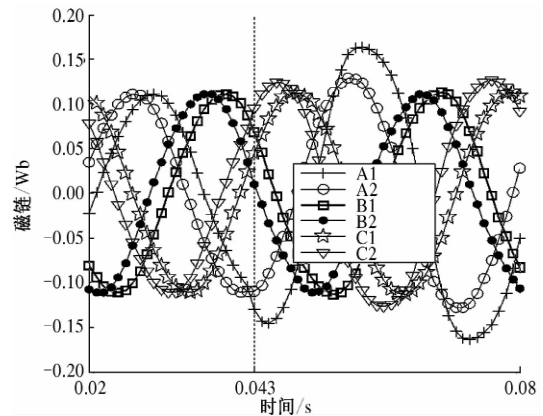


图 3 双三相电机 A1 相短路故障时各相绕组的磁链波形

Fig. 3 Flux linkage waveforms of dual three-phase motor when A1 phase short circuit

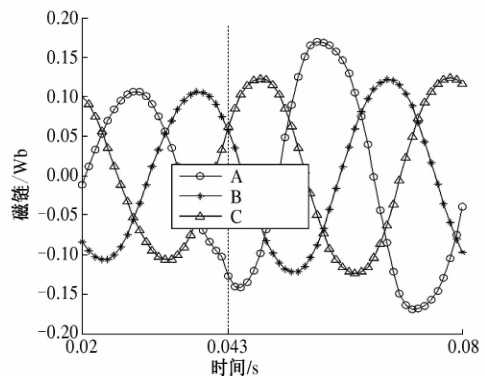


图 4 三相电机 A 相短路故障时各相绕组的磁链波形

Fig. 4 Flux linkage waveforms of the traditional three-phase motor when A phase short circuit

从图 3、4 中可以看出,在 0.043 s 时刻以前两种电机都处于正常工作状态,各相磁链曲线对称,并都具有较好的正弦度;在 0.043 s 时刻电机发生一相短路故障,故障相 A1 相和 A 相磁链幅值瞬间增大,其他非故障相的磁链幅值也都有不同程度的增加,其增加幅度列于表 2. 从表 2 中可以看出,在传统三相电机中,其余的 B、C 两相均

受到严重的影响,磁链幅值增长幅度较大;而在双三相电机中,仅与故障相相邻的 A2 相和 C2 相受到严重的影响,而其余各相几乎不受到影响,磁链幅值增加不明显.

表 2 两种电机短路故障后各相绕组磁链幅值的增长情况

Tab.2 Amplitude increment of the flux linkage when short circuit occurred in two motors

| 各相 | 双三相电机故障后磁链增长率/% | 三相电机故障后磁链增长率/% |
|----------|-----------------|----------------|
| A1 相/A 相 | 47.2 | 60.0 |
| B1 相/B 相 | 1.3 | 14.4 |
| C1 相/C 相 | 1.2 | 14.6 |
| A2 相 | 15.6 | — |
| B2 相 | 0.1 | — |
| C2 相 | 14.2 | — |

3.2 各相绕组电流波形分析

电机在正常运行时发生突然短路故障所经历的时间虽然极短,但对故障时各相绕组短路电流的分析有着非常重要的意义.图 5 和图 6 分别为双三相电机和传统三相电机故障前后各相绕组电流的变化情况,其电流幅值的增长幅度列于表 3.

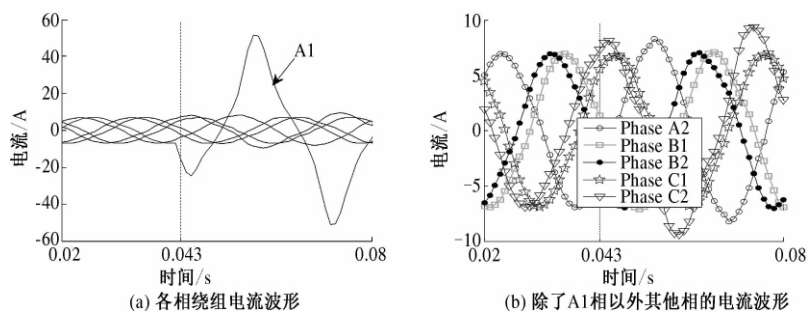


图 5 双三相电机 A1 相短路故障时各相绕组电流波形

Fig.5 Current waveforms of each phases in dual three-phase motor when A1 phase short circuit

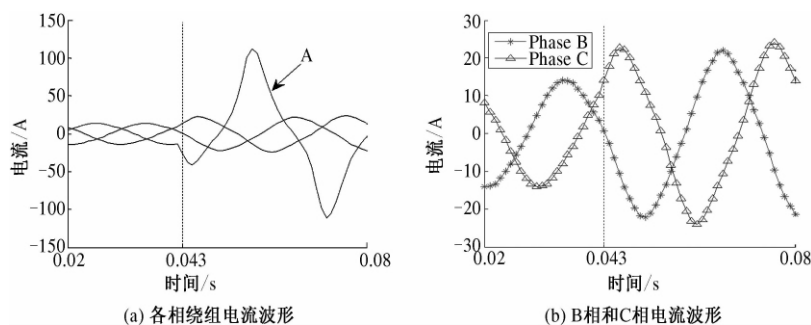


图 6 传统三相电机 A 相短路故障时的各相绕组的电流变化情况

Fig.6 Current waveforms of each phases in the traditional three-phase motor when A phase short circuit

传统三相电机在一相绕组突然短路时,不仅故障相绕组电流会骤然增大,其余相绕组中的电流也会大幅增加,如果继续运行会使电机绕组过

表 3 两种电机短路故障后非故障相绕组电流幅值增长情况
Tab.3 Amplitude increment of current of Non-fault phase winding when short circuit occurred in two motors

| 各相 | 双三相电机故障后电流增长率/% | 三相电机故障后电流增长率/% |
|----------|-----------------|----------------|
| B1 相/B 相 | 1.2 | 70.9 |
| C1 相/C 相 | 1.9 | 71.2 |
| A2 相 | 18.4 | — |
| B2 相 | 1.6 | — |
| C2 相 | 35.6 | — |

从表 3 中可以得出,与传统三相电机相比,双三相电机的非故障相电流在短路故障前后变化幅度较小,并且受故障相影响最为严重的 C2 相电流幅值增大了 35.6%,仅为传统三相电机 B、C 两相电流幅值增长幅度的 1/2. 分析结果表明,电机发生故障时,双三相电机与传统三相电机相比较,其非故障相受故障相影响程度较小,几乎能保持原有的运行状态.在图 5(a) 和图 6(a) 中可以看出,在 0.043 s 时刻两种电机出现一相短路故障,此时故障相绕组中的短路电流幅值瞬间急剧增大,从图 5(b) 和图 6(b) 看出:非故障相绕组中的电流幅值都有所增加,但程度不同.

热而导致烧毁.但从双三相电机故障前后电流变化的情况来看,非故障相电流增加幅度较小,只略大于额定电流,变化最大的 C2 相也不过是正常

运行时的1.356倍.因此如果切断故障相,在不超过温升的情况下,双三相电机依然能够短时运行,而不必中途停机,这就比传统三相电机有更为显著的带故障运行能力和优势.

3.3 电机转矩性能分析

电机在故障状态时,输出转矩的能力是衡量容错电机性能的重要指标之一.为此,笔者着重对双三相电机发生一相短路故障前后的输出转矩情况进行分析,考察其带故障运行能力,并与传统三相电机进行比较,如图7所示.

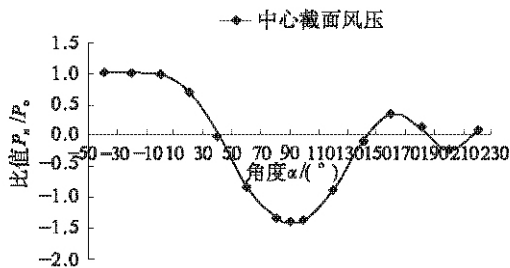


图7 两种电机短路故障时转矩性能比较

Fig. 7 Comparison of torque performance when short circuit occurred in two motors

(1) 0~0.043 s: 两种电机都处于正常运行状态,电机输出转矩均为额定转矩 $5.5 \text{ N} \cdot \text{m}$.

(2) 0.043~0.08 s: 在0.043 s时刻,两种电机在运行时发生一相突然短路故障,此时两种电机转矩均骤然增大,严重影响电机的正常运行.但双三相电机的转矩波动明显小于传统三相电机,这体现出了双三相相移 30° 这种绕组结构的优势.

(3) 0.08~0.12 s: 为防止电机短路相绕组因电流骤然增大迅速升温而烧坏,并阻止热量影响到其余非故障相工作,在0.08 s时刻迅速切断双三相电机的A1相绕组以及传统三相电机的A相绕组.此后在0.08~0.12 s期间,两种电机依靠非故障相继续运行.与上一阶段相比,两种电机的输出转矩波动明显减小,但是传统三相电机转矩波动依然大于双三相电机.与额定运行相比,双三相电机的输出转矩有所降低,但输出转矩最低值仍可达到 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上且无转矩死区,但传统三相电机的输出转矩最低值仅为 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$. 比较结果表明,双三相电机的带故障运行能力优于传统三相电机.

(4) 0.12~0.16 s: 在上一阶段,双三相电机切除故障相后电机输出转矩的波动较大.为进一步改善电机的输出转矩性能,鉴于双三相绕组的特殊性,在0.12 s时刻,切断故障A1相所在的整

个第一套三相绕组,仅用剩余的第三套三相绕组工作.但同时应及时降低负荷,使之与剩余的激励相匹配,这样电机才能够继续稳定运行.从图中可以看到,双三相电机的输出转矩明显趋于平稳,并且保持在 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右.分析结果表明,双三相电机因其自身独特的电机本体设计使其容错性能更加优越,使得电机在运行过程中有一套绕组出现问题时,可以使其退出系统运行,只利用剩下的另一套三相绕组继续运行,从而大大提高了电机本体乃至整个系统的可靠性.

4 结论

在一些对电机本体及其控制系统技术指标要求较高的场合,特别是矿井轧钢、航空航天等对连续运行有较高要求的领域,要求电机具有一定的容错性能.笔者主要分析了双三相电机的结构,以及一相绕组短路故障前后的各相绕组的磁链曲线和电流的变化情况,以及故障后转矩性能的变化,并在同等条件下与传统三相电机进行了详细的比较分析.分析结果表明,双三相电机在同等故障下运行性能优于传统三相电机.此外,双三相电机又因其定子槽中两套绕组的独立性使其容错性能得到进一步提高,作为新型永磁容错电机有着良好的研究和应用前景.

参考文献:

- [1] 张晓晨,朱景伟.双余度永磁容错电机开路故障补救策略研究[J].微电机,2011,44(9):5-8.
- [2] 郝振洋,胡育文,黄文新,等.电力作动器中永磁容错电机及其控制系统的发展[J].航空学报,2008,29(1):149-158.
- [3] 周启章.多相电机的绕组设计[J].电机技术,2001(1):3-5.
- [4] 张阔,夏楠,王雅楠,等.基于空间矢量法的多相电机绕组磁动势的分析[J].现代电力,2010,27(3):37-40.
- [5] 王晋,周理兵,马志云,等.多相永磁无刷直流电动机系统设计与协调控制[J].电工技术学报,2008,23(1):53-59.
- [6] QI Ge, MA Ding, ZHOU Li-bing, et al. Analysis of dual three-phase fractional-slot pm brushless ac motor with alternate winding connections[J]. International Conference on Electric and Electronics, 2011, 99: 793-800.

(下转第32页)

文章编号: 1671-6833(2015)01-0028-05

基于 Aspen Plus 的煤气化副产物粗酚的分离精制

李惠萍¹, 李焕新¹, 李雪平², 张 丹¹, 梁淑琴¹, 梁学博²

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南煤气集团有限责任公司 义马气化厂, 河南 三门峡 472300)

摘 要: 针对煤气化副产物粗酚的组分和组成特点, 设计了三塔和双塔两条连续减压精馏工艺. 借助 Aspen Plus 软件对构建的分离工艺进行系统的模拟研究, 物性方法采用 NRTL 模型. 首先利用 DSTWU 模块简捷设计计算得到了塔板数、回流比和采出量等操作参数, 对比得出适合该系统的分离工艺为双塔精馏. 然后利用 RadFRAC 模块对设计结果进行严格模拟核算, 最终得出双塔 B1 和 B2 的塔板数分别为 29 和 31; 进料塔板级数分别为 15 和 16; 回流比分别为 2.87 和 2.44. 在最佳操作条件下, 所得产品质量分数分别为苯酚 99.0%, 对(间) 甲酚 86.1%, 二甲酚 96.5%. 本研究结果可为粗酚的实际分离工艺设计和操作过程提供参数依据.

关键词: 煤气化粗酚; 双塔; 三塔; 减压精馏; Aspen Plus 模拟

中图分类号: TQ523.59 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.007

0 引言

酚类化合物是重要的有机化工中间体及化工基础原料, 在医药、染料等领域都有着广泛的应用. 鲁奇(Lurgi) 加压生产城市煤气的过程, 煤气发生、洗涤、冷却过程中产生大量副产物粗酚^[1], 由于分离技术困难等原因, 这部分副产物目前大部分低价出售, 严重污染环境. 国内酚类市场在很长一段时间内都处于相对紧缺的状态, 且随着石油资源的日益紧缺, 国家对煤炭资源的综合利用更加重视^[2]. 如果能将这些副产物加以分离、提纯, 必将提高其产品附加值, 增强社会及经济效益. 开展对煤气化副产物粗酚分离精制的研究, 不仅能提高煤气化行业的整体竞争力, 而且还符合国家能源战略的需求. 但粗酚系酚类同系物, 组成复杂, 沸点又十分相近, 对其分离存在极大困难^[3].

Aspen Plus 是一款功能强大的工艺模拟软件, 广泛应用于化工流程设计和新工艺开发, 结合利用这项新技术可以实现化工工艺全流程的模拟与优化^[4]. 此外, Aspen Plus 拥有最完善的物性数据库, 包含六千多种纯组分的物性数据, 它还具有超强的热力学计算系统, 以及各种单元操作模块^[5-6]. 笔者借助 Aspen 工程软件对成分复杂、分

离困难的粗酚系统分离进行了模拟计算, 拟为粗酚系统的精馏工艺设计开发提供必要的基础参数.

1 原料及组成

粗酚由河南煤气集团有限责任公司义马气化厂提供, 该厂以长焰煤为原料, 采用先进的德国鲁奇加压煤气化工艺生产城市煤气^[8]. 系统而准确地分析粗酚的组成是高效提取并合理利用酚类化合物的基础工作, 但是这些化合物的极性高, 挥发性低, 所含同分异构体性质极为相似, 色谱分离较为困难. 通过查阅文献^[9-10] 和实验对比得出: FFAP (30 m × ϕ 0.32 mm × 0.5 μ m) 能实现酚类化合物的基线分离. 采用 GC7900 色谱仪, 色谱条件为: FID 检测器 250 $^{\circ}$ C, 柱温 170 $^{\circ}$ C, 气化室温度 240 $^{\circ}$ C. 粗酚气相进样结果见图 1, 通过标准物定性及内标标准曲线法最终确定了粗酚的组成, 见表 1.

2 工艺流程设计

为了得到纯度较高的单一酚产物, 笔者针对煤气化副产物粗酚的组成和组分特点设计了三塔和双塔连续精馏工艺, 拟通过对比得出实现高纯

收稿日期: 2014-09-23; 修订日期: 2014-11-14

基金项目: 河南省重大公益科研资助项目(101100910200); 河南省自然科学基金资助项目(511021100)

作者简介: 李惠萍(1958-), 女, 河南洛宁人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事新能源材料的开发及废弃物的资源化利用方面的研究, E-mail: huipingli@zzu.edu.cn.

度产品分离、操作费用及设备费用较低的最佳工艺. Aspen Plus 提供了 DSTWU、Distl 等多种塔模型来计算和模拟精馏塔, DSTWU 模块可通过确定轻、重关键组分在塔顶的回收率及回流比等重要参数对最小回流比、最少塔板数、理论塔板数、进料位置等操作条件进行初步设计计算^[11], 该模块计算精度不高, 常用于初步设计, 但其计算结果可为严格精馏计算提供合适的初值^[12].

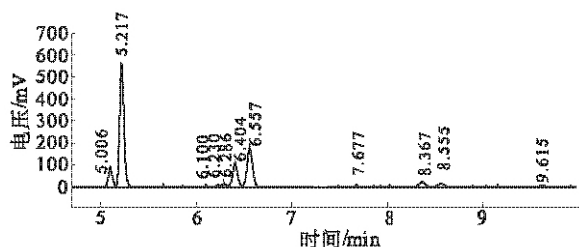


图 1 粗酚的气相色谱图

Fig. 1 The GC spectra of crude phenol

表 1 粗酚中主要组分的质量百分比

Tab. 1 the main components of the crude phenol

| 保留时间/min | 化合物名称 | 相对质量分数/% |
|----------|-------|----------|
| 5.217 | 苯酚 | 33.22 |
| 5.006 | 邻-甲酚 | 5.21 |
| 6.404 | 间-甲酚 | 13.67 |
| 6.557 | 对-甲酚 | 14.10 |
| 其它 | 二甲酚等 | 33.80 |

三塔和双塔均采用液体进料, 进料温度为 60 °C, 压力 101.325 kPa, 进料量为 100 kg/h. 冷凝器均采用全凝器^[7], 塔顶、塔釜的压力均为 10 kPa, 物性方法采用 NRTL 模型, 该模型可用来描述非理想溶液的气液平衡和液液平衡. 即可用来模拟计算极性与非极性化合物组成的混合物体系, 甚至是高度非理想体系^[13-14]. 由于间、对甲酚的沸点仅相差 0.3 °C, 难以分离, 故可将其看作一个虚拟组分, 用对(间)甲酚来代替. 二甲酚则用含量较大且沸点等性质位于中间的 3,5-二甲酚来替代.

2.1 基于 DSTWU 模块的三塔串联的简捷设计计算

图 2 为三塔串联工艺流程.

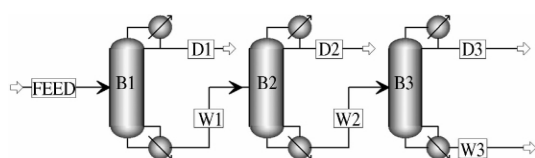


图 2 三塔串联工艺流程

Fig. 2 Flowsheet of three-columns distillation process

如图 2 所示, 其中 B1 为苯酚塔, B2 为邻-甲酚塔, B3 为对-甲酚塔. 在三塔简捷计算中根据组分沸点的差异初步确定各塔的轻、重关键组分及轻关键组分质量回收率, 见表 2.

表 2 三塔初步确定的轻、重关键组分及回收率

Tab. 2 Light and heavy key components and recovery for three columns

| 塔 | 轻关键组分 | 轻关键组分回收率/% | 重关键组分 |
|----|-------|------------|-------|
| B1 | 苯酚 | 98 | 邻-甲酚 |
| B2 | 邻-甲酚 | 95 | 对-甲酚 |
| B3 | 对-甲酚 | 95 | 二甲酚 |

在上述条件下, 用 DSTWU 模块计算后得知, 由于邻-甲酚含量低, 对分离要求较高, 故先对塔 B2 进行灵敏度分析回收率与回流比和实际塔板数之间的关系, 如图 3 所示.

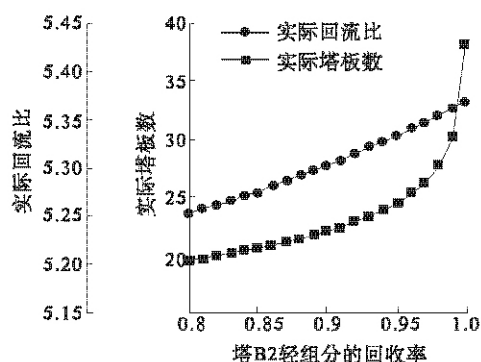


图 3 塔 B2 轻组分的回收率与回流比和塔板数的关系

Fig. 3 The relationship between the light key component recoveries and reflux ratio and plate number in column B2

从图 3 可以看出, 随着轻组分邻-甲酚回收率的增加, 实际塔板数曲线斜率也逐渐增大, 即实际塔板数迅速增大, 而回流比的变化比较缓慢. 由此可见, 轻组分回收率对实际塔板数的影响较大, 而对回流比的影响比较小. 在实验和设计中要想得到 95% 和 0.5% 的质量回收率, 塔板数不应该低于 25, 否则会造成过高的回流比, 耗能增加. 经过多次模拟, 三塔简捷计算所得各个物流信息见表 3, 所得工艺参数结果见表 4.

2.2 基于 DSTWU 模块的双塔串联的简捷设计计算

双塔操作的进料状态, 物性方法等与 2.1 中三塔精馏相同, 工艺流程如图 4 所示. 其中 B1 为苯酚塔, B2 为对甲酚塔, 在选择轻、重关键组分时

忽略邻甲酚,轻重关键组分及回收率见表 5,经过多次模拟计算所得的工艺参数见表 6。

表 3 三塔的物料及能量衡算结果

Tab. 3 The results of material and energy balance

| 项目 | 进料 FEED | D1 | D2 | D3 |
|------------------------------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 温度/℃ | 60.0 | 113.8 | 117.4 | 131.1 |
| 压力/kPa | 101 | 10 | 10 | 10 |
| 摩尔流量/ (kmol · h ⁻¹) | 0.935 | 0.336 | 0.064 | 0.247 |
| 焓/kJ | -168.1 | -42.21 | -10.55 | -41.15 |
| 苯酚质 量分数 | 0.332 | 0.999 | 0.246 | 2×10^{-6} |
| 邻甲酚 质量分数 | 0.052 | 8×10^{-6} | 0.733 | 0.010 |
| 对甲酚 质量分数 | 0.278 | — | 0.021 | 0.984 |
| 二甲酚 质量分数 | 0.338 | — | 5×10^{-6} | 0.006 |

表 4 三塔简捷模拟所得工艺参数

Tab. 4 The process parameters with three columns

| 塔 | 塔板 数 | 回流 比 | 进料 位置 | 塔釜所 需热量 /kW | D/F |
|----|---------|---------|----------|-------------------|-------|
| B1 | 49 | 4.81 | 35 | 30.943 | 0.340 |
| B2 | 25 | 5.23 | 16 | 7.508 | 0.132 |
| B3 | 24 | 2.51 | 17 | 13.437 | 0.461 |

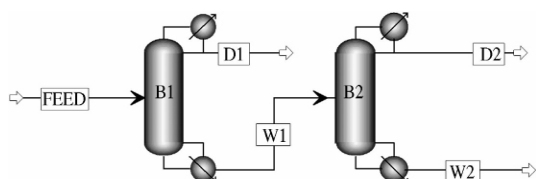


图 4 双塔连续精馏工艺流程

Fig. 4 Flowsheet of two-columns distillation process

表 5 双塔初步确定的轻、重关键组分及回收率

Tab. 5 Light and heavy key components and recovery for two columns

| 塔 | 轻关键 组分 | 轻关键组分回 收率/% | 重关键 组分 |
|----|-----------|----------------|-----------|
| B1 | 苯酚 | 90 | 对-甲酚 |
| B2 | 对-甲酚 | 95 | 二甲酚 |

由表 3 可以得知,B2 塔顶得到的产品邻-甲酚纯度仅为 73.3%,而实现这么低纯度的分离所需要的塔板数和回流比分别为 25 和 5.23,对比表 4 和表 6,并结合煤气化副产物粗酚的组成特点可知:实际操作时,若将原料中的邻-甲酚分离

出来,其操作费用和设备投资费用都较高.所以,综合考虑设备投资、操作管理、经济效益等各方面因素,得出双塔精馏工艺更适合这类粗酚体系。

表 6 双塔简捷模拟所得工艺参数

Tab. 6 The process parameters with two columns

| 塔 | 塔板 数 | 回流 比 | 进料 位置 | 塔釜所 需热量/ kW | D/F |
|----|---------|---------|----------|-------------------|-------|
| B1 | 23 | 1.950 | 15 | 19.682 | 0.387 |
| B2 | 24 | 2.076 | 16 | 13.485 | 0.496 |

3 基于 RadFRAC 模块的双塔串联的严格校核计算

RadFRAC 模块是 Aspen Plus 中一个严格的用于模拟所有类型的多级气液分馏操作的模型.它对气液两相混合存在、具备强非理想非线性体系的都能实现良好的模拟计算,能够模拟不同类型的多级气液分离操作^[5,15],因此为了得出精确的工艺参数,进一步选取 RadFRAC 模块对上述双塔精馏工艺进行了严格的校核计算。

现通过 DSTWU 设计模块对双塔设计进行初步校算,并利用 RadFRAC 模块对初步计算出的结果进行精确核算,通过精确核算的结果与原设计结果进行对比,发现结果相差比较大,见表 7.如苯酚在简捷设计模块中的质量纯度为是 91.5%,严格计算模块运行的结果是 85.7%,因此需要对各塔的参数进行调整。

表 7 简捷计算和严格计算物流结果

Tab. 7 The streams results for DSTWU and RadFRAC

| 质量分数 | 简捷计算 | | 严格计算 | |
|------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | D1 | D2 | D1 | D2 |
| 苯酚 | 0.915 | 0.054 | 0.857 | 0.013 |
| 邻甲酚 | 0.081 | 0.079 | 0.098 | 0.047 |
| 对甲酚 | 0.004 | 0.861 | 0.045 | 0.850 |
| 二甲酚 | 9×10^{-6} | 0.006 | 6×10^{-6} | 0.090 |

RadFRAC 模块不仅可以进行校核计算,也可以进行设计计算,即通过 Design Specs 来规定塔的操作要求,如通过调节回流比或塔顶(底)产品与进料的流率比(D/F)的大小来控制产品的质量.由此,可设置塔 B1 中苯酚的质量纯度为 99.0%,回流比的变化范围暂定为 1~10,结果可得,回流比为 2.87,产品满足分离要求,通过 RadFRAC 模块进行反复试算,最终所得双塔连续精馏工艺的参数见表 8,及 B1 塔板上温度分布曲线

及塔内气相组成分布情况分别见图 5 和图 6。

表 8 模拟计算工艺参数

Tab. 8 The simulation process parameters

| 参数 | B1($R=2.87$, $N=29$) | | B2($R=2.44$, $N=31$) | |
|---|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | 塔顶 | 塔底 | 塔顶 | 塔底 |
| 温度/℃ | 113.81 | 134.25 | 126.10 | 143.60 |
| 热负荷/kW | -16.79 | 21 | -14.90 | 15 |
| 流出量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) | 28.44 | 71.57 | 30.06 | 41.52 |

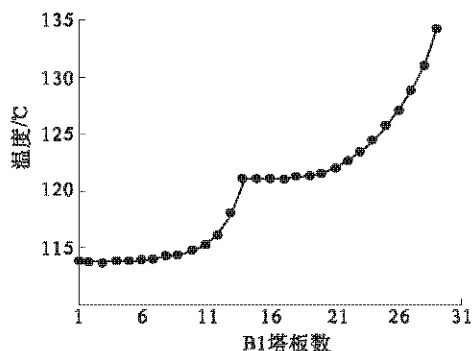


图 5 塔 B1 内塔板上温度变化曲线

Fig. 5 The variation of the temperature for each plate in column B1

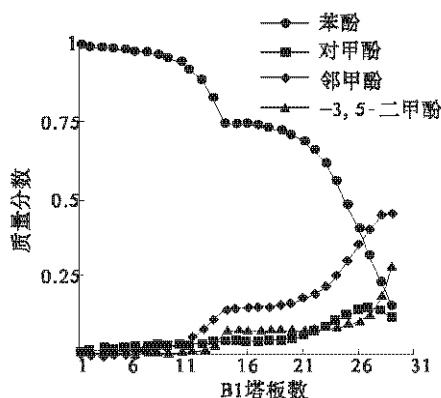


图 6 塔 B1 和 B2 内气相质量组成分布曲线

Fig. 6 The mass fraction of each component in column B1

4 结论

利用 Aspen Plus 流程模拟软件,针对煤气化副产物粗酚的组分特点,初步设计了三塔和双塔连续减压精馏工艺.利用 DSTWU 简捷设计模块对所需工艺参数进行初步计算,通过对所得工艺参数的对比,确定出适合该类化合物分离的工艺流程为双塔精馏.进一步利用 RadFRAC 严格校核模块对设计结果进行模拟核算,并结合应用模型分析工具,最终得到了满足分离要求的工艺参数,

为该工艺流程的开发建立了基础.

参考文献:

- [1] 李雪平,续静静,苗建林,等. 煤气化废水酚氨分离回收系统的流程改造[J]. 河南化工,2012,29(17):50-52.
- [2] 葛宜掌. 煤低温热解液体产物中的酚类化合物[J]. 煤炭转化,1997,20(1):14-19.
- [3] 孙琪娟,马晓迅,孙长顺,等. 陕北中低温煤焦油中酚类化合物的提取与分离研究[J]. 应用化工,2013,42(4):713-716.
- [4] 张哲,卢涛. 基于 Aspen Plus 的常压蒸馏装置流程优化[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2009,36(B11):109-112.
- [5] 李蓓. Aspen Plus 在精馏操作分析中的应用[J]. 科技创新与应用,2013(26):32-32.
- [6] MORE R K, BULASARA V K, UPPALURI R, et al. Optimization of crude distillation system using aspen plus: Effect of binary feed selection on grass-root design[J]. chemical engineering research and design, 2010, 88(2):121-134.
- [7] 白效言,曲思建,王利斌,等. 低温热解煤焦油粗酚精馏的初步研究与模拟计算[J]. 煤炭学报,2011,36(4):660-664.
- [8] 田亚鹏,伏盛世. 长焰煤制鲁奇气化炉气化型煤生产技术的改进[J]. 煤炭技术,2009,28(8):132-133.
- [9] 张明明,田晓露,关永毅. 气相色谱法快速测定间甲酚含量[J]. 燃料与化工,2012,42(6):50-51.
- [10] WEBER L. Gas chromatographic determination of urinary phenol conjugates after acid hydrolysis/extractive acetylation[J]. Journal of Chromatography B: Bio-medical Sciences and Applications, 1992, 574(2):349-351.
- [11] 孙卫国,李凭力,邸士标,等. 丙烯精馏塔过程模拟[J]. 石化技术与应用,2007,25(2):147-151.
- [12] 孙兰义. 化工流程模拟实训——Aspen Plus 教程[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [13] 郭小涛,顾丽莉,代文阳,等. 间歇精馏过程模拟的发展与应用[J]. 应用化工,2012,41(11):1990-1992.
- [14] VETERE A. NRTL equation as a predictive tool for vapor-liquid equilibria[J]. Fluid Phase Equilibria, 2004, 218(1):33-39.
- [15] 陈会,梅智明. Aspen plus 模拟环丁砜萃取精馏苯乙烯工艺过程[J]. 齐鲁石油化工,2009,37(3):182-185.

Separation of Gasification Byproducts Crude Phenol Based on Aspen Plus

LI Hui-ping¹, LI Huan-xin¹, LI Xue-ping², ZHANG Dan¹, LIANG Shu-qin¹, LIANG Xue-bo²

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yima Gasification Plant, Henan Gas (Group) Co. Ltd. Yima, Sanmenxia 472300, China)

Abstract: In this paper, the three towers and two towers continuous vacuum distillation process were designed preliminarily according to the component characteristics of the coal gasification by-products of crude phenols. The separation process was studied systematically by using aspen plus with the NRTL property method. DSTWU simple design model was used to calculate the required process parameters firstly, and the appropriate process for the separation of the system was determined by comparing the obtained parameters. And then, RadFRAC model was used to carry out the strict checking of the results of parameters, the process parameters (i. e. numbers of the column, the feed stage number, and the reflux ratio) of the two towers was obtained eventually, and the main operating parameters and working conditions was also determined. It was designed to establish a foundation for the process development.

Key words: crude phenols of coal gasification; two columns; three columns; reduced pressure distillation; aspen plus simulation

(上接第 27 页)

- [7] 赵博. Ansoft12 在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 10 - 45.
- [8] 朱喜华, 李颖晖, 张敬, 等. 基于 Ansoft 的永磁同步电机早期匝间短路故障分析 [J]. 大电机技术, 2010 (5): 35 - 39.
- [9] 齐蓉, 陈明. 永磁容错电机及容错驱动结构研究 [J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(4): 475 - 478.
- [10] 赵文祥, 程明, 花为, 等. 双凸极永磁电机故障分析与容错控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 71 - 77, 91.
- [11] 高爱云, 钱武, 蔡泽祥, 等. 有限元法在电动机匝间短路故障诊断中的应用 [J]. 电气制造, 2009(1): 68 - 69.

Analysis Of One-Phase Short-Circuit Performances of Dual Three-Phase Permanent Magnet Brushless Ac Motor

QI Ge, BAI Zuo-xia, LIU Xian-lin, SHI Li

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

Abstract: The electromagnetic performance of the electromagnetic field distribution, flux linkage, current, and output torque and so on are analyzed, when dual three-phase motor is in fault condition of short-circuit of one phase winding. At the same time, it is compared with traditional three-phase motor. Results indicate that coupling between phases of dual three-phase motor is very weak. In fault condition, the fault phase of dual three-phase motor dose not affect normal operation of non-fault phase which makes it can still continue to work within the acceptable range. So dual three-phase motor does not have to stop on the way, and has a certain tolerance, and is applicable to the occasion which has special requirements for motor.

Key words: dual three-phase; permanent magnet machine; fault-tolerant performance; one-phase short-circuit

文章编号: 1671-6833(2015)01-0033-04

由化纤厂废碱液制备羧甲基纤维素

周彩荣, 徐敏强, 王晓松, 王海峰

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 以某化纤厂的废碱液和木浆粕为主要原料制备羧甲基纤维素(CMC), 选择梯度升温 and 添加助剂的方式来提高 CMC 的性能, 提出了一种新的处理化纤厂废碱液和制备 CMC 的方法. 为了提高 CMC 的性能, 用单因素试验法考察了醚化过程梯度升温方式、碱化阶段添加尿素、硅酸钠以及醚化阶段添加四硼酸钠等因素的影响, 优化出较佳的工艺条件: 醚化反应三阶梯度升温(一阶温度 55 ℃、二阶温度 70 ℃、三阶温度 80 ℃), 碱化阶段分别添加质量分数为 3% 的尿素和质量分数为 5% 的硅酸钠, 醚化阶段添加质量分数为 6% 的四硼酸钠. 在此条件下制备出的 CMC 的黏度为 2 486.7 MPa·s、取代度为 0.65、酸黏比为 0.416、盐黏比为 0.547, 较未改性前的上述性能分别提高了 97.17%、23.63%、57.53% 和 45.55%.

关键词: 粘胶纤维; 废碱液; 羧甲基纤维素

中图分类号: TQ0352.7; TQ0352.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.008

0 引言

目前, 全世界粘胶纤维的产量约占化纤总量的 1/3, 是主要的化纤品种之一^[1]. 据 2010 年统计表明, 我国的粘胶纤维产能达到了 210 wt, 此外, 还有 93 wt 的在建项目^[2]. 随着全球经济的发展以及人口的增长, 粘胶纤维的用量仍会以较高的速度继续增长, 随之将产生大的环境压力, 尤其是浆粕生产废液的处理所带来的环境问题. 目前, 国内的粘胶纤维生产企业对于浆粕生产废液大都采用膜分离技术, 回收的废碱液中含有少量半纤维素、木质素等有机物使得其再利用受到限制^[3]. 本研究以化纤厂废碱液为原料, 配以廉价的木浆粕来制备化工产品羧甲基纤维素(CMC), 这样不仅开发出废碱液的新用途, 同时也降低了 CMC 的生产成本, 推广后将会产生较大的社会效益和经济效益. 在工业应用上, CMC 主要是以水溶液的形式存在, 耐酸性、耐盐性以及热稳定性是衡量 CMC 性能好坏的重要指标. 本研究在预实验的基础上, 采用醚化过程梯度升温、碱化阶段添加尿素和硅酸钠、醚化阶段添加四硼酸钠等方法来改性 CMC, 优选出较佳的工艺条件, 以达到提高 CMC 性能的目的.

1 实验部分

1.1 主要原料与仪器

乳酸、氢氧化钠、硅酸钠、氯化钠、无水乙醇、硫酸、一氯乙酸、四硼酸钠、尿素, 皆为市售分析纯. 废碱液(新乡某化纤厂)的主要成分是质量分数为 70.75% 的水和 24.03% 的氢氧化钠; 木浆粕也源自该化纤厂, 其纤维素的质量分数为 96.79%.

主要用仪器有: CH1015 超级恒温槽; JJ-1A 精密增力电动搅拌器; NDJ-5S 数字式黏度计; pH S-25 数显 pH 计; FA1004 电子精密天平; FT-IR200 红外光谱仪.

1.2 羧甲基纤维素的合成

在 250 mL 三口烧瓶中先后加入废碱液、适量氢氧化钠(根据废碱液的含碱量而定)和无水乙醇, 充分溶解后加入木浆粕, 置放于恒温水浴中连续搅拌进行碱化反应, 反应一段时间后用分液漏斗将质量分数为 50% 的氯乙酸乙醇溶液滴加至三口烧瓶中, 同时升温进行醚化反应, 待反应结束后用稀盐酸进行中和、过滤, 然后用质量分数为 75% 的乙醇溶液洗涤 3 次, 再用 95% 乙醇溶液洗涤 1 次, 然后, 置于 90 ℃~100 ℃烘箱中烘干得固体

收稿日期: 2014-09-27; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 河南省重点科技攻关计划资助项目(13A530712)

作者简介: 周彩荣(1958-), 女, 江苏沐阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事精细有机合成和基础工程数据的研究,
E-mail: zhoucairong@zzu.edu.cn.

CMC. 最后回收乙醇洗涤液, 循环使用.

1.3 分析方法

用酸度计测定法测定 CMC 的取代度^[4]; 用 NDJ-5S 数字式黏度计测定质量分数为 2% CMC 水溶液的黏度^[5]; 酸黏比的测定方法是以 0.1 mol/L 乳酸溶液代替水, 配制 2% CMC 溶液, 测定其黏度; 盐黏比的测定方法是以质量分数为 2% 氯化钠水溶液代替水, 配制质量分数为 2% 的 CMC 溶液, 测定其黏度.

2 实验结果与讨论

用单因素试验和正交试验法, 对影响 CMC 黏度的 8 个相关因素进行了研究和探索, 优化得到较佳的条件^[6]: 碱用量 $n(\text{纤维素}):n(\text{氢氧化钠})$ 为 1:4.0、碱液浓度为 30%、溶剂用量 $m(\text{纤维素}):m(\text{乙醇})$ 为 1:12、碱化温度为 20 °C、碱化时间为 2 h、醚化剂用量 $n(\text{纤维素}):n(\text{一氯乙酸})$ 为 1:3.0、醚化温度为 70 °C、醚化时间为 4 h, 在此条件下, 产品黏度可达 1 201.5 MPa·s. 对制备出的 CMC 的

性能进行了测定, 产品的取代度为 0.52、酸黏比为 0.254、盐黏比为 0.366. FT-IR 谱图表明纤维素分子中部分羟基官能团被羧甲基官能团所取代, 即有 CMC 生成.

2.1 醚化过程梯度升温改性羧甲基纤维素

为了提高 CMC 的物理性能, 对醚化过程升温方式进行了改进. 醚化过程是醚化剂一氯乙酸与碱纤维之间的反应, 是在固-液多相体系中进行的复杂的化学反应过程. 该过程包括游离碱与一氯乙酸的中和反应、碱纤维与一氯乙酸钠的亲核取代反应以及一氯乙酸与游离碱生成羧酸钠的副反应等^[7]. 醚化反应可分为初期、中期和末期三个阶段进行反应. 根据醚化过程三个阶段的不同特征, 采用三阶升温进行醚化反应, 即一阶升温至 50 °C, 55 °C, 60 °C 反应 1 h, 二阶升温至 65 °C, 70 °C, 75 °C, 80 °C 反应 2 h, 三阶升温至 75 °C, 80 °C, 85 °C 反应 1 h, 考察产品 CMC 黏度和取代度随各阶温度变化的规律, 实验结果如图 1 所示.

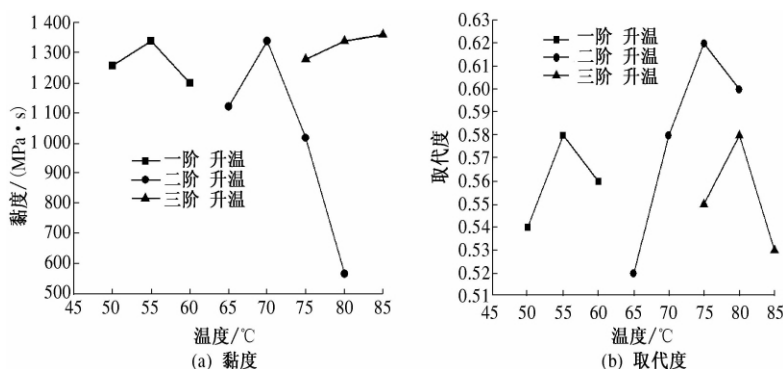


图 1 醚化过程的升温方式对 CMC 的黏度 (a) 和取代度 (b) 的影响

Fig. 1 The effect of the heating way of etherification procedure on the viscosity (a) and substitution degree (b) of the CMC

从图 1 可知, 随着一阶温度的增加, 产品黏度和取代度均是先增后降, 且均在 55 °C 达到最大值, 分别为 1 338.8 MPa·s 和 0.58. 这是因为在反应初期, 升高温度有利于醚化剂的分散、渗透, 提高了醚效和反应的均匀性. 但若温度过高, 又会加快碱纤维表面生成 CMC 凝胶层的速度, 阻碍醚化剂均匀扩散至碱纤维, 致使产品黏度和取代度降低, 故选择一阶温度为 55 °C 为宜.

随着二阶温度的增加, 产品黏度和取代度也都是先增后迅速降低, 但两者的转折点不同, 即产品黏度在 70 °C 达到最大 (1 338.8 MPa·s), 取代度在 75 °C 最高 (0.62). 原因在于反应中期为主反应阶段, 升高温度有利于醚化剂一氯乙酸分子中的正碳离子取代碱纤维中的氧负离子, 使得产品

黏度和取代度均增加, 但过高的温度不仅会加快碱纤维和产品 CMC 的降解, 还会加快副反应和溶剂的挥发, 导致产品黏度和取代度的降低. 综合考虑选择二阶温度以 70 °C 为宜.

随着三阶温度的增加, 产品黏度一直在增加, 但增加趋势放缓; 取代度则先增加后降低, 产品黏度在 85 °C 达到最大 (1 335.2 MPa·s), 取代度在 80 °C 下最高 (0.58). 这是因为在反应末期, 增加反应温度可以抑制由反应物浓度减少而引起的反应速率急剧降低的问题, 但若温度增加过高, 就会加快 CMC 的降解和溶剂的挥发. 综合考虑选择三阶温度为 80 °C 为宜.

对梯度升温下制备出的 CMC 进行性能分析, 其分析结果为: CMC 的黏度、取代度、酸黏比和盐

黏比分别是 $1\,338.8\text{ MPa}\cdot\text{s}$, 0.58 , 0.291 , 0.408 , 相应的性能指标较单一温度下所得结果分别提高了 11.43% , 11.54% , 14.57% 和 11.48% 。

2.2 添加剂改性提高羧甲基纤维素性能

2.2.1 尿素改性提高 CMC 性能

为了研究尿素的添加量对 CMC 黏度和取代度的影响,在碱化反应前分别加入 2% 、 3% 、 4% 、 6% 、 8% 和 10% 的尿素,然后在梯度升温的条件下进行碱化和醚化反应,反应结束后对所得的 CMC 产品进行中和、洗涤、干燥,分析测试结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着尿素的添加量增加,CMC 的黏度和取代度均是先增后降,尿素的添加量为 3% 时达到最大,分别为 $1\,533.4\text{ MPa}\cdot\text{s}$ 和 0.62 。原因是添加尿素增强了碱液破坏木浆粕纤维素分子链间、分子链内中氢键的能力^[8-9],有利于碱纤维的生成,提高了醚化效率和反应均匀性;但随着尿素的添加量增大,溶解在溶剂中的纤维素增多,生成 CMC 的量增多,使体系的黏度增大,部分的 CMC 还会附着在碱纤维表层,阻碍醚化剂向碱纤维素中扩散、渗透和反应。故尿素的添加量以 3% 为宜。

2.2.2 硅酸钠改性提高 CMC 性能

在上述优化条件上,在碱化反应前分别添加质量分数为 2% 、 4% 、 5% 、 6% 、 8% 和 10% 的硅酸钠,进行碱化和醚化反应,考察硅酸钠的添加量对产品黏度和取代度的影响,结果如图 2 所示。由图 2 可知,随着硅酸钠的添加量增加,产品的黏度和取代度均是先增后降,产品黏度在硅酸钠的添加

量为 6% 时达到最大($1\,912.2\text{ MPa}\cdot\text{s}$),取代度在 4% 时达到最大(0.70)。硅酸钠能够提高 CMC 性能的原因:一是在碱化反应前加入硅酸钠,硅酸钠能与 NaOH 发生反应,抑制了纤维素分子和 CMC 的高温降解和碱性降解,使其性能得到提高^[10];二是在碱性条件下,产品 CMC 中的两个葡萄糖单元间能够形成碳硅键($\text{C}-\text{Si}-\text{C}$),受热不易断裂,提高了 CMC 的性能^[11]。综合考虑,确定硅酸钠的添加量为 5% ,此时,CMC 黏度和取代度分别为 $1\,887.5\text{ MPa}\cdot\text{s}$ 和 0.69 。

2.2.3 四硼酸钠改性提高 CMC 性能

在醚化阶段分别添加质量分数为 2% 、 4% 、 6% 、 8% 、 9% 、 10% 和 12% 的四硼酸钠对产品黏度和取代度的影响,其结果见图 2。由图 2 可知,随着四硼酸钠添加量的增加,产品黏度呈现先增后降的变化趋势,在四硼酸钠的添加量为 9% 时达到最大($2\,751.5\text{ MPa}\cdot\text{s}$),但产品的取代度一直是降低的。原因在于硼是缺电子原子,在碱性条件下硼能够与 CMC 上未被羧甲基取代的羟基氧原子上的孤对电子进行加合,发生醇羟基间的微交联反应^[12],提高了 CMC 的分子量,使得 CMC 的黏度增加。但随着四硼酸钠的添加量的增加,与碱纤维分子中羟基取代数目也增加,使碱纤维与醚化剂一氯乙酸发生亲和取代的羟基数减少,导致了 CMC 的取代度一直降低,水溶性也逐渐降低。综合考虑,确定四硼酸钠的添加量为 6% ,此时,CMC 黏度和取代度分别为 $2\,486.7\text{ MPa}\cdot\text{s}$ 和 0.65 。

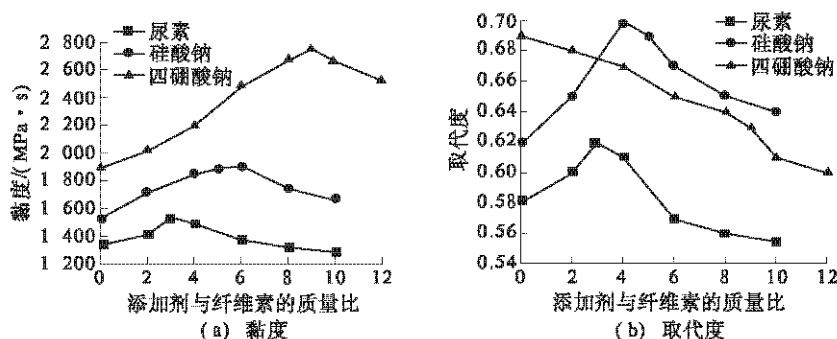


图2 添加剂对 CMC 的黏度和取代度的影响

Fig. 2 The effect of the additives on the viscosity and substitution degree of the CMC

对上述优化条件下制备出的 CMC 进行分析测试,其结果为:CMC 黏度 $2\,486.7\text{ MPa}\cdot\text{s}$ 、取代度 0.65 、酸黏比 0.416 和盐黏比 0.547 ,相应的指标较优化前制备出的 CMC 分别提高了 97.17% 、 23.63% 、 57.53% 和 45.55% ,这表明了添加复合

助剂能够明显提高 CMC 的性能。

2.3 羧甲基纤维素的性能分析

自制 CMC 的红外光谱图与木浆粕的红外光谱图进行对照,除了具有木浆粕纤维素分子的特征吸收峰外,在 $1\,608.34\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,417.42\text{ cm}^{-1}$

处出现了羧甲基上 $C=O$ 的对称与非对称的伸缩振动吸收峰,这表明产品中存在羧甲基基团,即有 CMC 生成^[13]。

3 结论

笔者提出了一种新的处理化纤厂废碱液的方法,将此废液成功地用于 CMC 的制备。以化纤厂废碱液为主要原料,配以木浆粕制备出的 CMC 其性能与传统工艺生产的 CMC 相当。同时,选择梯度升温 and 添加助剂的方式改性提高了 CMC 的性能,优化得到了较佳的合成工艺条件:三阶升温(一阶温度 55 ℃、二阶温度 70 ℃、三阶温度 80 ℃)进行醚化反应,碱化阶段添加 3% 的尿素和 5% 的硅酸钠,醚化阶段添加 6% 的四硼酸钠。

参考文献:

- [1] 叶代勇,黄洪,傅和青,等. 纤维素化学研究进展[J]. 化工学报, 2006, 57(8): 1782-1791.
- [2] 寻春珍. 溶解浆高利润之路还能走多远[J]. 中华纸业, 2011, 32(9): 46-49.
- [3] 王留成,马溢华,赵建宏,等. 一种高强度复合型气比型煤粘结剂的研究[J]. 郑州大学学报, 2013, 34(6): 32-35.
- [4] 樊泽霞,夏俭英. 测定羧甲基纤维素钠取代度的新方法[J]. 钻进液与完井液, 1997, 14(5): 35-36.
- [5] 韩春国,王春鹏,金铁铃,等. 生物丁醇副产物制备羧甲基纤维素[J]. 生物质化学工程, 2010, 44(6): 41-45.
- [6] 王晓松. 由化纤厂废液制备羧甲基纤维素及其流变性质的研究[D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2013.
- [7] 邵自强. 纤维素醚[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 10.
- [8] PUSHPAMALAR V, LANGFORD S J, AHMAD M, et al. Optimization of reaction conditions for preparing carboxymethyl cellulose from sago waste [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(2): 312-318.
- [9] ADINUGRAHA M P, MARSENO D W. Synthesis and characterization of sodium carboxymethyl cellulose from Cavendish banana pseudo stem (Musa cavendishii LAMBERT) [J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 62(2): 164-169.
- [10] 杨叶,陈洪章. 汽爆玉米秸秆羧甲基纤维素的制备[J]. 化工学报, 2009, 60(7): 1844-1849.
- [11] 王德龙,汪建明,宋自家,等. 无机硅改性羧甲基淀粉钠降滤失剂的研制及其性能[J]. 石油化工, 2010, 39(4): 440-443.
- [12] 苏茂尧,王双一,董思民. 两种微交联羧甲基纤维素的结构和性能研究[J]. 油田化学, 1999, 16(1): 5-9.
- [13] 曹静. 桑枝皮羧甲基纤维素钠的制备及其表征[D]. 杭州: 浙江理工大学材料与纺织学院, 2011.

Preparation of Carboxymethyl Cellulose (CMC) Using the Waste Liquor of the Viscose Fiber Industry

ZHOU Cai-rong, XU Min-qiang, WANG Xiao-song, WANG Hai-feng

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

Abstract: In view of the actual problem and the characteristics of carboxymethyl cellulose (CMC) synthesis process, the waste liquor of the viscose fiber industry as main raw materials with wood pulp was used for producing carboxymethyl cellulose (CMC). The effect of gradient heating in etherification process, along with the addition of urea, sodium silicate sodium in alkalization process and the addition of tetraborate in the etherification process on the properties of the modified CMC were studied and explored by single factor test. The results show that the modified CMC with the best properties were obtained by third-order heating (first-order temperature of 55 ℃, temperature of the second order of 70 ℃, and third-order temperature of 80 ℃) for etherification reaction. Meanwhile, 3% urea and 5% alkaline sodium silicate were also added in alkalization process, and 6% tetraborate was added in the etherification process. The viscosity of the product CMC was up to 2486. 7 MPa · s, the substitution degree was 0.65, the acid-viscosity ratio was 0.416, salt-viscosity ratio was 0.547. Compared with previous modified CMC, the indexes were promoted by 97.17%, 23.63%, 57.53% and 45.55% for aboved-mentioned performances, respectively.

Key words: viscose fiber; spent caustic; CMC

文章编号: 1671-6833(2015)01-0037-04

高效液相色谱法同时测定反应液中的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑

赵建宏, 张梅梅, 程相林, 王建设, 王留成, 宋成盈, 张家丽

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 建立了一种同时定量测定反应液中苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的高效液相色谱分析方法. 该方法采用 Hypersil C₁₈ (150 mm × 4.6 mm i. d) 型色谱柱, 以 V(甲醇): V(水) = 50: 50 作为流动相(用氨水调节流动相的 pH 为 7.0 ~ 8.0); 检测波长 254 nm; 柱温 30 °C; 流速 0.9 mL/min. 结果表明, 待测物苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑在上述色谱条件下分离良好, 两种物质的质量浓度线性范围分别为 0.047 ~ 0.426 g · L⁻¹ 和 0.059 ~ 0.273 g · L⁻¹, 检出限分别在 1.23 × 10⁻³ g · L⁻¹ 和 0.78 × 10⁻³ g · L⁻¹, 加标回收率分别在 98.20 % ~ 101.03 % 和 98.78 % ~ 99.76 %, 测定结果的最大相对标准偏差分别为 0.45 % 和 0.63 %.

关键词: 高效液相色谱; 2-巯基苯并噻唑; 苯并噻唑

中图分类号: O657.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.009

0 引言

苯并噻唑(Benzothiazole), 又名 1,3-硫氮杂茛或间氮硫茛, 外观为浅黄色液体, 是一种重要的有机化工产品 and 中间体, 广泛应用于橡胶、防腐、医药、农药及食品、饮料等行业^[1-3].

目前, 苯并噻唑的合成方法主要有重排反应法、邻氨基苯硫酚合成法及氧化法等^[4-5]. 前两种方法由于存在着能耗较大、原材料价格昂贵及环境污染严重等缺点, 其工业化过程受到限制. 氧化法合成苯并噻唑, 具有生产成本低、反应条件温和、污染小等优点, 是一种很有发展前景的合成方法. 郑州大学有机电化学工程中心成功开发了以 2-巯基苯并噻唑和双氧水为主要原料的苯并噻唑合成新工艺, 而该合成工艺的实施需要建立一种准确、快速的分析方法同时测定反应液中的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑. 文献报道的单独分析苯并噻唑或 2-巯基苯并噻唑的方法主要有气相色谱法和液相色谱法, 由于氧化合成反应液中含有无机酸和水, 气相色谱法分析时需经过复杂的预处理; 而采用液相色谱法测定苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑时须采用不同的流动相体系, 操作繁琐, 同时分析反应液中这两种物质的方法未见报

道^[6-8]. 笔者采用高效液相色谱法, 对合成液中的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑进行了同时测定, 该方法准确、快速, 解决了合成反应液的分析问题, 为苯并噻唑的生产工艺优化和产品质量控制提供了帮助.

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

Agilent1200 型高效液相色谱仪(美国安捷伦公司); UV22401PC 型紫外-可见分光光度计(岛津公司); AW120 型电子分析天平(日本岛津公司); KQ-100E 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司).

苯并噻唑标准品(质量分数 ≥ 99.5%, 鹤壁市双力橡塑助剂厂); 2-巯基苯并噻唑标准品(质量分数 ≥ 99.5%, 鹤壁市双力橡塑助剂厂); 甲醇和乙腈均为色谱纯(山东禹王实业有限公司化工分公司); 四氢呋喃和氨水为分析纯(天津市科密欧化学试剂有限公司); 实验用水为二次蒸馏水.

1.2 色谱条件

Hypersil C₁₈ 型(150 mm × 4.6 mm i. d) 色谱柱; 检测波长 254 nm; 以 V(甲醇): V(水) = 50: 50 作为流动相(用氨水调节流动相的 pH 为 7.0 ~

收稿日期: 2014-09-25; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 河南省产学研计划资助项目(142107000007)

作者简介: 赵建宏(1963-), 男, 河北巨鹿人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事精细有机合成及有机电合成方面的研究, E-mail: zhaojh@zzu.edu.com.

8.0), 超声 15 min, 经 0.45 μm 滤膜过滤; 柱温 30 $^{\circ}\text{C}$; 流速: 0.9 mL/min; 进样量: 20 μL .

1.3 实验方法

标准溶液的配制: 分别准确称取一定量的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑于 50 mL 的容量瓶中, 用流动相溶解并定容, 经 0.45 μm 滤膜过滤后备用.

样品溶液的配制: 准确称取 0.7 ~ 0.8 g 合成反应液样品于 50 mL 的容量瓶中, 用四氢呋喃稀释并定容, 再从中移取 2 mL 溶液于 10 mL 的容量瓶中, 然后用流动相稀释并定容, 经滤膜过滤后进样, 以峰面积外标标准曲线法定量.

2 结果与讨论

2.1 色谱条件的优化

2.1.1 检测波长的确定

分别配制一定浓度的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑标准溶液, 在紫外分光光度计上进行扫描, 扫描范围 200 ~ 400 nm. 结果发现为苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的最大吸收波长分别在 294 nm 和 322 nm, 本实验选取 254 nm 作为检测波长, 虽然在该波长下苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的吸收强度略有下降, 但是其他杂质吸收峰的干扰少, 基线较为稳定, 所以可选作最佳检测波长.

2.1.2 流动相组成及 pH 的确定

实验选用 C18(150 mm \times 4.6 mm i. d) 色谱柱对流动相组成和比例进行了优化. 分别采用乙腈-水及甲醇-水为流动相进行苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的色谱分析试验, 结果发现采用甲醇-水体系时样品的分离度均较好, 柱内残留样品量少. 因此本实验采用甲醇-水体系.

实验发现, 流动相的 pH 对苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的峰形和分离效果有显著的影响. 酸性条件下 (pH = 3 左右), 2-巯基苯并噻唑保留时间大于苯并噻唑的保留时间, 但二者不能有效分离, 出现双头峰且苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑峰均拖尾严重, 可能与酸性条件下流动相中的氢离子与噻唑环上氮原子的相互作用有关. 弱碱性条件下 (pH \geq 7), 2-巯基苯并噻唑的出峰时间显著提前且峰型对称, 苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑可实现较好分离, 应与系统中发生化学反应有关: 2-巯基苯并噻唑由非水溶性转化为易溶于水的苯并噻唑巯基盐. 进一步的实验发现, 当流动相的 pH \geq 7.5 时, 二待分析物出峰重复性良好, 考虑到流动相 pH 过大可能对色谱柱造成损害, 本研究中采用氨水调节流动相的 pH 在 7.0 ~ 8.0 之间.

不同的甲醇-水比对峰型和分离效果的影

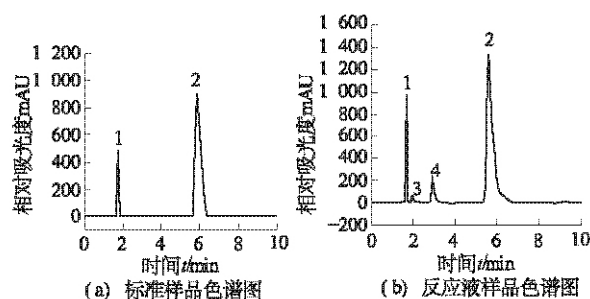
响也比较明显. 流动相中甲醇体积分数小于 40% 时 (流动相 pH = 7.0 ~ 8.0, 下同), 苯并噻唑峰拖尾严重且峰展较宽; 甲醇体积分数大于 70% 时, 苯并噻唑出峰时间提前, 但 2-巯基苯并噻唑的出峰时间明显推迟, 出现重叠峰, 分离效果不好; 当控制流动相中甲醇比例为 50% 时, 苯并噻唑峰拖尾现象消失, 峰型对称, 苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑峰完全分离.

2.1.3 流速及柱温的确定

流动相的流速对待分析物的分离度及峰形有一定的影响^[9-10]. 综合考虑, 流速采用 0.9 mL/min.

在上述流速下, 分别在柱温 25 $^{\circ}\text{C}$ ~ 40 $^{\circ}\text{C}$ 进行实验. 结果发现, 柱温的高低对峰形及分离效果影响不大. 综合考虑, 本实验中柱温控制在 30 $^{\circ}\text{C}$.

图 1 为优化的色谱条件下标准样品和反应液样品的色谱图, 其中 2-巯基苯并噻唑、苯并噻唑的保留时间分别为 1.725, 5.726 min. 显然, 待测物苯并噻唑、2-巯基苯并噻唑及杂质的分离良好, 峰型对称, 基线平稳.



1 为 2-巯基苯并噻唑; 2 为苯并噻唑; 3, 4 为副产物

图 1 标准样品及反应液样品色谱图

Fig. 1 Chromatograms of standard sample and synthetic sample

2.2 标准曲线及检出限

分别精密吸取上述苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑标准溶液 1, 3, 5, 7, 9 mL 于 10 mL 的容量瓶中, 用流动相稀释至刻度, 摇匀, 得到一系列不同浓度的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑混合标准液. 将所有样品经 0.45 μm 滤膜过滤后进样, 每个样品平行进样 3 次, 以峰面积 y 作为纵坐标, 质量浓度 x 作为横坐标进行线性回归. 苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的标准曲线回归方程、线性范围及相关系数均列于表 1 中. 以 3 倍基线噪声测得的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的检测限也列于表 1 中. 可以看出, 在所确定的色谱条件下测定苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的浓度线性范围均较宽, 线性关系较好.

表 1 苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的线性回归及检出限

Tab. 1 Regression analysis and detection limits of benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazole

| 组分 | 线性回归方程 | 相关系数 | 线性范围/(g·L ⁻¹) | 检测限/(g·L ⁻¹) |
|----------|------------------------|---------|---------------------------|--------------------------|
| 苯并噻唑 | $y = 64.383x - 281.35$ | 0.999 7 | 0.047 ~ 0.426 | 1.23×10^{-3} |
| 2-巯基苯并噻唑 | $y = 66.497x + 557.39$ | 0.999 8 | 0.059 ~ 0.273 | 0.78×10^{-3} |

2.3 精密度检测

分别取高、中、低 3 个浓度,对应样品编号为 1,2,3 的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑标准溶液,按前面所确定色谱条件进行重复测定,每份样品分别连续进样 3 次,结果如表 2 所示.可以看出,苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的最大相对标准偏差分别为 0.45% 和 0.63%,说明本测定方法的重复性良好.取反应液样品 3 份分别检测,对应样品编号为 4,5,6.结果表明,反应液样品的精密度在检测精密度范围内.

2.4 回收率实验

取不同工艺条件下的反应液样品 3 份,分别加入一定量的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑标准品,然后按同样的方法和色谱条件重复测定,进行回收率实验,每份溶液进样 3 次.计算回收率.结果见表 3.由表可知,苯并噻唑、2-巯基苯并噻唑的加标回收率分别为 98.20% ~ 101.03%,98.78% ~ 99.706%,说明在优化的色谱条件下测定结果的准确度较高,可用于苯并噻唑合成工艺优化及其它相关研究中.

表 2 苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的精密度检测

Tab. 2 Detection of the precision of benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazol

| 样品 编号 | 苯并噻唑 | | | 2-巯基苯并噻唑 | | |
|----------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------|
| | 测定值/(g·L ⁻¹) | 平均值/(g·L ⁻¹) | RSD/% | 测定值/(g·L ⁻¹) | 平均值/(g·L ⁻¹) | RSD/% |
| 1 | 0.048 2 | 0.048 1 | 0.12 | 0.094 7 | 0.095 1 | 0.38 |
| | 0.048 1 | | | 0.095 2 | | |
| | 0.048 1 | | | 0.095 4 | | |
| 2 | 0.227 5 | 0.228 1 | 0.25 | 0.148 0 | 0.148 2 | 0.25 |
| | 0.228 3 | | | 0.147 9 | | |
| | 0.228 6 | | | 0.148 6 | | |
| 3 | 0.416 1 | 0.418 0 | 0.45 | 0.270 8 | 0.269 5 | 0.63 |
| | 0.419 9 | | | 0.267 6 | | |
| | 0.418 0 | | | 0.270 2 | | |
| 4 | 0.143 7 | 0.143 2 | 0.31 | 0.112 4 | 0.112 8 | 0.35 |
| | 0.143 0 | | | 0.112 8 | | |
| | 0.142 8 | | | 0.113 2 | | |
| 5 | 0.172 8 | 0.172 5 | 0.35 | 0.201 2 | 0.201 0 | 0.58 |
| | 0.172 9 | | | 0.199 8 | | |
| | 0.171 8 | | | 0.202 1 | | |
| 6 | 0.217 8 | 0.216 8 | 0.40 | 0.249 7 | 0.249 9 | 0.59 |
| | 0.216 4 | | | 0.248 6 | | |
| | 0.216 2 | | | 0.251 5 | | |

表 3 苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑回收率检测

Tab. 3 Detection of the recovery of benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazoc

| 样品 编号 | 苯并噻唑 | | | | 2-巯基苯并噻唑 | | | |
|----------|------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| | 加标量/ (g·L ⁻¹) | 测定值/ (g·L ⁻¹) | 回收率/ % | RSD/ % | 加标量/ (g·L ⁻¹) | 测定值/ (g·L ⁻¹) | 回收率/ % | RSD/ % |
| 1 | 0.360 0 | 0.361 2 | 98.20 | 0.49 | 0.226 3 | 0.226 9 | 99.52 | 0.36 |
| | | 0.360 4 | | | | 0.225 8 | | |
| | | 0.363 8 | | | | 0.227 4 | | |
| 2 | 0.450 0 | 0.450 3 | 98.60 | 0.29 | 0.407 2 | 0.407 3 | 99.76 | 0.14 |
| | | 0.452 9 | | | | 0.408 4 | | |
| | | 0.451 2 | | | | 0.407 5 | | |
| 3 | 0.500 0 | 0.507 3 | 101.3 | 0.45 | 0.316 7 | 0.315 9 | 98.78 | 0.22 |
| | | 0.511 7 | | | | 0.316 5 | | |
| | | 0.508 2 | | | | 0.317 3 | | |

3 结论

笔者使用 Hypersil C18 型反相色谱柱,以 V (甲醇): V (水) = 50:50 作为流动相(用氨水调节流动相的 pH 为 7.0 ~ 8.0),建立了同时检测合成反应液中苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑的液相分析方法. 该方法具有良好的精密度和准确度,可在 7 min 内完成合成反应液的全部分析,可用于苯并噻唑合成工艺优化及其他相关研究中.

参考文献:

- [1] 海鹏,万力,徐冰,等. 苯并噻唑衍生物的合成及皮革防霉性能研究 [J]. 西部皮革,2009,31(13): 20-23.
- [2] 洪艳平,宋宝安,吴平,等. 苯并噻唑类农药生物活性研究进展 [J]. 安徽农业科学,2005,33(7): 1254-1257.
- [3] 陈江. 高品质二巯基苯并噻唑及其衍生物合成工艺研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学化工学院,2012.
- [4] 刘俊峰,冯桂英,王象清等. 2-巯基苯并噻唑氧化合成苯并噻唑 [J]. 化工生产与技术,2012,19(3): 8-9.
- [5] 欧阳晃澈. 苯并噻唑及苯并咪唑异噻啉的化合物合成方法研究 [D]. 温州: 温州大学化学与材料工程学院,2011.
- [6] 孙桂英. 用高效液相色谱仪测定 2-巯基苯并噻唑纯度的方法: 中国, CN102435685A [P]. 2012-05-02.
- [7] 安静. 苯并噻唑的液相色谱分析方法: 中国, CN102435686A [P]. 2012-05-02.
- [8] 蒋宏丽. 工业废水中硫化促进剂 M 的 HPLC 分析及吸附分析法 [J]. 中国环境监测,1996,12(1): 24-25.
- [9] 程传玲,宋辉,汪文良,等. 流动相和流速对高效液相色谱分析果糖酮的影响 [J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版,2012,27(4): 65-68.
- [10] 赵建宏,李亚芳,王建设. 高效液相色谱法同时测定噻啉酸和噻啉 [J]. 郑州大学学报: 工学版,2013,34(4): 73-76.

The Simultaneous Determination of Benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazole in the Reaction Liquid by High Performance Liquid Chromatography

ZHAO Jian-hong, ZHANG Mei-mei, CHENG Xiang-lin, WANG Jian-she,
WANG Liu-cheng, SONG Cheng-yi, ZHANG Jia-li

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

Abstract: A method was presented for the simultaneous determination of benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazole in the reaction liquid by high performance liquid chromatography (HPLC). The analysis was performed on a Hypersil C18 column (150 mm \times 4.6 mm i. d) with 50:50 methanol-water as the mobile phase (mobile phase with ammonia, pH = 7.0 ~ 8.0) at a flow rate of 0.9 mL/min. The samples were detected at 254 nm with an UV detector and the column temperature was 30 $^{\circ}$ C. It was found that benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazole could be well separated under the chromatographic conditions. The linear ranges of the mass concentration were 0.047 ~ 0.426 g/L and 0.059 g/L ~ 0.273 g/L respectively. The recoveries for them were 98.20% ~ 101.03% and 98.78% ~ 99.76%. The maximum relative standard deviations were 0.45% and 0.63% for benzothiazole and 2-mercaptobenzothiazole.

Key words: high performance liquid chromatography; benzothiazole; 2-mercaptobenzothiazole

文章编号: 1671-6833(2015)01-0041-04

煤炭自燃阻化剂的试验研究

王要令, 池吉安, 陈 铎

(河南城建学院 化学与材料工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘 要: 煤炭自燃是煤矿开采业面临的一个严重问题. 阻化剂防灭火技术是抑制煤炭自燃的重要方法之一. 为寻找高效阻化剂以阻止煤炭自热引燃, 对 CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 及复合阻化剂进行研究, 通过双氧水氧化升温实验和活化能实验, 考察阻化剂的阻化效果. 实验结果表明: 4 种阻化剂均为煤炭自燃有效阻化剂, 其中复合阻化剂的阻化效果最好. 复合阻化剂无毒无害, 使用方便.

关键词: 阻化剂; 煤炭; 自燃; 阻化效果; 活化能

中图分类号: TD75

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.010

0 引 言

我国煤炭资源丰富, 产量和消费量居世界前列, 但大约有 75% 的开采煤层存在自燃发火危险^[1]. 煤的自燃是煤矿严重自然灾害之一, 不仅污染环境、造成严重的资源浪费, 还会造成人员伤亡, 所以防止煤矿煤的自燃尤为重要. 目前, 较常用的煤自燃防灭火技术主要有注水、灌浆、漏风封堵、阻化剂、惰性气体、凝胶、粉煤覆盖等^[2-6]. 其中, 利用阻化剂抑制煤炭自燃, 是国内外煤矿常用的防灭火技术之一. 阻化剂主要有铵盐阻化剂、凝胶阻化剂、复合阻化剂、高聚物阻化剂、泡沫阻化剂等^[7-11]. 但均存在一定的缺陷, 譬如阻化效果差、阻化寿命短、价格成本高、产生有毒物等. 所以开发经济合理、使用方便、阻化效果好、环境友好的新型煤自燃阻化剂具有重要的工业价值.

考虑到阻化剂在选择方面要以经济、环保、高效为目的, 又结合地方发展循环经济理念的实际情况, 笔者以本地尾矿的主要成分 MgCl_2 、 CaCl_2 、 NaCl 及三者的复合物为阻化剂, 通过双氧水氧化升温试验和活化能试验, 考察各阻化剂的阻化效果. 以期得到环境友好的新型阻化剂, 并为尾矿的综合利用提供技术支持.

1 试验原料和仪器

无机盐: CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl ; 蒸馏水.

XL 箱式电阻炉, 河南省鹤壁市仪表厂; WRK 热电偶, 江苏省金湖县联合仪表厂; 79HW-1 恒温磁力搅拌器, 江苏金坛市环宇科学仪器厂; 万用表, 鸿昌滨江电子仪器有限公司.

2 煤样及阻化剂的配制

2.1 原煤样的制备

试验所用煤样为山西灵石肥煤, 工业分析结果见表 1.

将采集的新鲜煤样 5 kg 粉碎后混合均匀, 取 $\leq 0.9 \text{ mm}$ 粒度的煤样放入瓷盘, 至于鼓风干燥箱内, 在 60°C 下干燥, 每隔一定时间称量 1 次, 待煤样恒重后取出, 装入密闭容器内备用.

表 1 煤样工业分析结果

Tab. 1 Industrial analysis results of coal sample %

| 样品 | 挥发分 Vdaf | 灰分 Aad | 金水分 Mt |
|------|----------|--------|--------|
| 灵石肥煤 | 30.86 | 9.99 | 14 |

2.2 阻化剂的制备

2.2.1 单体阻化剂

根据前期研究结果, 浓度为 15% 的氯盐阻化剂阻化效果经济高效. CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 具有很强的吸水性, 能使煤长期处于潮湿状态, 形成的水膜隔绝氧气, 抑制煤的低温氧化.

称取 MgCl_2 阻化剂试样 20 g, 放入烧杯中, 用少量蒸馏水进行溶解, 待全部溶解后, 移入容量瓶

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-10-19

基金项目: 河南省科技攻关资助项目 (122102210395); 平顶山市重点科技攻关资助项目 (2013066); 河南城建学院 2015 基金重点项目 (2015JZD001).

作者简介: 王要令 (1979-), 女, 河南平顶山人, 河南城建学院讲师, 硕士, 研究方向: 绿色催化及煤化工, E-mail: wyl375@hncj.edu.cn.

中用蒸馏水稀释至质量分数为 15%, 充分摇匀后备用. CaCl_2 、 NaCl 单体阻化剂制备同上.

2.2.2 复合阻化剂

选用 CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 按质量比为 10:4:1 的比例复混, 将其配制成质量分数为 15% 的水溶液. 方法同上.

3 双氧水氧化升温试验

3.1 试验设计

鉴于双氧水对煤的氧化过程与煤炭在松散堆放状态下的自燃氧化过程极其相似, 因此选用双氧水氧化法对混有不同阻化剂的煤样进行氧化升温试验, 考察其对煤的阻化效果^[12].

3.2 试验方法

取 10 g 煤样放入绝热试样瓶, 加入配好浓度的阻化液 4.5 mL, 用玻璃棒搅拌, 使之均匀润湿煤样; 之后向瓶内加入体积分数为 30% 的双氧水 18 mL, 插入温度计, 密封绝热试样瓶; 开启磁力搅拌器, 边搅拌边记录温度随时间的变化. 当反应温度达到 40 °C ~ 50 °C 时, 加快搅拌速度.

对于原煤样的氧化升温试验, 只需将阻化液改为蒸馏水即可, 操作过程同上.

3.3 试验结果

根据煤样温度随时间变化关系, 可判断原煤样的自燃倾向性和不同浓度阻化液的阻化效果. 阻化煤样和原煤样的氧化升温趋势见图 1.

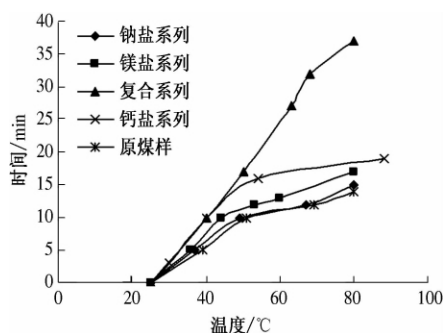


图 1 不同煤样的温度变化趋势

Fig. 1 Temperature trends of different coal samples

3.4 分析与讨论

从图 1 可以看出, 在 20 °C ~ 50 °C 的升温过程中, 原煤样的升温速度与加入阻化剂的阻化煤样升温速度相差不大, 说明在低温时阻化剂阻化效果不是很明显; 当达到 50 °C 之后, 随着温度的升高, 不同阻化煤样升温速度较原煤样显著减小, 说明阻化剂起到了阻化作用, 而在短时间内阻化剂不能及时覆盖煤样表面活性中心、降低吸氧能

力和氧化速度, 经过充分接触后, 则能较好地延缓、阻止煤的氧化自燃.

CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 3 种单体阻化剂的阻化效果各不相同, 其中 CaCl_2 单体阻化剂的阻化效果最好. 复合阻化剂与单体阻化剂相比, 升温速度最小, 阻化效果最好. 这是因为复合阻化剂中的 Ca 、 Mg 、 Na 相互作用, 与煤中的活性基团发生了不可逆转的反应, 而使氧难以和煤的活性分子团反应, 间接引起了煤氧化活性的减弱^[13]; 另外阻化液的膜隔绝了煤和氧的接触, 所以使煤与氧无法反应, 升温速度变小.

阻化效果由好到差依次是: 复合阻化剂、 CaCl_2 阻化剂、 MgCl_2 阻化剂、 NaCl 阻化剂.

4 活化能试验

4.1 试验设计

本试验依据董希琳^[14]提出的煤氧化反应活化能, 通过测定不同尺寸阻化煤样的临界自燃温度, 依据 Frank-Kamenetskii (F-K) 模型计算煤氧化反应的活化能. 活化能越大, 阻化效果越好.

4.2 实验方法

原煤样加入蒸馏水代替阻化剂, 即得水湿煤. 将水湿煤和各种阻化煤样分别通过箱式电阻炉测定临界自燃温度 (T_k). 试样尺寸为 4, 6, 8 cm 的立方体, 温度范围为 60 °C ~ 220 °C. 立方体试样置于强制对流的电阻炉中心, 分别用 WRK-型热电偶检测试样中心温度, 并在 X-Y 记录仪上记录温度随时间的变化关系; 查取热电偶分度表, 计算可得临界自燃温度. 再通过 F-K 模型估计氧化反应活化能.

4.3 试验数据处理原理

热电偶温度计是根据热电效应即塞贝克效应原理来测量温度的. 将不同材料的导体 A 和 B 接成闭合回路, 接触测温点的一端称为测量端, 另一端称为参比端. 若测量端和参比端温度 t 和 t_0 不同, 则在回路的 AB 间产生一热电势 $E_{AB}(t, t_0)$, 这种现象称为塞贝克效应, 即热效应. E_{AB} 大小随导体材料和两端温度而变.

由参比端温度 t_0 通过电偶分度表查取 $E_{AB}(t_0, 0)$, 根据热电偶中间温度定律: $E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0)$, 计算出 $E_{AB}(t, 0)$, 再由电偶分度表即可查得温度 t .

4.4 试验结果与分析

复合阻化煤样各尺寸煤样中心温度随时间的变化在 X-Y 记录仪上所对应的时间变化曲线如

图 2 所示。

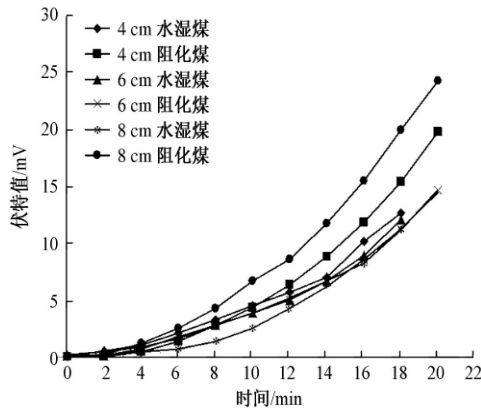


图 2 煤样中心温度的变化曲线

Fig. 2 Core temperature curves of coal sample

由图 2 根据热电偶测温原理及热电偶分度表,计算可求出不同尺寸煤样的临界自燃温度,结果见表 2。

根据测得临界温度 T_k ,通过 F-K 模型估计

水湿煤和阻化煤样的氧化反应活化能. F-K 模型是一定几何的试样与相应的临界自燃温度之间的相互关系,此处假定,强制对流条件下煤的氧化反应对氧而言是零级的,即

$$\ln(\delta_c T_k^2/r^2) = p - E/RT_k, \quad (1)$$

$$P = \ln(EQA\rho/R\lambda). \quad (2)$$

式中: A 为指数前因子; E 为反应活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; Q 为煤的燃烧热值, $300 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{O}_2^{-1}$; R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_k 为临界自燃温度, K ; δ_c 为 F-K 临界参数,立方体取 2.52; ρ 为煤的堆积密度, $760 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; λ 为煤的导热系数, $0.194 \text{ W} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; r 为特征尺寸, mm , 此处为 $1/2$ 立方体边长。

利用表 2 中的数据,以 $\ln(\delta_c T_k^2/r^2)$ 为纵坐标, $1/T_k$ 为横坐标作图,所得到的直线斜率为 $-E/R$,从而可得到活化能值,如图 3 所示. 此处活化能是由实验数据最小二乘法回归的直线斜率求得的。

表 2 临界自燃温度与尺寸的关系

Tab. 2 Relationship between critical ignition temperature and size

| 立方体 边长/mm | 临界自燃温度 $T_c/^\circ\text{C}$ | | $\frac{1000}{T_c}/\text{K}^{-1}$ | | $\ln(\delta_c T_c^2/r^2)$ | |
|--------------|-----------------------------|-------|----------------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | 水湿煤 | 复合阻化煤 | 水湿煤 | 复合阻化煤 | 水湿煤 | 复合阻化煤 |
| 40 | 160 | 184 | 2.309 | 2.187 | 7.075 | 7.183 |
| 60 | 145 | 175 | 2.391 | 2.231 | 6.194 | 6.332 |
| 80 | 120 | 150 | 2.545 | 2.363 | 5.494 | 5.642 |

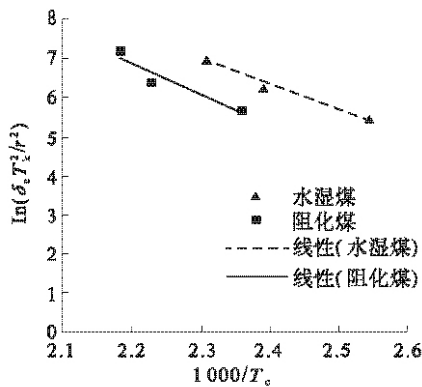


图 3 $\ln(\delta_c T_c^2/r^2)$ 与 $1/T_c$ 关系

Fig. 3 Relationship between $\ln(\delta_c T_c^2/r^2)$ and $1000/T_c$

各煤样的活化能试验结果见表 3. 由表 3 可知,各阻化煤样的活化能均高于水湿煤,说明 4 种阻化剂均起到了阻化作用;而复合阻化剂对应的阻化煤样活化能最高,说明添加阻化剂后,煤的活性基团与阻化剂中的 Ca 、 Mg 、 Na 作用生成了稳定的配合物,从而降低了煤分子中活性基团与氧反

应的活性;而复合阻化剂与煤形成的配合物最为稳定,所以活化能最高^[15]. 4 种阻化剂的阻化效果强弱顺序依次为: 复合阻化剂、 CaCl_2 阻化剂、 MgCl_2 阻化剂、 NaCl 阻化剂。

表 3 各煤样的活化能

Tab. 3 Activation energy of coal samples

| 煤样 | 活化能 $E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ |
|---------------------|---|
| 水湿煤 | 53.39 |
| CaCl_2 + 煤 | 60.15 |
| MgCl_2 + 煤 | 57.56 |
| NaCl + 煤 | 55.06 |
| 复合阻化剂 + 煤 | 66.02 |

5 结论

(1) 4 种阻化剂通过吸水降温、覆盖煤表面活性中心、降低煤表面的吸氧能力和表面氧化速度等作用对煤的自热燃烧起到了抑制作用。

(2) 复合阻化剂的阻化效果优于单体阻化剂,质量比 10:4:1 的 CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 复合阻

化剂对灵石肥煤阻化效果最好。

(3) 质量比为 10:4:1 的 CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 复合阻化剂溶于水,无毒无害,成本较低,是一种环保型阻化剂。

参考文献:

- [1] 谢锋承. 阻化剂抑制煤自燃的实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学安全科学与工程学院, 2011.
- [2] YANG Yong-liang, LI Zeng-hua, TANG Yi-bo, et al. Fine coal covering for preventing spontaneous combustion of coal pile[J]. Nat Hazards, 2014, 74 (2): 603 – 622.
- [3] OZDENIZ H, SIVRIKAYA O, SENSOGUT C. Investigation of spontaneous combustion of coal in underground coal mining [C]//Proceedings of the 22nd MPES Conference. Dresden: Springer International Publishing, 2014: 637 – 644.
- [4] 朱玉龙, 张小东, 庞光荣, 等. 急倾斜易自然薄煤层群开采综合防灭火技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(3): 78 – 81.
- [5] 于水军, 贾博宇, 张朋飞, 等. 新型凝胶对煤的阻化性能热分析法研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(4): 31 – 34.
- [6] 王要令, 池吉安. 煤炭自燃防火及灭火技术研究进展[J]. 化学研究, 2013, 24(6): 649 – 652.
- [7] PANDEY J, MOHALIK N K, MISHRA R K, et al. Investigation of the role of fire retardants in preventing spontaneous heating of coal and controlling coal mine fires [J]. Fire Technology, 2012, 48: 1 – 19.
- [8] LI Li-cheng, ZHENG Zhi-yang, WANG Qun-ying, et al. Polyethylene as a novel low-temperature inhibitor for lignite coal [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 117 (3): 1321 – 1325.
- [9] 于水军, 贾博宇, 张朋飞, 等. 新型凝胶对煤的阻化性能热分析法研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(4): 31 – 34.
- [10] 王要令. 防止煤炭自燃阻化剂研究进展[J]. 化工时刊, 2013, 27(1): 32 – 35.
- [11] 王亚敏. 防止煤炭自燃的化学阻化剂的实验结果研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(2): 183 – 185.
- [12] 肖辉, 杜翠凤. 新型高聚物煤自燃阻化剂的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 46 – 48.
- [13] 李培. 煤炭自燃化学阻化的实验结果分析[J]. 煤炭技术, 2013, 32(12): 93 – 94.
- [14] 董希琳. DDS 系列煤炭自燃阻化剂试验研究[J]. 火灾科学, 1997, 6(1): 20 – 25.
- [15] 王雪峰. 煤活性基团与 Ca^{2+} 形成配合物的结构与表征[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学资源与环境工程学院, 2009.

Experimental Research on Inhibitors of Coal Spontaneous Combustion

WANG Yao-ling, CHI Ji-an, CHEN Duo

(School of Chemistry and Material Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: Coal spontaneous combustion is a serious problem for coal mining industry. The use of inhibitor to prevent coal spontaneous combustion is one important measure. To identify a high efficient inhibitor to suppress the self-heating and spontaneous ignition of coal, the inhibiting effect of CaCl_2 inhibitor and MgCl_2 inhibitor, NaCl inhibitor, combined inhibitor was investigated by H_2O_2 oxidation test and activation energy test. The results show that each of four inhibitors is efficient and the combined inhibitor is best for preventing coal spontaneous combustion. In addition, the combined inhibitor is nonpoisonous and convenient in use.

Key words: inhibitor; coal; spontaneous combustion; inhibiting effect; activation energy

文章编号: 1671-6833(2015)01-0045-04

900 MW 压水堆稳态热工水力特性数值研究

王为术¹, 郭会军¹, 梁诚胜^{1,2}, 徐维晖¹

(1. 华北水利水电大学 热能工程研究中心, 河南 郑州 450011; 2. 河北华热工程设计有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 针对 900 MW 压水堆, 建立了堆芯稳态热工分析模型. 采用 COBRA-IV 进行堆芯稳态热工水力计算分析. 获得堆芯燃料元件温度, 堆芯冷却剂流量分配及温度和堆芯各通道偏离泡核沸腾比(DNBR). 结果表明: 堆芯冷却剂出口最高温度达 338.2 °C; 堆芯燃料最高温度达 1 350 °C; 所有通道燃料包壳外表面温度和燃料芯块的最大值都出现在堆芯中心偏上的位置; 堆芯进口附近的偏离泡核沸腾比要远高于堆芯出口附近, 且最小 DNBR 值出现在堆芯中心附近.

关键词: 核反应堆; 子通道分析; 堆芯传热; 热工水力

中图分类号: TL331

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.011

0 引言

反应堆是单位体积释热率高的核能能量转换装置, 反应堆热工水力安全是核电站安全的最重要保障. 反应堆热工水力是以试验研究为基础, 建立模型, 开发程序实现热工水力分析, 通过热工水力特性确定反应堆传热和水力安全, 获得堆芯冷却剂流量、温度和压力分布, 获得棒、壳温度特性和堆芯偏离泡核沸腾比(DNBR), 从而为反应堆安全性和经济性评价提供基本数据.

反应堆热工水力分析一直是国内外学者研究热点, 基于理论研究和广泛的实验数据^[1-2], 相继建立了一系列的分析模型, 开发了热工水力分析程序. 国内外已针对具体堆型开发了多达几十种热工水力分析程序^[3-5], 其中美国 COBRA 系列^[6]和 RELAP5^[7]压水堆瞬态分析程序应用最为广泛. 王伟伟等^[8]针对 AP1000 主回路系统开发了 RETAC 热工水力瞬态分析程序. 陈选相等^[9]开发了 Na 冷快堆 ATHAS 热工分析程序. 笔者以 900 MW 压水堆为对象, 采用 COBRA-IV 子通道模型程序, 计算分析了压水堆稳态热工水力特性.

1 数学模型

不同的堆芯子通道模型的守恒方程是一致的, 不同点主要在于横向混流的处理以及经验公

式与数据的差异.

1.1 基本控制方程

采用 COBRA-IV 子通道模型程序计算稳态热工水力特性时, 将反应堆堆芯在轴向和横向分为若干个计算单元. 一个计算单元作为一个控制体, 对每个控制体考虑子通道之间的横向作用, 列质量守恒方程、能量守恒方程以及轴向和横向的动量守恒方程.

1.2 堆芯稳态传热及流动模型

1.2.1 冷却剂传热模型

单相流区^[10], 当堆芯冷却剂为大流量($Re > 3\,000$)或小流量($Re < 2\,000$)时, 对流传热分别采用 Dittus-Boelter 和 Collier 关系式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n; \quad (1)$$

$$Nu = 0.17 Re^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} Gr^{0.1}. \quad (2)$$

式中: Nu , Re , Pr , Gr 分别为努塞尔数、雷诺数、普朗特数和格拉晓夫数; 下标 w 表示壁面.

对过冷沸腾^[10], 在大流量区和小流量区分别用 Jens-Lottes 和 Rohsenow 关系式

$$t_w - t_s = 25 \left(\frac{q}{10^6} \right)^{0.26} \exp \left(\frac{-p}{6.2} \right); \quad (3)$$

$$h = \frac{\mu}{r^2 (T_w - T_f)} \left[\frac{C_p (t_w - t_s)}{0.0132 (C_p \mu / k)^{1.7}} \right]^3 \sqrt{\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\sigma}}. \quad (4)$$

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406026); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(2012HASTIT018)

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, 主要从事多相流动与传热的研究, E-mail: wangweishu@ncwu.edu.cn.

式中: t_w 为壁面温度; t_s 为饱和温度; q 为热流密度; p 为压力; h 为换热系数; r 为汽化潜热; μ 为黏度; C_p 为定压比热容; k 为导热系数; ρ_l, ρ_g 分别为液相和相下的密度。

发生膜态沸腾传热时,其换热系数比核态沸腾要小得多,使用修正的 Dittus-Boelter 关系式^[10]

$$h_{\text{MDB}} = 0.023 \frac{k_g}{D_e} \left(\frac{GD_e}{\mu_g} \frac{x}{\alpha_{\text{dfm}}} \right)^{0.8} Pr_g^{0.4} \quad (5)$$

式中: G 为质量流量; D_e 为当量直径; α_{dfm} 为空泡份额。

当加热表面由泡核沸腾转变为膜态沸腾时,产生沸腾临界的热流密度称为临界热流密度。COBRA 程序中采用的临界热流密度公式为由上千个试验数据得到的 W-3 公式。

1.2.2 两相流压降模型

对于两相流区压降的分析计算领域,应用较广的模型有“均匀流模型”和“分离流模型”。在 COBRA-IV 采用均匀流模型:

$$-\left(\frac{d\phi}{dz}\right)_f = -\left(\frac{d\phi}{dz}\right)_0 \left[1 + x_e \left(\frac{\nu_{lg}}{\nu_{ls}} \right) \right] \left[1 + x_e \left(\frac{\mu_{lg}}{\mu_{gs}} \right) \right]^{-0.25} \quad (6)$$

式中: z 为高度; ν 为运动黏度。

其中: $\phi_{f0}^2 = \left[1 + x_e \left(\frac{\nu_{lg}}{\nu_{ls}} \right) \right] \left[1 + x_e \left(\frac{\mu_{lg}}{\mu_{gs}} \right) \right]^{-0.25}$ 称为两相摩擦倍增因子,其值是含汽量和压力的函数。

2 子通道划分与计算流程

由堆芯对称性,选取 1/8 堆芯为计算区域。图 1 为子通道划分模型。每一燃料组件为一子通道,共 26 个子通道。图 2 为稳态热工水力计算程序流程。

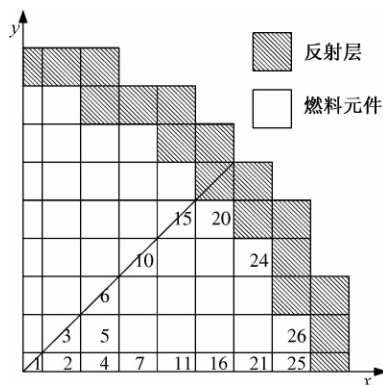


图 1 子通道划分

Fig. 1 Subchannel division

三步求解过程为: ①采用闭通道的轴向动量方程进行迭代计算,确定堆芯出入口流量和压力;

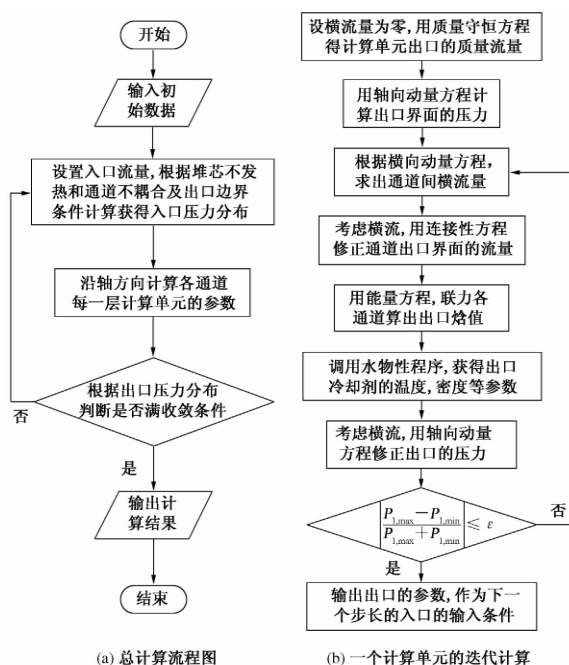


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flow char

②利用横向能量守恒与动量守恒对单个计算单元层进行迭代求解,获得每个子通道单个单元层的进出口数据; ③把上个计算单元层的出口数据作为下个单元层的入口数据继续进行轴向推导。若计算结果满足子通道出口压力判断准则,计算完成,反之对子通道入口初值进行修正后重新进行计算。

3 数据结果与分析

研究针对堆芯 100% 功率,计算获得了所有子通道各个节点处的冷却剂温度,焓值,燃料棒包壳外表面温度和燃料芯块中心温度以及 DNBR 值。

3.1 冷却剂流量分配和温度

各通道入口按平均质量流量 112.87 kg/s 分配,由于子通道面积不全相同,取各子通道冷却剂出口质量流速进行对比。研究发现:靠近堆芯内部的子通道出口流速较小,而靠近堆芯边缘的子通道出口流速较大。因此,冷却剂横流的方向为由温度、焓值等热工参数较高的子通道流向热工参数较低子通道,即由靠近中心的子通道流向靠近边缘的子通道。

图 3 为堆芯各子通道在堆芯出口(即 $z = 3.66$ m)处冷却剂温度的横向分布。分析表明:冷却剂温度随堆芯半径的增大而减小,所有子通道在堆芯进出口最小温升为 29.3 °C。

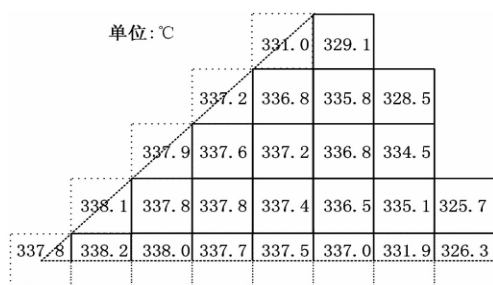


图3 各子通道在 $z=3.66$ m处冷却剂温度横向分布

Fig. 3 Temperature distribution of coolant flowing in subchannels at $z = 3.66$ m

选取 5 个具有典型意义的通道,如图 4 所示。图 4 为堆芯典型子通道冷却剂温度沿堆芯高度的变化,冷却剂温度沿高度逐渐升高,且上升幅度均为两端慢,中部快。其原因是燃料棒径功率的余弦分布特性,燃料棒中心处线功率密度最大,因此,温度上升快,而两端的线功率密度较小,温度上升慢。堆芯冷却剂最高温度发生在 2 号子通道出口,温度达 $338.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,距当前压力下的对应饱和温度 $344.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有 $6.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度富裕度,不会发生沸腾。

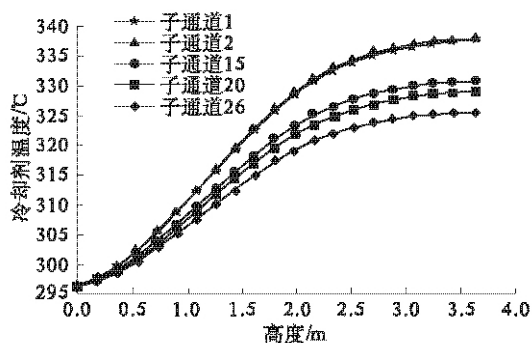


图4 典型子通道冷却剂温度轴向分布

Fig.4 Axial distribution of coolant temperature for subchannels

3.2 包壳外表面温度与芯块中心温度

图5为堆芯典型子通道燃料棒包壳外表面温度沿堆芯高度的变化。分析表明,各子通道内燃料棒包壳外表面温度在堆芯轴向呈中间高、两端低的趋势,且峰值偏向堆芯出口方向(即 $z=2.379\text{ m}$)。其主要原因有:一是通道内功率轴向为余弦分布;二是由于堆芯入口冷却剂温度低,与燃料棒包壳外表面温度差值大,而在堆芯出口附近冷却剂已经被加热,与包壳温度的差值减小,传热效果变差,因此燃料芯块中心温度的峰值偏向堆芯出口方向。

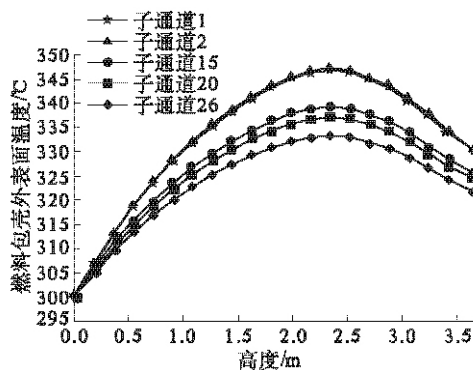


图5 典型子通道包壳外表面温度轴向分布

Fig.5 Axial distribution of cladding surface temperature for subchannels

图6为燃料棒包壳外表面最高温度(即 $z = 2.397\text{ m}$)处的横向分布,由图可知,燃料棒包壳外表面最高温度分布与冷却剂温度分布具有一致性:2号子通道的包壳外表面温度最高,达 $347.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;沿堆芯中心向堆芯边缘方向子通道的包壳外表面温度逐渐降低。

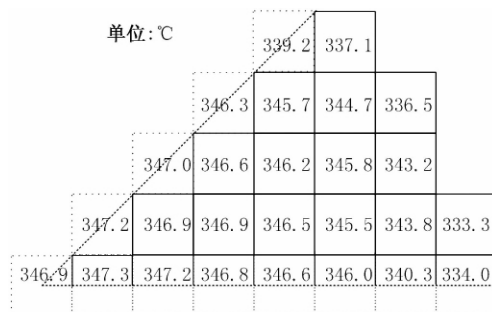


图6 各子通道在 $z=2.379\text{ m}$ 处包壳
外表面温度横向分布

Fig.6 Temperature distribution of cladding surface for subchannels at $z = 2.379$ m

图7为堆芯各子通道燃料芯块中心温度沿堆芯高度的变化.由图可知,各子通道内燃料芯块的中心温度同样呈中间高、两端低的趋势,且峰值发生在 $z=2.379\text{ m}$ 的高度.

图 8 为堆芯各子通道燃料芯块中心最高温度 (即 $z=2.397\text{ m}$) 处的横向分布. 可以看出整个堆芯内燃料芯块的最高温度仍为 2 号子通道的 $1\,350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 距燃料芯块相应燃耗下的融化温度 (不大于 $2\,650\text{ }^{\circ}\text{C}$), 有很大的安全裕量.

3.3 堆芯偏离泡核沸腾比 DNBR

图9为堆芯子通道中的DNBR沿堆芯高度的变化:子通道的进出口位置均有很高的偏离核态沸腾比,而中心位置DNBR都较小.所有通道的最小DNBR均出现在 $z=2.013\text{ m}$ 处,与燃料芯块

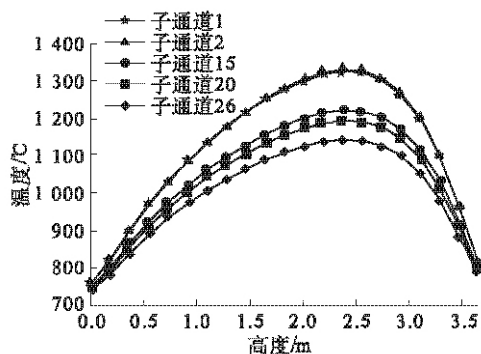
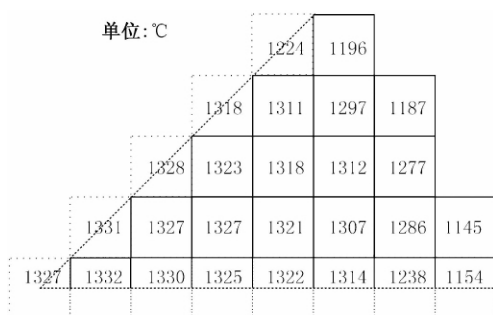


图7 典型子通道燃料芯块中心温度轴向分布

Fig.7 Axial distribution of fuel pellet centerline temperature for subchannels

图8 各子通道在 $z=2.379$ m处

燃料芯块中心温度横向分布

Fig.8 Temperature distribution of fuel pellet centerline for subchannels at $z=2.379$ m

中心最高温度出现的节点位置以及燃料棒包壳外表面最高温度节点位置相比,有一定的偏移.这是由于DNBR的大小是冷却剂温度、燃料棒包壳外表面温度以及轴向功率分布综合作用的结果;在所有子通道中,2号子通道的DNBR最小,为2.37,大于反应堆设计准则所要求的1.5;对每一个子通道,堆芯下半部分的DNBR要远高于其上半部分,表明堆芯下半部分的安全裕度要高于其上半部分.

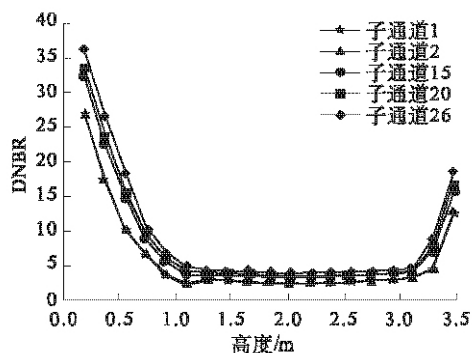


图9 典型子通道偏离泡核沸腾比轴向分布

Fig.9 Axial distribution of DNBR for subchannels

3.4 对比运行数据

表1为堆芯出口冷却剂温度、压力计算值与实际运行数据的对比.

表1 900 MW 压水堆计算结果与公布数据比较

Tab.1 Comparison of calculation results and published data of the 900 MW PWR core

| 项目 | 冷却剂压力(进/出口)/MPa | 堆芯压降/MPa | 冷却剂温度(进/出口)/°C | 堆芯温升/°C |
|----|-----------------|----------|----------------|---------|
| 计算 | 15.5/15.398 | 0.12 | 296.4/335.0 | 38.6 |
| 运行 | 15.5/15.3 | 0.2 | 296.4/327.6 | 31.2 |

由表1可见,计算得到的数据与实际运行数据差距不大,总体堆芯压降偏小,而温升偏高.主要原因是在计算中对流量分配、传热模型等的简化和计算误差.

4 结论

(1) 整个堆芯的热通道为2号子通道,其冷却剂温度、进出口温升以及燃料棒包壳外表面和芯块中心温度均最高, DNBR 最低. 冷却剂出口温度达344.79 °C. 堆芯燃料最高温度达1300 °C, 远低于燃料芯块融化温度.

(2) 各子通道冷却剂的温度在堆芯两端处上升相对缓慢,在堆芯中部附近上升较快,且各子通道燃料包壳外表面温度和燃料芯块中心的最大值都出现在堆芯中心偏上的位置.

(3) 每个子通道的最小DNBR值都出现在堆芯中心附近,堆芯下半部分的安全裕度要高于上半部分.

参考文献:

- [1] 王新新.新时期我国核电发展现状及对策分析研究[J]. 节能技术, 2010, 28(1): 60-64.
- [2] 刘志毅, 秦本科, 解衡, 等. 压水堆核电站热工水力系统程序的研发现状与趋势[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(11): 966-972.
- [3] CHENG Xu, LIU Xiao-jing, YANG Yan-hua. A mixed core for supercritical water-cooled reactors[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2007, 40(2): 117-126.
- [4] 傅晟威, 许志红, 杨燕华. 基于 SCWR 堆芯结构的子通道程序开发与应用[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(3): 345-350.
- [5] 靖剑平, 张春明, 陈妍, 等. 浅谈核电领域中的热工水力分析程序[J]. 核安全, 2012(3): 70-74.
- [6] STEWART C W, WHEELER C L, CENA R J, et al. COBRA IV: The code and the method[M]. Washington: Pacific Northwest Laboratory, 1997.

(下转第53页)

文章编号: 1671-6833(2015)01-0049-05

汽轮机叶型的三维数值模拟及优化

周俊杰, 王梅玲, 郭朋飞, 王定标

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 以 25 MW 凝气式汽轮机的某级叶片为研究对象, 利用 ANSYS Workbench 平台中的旋转机械分析系统对该级叶片进行了静、动联合三维数值模拟优化。结果表明, 优化后叶片压力系数分布较好, 降低了叶片表面压差分布, 有效控制径向二次流损失; 总压损失系数有所减小, 平均总压损失系数降低 1%; 等熵效率由原来的 92.099% 提高至 93.157%。优化后的叶型明显提高了气动性能, 降低叶型能量损失, 增加了汽轮机效率。

关键词: 汽轮机; 叶片; 气动性能; 数值模拟

中图分类号: TK26 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.012

0 引言

汽轮机是一种以过热蒸汽为动力, 并将蒸汽的热能转化为机械能的旋转机械。设计高性能的蒸汽轮机, 是目前叶轮机领域技术研发的重要目标。汽轮机级内损失主要有型线损失、漏气损失、湿气损失、鼓风摩擦损失等^[1]。

在国内汽轮机的设计中, 目前更多的是应用 CFD 软件为主, 辅以必要的实验对现有叶片进行优化设计, 从而节省经费和减少研制时间。MHI 公司利用 CFD 软件对 165 MW 汽轮机叶片和汽封进行优化, 最终得到性能良好的低压级叶片和汽封^[2]。岳国强等^[3]对两套具有不同前缘直径和分布的叶栅进行对比吹风试验, 结果表明选择适当的前后缘直径及合理匹配出口逆压段长度与逆压梯度值, 可以有效地减少叶栅的二次流损失。薛彦光^[4]利用 CFX 对 300 MW 汽轮机高压级静叶栅流场进行数值模拟, 并分析了叶栅通道二次流发展特点。崔海涛^[5]、王定标等^[6]对汽轮机进行了三维数值模拟, 并根据模拟结果对叶片进行了优化设计。

笔者主要借助 ANSYS Workbench 平台中的旋转机械分析系统软件, 分析叶片间内流体的流动, 研究叶型对流动内流体的影响, 从而实现叶型优化, 减少级能量损失, 提高汽轮机效率。

1 数学物理模型

1.1 物理模型

研究对象为轴流式 25 MW 凝气式汽轮机某级叶片, 气动分析时只考虑单静叶、单动叶结构。表 1 为叶片物理结构详细参数, 图 1 为汽轮机结构图。



图 1 汽轮机结构

Fig. 1 Structure of steam turbine

1.2 数学模型

汽轮机叶片间流动通道内的流动满足质量、动量以及能量守恒方程。

质量守恒方程^[7-8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}. \quad (2)$$

收稿日期: 2014-08-07; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276173)

作者简介: 周俊杰(1974-), 男, 河南太康人, 郑州大学副教授, 博士, 主要研究方向为数值计算技术及其在过程设备中的应用, E-mail: zhoujj@zzu.edu.cn.

式中: ρ 为密度; t 为时间; u_i, u_j 分别为 i 方向、 j 方向上的速度; τ_{ij} 为黏性应力。

能量方程:

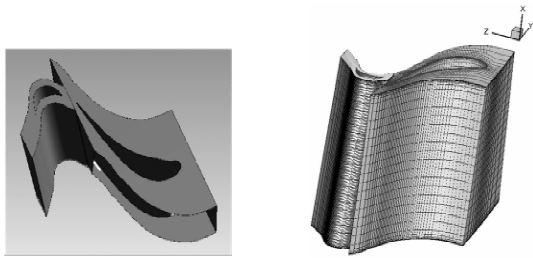
$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu \lambda}{Pr} \frac{\partial c_p T}{\partial x_j} \right) + w_s Q_s \quad (3)$$

式中: C_p 为比热容; T 为温度; 最后一项表示其他形式导入的能量。

表 1 叶型安装参数

Tab. 1 Parameters of blade

| 叶型 | 节圆直径 / mm | 叶片高度 / mm | 叶型弦长 / mm | 数目 / 只 | 节距 / mm | 安装角 / (°) | 相对节距 |
|----------|--------------|--------------|--------------|-----------|------------|--------------|------|
| TC-1A 静叶 | 1 299 | 160 | 61.2 | 46 | 88.7 | 34.2 | 0.79 |
| TP-1A 动叶 | 1 300 | 164 | 30 | 202 | 20.2 | 78 | 0.66 |



(a) 计算流道三维模型 (b) 计算区域网格示意图

图 2 计算及网格模型

Fig. 2 Computation and Mesh model

选用 P-Total Inlet P-Static Outlet 模式的边界条件、Frozen Rotor 交界面模式, 来流方向垂直于进口截面。具体参数设置为: 进口总压 0.088 9 MPa, 出口静压 0.050 99 MPa, 进口总温 369.5 K。

1.4 工质属性

为更好地模拟实际状况, 这里采用平衡态的水蒸气。首先在 CFX 中分别创建单相水和水蒸气, 然后再通过设置参数的方式建立平衡态的水蒸气, 定义单相水和水蒸气的最高温度为 500 K, 最低压力为 0.01 MPa, 最高压力为 0.45 MPa, 最大点数为 100, 定义单相水最低温度为 250 K, 水蒸气的最低温度为 273.15 K。

2 计算结果分析

2.1 叶型表面静压系数分析

叶片表面静压系数计算表达式为

$$C_p = \frac{p_i - p_{\text{outlet}}}{p_{\text{inlet}} - p_{\text{outlet}}} \quad (4)$$

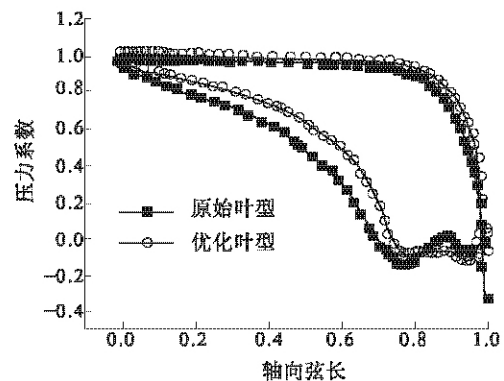
式中: p_i 是叶片表面上任一点处的静压; p_{outlet} 是叶片出口静压; p_{inlet} 是叶片的进口滞止压力。

图 3 为原始工况下静、动叶片的压力系数分布曲线图。由图可以看出, 在静叶 0 ~ 0.8 轴向位

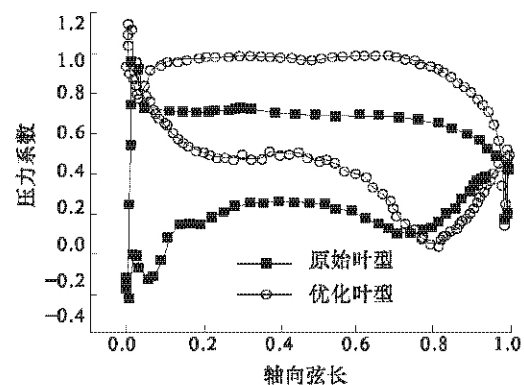
1.3 网格划分及边界条件

笔者模拟汽轮机级内的流动性能, 为了取消前、后级对该级性能的影响, 保证流场的稳定性, 分别对静、动叶的前后端均作适当的延长处理。采用 H/J/C/L-Grid 拓扑结构, 生成网格后的节点总数为 120 000。图 2(a) 为计算流道三维模型图, 图 2(b) 为计算区域网格示意图。

置处, 优化叶型压力面上的压力与原始叶型基本一致, 而吸力面压力比原始叶型大。因此优化后叶型在 0 ~ 0.8 轴向弦长处表面压差减小, 有利于二次流损失的降低; 0.8 ~ 0.9 弦长处, 原始叶型吸力面发生较为剧烈的扩压, 而优化叶型则出现了压力平缓区, 优化叶型压力面上的压力比原始叶型略有增加; 0.9 ~ 1 轴向弦长处, 优化叶型与原始叶型吸力面均出现了扩压, 压力面上压力基本重



(a) 静叶压力系数



(b) 动叶压力系数

图 3 叶片表面压力系数分布

Fig. 3 The pressure coefficient of blade

合。由图可知,优化后叶片吸力面的压力系数曲线比较平缓,有利于叶片气动负荷的减小,提高汽轮机级效率。

优化后动叶压力面的压力系数与原始叶片趋势相同,数值有所增加;吸力面上,原始叶片压力系数在 $0 \sim 0.45$ 轴向弦长处基本处于扩压趋势,只在 $0.45 \sim 0.55$ 弦长处平稳降低,然后又出现扩压现象;优化叶片吸力面上压力在 $0 \sim 0.8$ 弦长处均呈下降趋势,转捩点由 0.7 推迟至 0.8 ,减小扩压区域,有利于减小叶型损失。

2.2 静叶表面压力分布

图 4 给出了优化前后静叶吸力面压力分布云图。从图中可以看出,优化后叶片表面的压力比原始叶型压力大;静叶中部压力降低较原始叶型的小,有利于减小径向二次流损失。

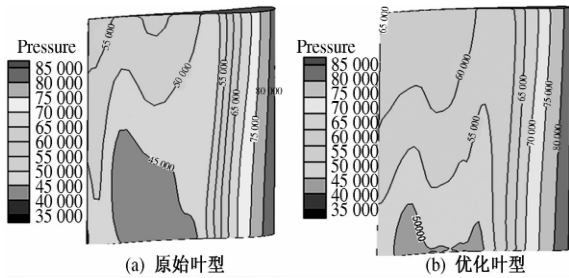


图 4 静叶吸力面上压力分布图

Fig. 4 The pressure distribution in the suction of stator

2.3 叶片子午面速度分布

图 5 给出了优化前后叶片子午面上速度分布图。从图中可以看出,优化后叶片速度明显增大,大大增加了叶片的做功能力,且叶型优化后,动叶顶部出口截面上速度小于原始叶型,有利于叶片余速损失的降低。

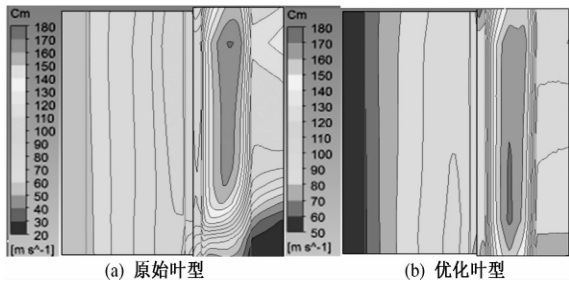


图 5 叶片子午面上速度分布图

Fig. 5 Meridian velocity contours in meridian view

2.4 总压损失系数 W

总压损失系数与汽轮机级内能量损失系数一一对应,因此可以采用 W 来表示叶栅的能量损失。定义表达式为

$$W = \frac{p_{\text{inlet}}^* - p_{\text{outlet}}^*}{p_{\text{outlet}}^* - p_{\text{outlet}}} \quad (5)$$

式中: p_{inlet}^* , p_{outlet}^* 分别为叶栅进、出口处滞止压力。

图 6 表示静叶栅总压损失系数沿叶高分布情况。从图中可以看出,叶栅总压损失沿叶高呈现增大趋势,优化后叶型总压损失在整个叶片范围处均比原始叶型小。在 50% 叶高处叶型总压损失系数由原来的 6.5% 降至 5.5%,说明叶型优化后该级级内损失较小。

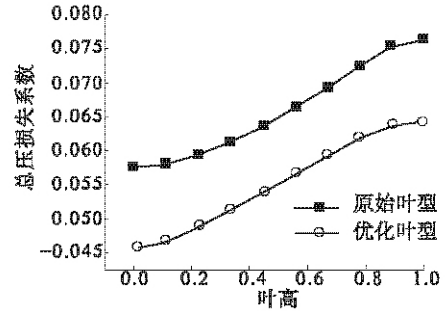


图 6 静叶总压损失系数沿叶高分布曲线

Fig. 6 Total pressure loss coefficient in stator along span normalized

2.5 等熵效率 η_i

等熵效率扣除了级内存在的所有能量损失,反应了级内蒸汽实际做功能力,即

$$\eta_i = \Delta h_i / \Delta h_i^* \quad (6)$$

式中: Δh_i 是级内有效焓降; Δh_i^* 是级内总焓降。

图 7 为沿流线方向等熵效率分布曲线。由图 7 可以看出,优化后静叶等熵效率基本与原始叶型一致,在 $0.8 \sim 1$ 弦长处有所增加;等熵效率在动叶前缘处较低,说明损失主要发生在动叶前缘处,经过优化,动叶前缘处等熵效率较原始叶型有所增加,而在 $0.3 \sim 0.5$ 动叶弦长处优化叶型较原始叶型等熵效率反而下降,之后又有增加,叶型优化后出口等熵效率由原来的 92.099% 提高至 93.175%。

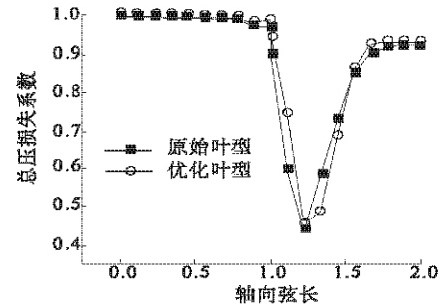


图 7 沿流线方向等熵效率分布

Fig. 7 Distribution of isentropic efficiency along streamwise location

图8为等熵效率沿叶高分布曲线,从图中可以看出,静叶的等熵效率在叶根和叶顶处较低,说明在叶根和叶顶处叶栅损失较大.优化后叶型等熵效率只在叶根处较原始叶型低,但是在0.2~1叶高处等熵效率均有所增加.动叶等熵效率较静叶小,说明动叶中损失比较严重,叶型优化后等熵效率在叶根至0.4叶高处比原始叶型小,而在0.4至叶顶处比原始叶型处大,可以考虑采用变截面叶型来减小损失,提高叶型效率.图9为型线优化前后对比.

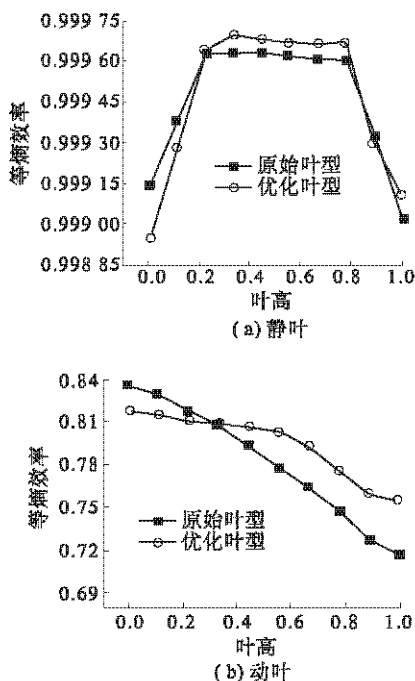


图8 等熵效率沿叶高分布曲线
Fig. 8 Distribution of isentropic efficiency along span normalized

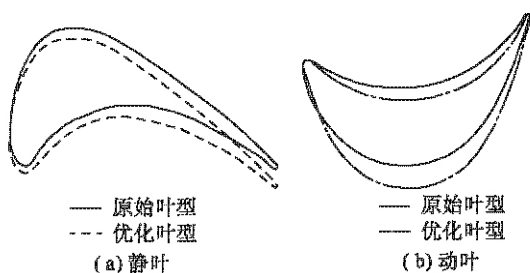


图9 优化前后型线
Fig. 9 Blade line before and after optimization

3 结论

(1) 优化叶型压力面上的压力与原始叶型基本一致,而吸力面上压力比原始叶型大,但中部压力降较小;动叶区域速度明显增大,动叶顶部出口截面上速度略小于原始叶型,有利于降低叶片余速损失,增加叶片做功能力.

(2) 静叶总压损失系数沿叶高逐渐增加,通过优化,静叶总压损失系数下降1%.

(3) 静叶的等熵效率在叶根和叶顶处较低,优化后叶型等熵效率在叶根处较原始叶型低,但是在0.2~1叶高处均增加.动叶叶型优化后等熵效率在0~0.4叶高处比原始叶型小,而在此范围之外大于原始叶型.优化后级内等熵效率由原来的92.099%增加至93.157%.

参考文献:

- [1] 雷凤林. 汽轮机末级变工况性能研究与流道改进设计[D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2010.
- [2] WATANABE E, TANAKA Y, NAKANO T, et al. Development of new high efficiency steam turbine[J]. Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev, 2003, 40(4): 1-6.
- [3] 岳国强, 李殿玺, 韩万金, 等. 两套后部加载叶栅的对比实验研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 125-129.
- [4] 薛彦光. 汽轮机级内二次流的数值模拟[D]. 吉林: 东北电力大学能源与动力工程学院, 2012.
- [5] 崔海涛. 汽轮机内部流场数值模拟及叶片改进优化[D]. 大连: 大连理工大学能源与动力学院, 2006.
- [6] 王定标, 雷凤林, 向飒, 等. 汽轮机末级变工况三维数值模拟与叶型改进设计[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010, 31(5): 1-4.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

Three-Dimensional Numerical Simulation and Optimization of Steam Turbine Blade

ZHOU Jun-jie, WANG Mei-ling, GUO Peng-fei, WANG Ding-biao

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

Abstract: The three-dimensional numerical simulation and optimization of the last stage of a 25 MW condensable steam turbine are conducted by using ANSYS Workbench, a platform of analysis system specially for the rotating machinery. The results show that the modified blade has a better pressure coefficient distribution, reduces the differential pressure distribution of blade surface, effectively controls the radial secondary flow losses. Total pressure loss coefficient is reduced, and the average total pressure loss coefficient is reduced by 1%. Isentropic efficiency increases from 92.099% to 93.157%. After optimization, the aerodynamic performance of the blade increases obviously, the energy loss in the blade is reduced and the efficiency of steam turbine increases.

Key words: steam turbine; blade; aerodynamic performance; numerical simulation

(上接第 48 页)

- [7] KALIATKA A. Benchmarking analysis of water hammer effects using RELAP5 code and development of RBMK - 1500 reactor main circulation circuit model [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2007, 34(1/2): 1 - 12.
- [8] 王伟伟, 苏光辉, 田文喜, 等. AP1000 主回路系统热工水力瞬态计算程序 RETAC 的开发 [J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(10): 1185 - 1190.
- [9] 陈选相, 吴攀, 单建强. 钠冷快堆分析程序 ATHAS - LMR 的子通道模型 [J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(6): 695 - 700.
- [10] 于平安. 核反应堆热工分析 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1980: 34 - 44.

Numerical Study of Thermal hydraulics Characteristics of 900 MW PWR

WANG Wei-shu¹, GUO Hui-jun¹, LIANG Cheng-sheng^{1,2}, XU Wei-hui¹

(1. Thermal Engineering Research Center, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Hebei Huare Engineering Design co. Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The steady-state thermal analysis model of reactor core was established for a 900MW pressurized water reactor. The steady-state thermal-hydraulic of reactor core was calculated and analyzed with COBRA-IV. The temperature of fuel element, coolant flow distribution and temperature and the departure from nucleate boiling ratio (DNBR) of the reactor core were obtained. The results show that the coolant in the core exits lateral flow from the center to the around. The maximum temperature of coolant in the core outlet is up to 338.2 °C. The maximum temperature of fuel in the core is up to 1350 °C. The maximum temperature of cladding surface and fuel pellet appears above the center. The DNBR near the inlet is much higher than near the outlet, and the minimum DNBR appears near the center.

Key words: nuclear reactor; subchannel analysis; heat transmission in the core; thermal hydraulic

文章编号: 1671-6833(2015)01-0054-03

引流介质充填强化旋流-静态浮选过程的研究

张 敏^{1,2}, 沈家华¹, 刘东云¹

(1. 广西大学 资源与冶金学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西理工科学实验中心, 广西 南宁 530004)

摘 要: 介质充填可有效改善浮选环境. 传统筛板仅是部分抑制旋流, 填料充填易堵塞且严重影响浮选处理量, 结合筛板与填料优势, 提出引流介质充填旋流-静态微泡浮选柱, 以解决强旋流与静态浮选之间的矛盾. 引流介质充填在旋流分选和柱浮选之间, 在稳定静态环境情况下, 又引导上移涡旋(负效应)成为平稳上升流并促使易浮矿物泡沫快速上浮(正效应), 使精选泡沫层更厚、更稳定. 结果表明, 在原矿品位基本相同情况下, 引流介质混合充填比筛板充填可以使精矿品位平均提高了 1.88%, 回收率提高了 1.63%.

关键词: 浮选柱; 矿物分选; 引流介质充填; 旋流

中图分类号: TS744

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.013

0 引言

旋流-静态微泡浮选柱是中国具有自主知识产权的选矿设备^[1], 目前先后成功应用在铅锌尾矿再回收、萤石回收、白钨分选、铜硫分选、磁铁矿反浮选等方面, 取得了较好的分选指标^[2-6].

由充填浮选柱研究知^[7-15], 大孔隙筛板充填只能部分改善浮选柱涡流状况和气泡性能, 填料充填会引起严重的堵塞问题, 且严重影响处理量, 最终影响浮选效率.

引流介质是为了解决强旋流与柱浮选的静态化分离之间的矛盾而提出的. 它的应用可使上移旋流(负效应)转化为平稳上升流(正效应), 缩短浮选时间, 节约能耗. 笔者主要研究引流介质充填对硫化铜矿的浮选影响.

1 实验部分

1.1 试验参数

- 1) 处理量: 20 ~ 23 t/d.
- 2) 给矿浓度: 45% ~ 49% (质量分数).
- 3) 药剂(补加粗Ⅱ与扫选部分): 黄药为 10 ~ 12 g/t; 松油为 45 ~ 55 g/t.
- 4) 液位高度: 粗选为 0.750 ~ 0.820, 精选为 0.400 ~ 0.600.

5) 循环泵工作压力: 粗选为 0.18 ~ 0.21 MPa, 精选为 0.17 ~ 0.20 MPa.

1.2 原矿矿物组成

中国云南某铜矿. 矿物组成如表 1 所示, 矿物以黄铜矿为主, 其次是斑铜矿, 有微量的铜兰和孔雀石; 铁矿物以磁铁矿为主, 次为菱铁矿和黄铁矿, 褐铁矿微量. 大红山铜矿的脉石矿物以黑云母、长石、白云母、石英及绿泥石为主, 其次是方解石、石榴石、高岭石等. 铜矿石为硫化矿, 嵌布粒度粗, 属易选矿石. 除主要金属铜、铁外, 还伴生有金、银、铂、钯等稀贵金属.

表 1 矿物组成概量分析表

Tab. 1 Minerals composition %

| 矿物名称 | 概量 | 矿物名称 | 概量 |
|------|-------|------|-------|
| 黄铜矿 | 1.90 | 黑云母 | 25.17 |
| 斑铜矿 | 0.16 | 斜长石 | 14.15 |
| 铜兰 | 微 | 白云石 | 16.15 |
| 孔雀石 | 微 | 石英 | 11.29 |
| 磁铁矿 | 24.48 | 绿泥石 | 3.02 |
| 黄铁矿 | 0.14 | 方解石 | 1.18 |
| 赤铁矿 | 0.24 | 其它 | 2.03 |
| 褐铁矿 | 微 | | |

1.3 试验设备和流程

试验设备联系图见图 1.1 对 1 是指用一台粗

收稿日期: 2014-09-20; 修订日期: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51404076); 广西教育厅重点课题资助项目(ZD2014005)

作者简介: 张敏(1978-), 女, 河南永城人, 广西大学副教授, 博士, 研究方向为浮选柱工艺及其流体力学, E-mail: scetmin@126.com.

选浮选柱与一台精选浮选柱进行等体积配置,即粗选容积与精选容积之比为1:1.浮选柱规格FC-SMC400 mm×4 800 mm.

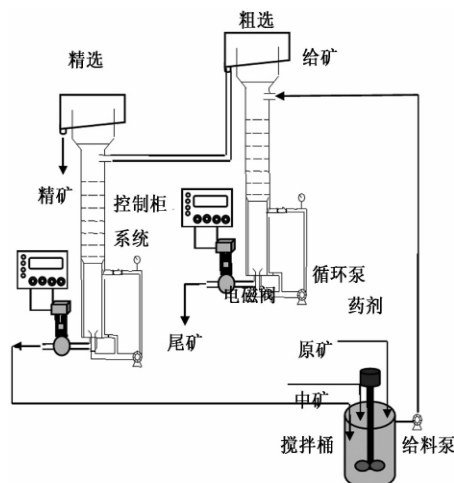


图1 1对1配置试验设备联系图

Fig.1 One to one experiment equipment

1.4 引流充填介质参数

筛板参数: 圆形; 筛孔直径 18 mm, 开孔率 90%, 孔间距 2~10 mm; 共一层筛板. 引流管管径 40 mm, 壁厚 1.0 mm, 高 500 mm, 开孔率 > 90%. 引流管是 PVC 材质的正六边形蜂窝状直管, 可任意切割大小和形状, 固定在浮选柱旋流分选上部、柱浮选下部. 图 2 是引流介质模型.

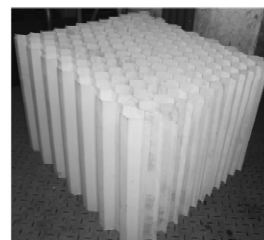


图2 引流介质侧视图

Fig.2 Guiding fluid packed media lateral view

2 结果与讨论

表 2 是旋流-静态微泡浮选柱筛板充填和引流管与筛板混合充填的选别结果. 可以知道, 在原矿品位基本相同情况下, 混合充填相对于筛板充填, 精矿品位平均提高了 1.88%, 回收率提高了 1.63%, 分选过程和分选指标都得到显著改善.

从流态化角度分析, 引流直管实际上就是利用碰撞和阻碍作用对旋流或涡旋进行再整流, 当旋流进入直管后, 涡旋消失, 而上移能量保存, 形成上下密度和空隙度均一的流化床层流.

从动力学角度分析也可以知道, 小直径管中雷诺数会远小于大直径浮选柱中雷诺数, 微泡与颗粒碰撞概率可能达到最大, “塞流”和逆流碰撞矿化效应得到加强, 矿物分选选择性提高.

表 2 筛板充填和混合充填的选别结果

Tab.2 Mixed packing separation and sieved packing separation

| 序号 | 引流介质混合充填 | | | | | 筛板充填 | | | | |
|------|----------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| | 原矿 | 精矿 | 尾矿 | 产率 | 回收率 | 原矿 | 精矿 | 尾矿 | 产率 | 回收率 |
| 1 | 0.650 | 25.08 | 0.044 | 2.48 | 95.69 | 0.724 | 25.15 | 0.063 | 2.63 | 91.53 |
| 2 | 0.852 | 29.93 | 0.055 | 2.67 | 93.79 | 0.752 | 25.72 | 0.050 | 2.73 | 93.53 |
| 3 | 0.720 | 29.07 | 0.056 | 2.29 | 92.46 | 0.672 | 24.33 | 0.060 | 2.52 | 91.30 |
| 4 | 0.745 | 25.40 | 0.046 | 2.76 | 94.10 | 0.794 | 27.25 | 0.069 | 2.67 | 91.54 |
| 5 | 0.728 | 28.69 | 0.050 | 2.37 | 93.40 | 0.693 | 26.72 | 0.064 | 2.36 | 90.98 |
| 算术平均 | 0.739 | 27.60 | 0.050 | 2.50 | 93.38 | 0.727 | 25.83 | 0.061 | 2.58 | 91.78 |

3 结论

1) 引流介质充填对浮选柱内的流态和矿化环境进行了整合, 对浮选气泡进行了剪切, 减少气泡兼并, 降低了浮选柱中下部旋流对上部泡沫层的干扰, 达到了稳定浮选过程、提高浮选效率的目的.

2) 引流直管充填形成更小的分选空间, 强化传质过程. 引流直管强化改变旋流流态(负效应)为平稳上升层流(正效应), 使矿化气泡可以快速

浮出, 中矿得到强化分选, 缩短浮选时间.

3) 引流介质充填混合充填使旋流-静态微泡浮选柱实现了真正意义上的“静态化”分离.

参考文献:

- [1] 刘炯天. 旋流-静态微泡浮选柱及洁净煤制备研究[D]. 北京: 中国矿业大学资源与安全工程学院, 1998.
- [2] LIN Jiong-tian, ZHANG Min, ZHAI AF, et al. Dynamic analysis and optimization of flotation-column packed separation zone [C]//Proceeding of XXIV In-

- ternational Mineral Processing Congress. Beijing, 2008: 940-945.
- [3] WANG Yong-tian, LIU Jiong-tian. The initial study of fluorite with column floatation [J]. Mining and Metallurgical Engineering. 2002, 11: 227-230.
- [4] ZHOU Xiao-hua, LIU Jiong-tian. The study of fluorite with microbubble column floatation [J]. Mining and Metallurgical Engineering. 2005, 14(2): 21-24.
- [5] GUO jie, LIU Jiong-tian. The study of reclaiming zinc from lead and zinc using column floatation with inhaling gas by itself [J]. Metal Mine, 2005(1): 63-70.
- [6] MA Zi-long, LIU Jiong-tian. The study of magnetite with Microbubble column floatation [J]. The technology of reparation for mine in foreign countries. 2004 (11): 19-20.
- [7] 刘炯天. 旋流-静态微泡柱分选方法及应用(之二): 柱分离过程的静态化及其充填方式 [J]. 选煤技术, 2000(4): 1-5.
- [8] 杨锦隆. 新型充填式浮选柱 [J]. 国外金属矿选矿, 1991(2): 8-12.
- [9] 刘炯天, 张敏, 刘焕彬, 等. 筛板充填浮选柱浮选流体的速度场分布 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(5): 578-581.
- [10] 高祖昌, 王永其, 袁永健. 充填式静态浮选柱及其分选细粒煤的实践 [J]. 选煤技术, 1999(2): 11.
- [11] 张敏, 刘炯天. 柱浮选充填及工业应用 [J]. 金属矿山, 2008(7): 96-99.
- [12] SCOTT AI, JOSEPH. A. Fjtpatrick, JOHN CS. Conceptual design of packed flotation columns [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1990, 29(6): 943-949.
- [13] 李冬莲, 蔡立新. 充填式浮选柱充气性能研究 [J]. 中国矿业, 1999, 8(3): 58-61.
- [14] 张敏, 刘炯天. 柱浮选优化充填的动力学分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 343-346.
- [15] 丁一刚, 李定或, 吴元欣. 充填浮选柱捕集区气含率的实验研究 [J]. 化工矿山技术, 1996, 25(4): 13-14.

Research of Guiding Fluid Packed Media Enhanced Cyclone-static Flotation Process

ZHANG Min^{1,2}, SHEN Jia-hua¹, LIU Dong-yun¹

(1. College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Experiment Centre of Science and Technology, Naning 530004, China)

Abstract: The medium filling can improve the flotation environment effectively. The traditional sieve trays and fillings could only partially inhibit the cyclone flow and usually generate pulp jam. So we put forward the guiding fluid packed media to solve the contradiction of strong cyclonic flow and static separation in the cyclone-static microbubble flotation column. guiding fluid packed media is filled between the cyclone separation and column flotation. while stabling static flotation environment, the upward scroll (negative effect) is guided and become stable upwelling, and the easy floating mineral is rapidly rised (positive effect), and make product concentrate layer more thicker, more stable. / Based on the test data, it was found that the sieve packing has the potential to yield a product of approximately 25.83% copper concentration with 91.78% recovery from a feed concentration of approximately 0.727%. If mixed packing was used, the product concentration could be further increased to 27.60% from a feed of approximately 0.739% concentration with 93.38% recovery.

Key words: flotation column; mineral separation; guiding fluid packed media; cyclone flow

文章编号: 1671-6833(2015)01-0057-04

FeSiCP 系软磁非晶合金的研究

李福山, 李杏瑞, 李育洛, 菅成志

(郑州大学 材料与科学工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 具有良好软磁性能及高非晶形成能力(AFA)的 Fe 基非晶合金由于其广泛的应用前景, 已成为国际上竞相研究的热点. 设计研发了具有共晶成分的 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0\%, 1\%$ 和 2%) 合金系, 研究其 AFA、热稳定性和磁学性能. 结果表明: $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 非晶合金具有高的 AFA, 尤其是优异的软磁性能. 其过冷液相区宽度 ΔT 可达 42 K, 饱和磁感应强度 B_s 高达 1.35 T, 初始磁导率 μ_i 达到 6 960 和矫顽力 H_c 低至 2.82 A/m.

关键词: FeSiCP 合金; 非晶态合金; 软磁性能; 非晶形成能力

中图分类号: TG141 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.014

0 引言

Fe 基非晶态软磁材料用于变压器中替代传统的硅钢铁芯可使其空载铁损降低 70% 以上, 被世界自然保护基金组织确定为“一项很有希望防止环境温室效应的新技术”; 而且 Fe 基非晶合金的主要构成元素是过渡族金属和类金属, 其成本较低^[1-2]. 因此, 国际上有实力的重点研究机构竞相投入研究 Fe 基非晶合金, 然而, 我国是该种材料需求和实际使用份额最大的国家, 在此领域面临的重大课题之一就是研发出拥有独立知识产权、性能优异和成本低廉的新型 Fe 基非晶合金^[3-5]. 日本东北大学教授 Makino 根据 Inoue 的三条经验原则设计了高 Fe ($\geq 80\%$) 含量的 FeSiBPC 系软磁非晶合金, 此合金系的最大特点是具有高的 B_s ($\geq 1.6\text{T}$)^[6-7], 但是本合金系也存在一些明显缺点, 即 AFA 比较差以及带材较脆, 难以得到工业化应用. MetglasInc^[8] 研发的 $\text{Fe}_{81.7}\text{Si}_2\text{B}_{16}\text{C}_{0.3}$ 以及日立金属^[9] 研发的 $\text{Fe}_{82}\text{Si}_1\text{B}_{16.9}\text{C}_{0.1}$ 都具有高达 1.6 T 的 B_s , 但对生产工艺要求很高, 其关键工艺为: 在制带时向辊咀间隙处熔潭前辊面和熔潭吹送预定流速、压力和数量的 CO 或 CO_2 气体, 使薄带贴辊面内部距表面在纳米级尺度的范围内形成 C 浓度高的偏析层.

由此可知, 开发出满足实际工程要求, 即 B_s

在 1.30 T 以上、较高的 AFA 以及成分控制和生产工艺容易实现的 Fe 基非晶态软磁带材具有重要意义. 为此, 笔者设计开发了新型 FeSiCP 系非晶合金, 并研究了其磁性能和 AFA. 该合金系具有以下特点: 第一, 本合金属于高 P ($P=12\% \sim 14\%$) 系, P 含量的提高有利于提高铁基非晶态软磁材料的 μ_i ; 第二, 本合金所涉及成分 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 2) 为共晶或近共晶点, 共晶或近共晶成分点的合金, 有利于形成非晶态合金或有望制备成大块非晶; 第三, 本合金中不含 B 元素, 相对于 Makino 开发的 FeSiBPC 系合金, 具有组元少、熔炼工艺简单等特点; 第四, 本合金相对于 MetglasInc 研发的 $\text{Fe}_{81.7}\text{Si}_2\text{B}_{16}\text{C}_{0.3}$ 以及日立金属研发的 $\text{Fe}_{82}\text{Si}_1\text{B}_{16.9}\text{C}_{0.1}$ 合金而言, 具有 C 含量较易控制的特点, 特别是 C 含量在 3% 以上, 较上述微量 C 更易实现控制.

1 实验材料及方法

将质量分数为 99.99% 的 Fe、质量分数为 99.999% 的 Si、质量分数为 99.9% 且含 C 质量分数为 4.23% 的 FeC 合金和质量分数为 99.9% 且含 P 质量分数为 19.6% 的 FeP 合金, 按名义成分 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0\%, 1\%$ 和 2%) 配置实验原材料, 然后使用非自耗真空电弧炉在氩气保护下熔炼母合金, 熔炼及翻转反复进行 6 遍, 以保证所

收稿日期: 2014-09-13; 修订日期: 2014-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50871105)

作者简介: 李福山(1963-), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事非晶态合金的研究, E-mail: address: fsli@zzu.edu.cn.

炼母合金的均匀性,为后续制备高性能的非晶条带做准备。

将部分熔炼好的母合金置于石英管中,在氩气保护下,采用高频感应熔炼的方法将母合金熔化到高出液相温度 T_l 约 150 °C (实际熔化至约 1 200 °C),然后在石英管咀距铜辊表面距离 1 mm 及 0.03 ~ 0.05 MPa 喷射压差的条件下,将熔融的金属液喷射在高速旋转的铜辊表面,制备出厚度为 25 ~ 30 μm 和宽度为 1.2 ~ 1.5 mm 的条带。

采用 X 射线衍射仪(日本理学 Ultima IV diffractometer 型 X-ray diffraction,简称 XRD,选用 Cu-K α 衍射源 radiation source($\lambda = 1.540\ 56\text{\AA}$))对上述所制试样进行结构检测;借助透射电镜(JEM-2010 型 Transmission electron microscope,简称 TEM)对试样的微结构和形貌进行观察和分析;用振动样品磁强仪(Lake shore 7410 型 Vibrating sample magnetometer,简称 VSM)测试试样的 B_s ;用日本理研直流磁滞回线测量仪(BHS-40B-Hloop tracer)测试试样的 H_c ;用阻抗分析仪(美国安捷伦 Agilent4294A 型 Impedance Analyzer)测定试样的 μ_i ,用差示扫描量热法(NETZSCH STA 型 Differential scanning calorimetry,简称 DSC)来确定合金的玻璃转变温度 T_g 和初始晶化温度 T_x ,从而确定出其 $\Delta T = T_x - T_g$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 成分设计

在开发和研究新型 Fe 基非晶软磁合金过程中,首先要对合金组元的组成进行筛选,从而有望得到 AFA 高的非晶态合金,而目前确定合金组元主要是依据 Inoue 的 3 条经验原则:(1)合金由 3 个或 3 个以上的组元组成;(2)各个组元的原子半径尺寸差大于 12%;(3)各组元之间有较大的负混合焓。据研究发现,仅借助上述的 3 条经验原则很难对多元非晶合金进行定量的计算。而设计共晶成分的合金是提高合金 AFA 的有效途径,因为在靠近深共晶点的合金成分,通过熔体快淬处理,能够较容易地避开结晶区而得到非晶态合金^[10]。因此,笔者结合 Inoue 的 3 条经验原则和 Fe-C 相图中碳当量公式:

$$\text{CE}\% = \text{C}\% + 1/3(\text{Si} + \text{P})\% \quad (1)$$

将 CE% 限定在共晶点附近。其中,P 是有利于提高 Fe 基非晶软磁合金的 μ_i ,用 P 替代传统的 B 元素、开发高 P($\geq 12\%$) Fe 基非晶软磁合金是笔者的研究重点;Si 元素在 Fe 合金中是固溶化元

素,有利于非晶的形成,其原子比含量保持在 3%;当 $\text{C} < 3\%$ 时,该合金系将明显偏离共晶成分,并且从为了实际生产上可靠控制 C 的加入量,要求其含量 $\geq 3\%$ 。为此,笔者设计了 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0,1$ 和 2,%) Fe 基合金,其中,为了确保合金的 AFA,通过比例计算的 3 种成分均为共晶或近共晶成分。

2.2 结构检测与分析

对采用单辊法制备的厚度和宽度分别为 26 μm 和 1.3 mm 的 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0,1$ 和 2,%) 快淬条带进行 XRD 衍射检测,其结果如图 1 所示。本研究所涉及的合金系的 XRD 衍射图谱在 2θ 为 44.4° 时,呈现出了明显的漫散射峰,表明所制备的带材具有典型 Fe 基非晶态结构。为了进一步证实本合金的非晶结构特征,笔者借助 TEM 对 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 合金的微观结构进行了观察,由图 2 所示的 TEM 形貌相可知,该合金表现出了单一的均相结构,没有晶态合金特有的晶界;图 2 中的插图部分为该合金的选区衍射照片,衍射结果表现为宽的衍射晕环,进一步证实了该合金的非晶态结构,结合图 1 和图 2 可知,本实验所制备的快淬条带属于典型的非晶态带材,为后续进行热稳定性和磁学能检查奠定了基础。

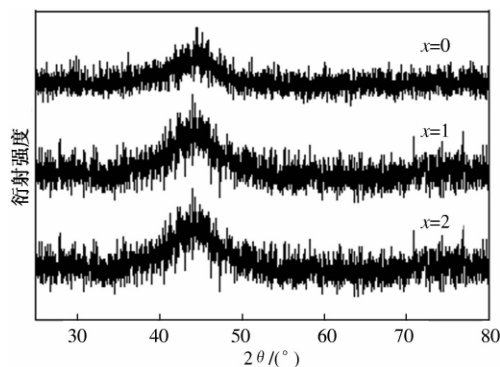


图 1 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0,1$ 和 2) 快淬条带的 XRD 衍射图谱
Fig. 1 XRD patterns of as-quenched $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0,1$ and 2) alloy

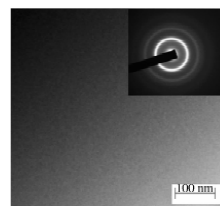


图 2 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 快淬条带的 TEM 形貌相
Fig. 2 The as-quenched TEM image of $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ alloy

2.3 热稳定性分析

非晶态材料属于亚稳态材料,在一定的温度下会向稳定态的晶态材料转变,一旦发生此转变,非晶态材料所具备的优异软磁性能将丧失,导致材料失效,同时,通常热稳定性高的材料一般都具有良好的 AFA,所以研究非晶态材料的热稳定对于工业应用显得尤为重要.因此,本研究利用 DSC 分析了所制备的 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 $2, \%$) 非晶条带的热稳定性,如图 3 所示,从曲线可以看出该合金系非晶带材的 T_g 和 T_x 随着合金成分变化而呈现一定规律性的变化,即随着元素 P 的原子比从 12% 增大到 14%, $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 $2, \%$) 非晶条带的 T_g 和 T_x 都移向低温,其原因为 P 属于低熔点易挥发元素,而根据金属学原理可知,一般低熔点元素的加入会导致合金的各个转变温度移向低温,同时还可以发现随着 P 元素含量的增加,合金的 ΔT 增大,而 ΔT 的增大,说明适当增加 P 元素的加入量能够增加 Fe 基非晶合金的热稳定性,而热稳定强的合金一般都具有较高的 AFA,其中 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 非晶合金的 ΔT 达到 42 K. 然而,宽的 ΔT 所导致高的热稳定强度未必一定意味着高的 AFA,为此,笔者有意将所开发的合金系成分设计在共晶点或近共晶点,可使熔体能快淬至较低的温度,避开液固转变区间(或越过极短的液固区间),从而使其在快淬过程中避开结晶区,明显提高无序熔体冻结为非晶态固体的能力^[10],所以,结合本研究实际获得的较宽的 ΔT ,表明该合金具有较高的 AFA.

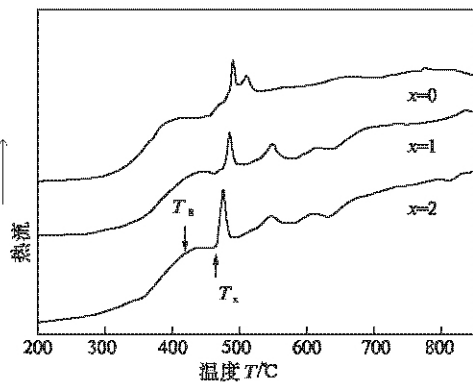


图 3 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 2) 非晶条带的 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curves of as-quenched $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ and 2) alloy

2.4 磁性能分析

高的 B_s 和 μ_i 及低的 H_c 是软磁材料具有优异软磁性能的保障,笔者对铸态下的 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 $2, \%$) 非晶条带进行 VSM 分析,

得到相应的磁滞回线. 图 4 为上述研究所得到的非晶稳定性和形成能力均最高的 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 非晶条带的 VSM 曲线. 从图 4 的磁滞回线中可以看出, $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 非晶合金具有典型的非晶态软磁合金的特征,磁滞回线的加磁部分和卸磁部分完全重合,没出现可观测的剩磁,其 B_s 达到 1.35 T.

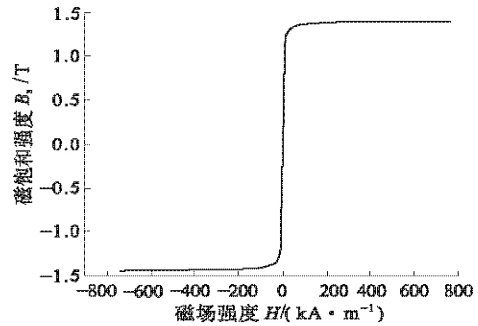


图 4 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 非晶合金的 VSM 磁滞回线

Fig. 4 Hysteresis loop of the $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ alloy measured by VSM

H_c 和 μ_i 是合金内应力和结构缺陷的敏感参数,而本研究所开发的合金系属于非晶态,有效避免了结构缺陷对其造成的影响,但是由于非晶合金所采用的快淬及激冷工艺必然导致所制备的带材中存在高的内应力,这将对非晶带材的软磁性能会产生明显不利影响,为了充分发挥本合金系的软磁性能,笔者对其进行了去应力退火处理,为保持非晶结构,去应力退火温度选为 T_g 前约 100 °C 即 345 °C,退火时间为 8 min. 退火之后测得非晶合金 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 $2, \%$) 的基本磁学性能如表 1 所示. 由表 1 数据可知, $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 $2, \%$) 非晶态合金的 B_s 和 μ_i 都随着 P 元素含量的增加而增加,而 H_c 随着 P 含量的增加而减小,其中 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_4\text{P}_{13}$ 非晶态合金的 B_s 为 1.35 T, μ_i 为 6 960 和 H_c 为 2.82 A/m,由此可知,适量的 P 元素含量有助于增加本研究所涉及的 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 $2, \%$) 合金系的 B_s 、 μ_i , 同时降低 H_c .

表 1 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ 和 2) 非晶合金的磁性能参数

Tab. 1 Magnetic properties of $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ and 2) amorphous ribbons

| 合金成分 | B_s / T | μ_i / ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$) | H_c / ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) |
|--|-----------|--|--|
| $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_5\text{P}_{12}$ | 1.28 | 6 385 | 5.35 |
| $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_4\text{P}_{13}$ | 1.29 | 6 576 | 4.01 |
| $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ | 1.35 | 6 960 | 2.82 |

3 结论

(1) 本研究所设计的共晶或近共晶的 4 组元 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0\%, 1\%, 2\%$) 合金系利用熔体快淬法都能够制备成非晶条带, 同时, 其 C 含量都在 3% 以上, 成分较易控制, 对实际工业生产中的制备工艺要求相对宽松。

(2) 随着 P 元素含量的增加, $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0\%, 1\%, 2\%$) 非晶态合金的 T_g 和 T_x 度移向低温, 而 ΔT 随着 P 含量的增加而增加, 其中 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 非晶合金的过冷度 ΔT 达到 42 K, 为本研究所设计的合金系中热稳性和形成能力最佳的成分点。

(3) 通过对 3 种非晶合金的磁性能分析表明, 每种非晶合金都表现出了优异的软磁性能, 其 B_s 分别为 1.28, 1.29 和 1.35 T, 而在去应力退火之后, $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ 非晶合金的 μ_i 达到 6 960 和 H_c 低至 2.82 A/m, 为本研究所涉及的合金系中性能最高的成分点。

参考文献:

- [1] LI Fu-shan, ZhANG Tao, GUAN Shao-kang, et al. Crystallization kinetics and induced magnetic properties of bulk (Fe, Co)-Zr-Nd-B metallic glass [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2004, 14(5): 840-845.
- [2] 李福山. Fe 基软磁非晶态合金的研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002, 23(4): 31-33.
- [3] LI Fu-shan, ZhANG Tao, GUAN Shao-kang, et al. A novel dual-amorphous-phased bulk metallic glass with soft magnetic properties [J]. Journal of applied physics, 2005, 100(4): 1453-1457.
- [4] DONG Shu-jian, SONG Bo, ZHANG Xiao-feng, et al. Fabrication of FeSiB magnetic coatings with improved saturation magnetization by plasma spray and dry-ice blasting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 584: 254-260.
- [5] LI Fu-shan, SHEN Bao-long, MAKINO A, et al. Excellent soft-magnetic properties of (Fe, Co)-Mo-P-C-B-Si bulk glassy alloys with ductile deformation behavior [J]. applied Physics letters, 2007, 91: 234101-1-234101-3.
- [6] MAKINO A. Soft magnetic Fe-Si-B-P-C bulk metallic glasses without any glass-forming metal elements [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 483: 616-619.
- [7] YOSHIDA S, MIZUSHIMA T, MAKINO A, et al. Local structure changes on annealing in an Fe-Si-B-P bulk metallic glass [J]. Intermetallics, 2009, 17: 186-189.
- [8] 日立金属株式会社. Fe 基非晶态合金带: 中国专利, CN1721563 [P], 2006-1-18.
- [9] 梅特格拉斯公司. 铁基高饱和感应非晶态合金: 中国专利, CN101167145A [P], 2008-4-23.
- [10] 卢博斯基 F E. 非晶态金属合金 [M]. 柯成, 唐与湛, 罗阳, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 12-20.

The Research of FeSiCP Soft Magnetic Amorphous Alloy

LI Fu-shan, LI Xing-rui, LI Yu-luo, JIAN Cheng-zhi

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Fe-based amorphous alloys with excellent soft magnetic properties and high amorphous forming ability have been a hot research point due to its wide application prospect. In this paper, the amorphous formation ability (AFA), thermal stability and magnetic properties have been studied for the deliberately designed $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_{5-x}\text{P}_{12+x}$ ($x=0, 1$ and 2) alloy system with eutectic composition. The results show that the amorphous alloy of $\text{Fe}_{80}\text{Si}_3\text{C}_3\text{P}_{14}$ has high formation ability and soft magnetic properties. The saturation magnetic magnetization (B_s) reaches 1.35 T, the initial permeability μ_i reaches 6 960, the coercivity H_c low to 2.82 A/m and the supercooled liquid region ΔT reaches to 42K.

Key words: FeSiCP alloy; amorphous alloy; soft magnetic properties; amorphous formation ability

文章编号: 1671-6833(2015)01-0061-05

张弦梁结构张拉力确定方法研究

李静斌¹, 洪彩玲¹, 张哲¹, 李素洁²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 濮阳职业技术学院 建筑工程系, 河南 濮阳 457000)

摘 要: 张弦梁结构属于预应力钢结构的一种, 在进行拉索预应力导入过程中必须保证施工过程的安全性和完工时的受力状态满足设计要求. 因此, 必须对张拉索进行张拉过程的索力优化分析和研究, 保证对整个施工过程的安全控制. 以双向张弦梁为例对比了 3 种优化方法对张弦梁结构的适用性. 经计算分析, 得出了张力补偿法为适用于张弦结构张拉力确定的最优方法. 结合鹤壁市体育馆预应力空间桁架钢屋盖结构, 采用张力补偿法进行了该结构施工阶段分析, 得出了高强钢索的内力发展变化规律, 验证了张力补偿法在实际大型预应力空间钢结构中的适用性.

关键词: 空间结构; 张弦梁; 张拉力; 张拉顺序; 索力优化

中图分类号: TU394 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.015

0 引言

张弦梁结构(简称 BSS, Beam String Structure)主要由刚性梁、柔性下弦及撑杆构成^[1], 属于典型的预应力钢结构. 刚性梁在整个结构体系中是刚性的压弯构件, 可由多种形式构成, 例如最简单的直线形梁、拱形梁和桁架结构等; 柔性下弦多采用高强度钢索或高强度钢棒构成; 撑杆多采用受压性能较好的构件, 如钢管等. 张弦梁结构是由刚性构件和柔性拉索组成的自平衡结构体系的独特受力模式, 直接导致其与普通的钢结构在施工控制和有限元分析的不同, 随着对柔性索张拉力的导入, 结构体系也随之变化, 并且不同施工方法和施工顺序, 都会对结构最终受力状态产生影响. 因此, 对于拉索张拉力的控制和张拉批次的划分显得尤为重要. 笔者结合鹤壁市体育馆预应力空间桁架钢屋盖结构, 采用张力补偿法进行了该结构施工阶段分析, 验证了张力补偿法在实际大型预应力空间钢结构中的适用性.

1 索力优化方法

索力优化可根据结构的具体形式选择不同的优化方法, 在预应力钢结构中已相对成熟的索力优化方法有从结构变形控制的形变控制法^[2]、有从施

工顺序考虑的迭代优化法^[3]和倒退分析法^[4]等, 还有从计算精度要求控制的改进遗传算法^[5]、改进倒退分析法和修正循环迭代法^[6]等. 然而并不是所有的预应力结构都能采用同一种方法. 针对张弦梁结构, 简单验证逆分析^[7]、位移补偿法^[8]和张力补偿法^[9]对其索力优化的适用性.

1.1 双向张弦梁有限元模型

一双向张弦梁结构, 上弦为工字形钢梁, 下弦为通过长 2 m、高 1 m 的撑杆相连的高强钢索, 结构每个方向跨度为 20 m. 上弦截面特性 HN800 mm × 300 mm × 14 mm × 26 mm, 撑杆采用钢管 $\Phi 32$ mm × 3 mm, 钢材均为 Q345B; 下弦是直径为 28 mm 的圆形截面高强钢索, 抗拉强度为 1 670 MPa. 每跨张弦梁的一端为固定铰支座, 另一端为滑动铰支座, 每跨张弦梁的构造相同. 算例结构简图、节点构造连接及 MIDAS/Civil 中的有限元模型见图 1 ~ 图 3 所示.

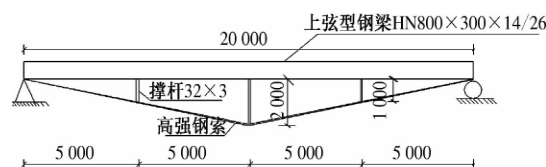


图 1 双向张弦梁结构图

Fig. 1 Two-way beam string structure

收稿日期: 2014-09-07; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478437)

作者简介: 李静斌(1973-), 男, 天津静海人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事结构计算分析方面的研究, E-mail: lijingbin@zzu.edu.cn.

1.2 逆分析法

按文献[7]方法对双向张弦梁进行索力优化分析. 该结构的张弦预应力在使用状态时的内力均为 150.7 kN, 每根型钢梁下均有一根张拉索, 共 4 根高强钢索, 划分为 4 批, 每批索编号见图 3. 正常的施工顺序是从 1 批张拉至 4 批. 在逆分析求张拉索的内力时, 逆着施工顺序进行拉索的模拟拆除. 拆除的顺序 4、3、2, 在拆除索的过程中记录剩余每根索的内力, 最终可得正常施工顺序时所应施加的预应力, 计算结果见表 1. 表中 $N_1 \sim N_4$ 代表各拉索内力.

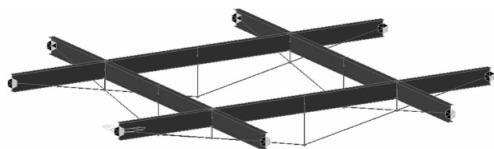


图 2 双向张弦梁体系算例有限元模型

Fig. 2 The FEM of two-way beam string structure

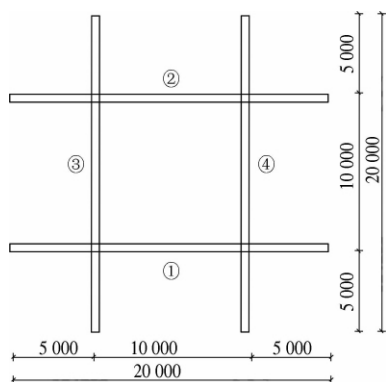


图 3 结构俯视图及拉索编号

Fig. 3 The overlooking of the model and cable position

表 1 双向张弦梁逆分析结果

Tab. 1 Results of two-way beam string structure inverse analysis

| 步骤 | N_4 | N_3 | N_2 | N_1 |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0 | 150.7 | 150.7 | 150.7 | 150.7 |
| 1 | 0 | 155.9 | 157.9 | 157.9 |
| 2 | 0 | 0 | 165.7 | 165.7 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 172.3 |

通过逆分析得出每根索应施加的预应力见表 1 对角线黑体数字所示. 为验证索预应力是否满足实际施工时的结构内力要求, 将逆分析得出的预应力值按照正常的施工顺序加载到相应的张拉索上, 验证完工后结构的张拉索内力是否为 150.7 kN. 经计算得到每根索的拉力如图 4 所示.

图 4 显示计算的结果并不等于结构设计状态的 150.7 kN, 最大误差约为 12.4%. 在文献中是

以柔性的张力结构为例进行的逆分析索力优化, 在整个优化过程中, 索力的增减与杆件刚度的增减是一致的. 这是因为柔性结构只有在施加预应力时结构才具有一定的刚度, 一旦将预应力减小或撤除, 则结构的刚度也会随之变化或消失. 但在张弦梁结构中, 结构的逆序只是在张拉索的过程中进行逆序, 此刻上部的刚性结构的刚度和内力并没有随着索力的增减而增减, 即结构的刚度变化只是索力部分的变化, 上部刚性梁的刚度并没有发生变化, 导致所谓的逆序并不是严格意义上的施工全过程的逆序. 故用逆分析法得出的索力优化结果与设计值存在一定的偏差.

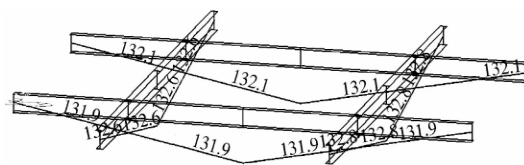


图 4 逆分析所得索力验证结果

Fig. 4 The verification results of inverse analysis

1.3 位移补偿法

位移补偿法是从变形上控制结构的张拉力, 为保证张拉完毕后结构几何位形满足实际要求, 应从控制节点位移着手. 按文献[8], 第 1 次循环计算时以结构所有控制节点位移坐标的设计值作为初始循环值; 然后张拉每批索, 使控制节点的位移值等于设计值, 并记录其他控制节点的位移值, 完成第 1 次循环计算. 这时, 每个控制节点的位移与设计值之间存在一个差值, 将该差值与设计值相加, 作为第 2 次循环计算的初始值, 依次循环计算, 直至各个控制节点在计算完成后的位移变化量接近或等于设计值. 并记录下达到位移设计值时各批索的张拉力大小, 即得出张拉高强钢索时的索力最优值.

结构的设计状态控制位移以结构撑杆处的最低点为控制位移, 如图 5 中点 18, 26, 20, 27 控制点的设计位移均为 11.371 mm. 进行第 1 次循环计算, 使张拉钢索时的控制点位移在张拉相应批次时等于其设计状态位移, 同时记录其他批次, 此时结构的控制点位移如表 2 所示.

该算例 1 次循环计算即可得到计算结果. 应注意, 对于简单结构采用该方法可获得精确结果, 且循环计算的次数也不多. 同时对于杂交的张弦结构, 结构的刚度由张拉钢索和上弦刚性构件共同组成, 在进行节点位移控制时, 需要保证结构的位移一致性的变化, 即下弦控制节点处与上弦刚

性梁连接处的位移变化一致,在进行结构的有限元建模时对于单元节点连接处的模拟要符合结构的受力要求。

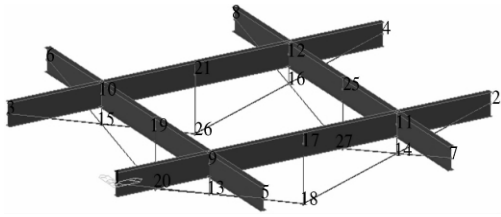


图 5 位移补偿法节点编号

Fig.5 The node number in the displacement compensation analysis method

表 2 第 1 次循环计算节点位移

Tab.2 The node displacement in step 1 cycle

| 张拉 批次 | 节点编号 | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| | 18 | 26 | 20 | 27 |
| 1 | 11.371 | -0.423 | 1.728 | 1.607 |
| 2 | 6.805 | 11.371 | 4.287 | 3.987 |
| 3 | 9.024 | 9.024 | 11.371 | 4.22 |
| 4 | 11.371 | 11.371 | 11.371 | 11.371 |

1.4 张力补偿法

张力补偿法的思想与位移补偿法的思想相似,也是进行循环的计算.但比后者更为直观.该

方法是直接以力的变化作为控制量,不需要再以位移作为基本量进行转化,具体原理可参考文献[9].结构成形后每根索所要达到的控制值作为首次计算的基本数据,首先对结构中的高强钢索按照实际的施工工序进行分批,然后模拟施工过程中边界条件随施工的进度发展.进行各批索的张拉,张拉完毕后,记录该过程完成后每根索的内力.此时各索内力与设计值之间存在一个差值,比较该差值与设计值之间的百分比,验算是否满足工程精度要求.若不满足,将该差值叠加到初始值上进行下轮计算,直到计算所得结果满足设计值要求。

双向张弦梁索力设计值为每根索 150.7 kN,计算过程记录如表 3 所示.表 3 中计算结果显示,当进行第 3 次循环计算以后,结构的内力值与设计值的差值百分比为 0.33%,满足工程的精度要求.那么第 3 次循环计算的初始值 162.2 kN 就是结构在进行预应力输入过程中的张拉力控制值.用张力补偿法最大的好处是优化过程也是内力控制的过程.因为在最后一步满足工程精度要求的结果,也就是优化过程的最后一次循环计算,跟踪这个过程的索的内力变化,防止在张拉过程中索力过大,造成结构的失稳破坏或其他形式的破坏。

表 3 张力补偿法计算过程与结果

Tab.3 The calculating process and results of tensile force compensation analysis method

| 索批次 | 1 次 | | | 2 次 | | | 3 次 | | | 差值百分比/% |
|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-----|-------|-------|-----|---------|
| | 初始值 | 循环 | 差值 | 初始值 | 循环 | 差值 | 初始值 | 循环 | 差值 | |
| 第 1 批 | 150.7 | 141.4 | 9.3 | 160 | 148.5 | 2.2 | 162.2 | 150.2 | 0.5 | 0.33 |
| 第 2 批 | 150.7 | 141.4 | 9.3 | 160 | 148.5 | 2.2 | 162.2 | 150.2 | 0.5 | 0.33 |
| 第 3 批 | 150.7 | 141.4 | 9.3 | 160 | 148.5 | 2.2 | 162.2 | 150.2 | 0.5 | 0.33 |
| 第 4 批 | 150.7 | 141.4 | 9.3 | 160 | 148.5 | 2.2 | 162.2 | 150.2 | 0.5 | 0.33 |

1.5 索力优化方法总结

通过 3 种索力优化方法对双向张弦梁进行索力优化分析,得到逆分析法所得的张拉控制值偏小,与设计值的最大偏差达到 12%;位移补偿法得到的结果与设计值一致,但是需要特别注意的是,应用该方法对于简单的结构可以很快地得到优化结果,对于复杂的杂交空间结构,需要掌握的控制点位移较多,需要进行迭代的次数就会增多,因此要慎重选择该方法;张力补偿法思路简单,从张拉力角度直接进行优化分析,需要迭代的次数不多,由于笔者所举例子拉索数量少,各索之间张拉力的影响不明显,当拉索数量较多时,张力补偿法在优化过程中还可充分考虑张拉过程中拉索之

间内力的相互影响,适合张弦结构的索力优化。

2 工程实例验证

2.1 工程概况

鹤壁市体育馆位于鹤壁市朝歌路与兴鹤大街向北 200 m 路西,造型呈“马蹄形”.基础为人工挖孔桩.结构形式为钢筋混凝土框架、劲性混凝土及钢结构为一体的混合结构,屋面为预应力空间管桁架,屋面板为铝镁锰板,外墙由 153 只铝单板制成的千纸鹤组成.建筑面积 16 666 m²,其钢屋盖结构图如图 6 所示。

2.2 有限元建模

采用 MIDAS/Civil 有限元软件建立鹤壁市体

育馆屋盖钢结构有限元计算模型,在进行钢索张拉过程中,实际张拉时,屋盖周边支撑情况是环向方向受到约束,径向方向在一定范围内可进行滑动,这也为施工完成后结构的索力在温度等其他效应影响产生变形时有一个伸缩变化的范围. 为了更加准确地定义适合该变化的边界条件,应对端部的约束位置进行单元局部坐标的定义,以便对节点进行支座的约束. 另外,对于中心凸起桁架下的胎架支撑的模拟采用简单的一般支撑,为中心刚性环的吊装提供临时支撑.

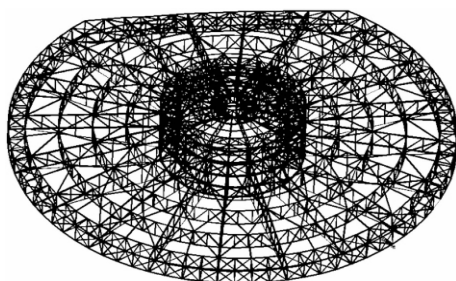


图6 鹤壁市体育馆钢屋盖结构

Fig.6 Steel roof structure of Hebi City stadium

根据工程实际,将屋盖钢结构分为管桁架、撑杆和拉索、第1批索、第2批索、第3批索、第4批索、第5批索7个结构单元组;将边界划分为边支座、中心支撑2个边界组;荷载组划分为自重、拉索力20% 1批、拉索力20% 2批、拉索力20% 3批、拉索力20% 4批、拉索力20% 5批、拉索力100% 1批、拉索力100% 2批、拉索力100% 3批、拉索力100% 4批、拉索力100% 5批共11个荷载组. 根据在施工中的预应力导入顺序,将整个过程划分为12个阶段.

2.3 施工阶段的索力张拉优化分析

在进行钢索的张拉过程中要实时监控每根索的内力变化,防止某根索或某批索的张拉力过大,超过钢索的承载极限. 施工阶段的前6个阶段是结构在边支撑和中心支撑上对结构进行设计值的20%进行初张拉,在这个过程中索的内力能保证处于设计值允许的范围内,但是在结构卸载即中心支撑撤出后的钢索拉力和上弦管桁架的内力和应力也应控制在材料允许的范围内.

由于在张拉20%初张力是在胎架上进行张拉,有中心支撑的作用,使得在张拉过程中不会出现某根索的超张拉,也不会出现某根索的应力松弛现象. 因此,拉索内力控制的核心关键在中心支撑撤除后,再进行100%张拉时对各个索在张拉过程中的索力变化,要保证避免出现较大的超张

拉和应力松弛现象. 张拉过程的仿真分析结果如图7所示,图中给出了采用张力补偿法分析得到的第5批4根高强钢索随施工阶段进展的内力变化图. 图7中横坐标CS1~CS12代表预应力导入的12的施工阶段,纵坐标代表索力. 其他各批次张拉的高强钢索的内力变化规律与其相似,限于篇幅,不再一一给出.

从钢索内力随施工阶段的变化图可知,每根索的内力基本控制在设计要求的范围内. 另外还可看到在进行张拉的过程中,每批索的内力都在随着施工阶段的推进受到其他索的内力影响,并且对于第一批索的张拉要特别注意,从内力变化趋势图中可以看到,基本是呈上升趋势. 所以在施工时一定要把握好第一批索的内力控制,防止在后续张拉索的进程中超张拉过度.

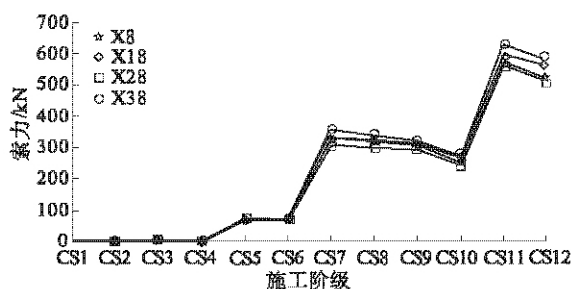


图7 第5批高强钢索随施工阶段的内力变化图

Fig.7 The internal force variation of the fifth high strength steel wire ropes in construction

3 结论

通过采用张弦梁简单结构选定索力优化方法,并通过鹤壁市体育馆预应力空间钢桁架结构的施工阶段分析,可得出以下结论.

(1) 逆分析法对于上下弦刚度相差较大的张弦结构所得到的优化结果差异超出了工程精度的要求,因此在实际运用中要充分考虑各方面因素对优化结果的影响,保证优化结果的准确性和精确度满足要求;

(2) 位移补偿法对张弦梁结构进行索力优化可以得到精确的结果,但是对于复杂的结构或拉索数量较多的结构,需要计算的控制点数量多,则需要更多次的循环迭代计算,因此,在采用该方法时需要注意这方面的计算要求,同时还要注意节点位移变化和力变化之间的关系是否可以直接转换,保证所得结果的有效性;

(3) 张力补偿法思路简单,对拉索数量较多的张弦梁结构,可充分考虑张拉过程中索力之间

的相互影响,需要迭代的次数不多,体现了该方法对于张弦梁结构的普遍适用性.通过张力补偿法在大型钢结构工程中的计算分析验证,证明该方法的适用性和有效性.

参考文献:

- [1] 陆赐麟.现代预应力钢结构(修订版)[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [2] 刘晟,薛伟晨.大跨度预应力张弦梁施工控制技术[J].建筑结构,2009,39(5):49-53.
- [3] 李传夫,李术才.迭代优化算法在大跨拱桥线性控制中的应用[J].山东大学学报:工学版,2008,38(3):23-27.
- [4] 吕晶,郭彦林.劲柔索张拉穹顶结构施工仿真分析[J].施工技术,2007,36(3):18-20.
- [5] FREDRICKSON H, JOHANSEN T, KLARBRING A. Topology optimization of frame structures with flexible joints [J]. Struct Multidisc Optim, 2003, 25(3): 199-214.
- [6] 吕方宏,沈祖炎.修正的循环迭代法与控制索原长法结合进行杂交空间结构施工控制[J].建筑结构学报,2003,26(3):92-97.
- [7] 李波,杨庆山.张力结构的施工计算[J].北京交通大学学报,2007,31(1):93-96.
- [8] 张国发,董石麟.位移补偿算法在结构索力调整中的应用[J].建筑结构学报,2008,29(2):39-34.
- [9] 卓新,石川浩一郎.张力补偿算法在预应力空间网格结构张拉施工中的应用[J].土木工程学报,2004,37(4):38-40.
- [10] 洪彩玲.大跨度预应力空间钢结构施工过程分析与索力优化研究[D].郑州:郑州大学土木工程学院,2013.

The Inquiry of Tension Method for the Beam String Structure

LI Jing-bin¹, HONG Cai-ling¹, ZHANG Zhe¹, LI Su-jie²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Building Engineering, Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China)

Abstract: The beam string structure belongs to a kind of pre-stressed steel structure, in the pre-stressed import process the cable must be ensured the safety and completion of the construction process of stress state must meet the design requirements. Therefore, the tension cable tensioning process cable force optimization analysis and research is useful to guarantee for the safety of the construction process control. Two-way beam string is used as an example, to compare the three kinds of the applicability of beam string structure optimization method. Through calculation and analysis, it is concluded that the tension compensation method is suitable for a optimal method to determine the tension of string structure. Combination of Hebi city stadium pre-stressed steel roof space truss structure, the tension compensation method is used for the analysis of structure construction stage, it is concluded that the development of internal force variation law of high strength steel wire rope, tension compensation method is verified in actual large the applicability of the pre-stressed space steel structure.

Key words: space structure; beam string structure; tension; tensioning sequence; cable force optimization

文章编号: 1671-6833(2015)01-0066-04

混凝土开裂部位氯离子渗透试验研究

唐先习¹, 尹月西¹, 国伟²

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘 要: 为研究混凝土裂缝宽度和深度对裂缝表面氯离子渗透的影响, 制作了带裂缝的钢筋混凝土试件并进行了氯离子渗透研究. 采用氯离子溶液浸泡时未开裂的试件、开裂试件的横断面进行研究. 对于开裂的试件, 通过对比裂缝的宽度、深度和裂缝表面氯离子渗透情况, 并与未开裂试件断面氯离子渗透情况进行对比分析. 研究表明, 裂缝宽度对于裂缝表面氯离子渗透几乎没有影响, 表面氯离子渗透主要与裂缝深度有关. 对混凝土开裂部位的耐久性研究方法提出了新的观点, 对混凝土结构耐久性的研究具有重要的参考价值.

关键词: 混凝土; 裂缝宽度与深度; 氯离子渗透; 试验研究

中图分类号: TU502

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.016

0 引言

钢筋混凝土是目前土木工程中应用最广泛的材料, 因此, 钢筋混凝土的耐久性是非常重要的. 钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构耐久性下降的最主要的原因, 在广大的含有氯离子的地区, 氯离子的侵蚀则是导致钢筋锈蚀的最主要因素. 由于混凝土裂缝是混凝土结构中普遍存在的现象, 氯离子在混凝土开裂部位的渗透性能会大大增加, 因此, 研究混凝土开裂部位氯离子的渗透情况则显得尤为重要.

对于混凝土开裂部位氯离子的渗透规律, 研究内容相对较少. 张士萍、金祖权等^[1-2]通过对混凝土收缩裂缝部位氯离子渗透研究指出, 收缩裂缝的存在加强了氯离子在混凝土中的传输, 并且氯离子的扩散性能随着裂缝宽度的增加而增加. 张士萍等^[3]研究了荷载作用下裂缝对氯离子渗透的影响, 同样得出氯离子扩散性能随着裂缝宽度的增加而增加的结论. 万小梅、JIANG Yu-chuan等^[4-5]通过试验研究, 得出了氯离子扩散系数随着荷载的增加先减小后增加的结论, 实际上是混凝土内的微裂缝在荷载作用下的开展规律对氯离子扩散系数的影响. 李炜等^[6]则研究了疲劳荷载对混凝土中氯离子扩散系数的影响, 其实质仍是

疲劳荷载造成的混凝土裂缝对氯离子扩散系数的影响. MU Song 等^[7]通过研究发现, 随着裂缝宽度的扩大, 氯离子的扩散系数不断增加. YU Bo 等^[8]对开裂混凝土边界条件和裂缝内的氯离子扩散系数进行了分析, 并建立了相关的氯离子扩散的时间依存模型.

以上对于混凝土裂缝部位氯离子渗透规律的影响, 取的裂缝因素往往只是裂缝的宽度, 并未涉及到裂缝的深度, 没有将裂缝的宽度和深度综合起来考虑裂缝对氯离子渗透的影响. 因此, 笔者主要针对这一方面, 研究混凝土裂缝的宽度和深度对氯离子渗透的综合影响.

1 试验目的与概况

1.1 试验目的

验证混凝土开裂后, 在混凝土裂缝表面氯离子渗透情况与裂缝宽度和深度之间的关系, 为混凝土结构在氯离子环境下耐久性能的研究奠定基础.

1.2 试验概况

1.2.1 试件

本次试验的裂缝是在弯矩作用下钢筋混凝土试件产生的裂缝, 试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm, 在受拉混凝土一侧预埋直径为 6 mm 的钢筋, 见图 1、图 2. 经研究可知, 试件内部的裂

收稿日期: 2014-08-01; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168030)

作者简介: 唐先习(1972-), 男, 山东济宁人, 兰州理工大学副教授, 博士, 主要从事大跨度桥梁施工与桥梁耐久性等方面的研究, E-mail: 695913483@qq.com.

缝宽度和深度可由试件两侧面的裂缝宽度和深度近似按直线内插法推导. 在本试验过程中,选择已制造出裂缝的混凝土试件进行干湿循环,结合试验室的环境条件,一个干湿循环采用浸泡48 h、晾干48 h的方式. 氯化钠溶液采用质量分数为3%和5%两种浓度,对于质量分数为3%的氯化钠溶液,试件浸泡的循环次数分为10,20,30,40和50个循环等情况;同时,对于质量分数为5%的氯化钠溶液,仅做了30个干湿循环的浸泡,以便与质量分数为3%的氯化钠溶液的试验结果进行对比.

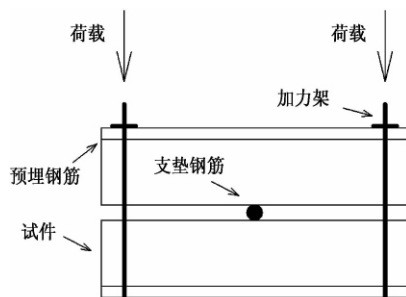


图1 构件加载示意图

Fig.1 Component Load Diagram



图2 施加载荷后的构件

Fig.2 Components under Loading

1.2.2 试验方法

对于混凝土内氯离子含量的检测,目前主要有3种方法:硝酸银喷涂法、电位法和化学滴定法. 其中电位法和化学滴定法均需将混凝土内氯离子含量测试部位的混凝土取下磨碎,然后溶于溶液中,不适用于本试验测定混凝土裂缝表面氯离子含量,因此,本试验采用硝酸银喷涂法^[9].

在试验过程中,由于混凝土裂缝断面表面不平整,加上氯化银在裂缝表面的颜色显现不明显,所以仅涂硝酸银很难测定裂缝表面氯离子的渗透范围. 在这种情况下,采用铬酸钾和硝酸银配合使用的办法. 在试件表面先滴铬酸钾指示剂,等裂缝表面变干后再滴硝酸银溶液. 则裂缝表面先出现砖红色,即为铬酸银. 由于氯离子与银离子反应的能力要大于铬酸根离子,因此,裂缝表面慢慢出现白色,即为新生成的氯化银,用这种方法确定裂缝

内氯离子渗透范围,试验过程见图3、图4.



图3 试件断面上滴加铬酸钾

Fig.3 Add potassium chromate on the sections



图4 铬酸钾变干后滴加硝酸银

Fig.4 Add silver nitrate after potassium chromate dry

在试验过程中,采用质量分数2.5%的铬酸钾指示剂,和0.1 mol/L硝酸银溶液. 当试件浸泡到试验规定的次数后,将试件的加力架拆下,先用压力机将试件从裂缝部位压开,然后将钢筋截断. 通过在裂缝断面上滴加铬酸钾和硝酸银的方法,确定裂缝表面氯离子的渗透情况.

2 试验结果与分析

结合试验目的,选择有代表性的试件的混凝土裂缝表面氯离子渗透情况进行分析,以验证混凝土裂缝的宽度和深度对氯离子渗透的影响. 试件横断面氯化银析出情况见图5~图8.

2.1 采用质量分数为3%氯化钠溶液10个干湿循环

试件进行了10个干湿循环. 这一试件两侧的裂缝,一侧长度为7 cm,试件顶部裂缝最宽处为1.80 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.08 mm;另一侧长度为8 cm,试件顶部裂缝最宽处为1.90 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.06 mm. 裂缝断面处氯化银析出的情况见图5,从图上可以看出,在裂缝开裂区域,断面上有白色的氯化银析出,而在混凝土尚未开裂的区域,约1.3 cm宽的区域内,未有白色的氯化银析出,断面颜色呈灰

色. 这主要与干湿循环时间较短, 氯离子向未开裂混凝土内部渗透较浅有关.

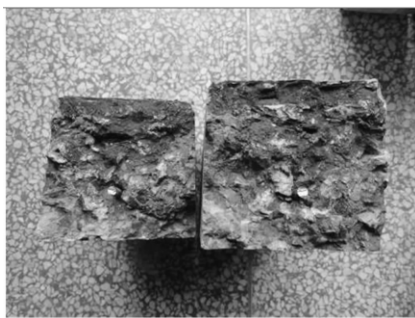


图5 采用质量分数为3%氯化钠溶液10个干湿循环的试件

Fig.5 Specimens after 10 dry-wet circulations of 3% sodium chloride solution

2.2 采用质量分数为3%氯化钠溶液30个干湿循环

试件进行了30个干湿循环, 这一试件两侧的裂缝, 一侧长度为8 cm, 试件顶部裂缝最宽处为1.07 mm, 且为分叉裂缝, 最窄处裂缝尖端部位宽度为0.04 mm; 另一侧长度为8 cm, 试件顶部裂缝最宽处为1.04 mm, 最窄处裂缝尖端部位宽度为0.25 mm, 从裂缝尖端到试件底面, 发生了起皮破坏, 无法测出裂缝的宽度, 实际上相当于这一侧的裂缝近似贯通. 裂缝断面处氯化银析出的情况见图6, 从图上可以看出, 横断面上开裂部分氯化银的析出现象较为明显. 而在混凝土尚未开裂的区域, 即图上标定的长约5 cm, 宽约1.5 cm的三角区域, 未有白色的氯化银析出, 断面颜色呈灰色. 但三角区域接近试件表面的边部, 已出现氯化银析出现象, 说明氯离子已渗入试件表面, 这与干湿循环时间较长有一定的关系.



图6 采用质量分数为3%氯化钠溶液30个干湿循环的试件

Fig.6 Specimens after 30 dry-wet circulations of 3% sodium chloride solution

2.3 采用质量分数为3%氯化钠溶液50个干湿循环

试件进行了50个干湿循环. 裂缝断面处氯化

银析出的情况见图7. 在图上的4个试件中, 从左向右, 第一个试件为干湿循环50次的试件, 这一试件两侧的裂缝长度均为8 cm, 试件顶部裂缝最宽处分别为0.35 mm、0.38 mm, 最窄处裂缝尖端部位宽度为0.02 mm、0.03 mm. 第二个试件为对比试件, 这一试件一直浸泡, 未进行干湿循环, 浸泡时间与其他试件的50个循环总时间相同. 第二个试件两侧的裂缝, 一侧长度为9 cm, 试件顶部裂缝最宽处为0.73 mm, 最窄处裂缝尖端部位宽度为0.04 mm; 另一侧长度为8 cm, 试件顶部裂缝最宽处为0.63 mm, 最窄处裂缝尖端部位宽度为0.01 mm. 两个试件均在裂缝处压断. 第3个、第4个试件断面处非原来的裂缝处. 由断面处的氯化银析出现象可以看出, 对于左侧的两个试件, 表面析出氯化银较多, 并且整个断面上都已经含有氯离子. 这说明氯离子不但渗透到裂缝端部, 而且沿裂缝端部向未开裂的混凝土渗透, 其渗透区域与试件未开裂表面的氯离子渗透区域已经连接上, 这与50次干湿循环所需的时间更长有关. 因此, 对于左边两个试件来说, 仅从裂缝表面, 未测出对比试件与干湿循环试件之间的氯离子规律渗透差别. 对于右侧的两个试件, 周边出现部分氯化银析出现象, 中间部位则没有氯化银析出, 这说明中间部位未渗入氯离子.



图7 采用质量分数为3%氯化钠溶液50个干湿循环的试件

Fig.7 Specimens after 50 dry-wet circulations of 3% sodium chloride solution

2.4 采用质量分数为5%氯化钠溶液30个干湿循环

试件进行了30个干湿循环, 这一试件两侧的裂缝, 一侧长度为8 cm, 试件顶部裂缝最宽处为0.80 mm, 最窄处裂缝尖端部位宽度为0.01 mm; 另一侧长度为7 cm, 试件顶部裂缝最宽处为0.7 mm, 最窄处裂缝尖端部位宽度为0.01 mm. 裂缝断面处氯化银析出的情况见图8, 从图上可以看出, 在裂缝开裂区域, 断面上有白色的氯化银析出, 而在混凝土尚未开裂的区域, 也有少量的氯化

银析出,这说明氯离子已经渗透到了整个截面,这与氯化钠溶液中氯离子含量较高有一定的关系。



图8 采用质量分数为5%氯化钠溶液30个干湿循环的试件

Fig.8 Specimens after 10 dry-wet circulations of 5% sodium chloride solution

3 结论

通过对以上试件的侧面裂缝长度与氯离子渗透区域进行对比分析可知,对于混凝土的裂缝部位,裂缝开裂表面氯离子均已渗透到。由此可以看出,裂缝表面氯离子的侵蚀与裂缝宽度关系不大,而与裂缝深度密切相关。因此,仅从混凝土裂缝在结构表面的宽度来判断裂缝内部其氯离子渗透情况是不合适的;从混凝土结构耐久性研究方面而言,不应仅仅限定不同环境条件下的裂缝表面宽度值,而应考虑裂缝宽度和深度对氯离子渗透的综合影响。

笔者仅研究了不同裂缝的表面氯离子渗透情况,而未对裂缝的不同宽度和深度处垂直于裂缝表面方向的氯离子渗透深度展开研究,今后的研究应该从这些方面进行加强。

参考文献:

- [1] 张士萍,刘加平,董良峰. 收缩裂缝对混凝土氯离子传输的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 90-92, 143.
- [2] 金祖权,侯保荣,赵铁军,等. 收缩裂缝对混凝土氯离子渗透及碳化的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 7-11.
- [3] 张士萍,刘加平. 荷载裂缝对混凝土氯离子扩散的影响[J]. 混凝土, 2011(11): 24-26.
- [4] 万小梅,苏卿,赵铁军,等. 单轴受压混凝土的微裂缝和氯离子侵入性[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 104-110.
- [5] JIANG Yu-chuan, HUO Da, TENG Hai-wen, et al. Testing and evaluation on the chloride ion penetrability of concrete under compressive stress[J]. Key Engineering Materials, 2012, 544: 415-420.
- [6] 李炜,蒋林华,王永亮,等. 疲劳作用对混凝土中氯离子扩散系数影响的研究[J]. 混凝土, 2014(1): 31-34.
- [7] MU Song, LIU Jian-Zhong. Transient diffusion behavior of chloride ions in concrete with a macro crack[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405-408: 2671-2676.
- [8] YU Bo, HUANG Zhong-Hui, WU Ming, et al. Concentration distribution of chloride ion in cracked concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351-352: 1581-1584.
- [9] 陈正,杨绿峰,曾建聪. 混凝土氯离子提取液中氯离子含量测定方法研究[J]. 新型建筑材料, 2010(10): 73-76.

Experimental Study of the Chloride Ion Penetration on the Crack Parts of Concrete

TANG Xian-xi¹, YIN Yue-you¹, GUO Wei²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute co. Ltd., Ji'nan 250013, China)

Abstract: For the study of the effect of chloride ion penetration on crack surface by crack width and depth, the reinforced concrete specimens with cracks were made and the chloride ion penetration experiments were carried out. The transverse sections of specimens without crack and cracking while soaked in Chlorine ion solution were used for experiments. For the cracking specimens, the analysis were carried through compared of the crack width, the crack depth and the chloride ion penetration of crack surface, and compared with the transverse section of specimens without crack. The research results show that, the crack width has negligible effect on surface chloride ion penetration of concrete cracks, surface chloride ion penetration was mainly related with the crack depth. The new viewpoint of concrete durability research on the cracking parts were put forward, which has important reference value for the study of the durability of concrete structures.

Key words: concrete; width and depth of crack; chloride ion penetration; experimental study

文章编号: 1671-6833(2015)01-0070-05

大跨连续梁桥桩基础的减隔震分析

郭红梅^{1,2}, 周 燕^{1,2}, 张 凯³, 李 宇⁴

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 3. 天津市赛英工程建设咨询管理有限公司, 天津 300191; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 以中宁和中卫黄河公路大桥为背景, 采用铅芯橡胶支座代替普通支座, 建立了隔震和非隔震连续梁桥有限元模型. 并通过选取合理强震记录作为地震输入, 研究了铅芯橡胶支座对大跨连续梁桥桩基础地震响应的影响, 从中可知: (1) 铅芯橡胶支座可使桩基顶部的弯矩和剪力明显减少, 进而保证地震作用下桩基的安全; (2) 铅芯橡胶支座使剪力和弯矩在不同桥墩间的分配趋于均匀, 在使用相同桩基的情况下, 减少了强度的浪费. 可见, 铅芯橡胶支座可改善桩基受力, 并可优化桩基设计.

关键词: 梁式桥; 铅芯橡胶支座; 减隔震设计; 弹塑性位移; 非线性分析

中图分类号: U442.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.017

0 引言

近年来, 结构的减隔震研究引起了国内外学者的极大关注, 许多已建成的桥梁结构都采用了减隔震技术. 国内外学者对铅芯橡胶支座(LRB)进行了广泛的研究. Tsai H C 等^[1]研究了 LRB 非线性隔震结构的基于反应谱的地震反应分析; Hwang J S 等^[2-4]对 LRB 隔震桥梁的等效线性化设计方法及隔震桥梁的等效阻尼比进行研究; Turkington 等^[5]提出了一个等效的 LRB 支座刚度和阻尼的线性设计曲线, 使用单自由度系统分析了 2 个 4 跨桥梁在不同墩、台和支座排列情况的地震响应, 并根据对参数的研究提出了关于响应谱分析的设计方法; Ramallo J C 等^[6]使用一个两自由度系统对 LRB 支座的抗震性能进行研究; Hwang J S 等^[7]在美国 AASHTO 规范的基础上, 对 LRB 支座提出了一个等效刚度和等效阻尼的线性公式, 用于单自由度的谱分析. 在实际应用方面, 1983 年新西兰就提出了桥梁隔震设计和地震响应分析规范(NZMWD 规范); 1992 年美国提出了关于隔震设计的 AASHT 规范; 日本在很多的桥梁中已经开始使用了隔震设计^[8]. Jangid R S^[9]均指出, 使用等效的单自由度线性系统分析会有较大

的误差, 而使用多自由度系统, 考虑 LRB 的非线性特性, 研究分析支座对桥梁的隔震效果很有必要. 中国在桥梁隔震设计研究起步较晚, 同济大学的范立础等^[10]对桥梁的隔震设计进行过系统的研究. 陈水生^[11-12]也对高架桥梁的地震响应控制进行了研究. 王丽等^[13]对 LRB 隔震桥梁的减震效果进行了研究, 分别采用非线性水平和转动弹单元来模拟减隔震支座和桥墩延性铰的非线性性能, 首次把支座和桥梁结构纳入一个系统中, 并考虑其相互影响和相互作用.

虽然上述学者对 LRB 对桥梁地震响应的影响进行了大量的研究, 但他们的研究主要都是集中在上部结构或者桥墩, 而鲜有文献提及 LRB 对桥梁基础地震响应的影响, 因此笔者以两座特大连续梁桥为工程背景, 研究了 LRB 对大跨连续梁桥桩基础地震响应的影响.

1 工程概况

笔者以中宁和中卫黄河公路大桥为工程实例, 以研究 LRB 对大跨连续梁桥桩基础地震响应的影响. 如图 1(a) 所示, S202 线中宁黄河公路大桥, 主桥采用变截面预应力混凝土连续梁式桥, 跨径组合为(40+8×80+40)m, 长度为 720 m. 主

收稿日期: 2014-06-07; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408042); 天津市市政公路行业科技创新计划项目(2013-04); 2012 年天津市“131”创新型人才培养工程第三层次资助计划; 2013 年天津市高校“优秀青年教师资助计划”

作者简介: 郭红梅(1977-), 女, 山西长治人, 天津城建大学讲师, 硕士研究生, 主要从事, E-mail: ghmtj@126.com.

墩墩身左右分幅设置,六边形实心结构.墩身顺桥向为 3 m,横桥向为 10.65 m,墩顶设支座.中墩设 $8\Phi 1.8$ m 桩基,边墩设 $2\Phi 1.8$ m 桩基.如图 1(b)所示,S202 线中卫黄河公路大桥为变截面预应力混凝土连续箱梁桥,跨径布置为 $(60+6\times 90+60)$ m,主桥长度为 660 m.主墩墩身采用实体矩形墩,顺桥向尺寸 3 m,横桥向尺寸 17.1 m,桥墩两侧设置破冰棱,主墩墩身下接承台,承台下设置 11 根 $\Phi 1.8$ m 桩基.过渡墩墩身采用实体矩形墩,顺桥向尺寸 2 m,横桥向尺寸 16.3 m,承台下设置 8 根 $\Phi 1.7$ m 桩基.

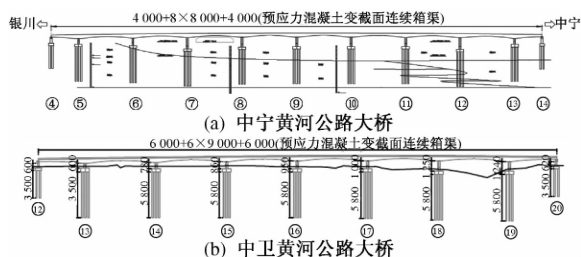


图 1 桥型布置图

Fig. 1 Layout of bridges

根据中国地震局 GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》^[14],本工程所经地震动峰值加速度为 $0.2g$,地震基本设防烈度为Ⅷ度,反应谱特征周期 $T=0.45$ s.

2 有限元模型的建立

采用有限元分析软件 SAP2000 建立中宁和中卫黄河公路大桥的有限元分析模型如图 2 所示,主梁和桥墩均采用三维空间梁单元,横隔板荷载和二期荷载作为梁单元附加质量,并建立考虑桩-土-结构相互作用的桩基模型.桥梁约束条件的模拟:利用规范^[15]的“m 法”计算土弹簧的刚度,采用表征土介质弹性值 m 参数计算的等代土弹簧刚度模拟桩土作用,桩底固结;主梁与桥墩根据实际支座类型建立非线性连接.坐标系取顺桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖向为 Z 轴.为进行对比研究,计算工况包括“非隔震桥梁”和“铅芯橡胶减隔震桥梁”的地震动时程分析.

笔者用两个正交的水平非线性弹簧来模拟 LRB 的双向非线性特性,并采用屈服前刚度 K_1 、屈服后刚度 K_2 和屈服强度 Q 作为 LRB 的力学控制参数,将非线性模型简化为双线性模型(图 3)进行分析计算(笔者定义刚度比 η 为屈服后刚度与屈服前刚度的比值).

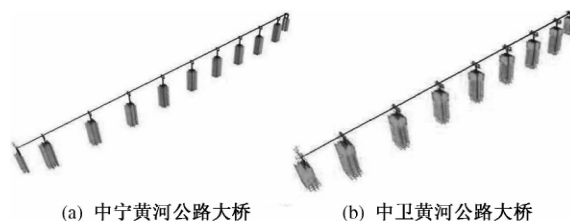


图 2 隔震连续梁桥有限元模型

Fig. 2 FEA model for seismically isolated continuous bridges

依据《公路桥梁抗震设计细则》^[14]和本项目地震烈度和场地土类别,采用和场址场地土条件相近的天然地震波整理得到和设计加速度反应谱兼容地震波.计算采用的 E2 地震, X 、 Y 方向加速度时程如图 4 所示.

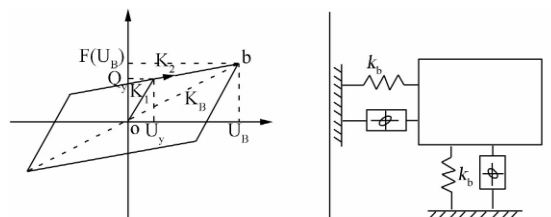


图 3 LRB 双线性滞回模型

Fig. 3 Bilinear hysteretic model of LRB

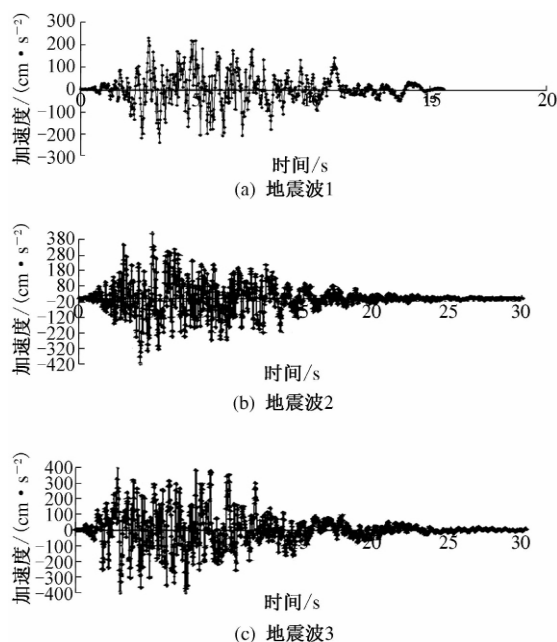


图 4 地震加速度时程

Fig. 4 Acceleration time history of Seismic in the fermentation

3 桩基础地震响应的对比

3.1 中宁黄河公路大桥

本桥采用群桩基础,每根边墩下有 2 根桩,每

根中间墩下有 8 根桩. 为比较在地震作用下, 减隔震连续梁桥和非隔震连续梁桥整桥桩基的受力情况, 图 5 和 6 选取每座桥墩下桩基中受力最大的一根进行对比, 从中可以看出: 在 3 条地震波作用下, 不管是顺桥向还是横桥向, 铅芯橡胶支座都使桩基顶部的弯矩和剪力明显减少, 保证地震作用下桩基的安全; 同时铅芯橡胶支座使剪力和弯矩在不同桥墩间的分配趋于均匀, 在使用相同桩基的情况下, 减少了强度的浪费.

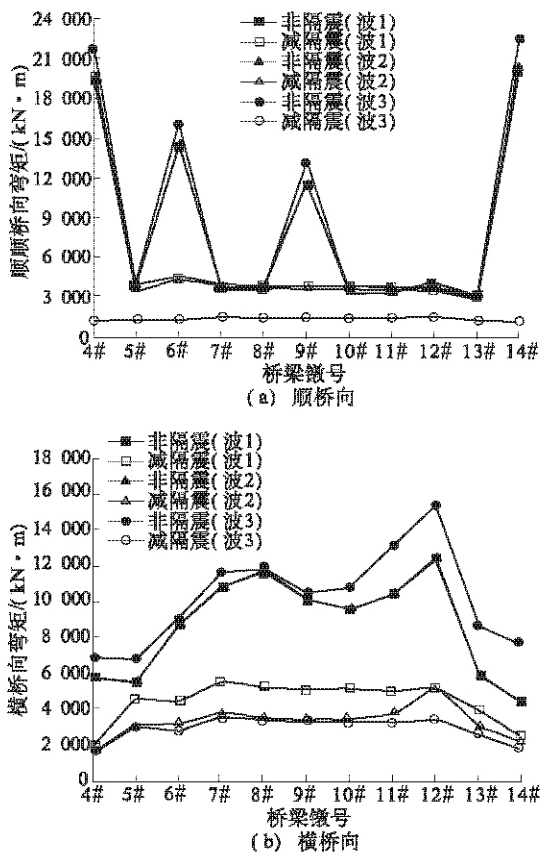


图 5 桩基顶部最大弯矩

Fig. 5 Max transverse moment of pile top

为确定铅芯橡胶支座对一座桥墩下每根桩地震响应的影响, 须选取一个桥墩下的所有桩进行分析. 由于 9# 桥墩作为非隔震连续梁桥安装固定支座的桥墩, 受力情况最为不利, 因此选取 9# 桥墩下的所有桩进行受力分析.

图 7 和图 8 为地震作用下, 非隔震和隔震连续梁桥模型 9# 桥墩下 8 根桩基的受力对比. 从图 7 和 8 可以看出: 在 3 条地震波作用下, 隔震连续梁桥模型中的桩基受力都远小于非隔震连续梁桥, 说明使用铅芯橡胶支座能够大幅减少地震时桩基破坏的情况. 同时, 铅芯橡胶支座还有使桩基受力更均匀的作用, 对抗震有利.

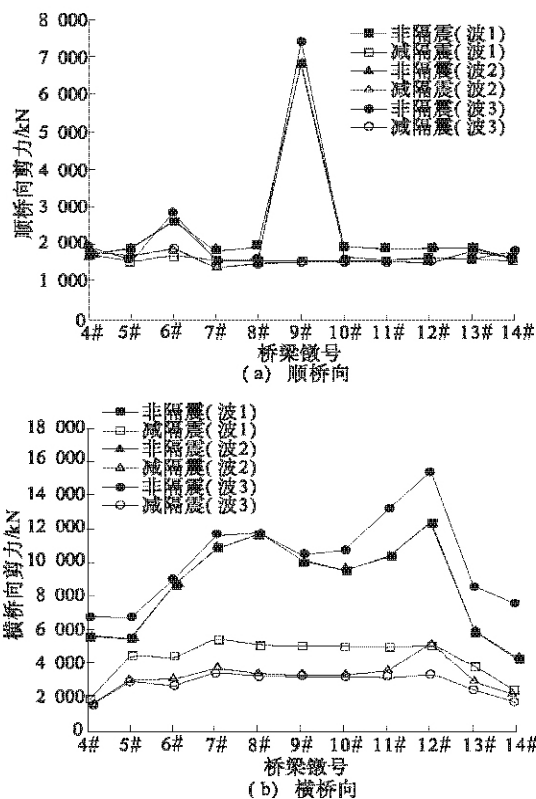


图 6 桩基顶部最大剪力

Fig. 6 Max transverse shear of pile top

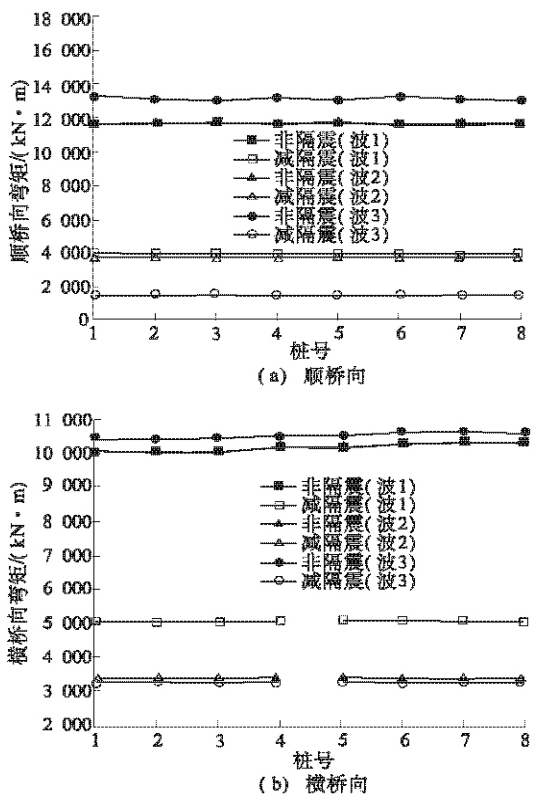


图 7 9# 墩桩基顶部最大弯矩

Fig. 7 Max transverse moment of pile top at Pier 9 in the fermentation

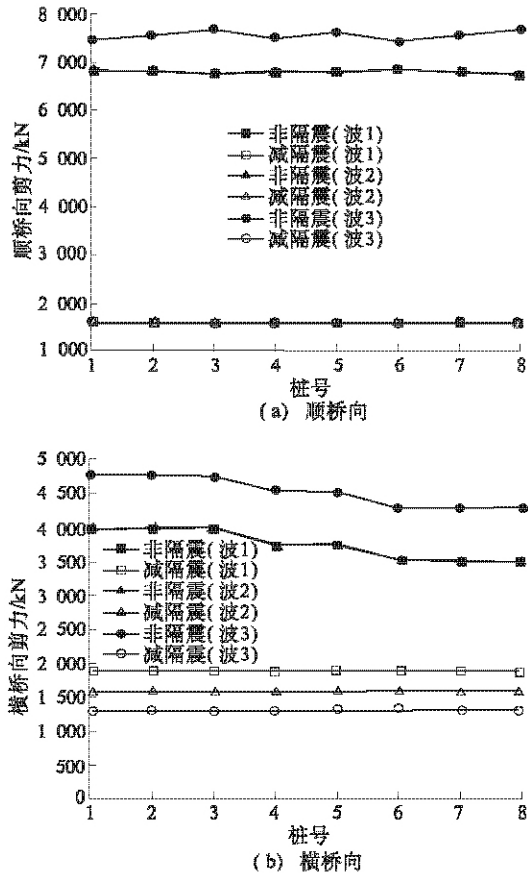


图8 9#墩桩基顶部横桥向最大剪力

Fig. 8 Max transverse shear of pile top at Pier 9

3.2 中卫黄河公路大桥

隔震连续梁桥与非隔震连续梁桥的有限元模型都考虑了桩-土-结构相互作用,桩-土模型采用m法桩进行模拟,其地震响应分析峰值反映对比如图9和10所示。

由图10(a)、(b)可看出:采用铅芯橡胶支座状态,与非隔震支座状态进行桩基顶受力相比,桩基顶顺桥向弯矩最大减震89%,桩基顶横桥向弯矩最大减震24%,桩基顶顺桥向剪力最大减震76%,桩基顶横桥向剪力最大减震61%。铅芯橡胶支座的使用对改善桩基受力同样有显著作用,平衡了各桩基受力,便于优化桩基设计。

4 结论

笔者以中宁和中卫黄河公路大桥为工程背景,研究了铅芯橡胶支座对大跨连续梁桥桩基础地震响应的影响。从中可知:(1)铅芯橡胶支座都使桩基顶部的弯矩和剪力明显减少,保证地震作用下桩基的安全;(2)铅芯橡胶支座使剪力和弯矩在不同桥墩间的分配趋于均匀,在使用相同桩基的情况下,减少了强度的浪费。可见,铅芯橡胶支座可改善桩基受力,并可优化桩基设计。

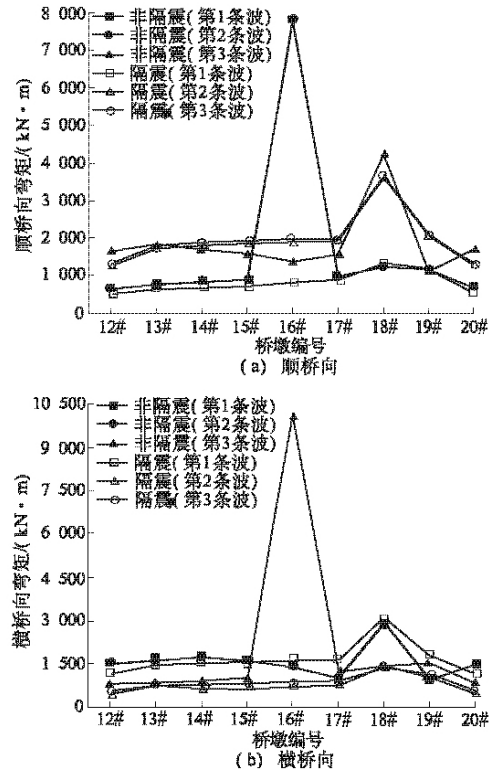


图9 12#~20#桥墩1号桩基顶最大弯矩

Fig. 9 Peak moment at the top section of piles

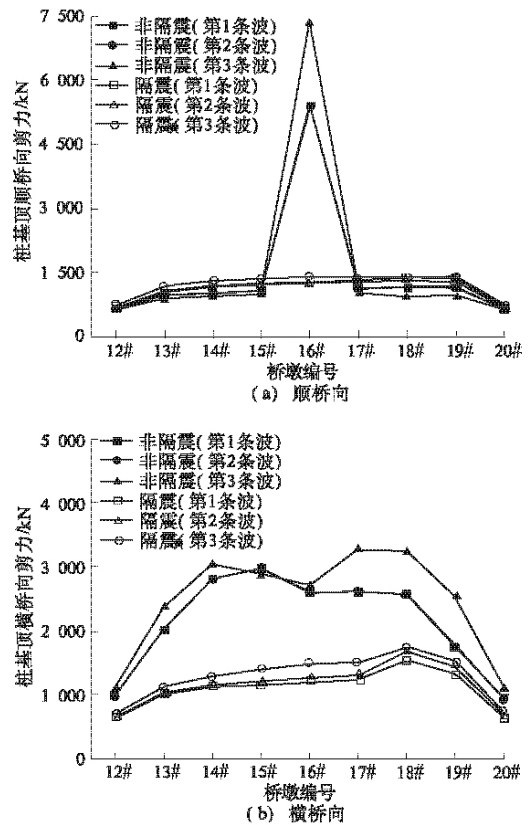


图10 12#~20#桥墩1号桩顶最大剪力

Fig. 10 Peak shear at the top section of piles

参考文献:

- [1] TSAI H C, KELLY J M. Dynamic parameter identification for nonlinear isolation systems in response spectrum analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18: 1119 – 1132.
- [2] HWANG J S, SHENG L H. Equivalent Elastic Seismic Analysis of Base-isolated Bridges With Lead-rubber Bearing [J]. Engineering structures, 1994, 16 (3) : 201 – 209.
- [3] HWANG J S, CHIOU J M. An Equivalent Linear Model of Lead-rubber Seismic Isolation Bearings [J]. Engineering Structures, 1996, 18 (7) : 528 – 536.
- [4] HWANG J S, CHANG K C, TSAI M H. Composite damping ratio of seismically isolated regular bridges [J]. Engineering Structures, 1997, 19 (1) : 55 – 62.
- [5] TURKINGTON D H, CARR A J, COOKE N, et al. Design method for bridges on lead rubber bearings [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115 (12) : 3001 – 3033.
- [6] RAMALLO J C, JOHNSON E A, SPENCER B F. “Smart” base isolation systems [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128 (10) : 1088 – 1099.
- [7] HWANG J S, SHENG L H. Effective stiffness and equivalent damping of base-isolated bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (10) : 3094 – 3101.
- [8] CHAUDHARY M T A, MASATO A, FUJINO Y. Performance evaluation of base-isolated Yama-age bridge with high damping rubber bearings using recorded seismic data [J]. Engineering Structures, 2001, 23: 902 – 910.
- [9] JANGID R S. Seismic response of isolated bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9 (2) : 156 – 166.
- [10] 范立础, 王志强. 大跨度桥梁隔震设计 [M]. 北京: 北京人民交通出版社, 2001.
- [11] 陈水生. 高架桥梁地震响应磁流变阻尼器 (MR) 半主动控制 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23 (6) : 40 – 43.
- [12] CHEN Shui-sheng. Magneto rheological (MR) dampers semi-active control of earthquake response for elevated bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23 (6) : 40 – 43.
- [13] 王丽, 阎贵平, 孙立. LRB 隔震桥梁的减震效果分析 [J]. 工程力学, 2003, 20 (5) : 124 – 129.
- [14] GB 18306—2001. 中国地震动参数区划图 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [15] 重庆交通科研设计院. JTG/TB 02—01—2008 公路桥梁抗震设计细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

Aseismic Isolation for Pile Foundation of Long-span Continuous Girder Bridge

GUO Hong-Mei^{1,2}, ZHOU Yan^{1,2}, ZHANG Kai³, LI Yu⁴

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Saiying Engineering Construction Consultancy Management Co. Ltd, Tianjin 300191, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: By using FEA software, analysis models of seismically isolated and non-isolated continuous bridges are established for Zhongning and Zhongwei Yellow River highway bridge. And the effect of LRB for seismic response of this bridge is analysed by considering force, energy and displacement under the function of the reasonably chosen seismic motion. The results indicate that the natural period of seismically isolated bridge can be prolonged to avoid the principal period of ground. Meanwhile, the seismic energy of structure can be efficiently consumed by the hysteretic energy dissipation of lead rubber bearing. So the response of bridge structure can be reduced. The decrease of the structural force and moment is benefic for seismic design by using LRB.

Key words: beam bridge; LRB; aseismic design; elasto-plastic displacement; nonlinear analysis

CEEMD-FFT 在滚动轴承故障诊断中的应用

陆森林, 王 龙

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 针对经验模态分解(EMD) 在非线性和非平稳信号处理中存在模态混叠问题, 虽然总体平均经验模态分解(EEMD) 能在一定程度上抑制模态混叠问题, 但是添加的白噪声不能完全被中和. 因此利用补充的总体平均经验模态分解(CEEMD) 对降噪监测信号进行分解, 减少重构误差, 提取最佳的 IMF 分量, 然后对 IMF 分量进行 FFT 变换, 实现对滚动轴承的故障诊断. 通过对实验采集的滚动轴承的振动信号进行分析, 证明了该方法的优越性, 有一定的使用价值.

关键词: 滚动轴承; EMD; EEMD; CEEMD 分解; 故障诊断

中图分类号: TH133.3; TP18 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.018

0 引言

在当今工业生产规模发展不断要求旋转机械设备日趋大型化、集成化、高速化的背景下, 旋转机械设备发生故障, 就可能造成重大的经济损失、环境污染、人员伤亡, 而滚动轴承恰恰是旋转机械中容易损坏的关键部件. 因此, 滚动轴承的故障诊断已经变成了一个广泛研究的课题^[1].

EMD (Empirical Mode Decomposition) 是 Huang 首先提出的一种新型的时频分析方法, 能将信号分解为有限个内禀模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF), 适合处理非线性、非平稳信号^[2-3]. 谷泉等^[4] 对滚动轴承的故障信号进行 EMD 分解, 得到基本模式分量, 然后对其做 Hilbert-Huang 变换求得包络谱, 从而提取了滚动轴承的故障信息. 但是 EMD 时频分析方法, 最重要的缺点之一是模态混叠的问题^[5]. Wu 等^[6] 提出的总体平均经验模式分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition) 方法, 能有效解决经验模式分解方法态混叠问题. 但是 EEMD 添加的白噪声不能完全被中和, 不具备完备性. 姜军生^[7] 提出的一种迭代的经验模态分解 (IEEMD, Iterative Ensemble Empirical Mode Decomposition), 通过添加不同幅度的高斯白噪声去寻找最优高斯白噪声, 取得了一定的效果.

因此, 补充的总体平均经验模态分解 (Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD) 被提出, 其主要是通过向待分析信号中添加两个相反的白噪声信号, 并分别进行 EMD 分解. CEEMD 在保证分解效果与 EEMD 相当的情况下, 减小了由白噪声引起的重构误差.

本研究采用小波分析对滚动轴承故障信号进行去噪前处理, 然后对去噪后的信号进行补充总体平均经验模式分解 (CEEMD), 对所得到的 IMF 分量进行快速傅里叶变换 (FFT), 以达到识别轴承故障的目的, 并且通过实验对比, 验证了方案的优越性.

1 CEEMD 原理

1.1 EMD 分解原理

在 EMD 中, $x(t)$ 数据被分解为多个 IMF 分量 c_j , $x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n$, 其中 r_n 残余量.

IMF 分量所具备的条件: ①其极值点和过零点的个数相等或者最多相差一个; ②极大值和极小值构成包络线的平均值为零.

图 1 为经验模态分解的流程图^[8], 如此重复直到最后一个剩余数据序列 r_n 不可再被分, 筛选结束.

收稿日期: 2014-09-28; 修订日期: 2014-11-13

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(06KJD510038)

作者简介: 陆森林(1957-), 男, 江苏镇江人, 江苏大学教授, 博士, 主要从事振动与噪声与轴承故障诊断的研究, E-mail: 305383435@qq.com.

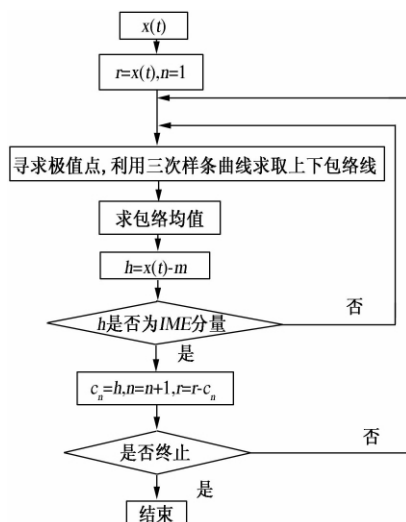


图1 经验模态分解流程图

Fig.1 Flow chart of EMD

1.2 补充总体平均经验模态分解(CEEMD)原理

在 EMD 方法中,良好的 IMF 分量的取得与待分解信号的极值点有很大关系.如果信号中极值点时不够多,EMD 分解将停止;如果待分解信号极值点分布不够均匀,分解得到的 IMF 分量将会出现模态混叠的现象.但是,白噪声却可以弥补这一缺点,原因如下:同等幅值随机高斯白噪声,如果进行多次试验,然后把各次试验结果叠加起来,就可以使添加的白噪声相互抵消.利用这一特性,在待分解信号中添加高斯白噪声,可以使信号连续性更好,极值点分布更加合理、均匀,更利于 EMD 分解的进行,得到最佳的 IMF 分量,最后通过叠加的方式消除所添加高斯白噪声的干扰.

为了避免上文所述的添加的白噪声不能被完全中和的问题,CEEMD 采用的是添加符号相反的随机白噪声,然后进行 EMD 分解,这样可以减少重构误差,最大限度地中和添加的白噪声,实现对 EEMD 方法的改进.

具体的操作步骤如下.

- (1) 在目标数据中加入白噪声序列 $n_1(t)$;
- (2) 将加噪数据分解到 IMF 中,得到第一组内禀模态函数 c_{1j}, r_1 ;
- (3) 在目标数据中加入与第一步符号相反的白噪声序列 $-n_1(t)$;
- (4) 将加噪数据分解到 IMF 中,得到第二组内禀模态函数 c_{-1j}, r_{-1} ;
- (5) 在目标数据中加入另一组白噪声序列 $n_2(t)$,反复运行 1,2,3,4,得到 $c_{2j}, r_2, c_{-2j}, r_{-2}$,依次类推,得到 n 组 $c_{nj}, r_n, c_{-nj}, r_{-n}$;
- (6) 获取分解的 IMF 的(总体)均值作为最终

的 IMF 结果为:

$$c_j(t) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (c_{nj} + c_{-nj});$$

$$r_n(t) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (r_n + r_{-n}).$$

1.3 参数的设置

在 CEEMD 分解的过程中需要确定两个参数:所添加的高斯白噪声的幅值 k 和 CEEMD 的分解次数 n . Wu 和 Huang 建议: k 用原信号 $x(t)$ 的标准偏差乘以一个分数来定义,这样当 n 为数百次的时候,残留噪声引起的误差一般低于 1%.因此,建议当 n 为 100 时, k 取为原信号标准差的 0.01 ~ 0.5 倍.

2 滚动轴承故障诊断实例

文章所需要的轴承振动实验数据来自 Case Western Reserve University 电气工程实验室的滚动轴承故障模拟实验台所测得的数据,实验时电机转速 1 797 r/min,负载为 0,采样频率为 12 kHz 速度传感器来拾取.

采用的数据来自电机驱动端型号为 6205-2 RS 的深沟球轴承,其结构参数如表 1 所示.

滚动轴承的故障特征频率^[9]经计算可得如表 2 所示.

表1 滚动轴承的结构参数

Tab.1 Structure parameters of rolling bearing

| 轴承 | 节圆 | 轴承 | 滚动体 | 滚动体 | 接触 |
|-------|-------|-------|-----|-------|-------|
| 外径/mm | 直径/mm | 内径/mm | 个数 | 直径/mm | 角/(°) |
| 52 | 39 | 25 | 9 | 7.94 | 0 |

表2 滚动轴承的故障特征频率

Tab.2 Fault characteristic frequency of rolling bearing

| Hz | | | | |
|----------|----------|-----------|-------|-------|
| 内圈缺陷 | 外圈缺陷 | 滚动体缺 | 保持架旋 | 内圈旋转 |
| 旋转特征 | 旋转特征 | 陷旋转特 | 转特征频 | 频率 |
| 频率 f_i | 频率 f_o | 征频率 f_b | 率 f | f_r |
| 162 | 104 | 141 | 11.9 | 30 |

2.1 小波阈值去噪预处理

对于监测得到的振动信号,存在大量的噪声,为了减少模态分解产生的误差,需要对监测得到的振动信号进行初步降噪.为此,笔者选取小波阈值降噪进行预处理.

对于信号 $x(t)$,小波阈值去噪步骤如下.

- (1) 分解. 选择合适的小波基并确定分解层次 n , 然后对带噪信号 $x(t)$ 进行 n 层分解计算,得到一组小波系数 w_{jk} .

(2) 高频系数的阈值选择. 对第 1 到第 n 层每一层, 选择一个阈值, 并且对高频系数用阈值进行处理, 得出估计小波系 \tilde{w}_{jk} .

(3) 重构. 根据小波分解的第 n 层的低频系数和经过量化处理后的第 1 层到第 n 层的高频估计系数 \tilde{w}_{jk} , 进行离散小波重构, 去噪后的信号记为 $\tilde{x}(t)$.

2.1.1 监测信号小波阈值去噪参数的选择

Symlet 小波为近似对称的一类紧支正交小波函数, 它具有 Daubechies 小波系的大部分良好特性, 因为它的对称性, 故小波系在处理振动信号时, 可极大地避免不必要的失真, 因此适合对振动信号进行预处理, 故轴承信号去噪选择 Symlet8 小波.

阈值选择 Stein 无偏似然估计阈值 (Rigrsure), 并且根据不同层次计算不同的噪声, 滚动轴承的振动信号进行 4 层分解.

相对于硬阈值去噪, 软阈值去噪连续性好, 去噪信噪比高, 均方差小, 光滑度较好, 故选择软阈值去噪.

2.2 基于 CEEMD 和 FFT 轴承故障诊断

本实验的实验数据取自 6205-2 RS 的深沟球轴承的内圈故障监测信号, 图 2 所示为采集的振动信号的时域频谱及其初步降噪后得到的去噪信号.

图 3 为内圈故障去噪信号的频域频谱, 经过 FFT 变换所得, 由频谱图可知, 轴承存在明显的冲击性故障, 但是直接进行变换的频谱图无法得知故障特征频率.

为了验证笔者提出的 CEEMD 方法有效性, 对上述去噪信号分别进行 EMD, EEMD, CEEMD, 分别得到 IMF 分量, 由于篇幅所限, 对于各 IMF 分量就不再一一列出.

其中, 在 EEMD 和 CEEMD 方法中, 所加白噪声的幅值 k 取值为 0.1, 分解次数 n 取 100.

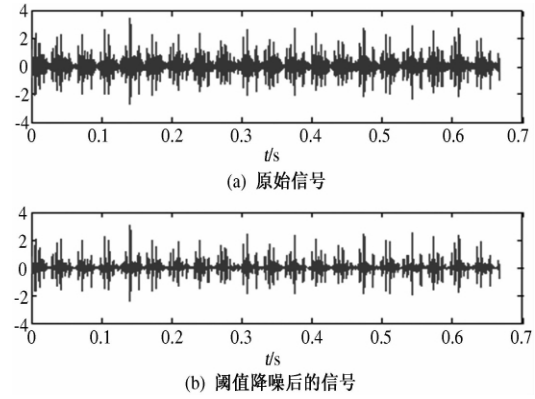


图 2 原始信号与初步去噪信号

Fig. 2 Original signal and de-noising signal

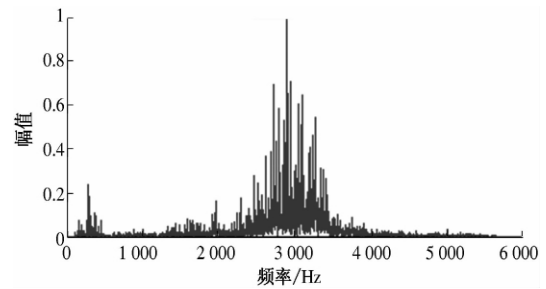


图 3 轴承内圈故障信号的 FFT 频谱

Fig. 3 Spectrum of bearing with inner fault in FFT

在所得的三组 IMF 分量中, 分别提取第 5 个分量, 进行 FFT 变换, 分别得到频谱图, 如图 4 (a)、4(b)、4(c) 所示.

综合对比 4(a)、4(b)、4(c), 可知通过 CEEMD 方法得到的第 5 阶 IMF 分量, 进行 FFT 之后, 得到的频谱图可以清楚辨别出幅值最集中的频率 162 Hz, 与监测轴承的内圈缺陷旋转特征频率 f_i 相同, 其次, 振动信号频率次集中的频率为 132, 192, 294, 324 Hz, 分别为 $f_i - f_r$, $f_i + f_r$, $2f_i - f_r$, $2f_i$, 其中 f_r 为内圈旋转频率, 由此可以鉴别出轴承存在内圈故障. 虽然通过 EMD, EEMD 方法获得频谱图, 能在一定的程度上判断出轴承故障, 但是 CEEMD 方法更优越, 更有效.

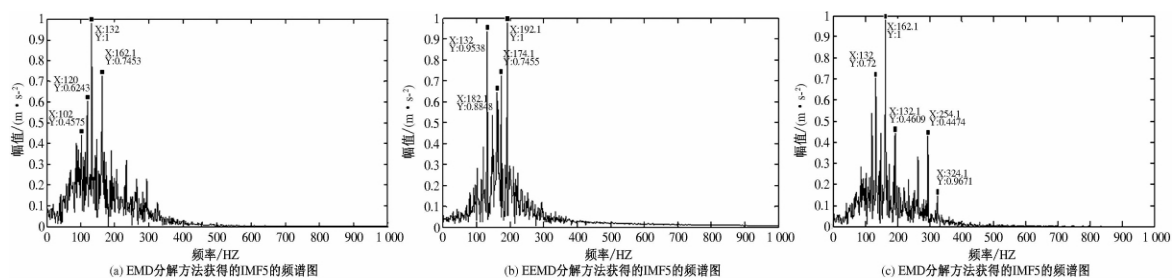


图 4 三种分解方法对比

Fig. 4 Comparison of different decomposition methods in the fermentation

同理,使用外圈故障信号进行测试,用 CEEMD 方法分解去噪信号,得到频谱图,如图 5 所示,可以看出频率最集中的地方为 102.2 Hz,监测轴承的外圈缺陷旋转特征频率 f_o 基本相同,分别为 $f_o - f_r = 78$ Hz, $f_o - 2f = 87$ Hz, $f_o + f = 117$ Hz,由此可以鉴别出轴承存在外圈故障,从而验证了理论的正确性.

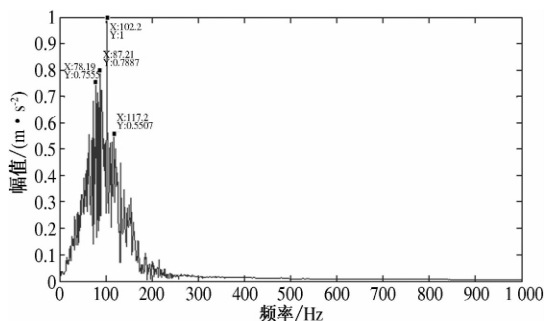


图 5 CEEMD 分解外圈故障信号获得的 IMF6 的频谱图

Fig. 5 Spectrum of IMF6 with CEEMD of outer race fault signal

3 结论

笔者通过 EMD 和 EEMD 的改进算法 CEEMD,结合阈值降噪和傅里叶变换技术,提取轴承故障特征频率,通过与计算所得的故障特征频率进行对比,实现轴承故障诊断.通过 3 种方法的对比,CEEMD 提高了轴承故障诊断的有效性和准确性,具有一定的实用价值.

参考文献:

- [1] 王延博. 大型汽轮发电机组轴系不对中振动的研究. 动力工程, 2004, 24(6): 768 - 774.
- [2] CHENG J S, YU D J, TANG J S, et al. Local rub-impact fault diagnosis of the rotor systems based on EMD [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44: 784 - 791.
- [3] YANG B, SUH C S. Interpretation of crack-induced rotor non-linear response using instantaneous frequency [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2004, 18 (3): 491 - 51.
- [4] 谷泉, 陈长征, 周昊, 等. 滚动轴承故障诊断新方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2013(9): 125 - 127.
- [5] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1 - 41.
- [6] 雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 71 - 77.
- [7] 姜军生. 基于迭代的集总经验模式分解算法的齿轮箱故障特征提取 [J]. 机械传动, 2011, 35(12): 125 - 127.
- [8] 杨宇, 于德介, 程军圣. 基于 EMD 与神经网络的滚动轴承故障诊断方法 [J]. 振动与冲击, 2005, 24(1): 85 - 88.
- [9] 陈长征, 胡立新, 周勃等. 设备振动分析与故障诊断技术 [M]. 北京: 科学出版社.

Application of CEEMD-FFT in Roller Bearing Fault Diagnosis

LU Sen-lin, WANG Long

(College of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Modal aliasing problem exists in nonlinear and non-stationary signal processing through Empirical Mode Decomposition (EMD); Ensemble Empirical Mode Decomposition EEMD can suppress modal aliasing problems in some extent, but added white noise can not be completely neutralized. So, complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition (CEEMD) is proposed, which can reduce the reconstruction error and extract the best Intrinsic Mode Function (IMF). Then, fast fourier transformation is applied to the IMF component to derive the characteristic frequency of the fault. Analyzing the vibration signal collected by roller bearing experiment proved the superiority of the method and it has some practical value.

Key words: roller bearing; EMD; EEMD; CEEMD; fault diagnosis

文章编号: 1671-6833(2015)01-0079-04

基于第二主应力的沥青混合料强度试验研究

锁利军^{1,2}, 王秉纲¹, 郑传超¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 洛阳理工学院 土木工程系, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 沥青混合料的强度理论与沥青混合料试验方法都未考虑第二主应力对沥青混合料强度的影响. 为了研究第二主应力与沥青混合料强度的关系, 选定第二主应力、试验温度和加载速率三个因素进行了正交试验设计, 据此完成了沥青混合料强度试验. 试验结果表明, 正温时有第二主应力的沥青混合料的强度明显大于无第二主应力的相应结果, 而在零度和负温度时, 有第二主应力的沥青混合料的强度与无第二主应力的相应结果相差不大. 考虑各因素的交互作用, 对给定显著水平 $\alpha=0.05$ 的正交试验显著性分析表明: 温度大于零度时, 对沥青混合料强度显著性影响的强弱顺序是第二主应力、试验温度和加载速率; 在零度和负温度时, 对沥青混合料强度显著性影响的强弱顺序是试验温度、加载速率和第二主应力.

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 强度; 第二主应力; 正交试验设计

中图分类号: U416.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.019

0 引言

沥青路面在使用过程中易产生高温车辙和低温裂缝病害, 前者与沥青混合料的高温强度有关, 后者与沥青混合料的低温强度有关. 实践中, 如何提高沥青混合料的强度以减少沥青路面的车辙和开裂等病害, 成为一个重要问题. 刘宇等^[1]将半圆弯拉试验方法和间接拉伸试验方法进行对比, 分析了半圆弯拉强度与间接拉伸强度的相关性. 钱国平等^[2]对不同加载速率下单轴压缩、弯曲、直接拉伸和劈裂强度进行试验研究. Hartman等^[3]采用四点弯曲疲劳试验方法对沥青混合料进行疲劳强度试验研究. Archilla等^[4]通过强度试验数据建立沥青路面车辙计算模型. 实践中, Mohr-Coulomb 强度理论未考虑第二主应力, 测试沥

青混合料抗压强度采用圆柱形马歇尔试件抗压试验或棱柱体试件单轴压缩试验, 都是无侧限强度试验. 评价沥青混合料剪切强度的闭式三轴试验对圆柱体试件施加的围压是第三主应力. 由此可知, 现有研究成果、现行规范中沥青混合料的试验方法均未涉及第二主应力. 因此, 有必要考虑第二主应力进行沥青混合料强度试验研究. 笔者设计了试验装置, 确定了试验条件, 进行了考虑各因素交互作用的正交试验研究, 并对试验结果进行了显著性分析.

1 沥青混合料与试验试件

1.1 沥青混合料

沥青混合料的类型是 AC-16, 矿料的合成级配见表 1.

表 1 矿料的合成级配
Tab.1 Gradation for aggregates

| 级配 | 筛孔尺寸/mm | | | | | | | | | | % |
|--------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| | 19 | 16 | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 矿料合成级配 | 100.00 | 98.54 | 86.77 | 66.37 | 46.13 | 27.63 | 23.30 | 17.53 | 11.92 | 8.98 | 6.04 |
| 规范级配范围 | 100 | 90~100 | 76~92 | 60~80 | 34~62 | 20~48 | 13~36 | 9~26 | 7~18 | 5~14 | 4~8 |

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目(102102310271)

作者简介: 锁利军(1975-), 男, 河北徐水人, 洛阳理工学院副教授, 博士, 研究方向为路面工程, E-mail: lijunsuo@126.com.

1.2 试验试件

1.2.1 试件形状

图 1 反映两种试件的受力状态. 圆柱体试件侧面的应力为一个值. 立方体试件的侧面的应力是两个值, 可以充分考虑第二主应力变化对沥青混合料强度的影响. 因此, 沥青混合料试验中采用立方体试件.

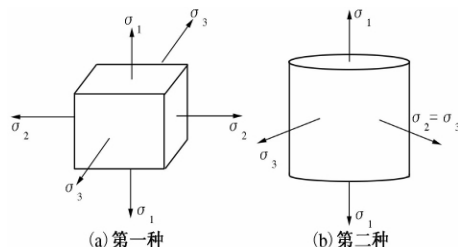


图 1 两种试件受力状态

Fig. 1 Stress state for two specimens

1.2.2 试件尺寸

按照现行沥青混合料试验规程, 对于轮碾板块试件, 碾压层厚度或宽度不小于公称最大粒径 1~1.5 倍, 长度不小于公称最大粒径的 4 倍, 试验中级配集料的公称最大粒径为 16 mm, 所以试验采用边长 50 mm 的立方体试件.

2 试验方案

2.1 试验温度与加载速率

沥青混合料的力学性能受加载速率、试验温度的影响较大, 综合考虑国内外沥青混合料试验规程的要求, 确定试验温度 25 °C、15 °C、0 °C 和 -10 °C; 确定试验加载速率为 5.08 mm/min、2 mm/min 和 1 mm/min^[5].

2.2 试验仪器

试验仪器包括 SANS 多功能压力试验机和平应变试验装置. 平面应变试验装置通过钢板和螺杆的作用来限制试件在侧限方向上的变形. 下面分析试验装置能否达到平面应变状态.

$$K_1 = \frac{F_1}{\Delta l_1}; \quad (1)$$

$$E_1 = \frac{F_1 \cdot l}{\Delta l_1 \cdot A}; \quad (2)$$

$$F_1 = F_2; \quad (3)$$

$$\sigma_{22}^1 \cdot A = \sigma_{22}^2 \cdot A; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\Delta l_2}{l}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E_2} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})]; \quad (6)$$

$$-\frac{\sigma_{22}^1}{E_1} = \frac{1}{E_2} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})]; \quad (7)$$

$$\sigma_{22} = \frac{1}{E_2/E_1} \cdot \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}); \quad (8)$$

$$\sigma_{22} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}); \quad (9)$$

$$\varepsilon_{22} = 0. \quad (10)$$

式中: K_1 为试验装置的刚度; F_1 为作用于试验装置的力; F_2 为作用于试件的力; Δl_1 为试验装置轴向变形量; E_1 为试验装置弹性模量; l 为试件长度; A 为试件横截面面积; σ_{22}^1 、 σ_{22}^2 为对应于 F_1 、 F_2 的应力.

假设试件在侧限方向的位移 Δl_2 与平面应变装置的轴向变形量 Δl_1 相等, 试件的应变为式 (5). 用广义虎克定律表示试件的应变为式 (6).

平面应变试验装置采用 1 cm 厚的钢板, 其模量 E_1 远大于沥青混合料的模量 E_{22} , 所以式 (8) 可转化为式 (9). 式 (9) 和式 (10) 表明, 试验完全满足平面应变的条件.

2.3 试验步骤

首先以表 1 矿料合成级配为基础, 成型轮碾车辙板试件; 第二步考虑试验试件的形状, 将车辙板试件切割为 50 mm 的立方体试件; 接下来将试件放入温度控制箱使试件的温度满足试验的要求; 最后将试件放入试验装置, 在 SANS 多功能压力试验机上测试试件的强度值.

3 考虑交互作用的正交试验

3.1 正交试验设计

正交试验选择 $L_8(2^7)$. 试验因素水平见表 2. 试验表头设计见表 3.

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Factors and levels of orthogonal test

| 不同 工况 | 因子 | 第二主应 力(A) | 试验温度 (B) | 加载速率 (C) |
|----------|------|--------------|-------------|-------------|
| 正温 | 水平 1 | 无 | 15 | 2 |
| | 水平 2 | 有 | 25 | 5.08 |
| 零与 负温 | 水平 1 | 无 | 0 | 1 |
| | 水平 2 | 有 | -10 | 2 |

表 3 试验表头设计

Tab. 3 Table design of orthogonal test

| 列号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|---|---|----|---|----|----|---|
| 因素 | A | B | AB | C | AC | BC | - |

3.2 正交试验结果分析

不同温度时试验方差分析结果见表 4, 从表中可以看到, 工况为正温时, 显著水平 $\alpha = 5\%$ 时,

第二主应力的 F 值为 340.742 1 且远大于 $F_{\alpha}(1, 4) = 7.71$, 这表明第二主应力对沥青混合料强度的影响最为显著. 试验温度和加载速率的 F 值分别为 41.429 1 和 24.465 55, 也都大于 $F_{\alpha}(1, 4) = 7.71$, 说明温度和加载速率对沥青混合料的强度也有显著性影响. 工况为零度和负温度时, 考虑交互作用的正交试验方差分析结果显示, 对于给定显著水平 $\alpha = 5\%$ 的 $F_{\alpha}(1, 4) = 7.71$, 第二主应力、温度和加载速率对沥青混合料的强度都有显著影响, 其影响的强弱顺序为温度、加载速率和第二主应力.

水平随机化处理后的试验方案和试验结果见

表 5. 从试验结果可以看出, 考虑第二主应力、不同温度时沥青混合料的力学强度存在较大的差异. 正温时有第二主应力的沥青混合料的强度明显大于无第二主应力的相应结果, 这说明 25 ℃、20 ℃、15 ℃ 时沥青混合料的黏弹性与第二主应力的作用共同影响着沥青混合料的试验结果. 而在零度和负温度时, 有第二主应力的沥青混合料的强度与无第二主应力的相应结果相差不大, 原因是零度和负温度时沥青混合料的脆性增加, 试验中从加载到试件破坏经历的时间短, 导致试件侧面与平面应变装置接触时间短, 第二主应力未充分发挥作用沥青混合料已经破坏.

表 4 试验方差分析

Tab.4 Orthogonal test variance analysis

| 不同工况 | 因素 | 离差平方和 | 自由度 | 均方离差平方和 | F 值 | $F_{0.05}(1, 4)$ | $\alpha = 0.05$ |
|------|-------|-----------|-----|-----------|-----------|------------------|-----------------|
| 正温 | 第二主应力 | 64.928 71 | 1 | 64.928 71 | 340.742 1 | 7.71 | 显著 |
| | 试验温度 | 7.894 351 | 1 | 7.894 351 | 41.429 1 | | 显著 |
| | 加载速率 | 4.661 931 | 1 | 4.661 931 | 24.465 55 | | 显著 |
| 零与负温 | 第二主应力 | 6.137 256 | 1 | 6.137 256 | 52.391 2 | 7.71 | 显著 |
| | 试验温度 | 50.778 | 1 | 50.778 | 433.470 7 | | 显著 |
| | 加载速率 | 9.761 571 | 1 | 9.761 571 | 83.330 47 | | 显著 |

表 5 试验方案与试验结果

Tab.5 Orthogonal test plan and test results

| 试验处理 | 列号 | | | | | | | 正温时强度 /MPa | 零度和负温时强度 /MPa |
|------|----|---|----|---|----|----|---|------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | |
| | A | B | AB | C | AC | BC | — | | |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 5.940 | 7.303 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 7.303 | 9.904 |
| 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3.972 | 12.644 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4.983 | 14.948 |
| 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 10.893 | 9.261 |
| 6 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 13.431 | 11.757 |
| 7 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 9.735 | 14.676 |
| 8 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 10.930 | 16.112 |

4 结论

(1) 设计了平面应变试验装置, 并对其进行力学分析, 结果表明: 试验基本达到平面应变的条件. 确定试验采用边长 50 mm 的立方体试件. 确定试验温度 25 ℃, 15 ℃, 0 ℃ 和 -10 ℃; 确定试验加载速率为 5.08 mm/min, 2 mm/min 和 1 mm/min.

(2) 考虑第二主应力、加载温度与加载速率 3 因素, 进行了正交试验设计. 试验结果表明, 考虑第二主应力、不同温度时沥青混合料的力学强

度存在较大的差异. 正温时有第二主应力的沥青混合料的强度明显大于无第二主应力的相应结果, 而在零度和负温度时, 有、无第二主应力对沥青混合料的强度结果影响不大.

(3) 考虑交互作用的试验方差分析结果表明, 正温度条件下, 第二主应力对沥青混合料强度影响最为显著, 其次是温度和加载速率. 零度和负温度条件下, 温度对沥青混合料强度的影响最为显著, 加载速率对沥青混合料强度的影响次之, 第二主应力对沥青混合料的强度也有显著影响, 但在 3 因素中最弱.

参考文献:

- [1] 刘宇, 张肖宁. 沥青混合料半圆弯拉强度与间接拉伸强度对比分析 [J]. 公路交通技术, 2011, 27 (3): 34-39.
- [2] 钱国平, 刘宏富, 郑健龙, 等. 不同受力模式下沥青混合料强度的速度特性试验研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(2): 681-686.
- [3] HARTMAN A M, GILCHRIST M D. Evaluating four-point bend fatigue of asphalt mix using image analysis [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(1): 60-68.
- [4] ARCHILLA A R, MEDANAT S. Development of asphalt pavement rutting model from experimental data [C]//79th Annual TBR Meeting. Washington D C: National Research Council, 2000: 425-445.
- [5] JTG E20—2011 公路沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [6] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 刘红瑛, 叶松, 谭发茂, 等. 大粒径沥青混合料级配离析测量和评价方法 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(2): 24-27.
- [8] 锁利军, 王秉纲. 多孔混凝土基层缩缝处沥青面层荷载应力分析 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2011, 32(5): 100-103.

Experiment on Strength of Asphalt Mixture Based on Second Principal Stress

SUO Li-jun^{1,2}, WANG Bing-gang¹, ZHENG chuan-chao¹

(1. Key laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Civil Engineering Department, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Both strength theory of Mohr-Coulomb and testing methods, which are used to value strength of asphalt mixture in specification, do not include second principal stress. In order to study influence of second principal stress on strength of asphalt mixture, strength of asphalt mixture in different condition is tested on the base of orthogonal experimental design, which includes three factors, such as temperature, loading velocity and second principal stress. Experimental results show that strength of asphalt mixture with the second principal stress is obviously larger than the corresponding results without the second principal stress when it is positive temperature. However, there is a little difference in strength between asphalt mixture with second principal stress and one without second principal stress when it is negative temperature. The results also show that, for a given significant level, orthogonal experimental design significance analysis in positive temperature shows that second principal stress has the most obvious influence on strength of asphalt mixture, as followed by temperature and loading velocity. On the other hand, orthogonal experimental design significance analysis in negative temperature shows that temperature has the most obvious influence on strength of asphalt mixture, as followed by loading velocity and second principal stress.

Key words: road engineering; asphalt mixture; strength; second principal stress; orthogonal experimental design

文章编号: 1671-6833(2015)01-0083-04

测试条件对 SBS 改性沥青表观黏度影响研究

徐鸥明¹, 韩 森², 牛冬瑜¹, 刘亚敏²

(1. 长安大学 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 黏度是沥青的一项重要性质, 与沥青混合料施工温度和施工和易性密切相关, 为了评价测试条件对黏度的影响, 采用布洛克菲尔德黏度计, 研究了不同时间、温度和转速条件下 SBS 改性沥青表观黏度变化情况。结果表明: SBS 改性沥青表观黏度值随时间增加逐渐趋于稳定, 温度越高、剪切速率(转速)越大, 黏度趋于稳定的时间越短, 且初始黏度与稳定黏度之间的差值越小; 当温度超过 150 ℃ 时, 黏度与转速无关; 不同温度下进行 SBS 改性沥青黏度测定, 转速应不小于 20 r/min。

关键词: SBS 改性沥青; 表观黏度; 时间; 温度; 转速

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.020

0 引言

国民经济持续快速发展促使了交通量迅猛增加, 车辆重载和大型化比例显著提高, 以及气候因素影响对沥青路面提出了高性能要求, 高质量的公路沥青需求量呈上升趋势^[1]。苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)改性沥青由于具有优良的高、低温性能而在工程中得到了广泛应用。沈金安^[2]认为, SBS 改性沥青是我国改性沥青发展的主要方向。黄卫东等^[3]从微观角度研究了 SBS 改性沥青的储存稳定性和结构之间关系, 发现改性剂粒子的分布状态有重要贡献。张玉贞^[4]通过沥青四组分试验, 研究了基质沥青成分对 SBS 改性沥青效果的影响。王仕峰等^[5]采用光学显微镜、动态力学分析对 SBS 与基质沥青间的相互作用进行了研究。梁晓丽^[6]对 SBS 改性沥青的试验特性进行了研究, 探讨了 SBS 改性沥青各项指标影响因素和变化规律。耿九光等^[7]和原健安等^[8]应用凝胶色谱对改性沥青的改性机理及交联结构进行了分析, 解释了 SBS 改性沥青的高低温性能改善机理。郝培文^[9]和梁乃兴等^[10]对 SBS 改性沥青相容性和配伍性、SBS 改性沥青贮存稳定性进行了研究, 发现芳香分含量高的基质沥青与 SBS 相容性较好。综上所述, 目前对 SBS 改性剂、基质沥青配

伍性、SBS 改性沥青贮存稳定性、SBS 改性沥青性能以及 SBS 改性沥青机理等研究较多, 但对于不同条件下 SBS 改性沥青表观黏度特性研究较少。因此, 笔者选择一种沥青和 SBS 改性剂, 研究不同温度、转速、时间的 SBS 改性沥青黏度变化规律, 对于进一步正确认识和应用 SBS 改性沥青具有积极意义。

1 材料制备与试验方法

1.1 原材料

试验采用的基质沥青为针入度等级为 90 号道路沥青, 其主要技术性质如表 1 所示。

表 1 基质沥青主要技术性质

Tab. 1 The main technical properties of base asphalt

| 技术指标 | 数值 |
|--------------------------------|-------|
| 针入度(25 ℃, 100 g, 5 s) / 0.1 mm | 84 |
| 针入度指数 | -1.18 |
| 延度(15 ℃) / cm | >150 |
| 软化点环与球法 / ℃ | 43.5 |

试验采用的聚合物改性剂为星型结构 SBS 改性剂, 外观呈白色, 其物理力学性能指标如表 2 所示。

1.2 SBS 改性沥青制备

先将基质沥青加热到 160 ℃ ~ 170 ℃, 将高

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013G1211007)

作者简介: 徐鸥明(1979-), 男, 安徽巢湖人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事路面结构与材料研究方面的工作, E-mail: joe52005@126.com.

速剪切分散乳化机的剪切头浸入基质沥青液面下 3 cm 左右;将调速旋钮调至 3~4 档之间,剪切速率控制为 2 500~3 750 r/min,缓慢加入称量好的 SBS 改性剂(4% 质量分数),同时用玻璃棒搅拌,使 SBS 在基质沥青中形成回流;待剪切 5 min 后,将调速旋钮调至 5~6 档之间,控制剪切速率为 5 000~6 000 r/min,再剪切 10 min 后,加入适量稳定剂,继续剪切 30 min,完成剪切工作,制备好的 SBS 改性沥青留待试验。

表 2 SBS 改性剂技术性质

Tab. 2 The technical properties of SBS

| 技术指标 | 数值 |
|----------------------------------|-------|
| 嵌段比 S/B | 30/70 |
| 挥发分/% | 0.50 |
| 300% 定伸应力/MPa | 2.5 |
| 拉伸强度/MPa | 12 |
| 扯断伸长率/% | 600 |
| 硬度(邵氏 A 值) | 82 |
| 熔体流动速率/(g·10 min ⁻¹) | 1.0 |

1.3 试验方法

试验采用 Brookfield 公司生产的 RV. DV-II + Pro 型布氏黏度计,将制备好的 SBS 改性沥青加热制样,分别测试不同时间、温度和转速条件下 SBS 改性沥青黏度值。

2 试验结果与讨论

2.1 时间对 SBS 改性沥青黏度试验结果的影响

对于非牛顿流体,在不同的测试时间,所测得的黏度不同。在试验过程中,通过软件自动采集数据,记录黏度随时间的变化规律。图 1 为基质沥青与 SBS 改性沥青在 135 ℃ 和 20 r/min 条件下测得的黏度值随时间增加的变化曲线。

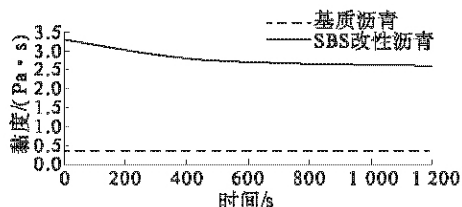


图 1 基质沥青与 SBS 改性沥青黏度-时间曲线
Fig. 1 Relationship between viscosity and time of base asphalt and SBS modified asphalt

由图可以看出,SBS 改性沥青的黏度远高于基质沥青的黏度。对于基质沥青的黏度,除了开始旋转的瞬间有轻微波动外,随着时间的增长,黏度值趋近为一条直线。这是因为,基质沥青在

135 ℃ 时属于典型的牛顿流体,对时间没有依赖性,因而黏度是一个常量^[11]。对于 SBS 改性沥青的黏度,在开始旋转阶段,黏度值会急速增加,大约经 10 s 达最大值,然后又迅速减小,经过 600 s 后达到相对稳定,此后黏度值虽然随时间增长继续降低,但降低幅度非常小。这是因为 SBS 的加入,改变了基质沥青的胶体结构:一方面,SBS 吸附了基质沥青中轻质组分,使得沥青内部相对运动变得困难;另一方面,SBS 吸附基质沥青中的轻质组分后会自身发生溶胀,当溶胀到一定程度时,SBS 会形成交联结构,成为连续相,此时沥青的运动受到网状结构的 SBS 滞留作用,从而使 SBS 改性沥青的黏度较基质沥青高很多;同时,SBS 改性沥青属于不均匀触变性流体,对时间有依赖性,虽然 SBS 在沥青中形成物理交联的网状结构,提高了 SBS 改性沥青的结构黏度,但随着剪切时间的增加,流体中沥青相与 SBS 相在界面力、氢键等相互作用下,产生局部扰动,造成物理交联结构不稳定的部分被破坏,又会导致黏度下降^[12]。

图 2 是转速为 20 r/min 时 SBS 改性沥青在不同温度下黏度值随时间的测试结果。

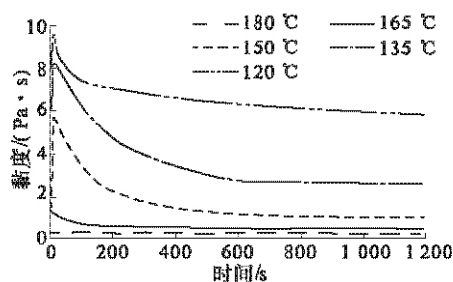


图 2 不同温度 SBS 改性沥青黏度-时间曲线
Fig. 2 Relationship between viscosity and time under different temperatures

由图可以看出,随着时间的增加,除 180 ℃ 时黏度,其他温度下的黏度值都有明显下降趋势;且温度越高,黏度达到稳定阶段所需的时间越短。这是因为,温度越高,对 SBS 改性沥青的假塑性的破坏也越快。120 ℃ 黏度在 1 200 s 时仍未趋于稳定,仍然呈明显的下降趋势;135 ℃ 黏度约在 700 s 时趋于稳定,150 ℃ 黏度约在 600 s 时趋于稳定,165 ℃ 黏度约在 400 s 时趋于稳定,而 180 ℃ 黏度随时间变化曲线近乎于一条直线,表明此时的 SBS 改性沥青已经趋于牛顿流体,剪切时间的长短,对黏度没有影响。

图 3 列出了 135 ℃ 时 SBS 改性沥青在不同转速时黏度随时间的变化曲线。

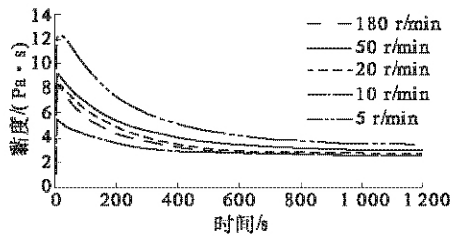


图 3 不同转速 SBS 改性沥青黏度 - 时间曲线

Fig.3 Relationship between viscosity and time under different shear rates

从图中可以看出,随着时间增加,不同转速时 SBS 改性沥青的黏度值都呈下降趋势;转速越高,黏度越小,黏度值达到稳定阶段的时间越短.转速为 5 r/min 时黏度最高,趋于稳定的时间最长,大约需 800 s;而转速 100 r/min 时黏度稳定时间约为 600 s.这表明,SBS 改性沥青交联结构对转速敏感,转速越高,剪切力越大,胶体结构中不稳定部分破坏越快,则黏度重新趋于稳定的时间越短.

由此可见,黏度值的稳定时间与温度和转速有关. SBS 改性沥青是由沥青相和 SBS 相组成,其分子量以及组成成分都有很大的差别, SBS 改性沥青的内部结构非常复杂,与基质沥青的结构有很大的差异, SBS 具有不同于基质沥青的空间结构,这种结构随着时间、温度、速率趋于稳定,温度越高、速度越大,趋于稳定的时间越短,且初始黏度与稳定黏度之间的差值越小.稳定后 SBS 改性沥青的黏度远高于基质沥青的黏度,这表明 SBS 的加入提高了沥青总分子量,增加了分子间的相互吸引力,流层相对运动时内摩擦阻力也随之增加,从而使黏度值升高.

2.2 温度对 SBS 改性沥青黏度试验结果的影响

对于一般流体,随着温度升高,分子热运动加剧,流体内部分子间的相对摩擦阻力减小,流动性增强,黏度降低,沥青材料也具有相似的变化规律^[13].图 4 和图 5 分别为基质沥青与 SBS 改性沥青在不同转速下的黏温曲线.

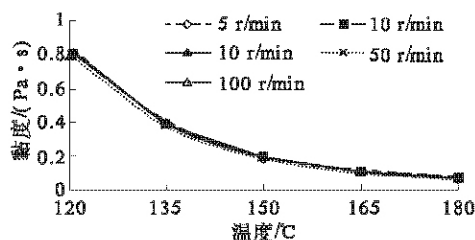


图 4 基质沥青黏度 - 温度曲线

Fig.4 Relationship between viscosity and temperature of base asphalt under different shear rates

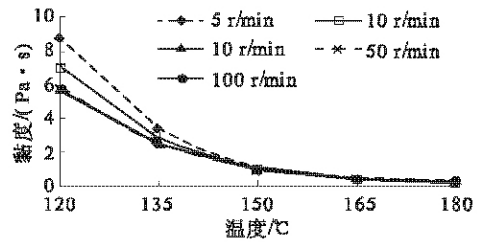


图 5 SBS 改性沥青黏度 - 温度曲线

Fig.5 Relationship between viscosity and temperature of SBS modified asphalt under different shear rates

由图 4、图 5 可以看出,基质沥青在 120 °C 以上是牛顿流体,黏度只与温度有关,与剪切速率无关,且随着温度的变化,黏度值变化范围减小. SBS 改性沥青的黏度随温度改变会发生显著变化,随着温度的升高,黏度值明显下降, SBS 改性沥青的黏度值的下降幅度较基质沥青黏度值的下降幅度大得多.这表明,加入 SBS 改变了基质沥青胶体结构,能够大幅提升 SBS 改性沥青的低温区域黏度;但随着温度升高, SBS 改性沥青的结构发生变化,沥青的流变性能也随之改变,非牛顿流体特性逐渐减弱, SBS 改性沥青趋近于牛顿流体,其黏度值与基质沥青的黏度值越来越接近.

对于 SBS 改性沥青,120 °C 黏度值与 135 °C 黏度值相差最大,135 °C 的黏度值与 150 °C 的黏度值相差次之,165 °C 黏度值与 180 °C 黏度值相差不大.这表明,温度越低, SBS 改性沥青的结构越明显,相对运动时引起的滞留能力越高;随着温度升高, SBS 改性沥青的黏度趋近于基质沥青的黏度,这对于工程实践具有重要意义,低温较高的黏度可以保证路面使用时的高温性能,而高温较低的黏度有助于施工的顺利进行.

2.3 转速对 SBS 改性沥青黏度试验结果的影响

对于高分子材料,当某个分子链段置于速度梯度流场时,由于分子链两端剪切速率不同,会使分子链两端产生相对移动,导致分子发生伸直和取向;剪切速率越大,分子取向就会越明显,这种取向作用会在一定程度上影响黏度的大小.

不同温度时的基质沥青与 SBS 改性沥青的黏度 - 速度曲线如图 6 和图 7 所示.

由图可以看出,温度不同时,转速对基质沥青几乎没有影响.这是因为,当温度高于 120 °C 时,基质沥青近似为牛顿流体,不受剪切速率的影响.对于 SBS 改性沥青,不同温度时,剪切速率的影

响不同;低温(120℃、135℃)时,随着转速的增加,黏度降低,温度越低,降低幅度越大;当温度高于150℃时,转速对黏度的影响减弱,165℃和180℃时,转速对黏度几乎没有影响,此时SBS改性沥青也已接近于牛顿流体.这是因为,温度较低时,SBS改性沥青是典型的非牛顿流体,SBS改性沥青具有基质沥青所不具有的结构^[14].这种结构是由分散在沥青中的SBS改性剂微粒之间的相互作用力所形成,微粒之间的性质和结构与微粒的性质和结构不一样,微粒会在外力的作用下发生变形取向,在SBS改性沥青结构内,因此形成层流.转速反映了剪切应力,随着转速的增加,外力作用下发生变形取向的程度增加,宏观表现为黏度值的下降.同时,微粒之间的作用力也会随着转速的增加而破坏,也会导致黏度值的下降.

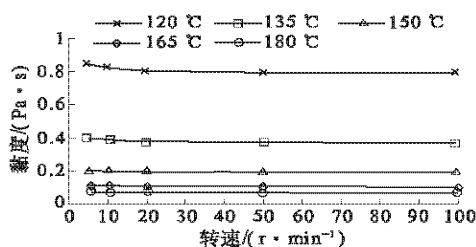


图6 不同温度时基质沥青黏度-速度曲线

Fig. 6 Relationship between viscosity and shear rate of base asphalt under different temperatures

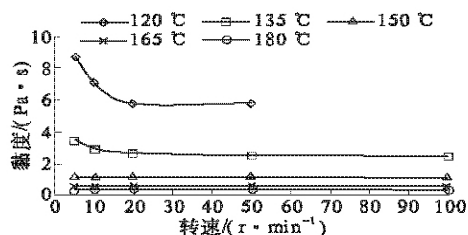


图7 不同温度时SBS改性沥青黏度-转速曲线

Fig. 7 Relationship between viscosity and shear rate of SBS modified asphalt under different temperatures

在黏度测试过程中,靠近转子的区域,转速较快;而靠近管壁的区域,转速较慢,从而使SBS改性沥青处于具有速度梯度的流场中.SBS属于高分子材料,转速越高,剪切速率越大,流场中速度梯度越大,SBS分子发生应力取向的作用越明显.当转速较低时,由于分子的布朗运动影响,取向不明显.当转速超出一定值后,布朗运动的影响可以忽略,分子进一步取向,随着转速的继续升高,取向稳定,黏度值也逐渐稳定,因此,转速超过20 r/min后,黏度值趋于稳定.

3 结论

(1) SBS改性沥青黏度值的稳定时间与温度和转速有关,温度越高、速率越大,趋于稳定的时间越短,且初始黏度与稳定黏度之间的差值越小.

(2) 温度低于135℃时,不同转速下测得的SBS改性沥青黏度差异较大;继续升高温度到135℃,由于分子热运动效应,部分不稳定交联结构逐渐解离,SBS对沥青相滞阻效应逐渐减弱,表现为不同转速下测得的黏度差异逐渐减小;当温度达到150℃后,SBS改性沥青黏度与剪切速率无关.

(3) 温度较低时(120℃),SBS改性沥青黏度在低转速区(<20 r/min)对转速变化较敏感,转速越高,SBS交联结构破坏越厉害,黏度降低越多;当转速超过20 r/min后,分子的布朗运动可以忽略,取向作用增强,继续提高转速,则分子取向逐步趋向稳定,黏度值也逐渐趋于稳定.

参考文献:

- [1] 姚德宏.我国公路建设与沥青要求[J].石油炼制与化工,2001,32(2):63-65.
- [2] 沈金安.论聚合物改性沥青的发展方向[J].公路交通科技,1998,15(1):4-9.
- [3] 黄卫东,孙立军.聚合物改性沥青显微结构及量化研究[J].公路交通科技,2002,19(3):9-11.
- [4] 张玉贞.SBS改性沥青的相容性和稳定性机理[J].石油学报,2002,23(2):68-72.
- [5] 王仕峰.苯乙烯-丁二烯共聚弹性体改性沥青的研究[D].广州:华南理工大学化工学院,2001.
- [6] 梁晓丽.SBS改性沥青试验特性研究[D].西安:长安大学公路学院,2005.
- [7] 耿九光,原键安,戴经梁.用GPC研究SBS改性沥青交联结构及其稳定性[J].郑州大学学报:工学版,2008,29(2):14-17.
- [8] 原键安,赵可.聚合物改性沥青机理研究(之二)——改性剂粒子的亚微观形态及改性机理综述[J].西安公路交通大学学报,2001,21(3):21-24.
- [9] 郝培文.SBS与沥青相容性研究[J].西安公路交通大学学报,2001,21(2):54-56.
- [10] 梁乃兴,李明国.SBS改善沥青路用性能及机理研究[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(2):17-20.
- [11] 史铁钧,吴德峰.高分子流变学基础[M].北京:化学工业出版社,2009.

(下转第91页)

文章编号: 1671-6833(2015)01-0087-05

工程翻新轮胎多元复合层型及力学模型的构建

王 强, 齐英杰

(东北林业大学 交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 为进一步提高工程翻新轮胎的使用性能和奠定理论基础, 以 26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎为研究对象, 分析并设计了翻新轮胎的基本结构及尺寸, 依据复合层型理论, 构建了由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型及胎侧层旋转圆环模型为主要构成的工程翻新轮胎多元复合层型, 依据地面力学理论, 采用极坐标的方式, 分析和探讨了多元复合层型力学模型和细观静力学平衡方程的构建, 描述了工程翻新轮胎各组成层的应力-应变关系矩阵。

关键词: 工程翻新轮胎; 多元复合层型; 力学模型; 细观静力学平衡方程; 关系矩阵

中图分类号: U4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.021

0 引言

随着我国采矿业及基础设施建设的快速发展, 土、石方作业用工程轮胎需求量不断增加, 其成本和使用越来越受到人们的关注, 轮胎的费用约占整个露天矿采费用 20%~30%。工程轮胎经常在路面不平坦且有尖锐碎石块、钉子和碎玻璃等环境下工作, 受硬物冲击较大, 轮胎胎面需具有较高的耐切割和耐磨损性能。93% 的工程轮胎失效是由于非正常磨损而引起的, 其中大部分失效后的轮胎可通过胎面翻新使其使用寿命进一步延长^[1-3]。近年来, 我国工程轮胎翻新行业发展极其迅速, 但是工程轮胎翻新质量参差不齐, 关于工程翻新轮胎的理论研究相对较少, 轮胎翻新并没有真正地 与轮胎理论相结合。笔者设计了 26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎基本结构及施工要求, 构建了由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型及胎侧层旋转圆环模型组成的工程翻新轮胎多元复合层型, 并对其力学模型和细观静力学平衡方程进行了分析和探讨。

1 工程翻新轮胎结构设计

根据工程机械轮胎标准 GB/T1190—2009 以及工程机械翻新轮胎标 HG/T3979—2007, 确定

26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎的技术参数为^[4-6]: 标准轮辋 22.00/3.0, 充气外直径 1 750 mm, 外直径 1 738 mm, 充气后轮胎外直径膨胀率 1.007, 充气断面宽 686 mm, 断面宽 673 mm, 行驶面宽度 565 mm, 断面宽膨胀率 1.019, 断面高 551.5 mm, 行驶面高 27 mm, 胎圈着合直径 635 mm, 着合宽度 564 mm, 断面水平轴位置 1.20; 耐磨型花纹, 花纹深度为 40 mm, 冠部胎面胶厚度为 40 mm, 中垫胶厚度为 2 mm, 胎侧胶厚度为 5 mm; 充气压力 (单胎) 800 kPa, 最大负荷 (单胎) 19 600 kg, 最高行驶速度 65 km/h。胎体层, 角度为 90°, 采用 1 层 0.20+18×0.18HT 钢丝帘布, 安全倍数为 18; 带束层采用 5 层结构: 1 为过渡层, 角度为 25°, 钢丝密度为 4 根/cm; 2~4 层为工作层, 角度为 22°, 钢丝密度为 5 根/cm; 1~4 层采用 3+8×0.38HT 钢丝帘线; 5 为保护层, 角度为 23°, 钢丝密度为 4 根/cm, 采用 1×5×0.38HI 钢丝帘线, 带束层安全倍数为 8; 钢丝圈为 $\phi 2.0$ mm 钢丝, 共 120 根六角形排列, 结构形式为 8-9-10-11-12-13-12-11-10-9-8, 安全倍数为 6。

2 工程翻新轮胎多元复合层型的构建

2.1 工程翻新轮胎多元复合层型的结构组成^[7]

依据 26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎结构设计及施工设计要求, 将胎面层、中垫胶层、带

收稿日期: 2014-11-10; 修订日期: 2014-11-25

基金项目: 黑龙江省科技攻关资助项目 (GC08A208)

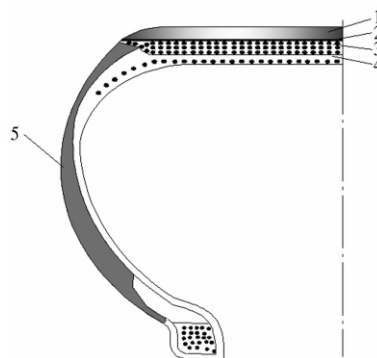
作者简介: 王强 (1981-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 东北林业大学博士研究生, 主要从事车辆轮胎技术研究, E-mail: 630702666@qq.com.

束层、胎体层及胎侧层视为不同材料组分的单元体,各层之间通过先胶合后硫化的方式粘合在一起,使工程翻新轮胎成为一个由多元材料构成的复合层型,其结构组成如图 1 所示.多元复合层型工程翻新轮胎的结构组成为:胎面层、中垫胶层及胎侧层视为由各项同性的一元橡胶材料构成,带束层和胎体层视为由各项异性的橡胶单元及钢丝帘线二元复合材料构成.

2.2 工程翻新轮胎多元复合层型的构建

胎面层、中垫胶层及胎侧层可视为橡胶各向同性材料,各层的抗拉强度、弹性模量和断裂伸长率等主要力学参数不同;带束层和胎体层由橡胶基体和钢丝帘线组成的正交各向异性复合材料,可视为“加强筋”模型^[8].如图 2 所示,工程翻新轮胎多元复合层型主要由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型、胎侧层旋转圆环模型

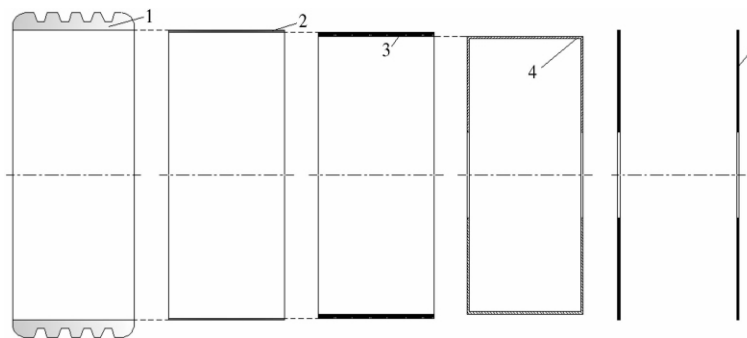
体模型及胎侧层旋转圆环模型构成,当轮胎承载时,各层分别会产生复杂的弹性变形,研究中将各层模型视为紧密的弹性过盈配合连接.



1—胎面层; 2—中垫胶层; 3—带束层; 4—胎体层; 5—胎侧层

图 1 多元复合层型的结构组成

Fig. 1 Structure and composition of multiple composite layer type



1—胎面层厚壁圆筒模型; 2—中垫胶层薄壁圆筒模型; 3—带束层薄壁圆筒模型; 4—胎体层薄壁壳体模型; 5—胎侧层旋转圆环模型

图 2 工程翻新轮胎多元复合层型的构成

Fig. 2 Constitute of engineering retreaded tire multiple composite layer type

3 工程翻新轮胎多元复合层型力学模型的构建

工程翻新轮胎多元复合层型的受力状况(如图 3 所示)与轮胎结构形式及尺寸、胎压、载荷和行驶速度等因素有关,其力的平衡条件为^[9]

$$T - F \cdot e = 0; \quad (1)$$

$$F \sin \alpha - F_T = 0; \quad (2)$$

$$F \cos \alpha - W = 0. \quad (3)$$

式中: T 为扭矩; F 为合反力; F_T 为驱动力; W 为径向载荷; e 为合反力偏心距.

轮胎的强度和刚度主要取决于每一元以及元与元之间所能承受而不致被破坏的最大应力,依据轮胎地面力学特性,笔者构建的工程翻新轮胎多元复合层型力学模型如图 4 所示.其中胎体层薄壁壳体模型内表面承受胎压 p_1 , p 和 p' , p_2 和 p'_2 , p_3 和 p'_3 , p_4 和 p'_4 分别为胎体受力膨胀后,胎

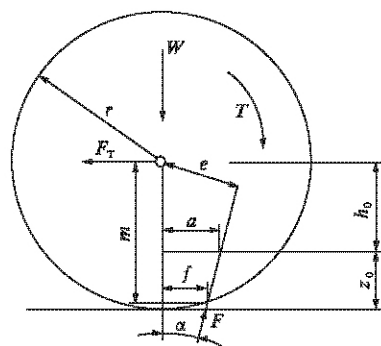


图 3 工程翻新轮胎地面受力状况

Fig. 3 Ground force status of engineering retreaded tire

体层与胎侧层、胎体层与带束层、带束层与中垫胶层、中垫胶层与胎面层之间所形成的内在张力,这些张力的大小与各层的弹性模量、泊松比及剪切模量有关.在忽略轮胎弹性体变形产生的滞后能量损失情况下,工程翻新轮胎多元复合层型力学

模型还需要满足下列关系

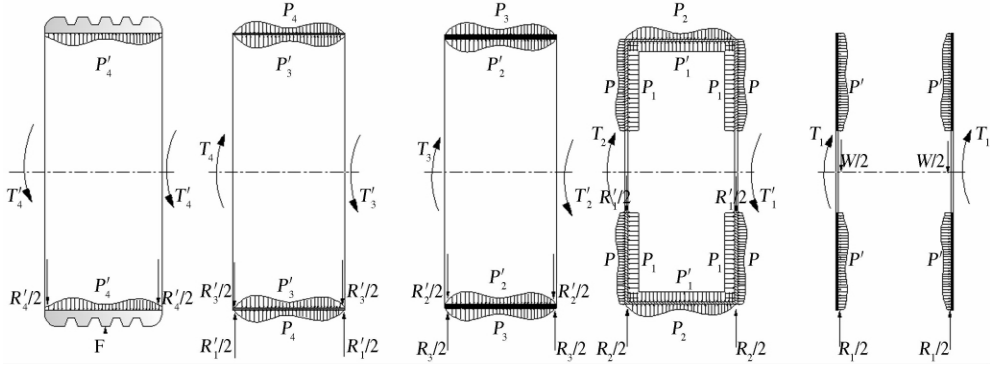
$$F \cos \alpha = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = W; \quad (4)$$

$$F \cdot e = T_4 = T_3 = T_2 = T_1; \quad (5)$$

$$R_1 = R_1' R_2 = R_2' R_3 = R_3' R_4 = R_4'; \quad (6)$$

$$T_1 = T_1' T_2 = T_2' T_3 = T_3' T_4 = T_4'. \quad (7)$$

式中符号含义与公式(1)、(2)、(3)中符号含义相同。



(a) 胎面层力学模型 (b) 中垫胶层力学模型 (c) 带束层力学模型 (d) 胎体层力学模型 (e) 胎侧层力学模型

图 4 翻新轮胎多元复合层型力学模型

Fig. 4 Mechanical model of retread tires multiple composite layer type

4 工程翻新轮胎多元复合层型细观静力学平衡方程

工程翻新轮胎细观静力学模型如图 5 所示, 变形与应力对称于轴线, 即应力和应变只是坐标 r 的函数, 与 θ 无关, 翻新轮胎各层在同一圆周上的点有相同的径向位移 u , 且 u 是 r 的函数与 θ 无关, 翻新轮胎在各层内可视为轴对称问题, 笔者采用极坐标描述其细观力学平衡方程^[10]。

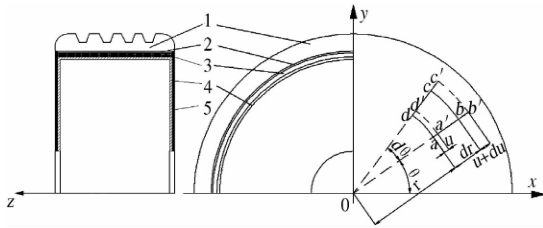


图 5 工程翻新轮胎多元复合层型细观静力学模型

Fig. 5 Meso static model of engineering retreaded tires multiple composite layer type

如图 5 所示, 微元 $abcd$ 变形后将位移到 $a'b'c'd'$, 则径向应变为

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}. \quad (8)$$

圆弧 ad 变形后将位移到 $a'd'$, 则周向应变为

$$\varepsilon_\theta = \frac{a'd' - ad}{ad} = \frac{(r+u) d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r}. \quad (9)$$

在平面应力情况下有

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_\theta); \quad (10)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \mu \sigma_r); \quad (11)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_r + \mu \varepsilon_\theta) = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right); \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_\theta + \mu \varepsilon_r) = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right). \quad (13)$$

在轴对称问题中, 如不考虑体积力, 平衡条件则化为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \quad (14)$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0. \quad (15)$$

边界条件为 $r=a$ 时, $\sigma_r = -p_1$, $r=b$ 时, $\sigma_r = -p_2$

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_1 - b^2 p_2}{b^2 - a^2} - \frac{(p_1 - p_2) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2}; \quad (16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_1 - b^2 p_2}{b^2 - a^2} + \frac{(p_1 - p_2) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (17)$$

式中: a 为胎体层内侧半径; b 为胎面层外侧半径; p_1 为胎压; $p_2 = \frac{W}{A}$ 为接地压力, 其中 W 为径向载荷, A 为接地面积。

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_1 - b^2 W/A}{b^2 - a^2} - \frac{(p_1 - W/A) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2}; \quad (18)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_1 - b^2 W/A}{b^2 - a^2} + \frac{(p_1 - W/A) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2}; \quad (19)$$

z 轴方向可视为平面应变问题, 则有

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{2\mu(a^2 p_1 - b^2 W/A)}{b^2 - a^2}; \quad (20)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r) = \frac{(p_1 - W/A) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (21)$$

工程翻新轮胎在自由充气工况下, $p_2 = 0$, 则有

$$\sigma_r' = -\frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right); \quad (22)$$

$$\sigma_\theta' = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right); \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\mu}{E} & \frac{-\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu}{E} & \frac{-\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

工程机械翻新轮胎带束层、胎体层属于正交各向异性材料, 其应力-应变关系矩阵可描述为如公式(26)形式。

5 结论

笔者构建了由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型及胎侧层旋转圆环模型组成的工程翻新轮胎多元复合层型, 并对其力学模型和细观静力学平衡方程进行了分析和探讨, 研究成果可为工程翻新轮胎的性能研究提供重要的理论参考, 研究中所构建的模型忽略了翻新轮胎的部分细节结构, 后续将进一步细化和完善工程翻新轮胎多元复合层型的构建。

参考文献:

- [1] 熊伟. 全钢载重子午线轮胎翻新的发展状况[J]. 轮胎工业, 2012, 32(7): 390-393.
- [2] 杨得兵. 大型工程机械轮胎预硫化翻新[J]. 轮胎工业, 2013, 33(6): 323-325.
- [3] 高孝恒. 提高工程机械轮胎翻新胎面胶质量的探讨[J]. 轮胎工业, 2005, 25(8): 451-455.

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{2\mu a^2 p_1}{b^2 - a^2}; \quad (24)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r) = \frac{p_1 a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2}. \quad (25)$$

工程翻新轮胎为非线性大变形结构, 笔者利用线性正交各项同性及各项异性弹性理论近似的预测其刚度, 胎面胶层、缓冲胶层及胎侧层属于各向同性材料, 其应力-应变关系矩阵可描述为^[11-12]:

- [4] 陈刚, 杨文利, 潘岱, 等. 29.5R25 全钢工程机械子午线轮胎的研究与开发[J]. 轮胎工业, 2010, 30(5): 268-273.
- [5] 李仁国, 张鹏, 程刚, 等. 14.00R20 20PR 全钢载重子午线轮胎的设计[J]. 橡胶科技, 2013(6): 342-344.
- [6] 焦世新, 姜新民, 袁燕, 等. 10.00-20 18PR 矿山用载重斜交轮胎的设计[J]. 轮胎工业, 2013, 33(2): 90-93.
- [7] 齐晓杰, 王强, 于建国. 翻新载重子午线轮胎层合结构模型的构建[J]. 橡胶工业, 2011, 58(4): 231-236.
- [8] 辛振祥, 邓涛, 王伟. 现代轮胎结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 125-126.
- [9] 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 77-78.
- [10] 齐晓杰. 载重车辆翻新轮胎承载仿真及失效机理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010: 24-28.
- [11] 危银涛, 李勇, 冯希金, 等. 轮胎理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 75-78.
- [12] 尚同羊, 张苛, 商涛涛, 等. 橡胶沥青应力吸收层设计方法探讨[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(2): 40-44.

Construction of Multiple Composite Layer Type and Mechanical Model of Engineering Retreated Tire

WANG Qiang, QI Ying-jie

(Traffic College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: 26.5R25 steel engineering meridian retreaded tire was regarded as study object, basic structure composition and dimension requirements of retreaded tires were analyzed and designed in order to lay the theoretical foundation for further improving use performance of engineering retreaded tires, engineering retreaded tire multiple composite layer type mainly composed of tread layer thick-wall cylinder model, medium cushion rubber layer thin-wall cylinder model, belt layer thin-wall cylinder model, carcass layer thin-wall shell model and tire side layer rotating ring model was constructed through theoretical analysis. Polar coordinate mode was adopted for analyzing and discussing construction of multiple composite layer mechanical model and meso-statics equilibrium equation based on ground mechanics theory. Stress-strain relation matrix of engineering retreaded tire tread rubber layer, buffer rubber layer, tire side layer, belt layer and carcass layer was described.

Key words: engineering retreated tire; multiple composite layer type; mechanical model; meso-statics equilibrium equation; relationship matrix

(上接第 86 页)

[12] 叶光华,王忠伟,谭跃辉. SBS 聚合物改性沥青的比較特性研究[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 78-81.

[13] 张肖宁. 沥青及沥青混合料的粘弹力学[M]. 北京:

人民交通出版社, 2006.

[14] HEUKELOM W. A bitumen test date chart for showing the effect of temperature on the mechanical behavior of asphaltic bitumens[J]. Journal of the Institute of Petroleum, 1969, 55: 404-417.

On the Effect of Testing Conditions on the Apparent Viscosity of SBS Modified Asphalt

XU Ou-ming¹, HAN Sen², NIU Dongyu¹, LIU Yamin²

(1. Engineering Research Center of Transportation Materials of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Education Ministry, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Viscosity is an important property of asphalt, and has a close relationship with the construction temperature and workability of the asphalt mixtures. In order to evaluate the effect of testing conditions on the viscosity, the apparent viscosity of SBS modified asphalt under different times, different temperatures, and different shear rates is studied by using Brookfield viscometer. The results shows that the apparent viscosity of SBS modified asphalt is tending towards stability with time increasing gradually. The higher the temperature and the greater the shear rate, the shorter the time for viscosity stabilizing and the smaller the difference between the initial viscosity and stable viscosity. When the testing temperature exceeds 150 °C, the variation of shear rate has little effect on the viscosity. The shear rate should be no less than 20RPM when the viscosity of SBS modified asphalt is measured at different temperatures.

Key words: SBS modified asphalt; apparent viscosity; time; temperature; shear rate

基于离散电视频带的频谱接入策略研究

陆彦辉, 张 帅, 穆晓敏, 杨守义

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于电视频带的认知网络中主用户为随机出现的无线麦克风等设备, 其随机行为使得可用频谱离散化, 产生许多小于用户需求的频谱碎片. 将主用户行为建模为 Markov 过程, 定义频谱占用度、碎片度及统计平均中断概率来分析其行为对系统性能的影响, 并提出两种接入策略, 策略一加入调整因子并优先选取较少连续信道, 策略二基于 k -agile 接收机, 考虑保护带及灵敏度约束, 以最小碎片数为目标, 非连续地接入频谱, 在物理层解决碎片问题, 仿真证明二者性能均优于已有策略.

关键词: 认知无线电; Markov 过程; 频谱碎片; 频谱接入策略; 中断概率

中图分类号: TN943

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.022

0 引言

随着无线技术的发展, 频谱紧缺问题愈发严重, 而 TV 频带因其良好的传播特性, 且在多数地区存在较大空闲而备受人们关注, 由此形成了 IEEE 802.22 协议^[1-3]. 其中主用户为随机出现的无线麦克风等设备, 随机占用/释放授权信道, 可用频谱被离散为一系列由若干连续信道组成的碎片. 而分布式系统没有控制中心, 相邻频块间由功率泄露造成的跨频干扰直接影响通信质量, 故接入策略应兼顾由碎片导致的可用频谱非连续及跨频干扰问题.

文献[4]基于 k -agile 接收机解决非连续性问题, 但忽略了跨频干扰, 文献[5-6]以插入保护频带的方法消除跨频干扰, 但未能解决非连续性问题. 已有策略未充分考虑非连续及跨频干扰问题, 且忽略了频谱结构随主用户的动态变化, 使碎片问题的研究缺乏普适性. 为此笔者将主用户行为建模为 Markov, 通过频谱占用度和碎片度分析其对系统性能的影响, 并考虑非连续及跨频干扰问题, 提出两种接入策略, 通过统计平均中断概率衡量策略性能.

笔者通过离散 Markov 模型, 分析主用户行为对频谱结构的影响, 并以此提出两种接入策略以解决实际中的频谱碎片问题, 提高资源利用率.

1 系统模型

1.1 认知网络模型

基于 TV 频带的分布式认知网络系统中, 次用户通过认知节点 AP (Access Point) 接入主干网 (VHF/UHF 频带), 一个 AP 可连接多个次用户. 存在通信需求时由 AP 选择满足自身及相连次用户需求的可用频段, 并将之广播给次用户, 次用户随之调整中心频率等参数接入该频段.

而由于主用户的随机行为, 主干网中空闲 TV 频带被离散为一系列碎片, 图 1 为一种具体分布. 设信道数为 N , 这里信道指一个 TV 信道 (6 MHz), 可用信道 (未被主用户占用) 1、2 和 3 即为一个碎片. 由于多个认知网络均可接入主干网, 故可用信道上存在来自其它认知网络的传输, 即背景传输^[6].

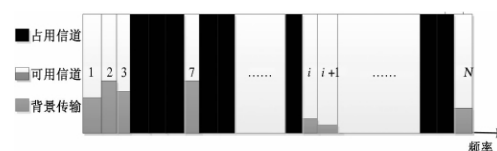


图 1 频谱结构

Fig.1 The structure of spectrum

由此定义空时利用率, 即可用信道被其它认知网络占用的比率, 其值可由 SIFT 技术^[6]获得,

收稿日期: 2014-08-25; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61271421); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-12-0699)

作者简介: 陆彦辉 (1972-), 女, 河南许昌人, 郑州大学教授, 博士, 主要研究方向是无线通信系统资源管理, Email: ieyhlu@zzu.edu.cn.

则可用信道共享率为

$$\rho_n(c_i) = \max\left(1 - A_{c_i}^n, \frac{1}{B_{c_i}^n + 1}\right). \quad (1)$$

式中: $A_{c_i}^n$ 为节点 n 处测得的可用信道 c_i 的空时利用率; $B_{c_i}^n$ 为 c_i 上的背景传输数. 即使 $A_{c_i}^n = 1$, 节点 n 竞争接入, 至少能平分到 $1/(B_{c_i}^n + 1)$ 的利用率, 二者最大值即 c_i 的共享率, 则可达速率为

$$M_n(C) = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^N \rho_n(c_i) \cdot a_i \cdot x_i \cdot W - G(C) \right). \quad (2)$$

$$G(C) = \left(\sum_{i=1}^N a_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^{N-1} a_i \cdot a_{i+1} \cdot x_i \cdot x_{i+1} \right) \cdot 2B_{\text{guard}}. \quad (3)$$

式中: C 为接入频段; $\sum_{i=1}^N \rho_n(c_i) \cdot a_i \cdot x_i$ 为 C 的总共享率; W 为信道带宽 6 MHz, 信道状态 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$, $a_i = 1$ 即信道 c_i 可用, $x_i \in \{0, 1\}$, $x_i = 0$ 即不选 c_i . $\sum_{i=1}^N a_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^{N-1} a_i \cdot a_{i+1} \cdot x_i \cdot x_{i+1}$ 为 C 中碎片数, $G(C)$ 为保护带消耗, 其中保护带是为消除跨频干扰而在频段两端保留的空白频带, 不用于数据传输, 设其大小 B_{guard} 不变^[5], 最后将共享到的总带宽归一化即得速率 $M_n(C)$.

1.2 频谱结构模型

图1只是一种分布情况, 而实际频谱结构随主用户行为动态变化, 为定性分析, 笔者定义频谱占用度 ζ 和碎片度 η

$$\zeta = 1 - \frac{K}{N}, \quad \eta = 1 - \frac{1}{S}.$$

式中: N 为总信道数, K 为可用信道数, S 为碎片数. 设信道同构, 根据已有研究^[2], 设主用户的到达服从泊松分布, 到达率为 λ , 离开服从负指数分布, 离开率为 μ . 将变量 K 建模为离散 Markov, 状态空间为 $\{0, 1, \dots, N\}$, 则状态转移概率率为

$$R_{k,l} = \sum_{i=\max(0, k+l-N)}^{\min(k,l)} \binom{k}{i} (1-\lambda)^i \lambda^{k-i} \cdot \binom{N-k}{l-i} \mu^{l-i} \cdot (1-\mu)^{N-k-l+i}, 0 \leq k, l \leq N$$

设稳态概率为 $T^R = \{T_0, T_1, \dots, T_N\}$, 由 $T^R R = T^R, T_0 + T_1 + \dots + T_N = 1$ 得:

$$T^R = B A^{-1}. \quad (4)$$

其中, R 为状态转移矩阵, 系数矩阵 A, B 为:

$$A = \begin{bmatrix} R_{0,0} & R_{1,0} + 1 & R_{2,0} + 1 & \cdots & R_{N,0} + 1 \\ R_{0,1} & R_{1,1} - 1 & R_{2,1} & \cdots & R_{N,1} \\ R_{0,2} & R_{1,2} & R_{2,2} - 1 & \cdots & R_{N,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ R_{0,N} & R_{1,N} & R_{2,N} & \cdots & R_{N,N} - 1 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)}$$

$$B = (1, 0, 0, \dots, 0)_{(N+1) \times 1}^T.$$

对于方阵 A , 若其不满秩, 则存在某一行可由其余行表示, 假设其中第 i 行可由其余行表示, 则必然存在一组不全为 0 的 $\{b_0, b_1, \dots, b_N\}$, 使该行各元素均可由其所列的其它元素表示, 即 $b_0 \cdot R_{0,0} + b_1 \cdot R_{0,1} + \dots + b_N \cdot R_{0,N} = 0$, 而由各行元素之和为 1, 可得 $b_0 = b_1 = \dots = b_N = 1$, 但该组值并不能使行中其它列元素之和为 0, 即该行不能通过其余行表示, 同理方阵 A 中各行均不可由其余行表示, 则假设不成立, 方阵 A 满秩, 则由式(4) 可得 $(N+1)$ 列向量 T^R 唯一解.

$S = \{1, 2, \dots, K\}$ 为 K 个可用信道中碎片数, 可归结为组合数学问题, 分为两步求解. 首先不考虑碎片大小, 用 $S-1$ 个被主用户占用的频谱块去分隔 S 个可用频谱碎片, 剩余 $K - (S-1)$ 个被占用信道分为 $(S+1)$ 组插入分隔后的结构中, 则组合数为 $\binom{N-K+1}{S}$, 其次在上述结构下将 K 个可用信道分为 S 组, 为各碎片分配具体可用信道数, 得组合数为 $\binom{K-1}{S-1}$. 两步求解可得 K 个可用信道中有 S 个碎片的概率为

$$\Pr\{S | K\} = \frac{\binom{N-K+1}{S} \cdot \binom{K-1}{S-1}}{C_N^K}. \quad (5)$$

由此可通过 ξ 和 η 描述主用户行为对频谱结构的影响, 二者概率可分别由式(4) 和(5) 确定.

1.3 问题描述

设各 AP 不同时接入, 则可由中断概率衡量接入策略性能, 综上碎片度及占用度的分析, 笔者定义统计平均中断概率 P_{out}^- 为

$$\overline{P_{\text{out}}} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^k \sum_{l=1}^L T_k^R \cdot \Pr\{S | k\} \cdot \Pr\{M_l(C^{k,n}) < M_l^{\text{req}}\}. \quad (6)$$

式中: M_l^{req} 为 l^{th} 节点自身及相连次用户的总速率需求; $C^{k,n}$ 为当前频谱结构下的可用信道集合; $\Pr\{M_l(C^{k,n}) < M_l^{\text{req}}\}$ 为当前可用频谱(去掉保护带)不能满足节点需求的概率.

频谱碎片下, 动态频谱接入的目标是最小化 $\overline{P_{\text{out}}}$. 故相较于传统接入策略^[6], 下文以最小 $\overline{P_{\text{out}}}$ 为目标, 提出两种接入策略以提高系统性能.

2 动态频谱接入策略

2.1 基于连续接入的改进策略

文献[6] 策略完全占用可用信道, 如信道 1

共享率为0.6,若共享0.3即可满足需求,则完全占用会造成资源的严重浪费,故策略一加入自适应调整,根据节点实际需求,动态调整占用度,如上述信道1,若共享0.3的信道即可满足需求,则保留该信道上0.3的共享率给下一节点.而为降低实现复杂度,加入调整因子 β ,依据 β 逐步调整占用度,释放多余共享率,且优先选择满足需求的最少连续信道.

策略一具体流程如下.

(1) 确定总信道数 N 、节点数 L 、到达和离开率 λ, μ 及 B_{guard} ,由 η 和 ξ 确定信道状态 A .

(2) 由式(1)、(4)和(5)得 $\rho(c_i)$ 、 T_k^R 和 $\Pr\{S=n\}$.

(3) 对 l^{th} 节点,由 A 搜索所有可能的连续信道组合,并由式(2)映射到速率域,同时按所占连续信道个数由小到大排序,依次找出满足 M_l^{req} 频段 $C_{\min} = \{C_1, C_2, \dots, C_i\}$,若均不满足 M_l^{req} ,则记录一次中断 $\text{Lost}(l) = 1$.

(4) 更新信道状态 $A(C_{\min}) = 0$.

(5) 设调整因子为 β ,根据 M_l^{req} 调整占用度.

while($(M(C_{\min}) - M_l^{\text{req}}) \geq \beta$)

$time = time + \beta, \rho(c_i) = time,$

$A(c_i) = 1$

$M(C_{\min}) = M(C_{\min}) - \beta$

end while

(6) 令 $l = l + 1$,重复3~5,并由式(6)计算 $\overline{P_{\text{out}}}$.

(7) 循环2~7并记录 $\overline{P_{\text{out}}}$,最终结果取均值.

2.2 基于非连续的改进策略

如图2所示,连续频谱接入基于1-agile接收机,只能接入一段连续信道,策略二基于k-agile接收机^[4],在物理层聚合多个非连续信道以解决碎片问题.

但k-agile接收机并非无限制的,其至多能同时接入 k 个非连续信道, k 即为其灵敏度,且接入碎片越多,消耗保护带也越多.故策略二节点以碎片数最小为目标,选择能以最小保护带消耗满足通信需求的频段,可归纳为

$$\min_X G(C) = \left(\sum_{i=1}^N a_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^{N-1} a_i \cdot a_{i+1} \cdot x_i \cdot x_{i+1} \right) \cdot 2B_{\text{guard}}; \quad (7)$$

$$\text{s. t. } M_l(C) \geq M_l^{\text{req}}; \quad (8)$$

$$\left(\sum_{i=1}^N a_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^{N-1} a_i \cdot a_{i+1} \cdot x_i \cdot x_{i+1} \right) \leq k^{\text{agile}}. \quad (9)$$

其中, k^{agile} 为灵敏度, $X = \{x_i | i \in \{1, 2, \dots, N\}\}$.

优化问题(7)即为找出一组 x_i ,使其满足约束条件的同时,所消耗的保护带最小.该问题属于整型规划问题,采用遍历搜索法进行求解.

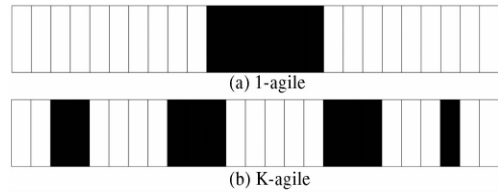


图2 两种接收机比较

Fig. 2 Comparison of two kinds of receivers

策略二具体流程如下.

(1) 确定总信道数 N 、节点数 L 、到达和离开率 λ, μ 及 B_{guard} ,由 ξ 和 η 确定 A .

(2) 由式(1)、(4)和(5)得 $\rho(c_i)$ 、 T_k^R 和 $\Pr\{S=n\}$.

(3) 依次为 L 个节点选择满足(7)的频段.

for $l = 1 : L$

在约束(9)下,根据 A 搜索所有连续或非连续信道组合,按碎片数由小到大排列,记为 MK

for $k = 1 : \text{length}(MK)$

if $MK(k) \geq M_l^{\text{req}}$

跳出并记录 C ,反之 $\text{Lost}(l) = 1$

end if end for

更新信道状态 $A(C) = 0$

end for

(4) 由3中得到的 Lost ,依式(6)计算 $\overline{P_{\text{out}}}$.

(5) 循环2~4并记录 $\overline{P_{\text{out}}}$,最终结果取均值.

综上所述,策略一和策略二性能的提升是以复杂度为代价的,策略一根据 β 调整占用度,调整次数将随 β 的减少而增大,即与实际需求相差愈小调整次数越多.策略二在灵敏度 k 的限制下,考虑所有可能信道组合,增加了搜索的次数,故两种策略下的复杂度均有所上升.但相较于其性能的提升,付出的复杂度代价是值得的.

3 仿真分析

为便于仿真,设节点数 $L = 3$,总信道数 $N = 10$,灵敏度为5,空时利用率随机分布,各节点速率需求服从同一均匀分布: $M_l^{\text{req}} \sim U(0.5 \overline{M}^{\text{req}}, \overline{M}^{\text{req}})$,以下结果均是经过1 000次循环后所得.

3.1 保护带大小对系统性能的影响

图3为保护带大小对系统性能的影响.设 B_{guard} 为 $\{0.1 \sim 1.1 \text{ MHz}\}$,其它参数不变.由于 ξ 和 η 均对结果产生影响,故考虑所有可能的 ξ 及

η , 最终结果取均值。

随着 B_{guard} 的增大, 去掉保护带后的剩余带宽减少, 三种策略 $\overline{P_{\text{out}}}$ 均增大。且 $\lambda + \mu$ 一定, λ 较高时, 统计情况下得到的可用信道数较少, 此时 $\overline{P_{\text{out}}}$ 较高, 而 μ 对 $\overline{P_{\text{out}}}$ 的影响则相反。由于策略二在满足约束 (9) 下可灵活选择多个非连续信道, 故策略二性能最优, 策略一加入调整因子 β 并优先选择较小连续频段, 性能介于二者之间。

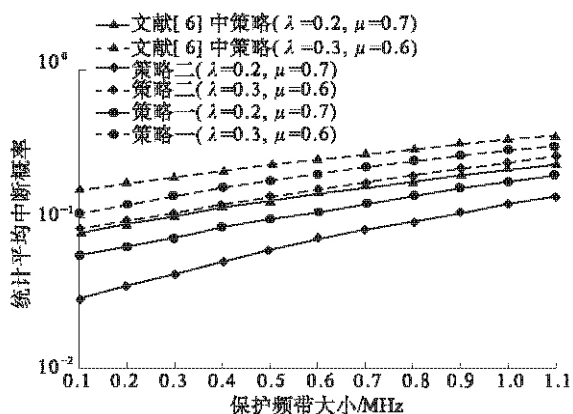


图3 保护带大小对系统性能的影响

Fig.3 The impact of guard-band width on the performance

3.2 频谱占用度对系统性能的影响

图4为 ξ 对性能的影响, 当占用度 ξ 为0, N 个信道全部可用时, 3种策略 $\overline{P_{\text{out}}}$ 均最低, 随着 ξ 的增大, 可用信道数减少, $\overline{P_{\text{out}}}$ 逐渐上升。而 $\xi = 0.8$ 开始, 由于信道几乎全被主用户占用, 故3种策略 $\overline{P_{\text{out}}}$ 均趋于1。

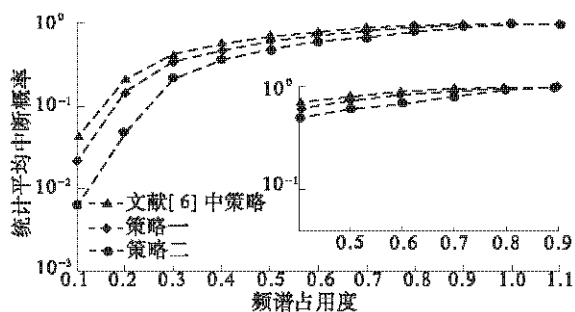


图4 ξ 对系统性能的影响

Fig.4 The impacts of ξ on the system performance

3.3 节点数及灵敏度对系统性能的影响

从图5和图6可知, 由于策略一和文献[6]策略均基于连续频谱, 故灵敏度对其无影响。而策略二, k^{agile} 为其能至多接入的碎片数, k^{agile} 越大, 其灵活性优势越明显, $\overline{P_{\text{out}}}$ 越低, 此时随着条件 (9) 约束逐渐减弱, k^{agile} 的增加对策略二的影响亦减

弱, 故 $\overline{P_{\text{out}}}$ 的降低程度逐渐变缓, 当 k^{agile} 大于等于5时, 因 k^{agile} 大于信道中最大碎片数, 此时其可任意接入, 约束 (9) 可忽略, $\overline{P_{\text{out}}}$ 呈一条直线, 而 k^{agile} 为1时, 策略二则等效于文献[6]策略。

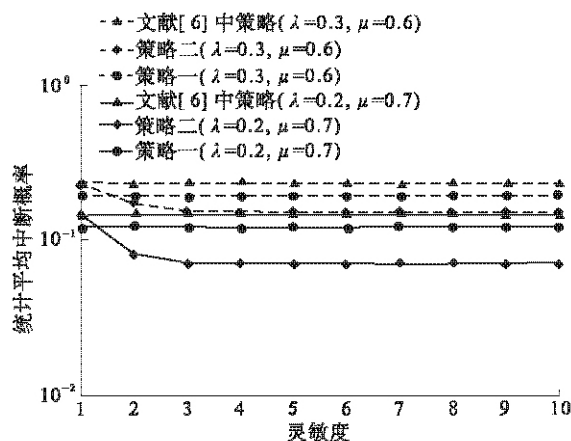


图5 灵敏度对系统性能的影响

Fig.5 The impact the agility on the system

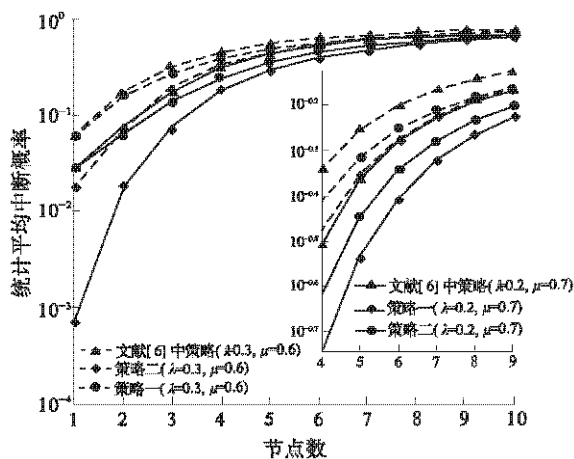


图6 节点数对系统性能的影响

Fig.6 The impact of the number of nodes on the system

节点数为1时, 由于没有节点再接入, 故策略一调整与否对结果无影响。而节点增多时, 策略一调整因子优势得以体现, 性能优于文献[6]。对于策略二, 节点数较少时, 其灵活性优势更能体现, 当节点数较多时, 由于总信道数固定, 接入的节点越多, 其灵活性优势越弱。

4 结论

笔者利用离散 Markov, 通过频谱占用度及碎片度分析由主用户随机行为产生的碎片问题。并提出两种接入策略, 策略一带有调整因子并优先选取较少连续信道, 策略二基于 k -agile 接收机, 考虑保护带及灵敏度约束非连续地进行接入。二

者虽在复杂上略高于已有策略,但这种代价相较于其性能的提升是值得的。

参考文献:

- [1] SHIN K, KIM H, MIN A, et al. Cognitive radio for dynamic spectrum access: from concept to reality [J]. *Wireless Communication, IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 17(6): 66–74.
- [2] NAVID T, SONIA A. Modeling and analysis of cognitive radio based IEEE 802.22 wireless regional area networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4363–4375.
- [3] KANG K M, JEONG B J. TV band device for TV white space field trial [J]. *IEEE ICCE*, 2014, 10(1): 450–451.
- [4] LILI C, LEI Y, HAITAO Z. The Impact of Frequency – Agility on Dynamic Spectrum Sharing [C]//In Proc of the IEEE DySPAN. Singapore, 2010, 6(4): 1–12.
- [5] HOU W, LIN Z, LEI Y, XIUMING S. Guardband Analysis for Distributed OFDMA with User Heterogeneity [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2011, 16(2): 83–89.
- [6] BAHL P, CHANDRA R, MOSCRIBRODA T, et al. White space networking with Wi-Fi like connectivity [C]//In Proc of the SIGCOMM. Spain, 2009: 27–38.
- [7] BRUALDI R. *Introductory Combinatorics* [M]. Pearson, 2009: 128–136.
- [8] 杨守义,郝万明. 认知无线电中考虑公平性的 OFDMA 资源分配策略 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2014, 35(3): 55–59.

Dynamic Spectrum Access Strategies in the Cognitive Radio Network Based on the Discrete TV Band

LU Yan-hui, ZHANG Shuai, MU Xiao-min, YANG Shou-yi

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

Abstract: The unused TV bands are discretized by the behaviors of the random presence of the incumbents, considered as primary users in the cognitive radio network. The spectrum discreteness is ignored by most of the existing strategies, resulting in a mass of spectrum fragments that cannot afford the user's demand. In the paper, the primary users are modeled as a Markov process, and the spectrum occupancy degree, fragments degree and the statistical average outage probability are defined to analyze the impact of the primary users on system performance. And two strategies are proposed in this paper. The first strategy involves adjustment factor and selects the fewer continuous channels. The second strategy based on the k-agile receiver involves the constraint of agility and guard bands, and selects the minimum non-contiguous fragments to solve the fragments problem in the physical layer. The simulations show that both strategies are superior to the existing strategies.

Key words: cognitive radio; Markov process; spectrum fragment; spectrum access strategy; outage probability

基于改进的小波核主元分析故障检测

张端金, 汪爱娟

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 研究了基于核主元分析的非线性系统故障检测问题. 提出了一种改进的小波核主元分析的故障检测方法. 该方法首先对数据进行小波去噪预处理, 然后再利用小波核函数, 将非线性的输入空间转换到线性特征空间. 在特征空间使用主元分析, 结合 SPE 统计量和 T^2 统计量对非线性系统进行故障检测. 仿真结果表明: 该方法能够提高故障检测性能.

关键词: 核主元分析; 小波核函数; 小波去噪; 故障检测

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.023

0 引言

随着现代工业和科学技术的飞速发展, 设备的结构变得复杂化. 系统的安全性和可靠性对人类社会产生巨大影响. 因而, 对这类系统进行故障检测设计具有重大的现实意义.

近年来, 多变量过程控制技术得到了很大的发展, 取得很多成果. Chan 等^[1]提出了基于特征值分解的改进 PCA 故障检测方法, 马贺贺等^[2]利用高阶统计量来获取过程信息, 提出了一种新的统计量核主元分析方法, 故障检测. 郭珂^[3]提出了一种小波核函数用于故障检测, 但是没有对采集数据进行预处理. 陈亮等^[4]采用多项式核函数对非线性系统故障进行检测, 对数据预先进行了小波去噪处理, 提高了故障检测性能. 倪国文^[5]提出了 PCA 本身就是一种去噪方法, 自身实现了数据预处理, 达到了很好的检测效果.

综上, 文献中还没有用到小波核函数和小波去噪结合起来进行故障检测的方法. 基于此, 笔者提出了一种新的非线性故障检测方法. 利用小波核函数和小波去噪相结合的方法进行故障检测. 并通过算例仿真, 验证了该方法的有效性.

1 小波分析

采集到的数据包含噪声, 直接利用这些受噪声干扰的数据进行故障检测, 必然会影响故障检

测的准确性. 因此, 在进行故障检测之前对数据进行去噪处理是必要的.

小波变换是时间和频率的局部变换, 因而能有效地从信号中提取信息. 通过伸缩和平移运算可对函数或信号进行多尺度的细化分析, 解决了傅里叶变换不能解决的许多困难问题.

2 基于小波核主元分析故障检测

小波核主元分析方法在故障检测中能够很好地提取系统中的非线性特征信息, 减少重要信息的丢失. 因此, 该方法可以提高故障检测的准确率, 大大减少误报和漏报率, 具有很好的非线性故障检测能力.

2.1 小波核主元分析

由 Scholkopf^[6]提出的核主元分析能够弥补主元分析在处理非线性系统方面的缺陷, 很好地捕捉非线性系统的特征信息.

已知采样数据 $\mathbf{X}_{n \times m} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]$ ($\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^m, i=1, 2, \dots, n$), n 为采样点数, m 为变量个数. 将采样数据通过非线性变换 φ , 映射到高维特征空间, 再利用主元分析法, 结合 SPE 统计量和 T^2 统计量进行故障检测.

在特征空间中, 假设 $\varphi(\mathbf{x}_i), i=1, 2, \dots, n$ 已经过中心化处理, 采样协方差矩阵可以表示为

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi(\mathbf{x}_i) \varphi(\mathbf{x}_i)^T. \quad (1)$$

收稿日期: 2014-08-07; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471323); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A120004)

作者简介: 张端金(1966-), 男, 湖北荆州人, 郑州大学教授, 博士, 研究方向为故障检测与估计, E-mail: djzhang@zzu.edu.cn.

通过确定 C 的特征向量 ν 就可以获得特征空间中的主元.

$$\lambda \nu = C\nu. \quad (2)$$

在 $\lambda \neq 0$ 的条件下, ν 的所有解都可以由 $\varphi(x_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ 表示, 即

$$\nu = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi(x_i). \quad (3)$$

因此, 式(2)可以表示为

$$\lambda < \varphi(x_k), \nu > = < \varphi(x_k), C\nu >. \quad (4)$$

由式(3)和式(4)得

$$\begin{aligned} \lambda \sum_{i=1}^n \alpha_i < \varphi(x_k), \varphi(x_i) > = \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i < \varphi(x_k), \sum_{j=1}^n \varphi(x_j) > < \varphi(x_j), \varphi(x_i) >. \end{aligned} \quad (5)$$

小波函数如下所示:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\pi^{1/4} \sqrt{3\alpha}} \left(1 - \frac{x^2}{\alpha^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\alpha^2}\right). \quad (6)$$

把上式看做一个母小波, 如果 $x, x' \in \mathbb{R}^n$, 那么小波核函数为

$$\begin{aligned} K(x, y) &= \prod_{i=1}^n \Phi(x_i - y_i) = \prod_{i=1}^n \frac{2}{\pi^{1/4} \sqrt{3\alpha}} \cdot \\ &\left(1 - \frac{(x_i - y_i)^2}{\alpha^2}\right) \exp\left(-\frac{(x - y)^2}{2\alpha^2}\right) = \prod_{i=1}^n \frac{2}{\pi^{1/4} \sqrt{3\alpha}} \cdot \\ &\left(1 - \frac{(x_i - y_i)^2}{\alpha^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x - y)^2}{2\alpha^2}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

具体的证明过程详见文献[2].

定义一个小波核矩阵 K , 如下所示:

$$[K]_{ij} = K(x_i, x_j) = < \varphi(x_i), \varphi(x_j) >. \quad (8)$$

式中: $K(x_i, x_j)$ 是在特征空间中利用核函数计算两个向量的内积.

把式(5)代入式(8)中, 可以得到

$$n\lambda \alpha = K\alpha. \quad (9)$$

其中, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$, 式(9)的求解问题和在特征空间中进行主元分析是等价的.

令 $\lambda(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n)$ 为 K 的特征值, 那么 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$ 为对应的特征向量. 对特征向量 ν 进行归一化

$$< \nu^k, \nu^k > = 1. \quad (10)$$

由式(3)可得

$$\lambda_k < \alpha_k, \alpha_k > = 1. \quad (11)$$

那么任何一个样本向量 x 在特征空间中的第 k 个主元计算为

$$t_k = < \nu_k, \varphi(x) > = \sum_{i=1}^n \alpha_i^k < \varphi(x_i), \varphi(x) >. \quad (12)$$

在特征空间中进行主元分析之前, 先对矩阵 K 进行标准化处理, 因为假设特征空间中数据的均值是零, 而实际运算用到的是核矩阵 K , 所以要对它进行如下标准化处理. 具体推导过程详见文献[7].

$$\bar{K} = K - I_n K - K I_n + I_n K I_n. \quad (13)$$

2.2 故障检测

T^2 统计量的定义为

$$T^2 = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_k] \Lambda^{-1} [t_1, t_2, t_3, \dots, t_k]^T. \quad (14)$$

如果样本的均值和协方差分别与建模样本的均值和协方差相等, 则 T^2 统计量服从自由度为 K 的 χ^2 分布. 如果给定显著性水平 α , 那么 T^2 统计量的控制限由下式计算

$$T_\alpha^2 = \chi^2(k). \quad (15)$$

如果样本的协方差未知, 而是通过建模样本的协方差矩阵来估计时, T^2 统计量服从自由度为 k 和 $n-k$ 的 F 分布, n 是样本点数. T^2 统计量的控制限由下式计算.

$$T_\alpha^2 = \frac{k(n^2-1)}{n(n-k)} F_\alpha(k, n-k). \quad (16)$$

在正常情况下, T^2 统计量的值应处于该控制限之内, 出现故障时, 统计量会超出控制限.

SPE 统计量的定义为

$$e = x - t p_k^T = x(I - p_k p_k^T). \quad (17)$$

$$\text{SPE} = e e^T. \quad (18)$$

给定显著性水平为 α , 计算 SPE 统计量的控制限为

$$\text{SPE}_\alpha = \theta_1 \left[\frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1^2} \right]^{1/h_0}. \quad (19)$$

式中: $\theta_1 = \sum_{i=k+1}^m \lambda_i$; $\theta_2 = \sum_{i=k+1}^m \lambda_i^2$; $h_0 = 1 - \frac{2\theta_1 \theta_3}{3\theta_2}$; C_α 是置信限为 $(1-\alpha)\%$ 的高斯分布.

对新的采样数据进行故障检测时, 建立检测统计量指标进行假设检验, 通过计算检测统计量是否超过控制限, 来判断故障是否发生.

改进的算法步骤如下.

(1) 采样得到正常无故障样本 X , 并标准化. 然后用 db5 小波对 X 中的每一列数据去噪;

(2) 选择小波核函数做非线性映射, 计算核矩阵 $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $K_{ij} = K(x_i, x_j) = < \varphi(x_i), \varphi(x_j) >$, n 为采样点数;

(3) 对核矩阵进行中心化处理, $\bar{K} = K - I_n K - K I_n + I_n K I_n$, 其中,

$$I_n = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix};$$

(4) 解方程 $\lambda \alpha = (1/n) \bar{K} \alpha$, 并归一化, 即 $\langle \alpha_k, \alpha_k \rangle = 1/\lambda_k$;

(5) 根据累计方程贡献率的方法, 确定核主元分析的个数, 即 $\eta_p = \sum_{i=1}^p \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$, 一般选择 $\eta_p \geq 85\%$;

(6) 计算 T^2 和 SPE 控制限;

以上步骤是正常无故障数据的建模模型.

(7) 对于采集的新测试数据 x_{new} , 先进行标准化, 然后进行小波去噪. 非线性主元的计算公式为

$$t_k = \langle v_k, \varphi(x_{\text{new}}) \rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i^k k_w(x_i, x_{\text{new}});$$

(8) 计算新的统计量, 检测是否超出控制限.

3 仿真研究

以如下典型的非线性系统^[8]为研究对象.

$$\begin{cases} x_1 = t + e_1; \\ x_2 = t^2 - 3t + e_2; \\ x_3 = -t^3 + 3t^2 + e_3. \end{cases} \quad (20)$$

其中, e_1, e_2 和 e_3 为服从均值为零, 方差为 0.01 的正态独立噪声变量, $t \in [0, 0.1, 2]$. 取 400 个无故障数据采样点, 建立 KPCA 故障检测模型, 然后取 200 个有故障数据采样点, 在第 160 个采样点引入均值为 0.5 的偏差故障. 本仿真系统采用小波核函数, $k_w(x, x') = (1 - (\|x - x'\|^2/\alpha)) \exp(-(\|x - x'\|^2/\alpha))$, $\alpha = 45$. 所得结果如图 1 和图 2 所示, 结合 SPE 和 T^2 统计量, 横线代表 99% 的控制限, 超出红线为故障数据点, 横线以下为正常数据点. 据此, 能判断出系统是否发生故障.

在图 1 和图 2 中, T^2 统计量的仿真图形变化趋势基本一致, 在 1~159 个采样点之间均没有超出控制限制, 代表采样信号在主元空间没有发生偏移, 160~200 个采样点之间超出控制限, 代表采样信号在主元空间发生了偏移, 出现了故障. 图 1 中, SPE 统计量的仿真图, 1~159 是正常数据点, 但超过 99% 控制限的数据点有 12 个, 误报率为 7.55%. 图 2 中, SPE 统计量的仿真图, 1~159 是正常数据点, 但超过 99% 控制限的数据点有 2 个, 误报率为 1.26%. 图 1 采用的是 marr 小波核,

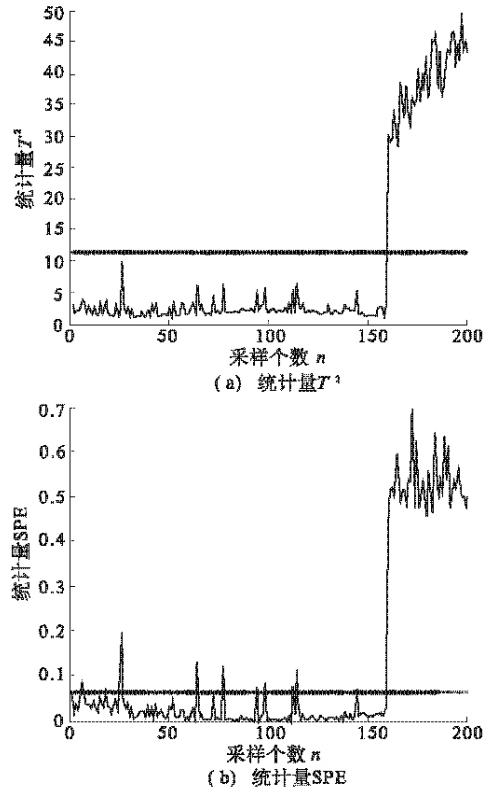


图 1 小波核主元分析检测结果

Fig.1 Detection results of wavelet kernel principal analysis

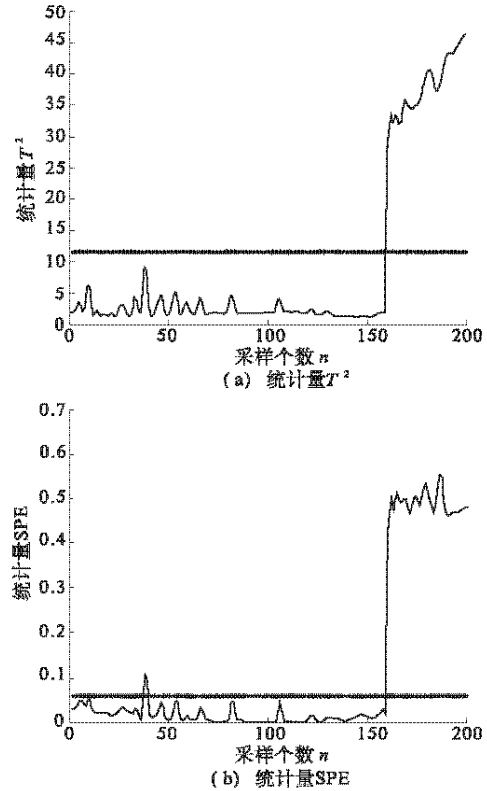


图 2 改进的小波核主元分析检测结果
Fig.2 Detection faults of the improved wavelet kernel principal analysis

没有进行去噪处理. 图 2 采用的是 marr 小波核, 小波去噪用的是 db5 小波. 核参数取 45. 图 1 比图 2 的误报率高, 原因是采集到的数据包含噪声, 直接利用这些受噪声干扰的数据进行故障检测, 必然会影响故障检测的准确性. 由此可见, 采用小波去噪对数据进行处理, 减小了噪声对故障检测的影响, 降低误报率, 提高检测性能.

4 结论

笔者给出了小波核函数和小波去噪相结合的故障检测方法. 首先, 对采样数据利用小波去噪进行预处理, 提高了建立模型的准确性. 然后利用小波核主元分析进行故障检测, 大大提高了故障检测率. 通过算例仿真, 验证了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] CHAN S C, WU H C, TSUI K M. Robust recursive eigendecomposition and subspace-based algorithms with application to fault detection in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(6): 1703 – 1718.
- [2] MA He-he, HU Yi, SHI Hong-bo. Statistics kernel principal component analysis for nonlinear process fault detection [C]//Proceedings of the 9th World Congress on Intelligent Control and Automation. Taipei, 2011: 431 – 436.
- [3] GUO Ke, SAN Ye, ZHU Yi. Nonlinear process monitoring using wavelet kernel principal component analysis [C]//Proceedings of International Conference on Systems and Informatics. Yantai, 2012: 432 – 438.
- [4] CHEN Liang, YU Yang, LUO Jie, et al. An improved fault detection algorithm based on wavelet analysis and kernel principal component analysis [C]//Proceedings of Chinese Control and Decision Conference. Xuzhou, 2010: 1723 – 1726.
- [5] 倪国文, 刘爱伦. 基于核主元分析的非线性故障检测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 443 – 447.
- [6] SCHOLKOPF B, SMOLA A, MULLER K. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem [J]. Neural Computation, 1998, 10(5): 1299 – 1319.
- [7] NOWICKI A, GROCHOWSKI M, DUZINKIEWICZ K. Data-driven models for fault detection using kernel PCA: A water distribution system case study [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2012, 22(4): 939 – 949.
- [8] LEE J M, YOO C K, CHOI S W, et al. Nonlinear process monitoring using kernel principal component analysis [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(1): 223 – 234.

Fault Detection Based on Improved Wavelet Kernel Principal Component Analysis

ZHANG Duan-jin, WANG Ai-juan

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

Abstract: The problem of fault detection for a class of nonlinear systems based on kernel principal component analysis is studied. The improved wavelet kernel principal component analysis is proposed. Firstly, the proposed method is applied to denoise the data. Then, the preprocessed data is transformed by wavelet kernel function to map the nonlinear input space into linear characterization space. In the feature space, principal component analysis is applied to detect faults for nonlinear system, in combination with SPE statistic and T^2 statistic. Simulation results show that the method can improve the fault detection performance.

Key words: kernel principal component analysis; wavelet kernel function; wavelet denoising; fault detection

对流层波导中电波传播的抛物方程法及误差分析

杨明珊¹, 邱志勇¹, 杜晓燕²

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 信息工程大学, 河南 郑州 450001)

摘 要: 对窄角抛物方程推导过程中引入的主要误差进行分析, 建立近似过程产生的误差与传播仰角、大气折射指数变化的关系, 关系式明确了两因子引入误差的大小与方程适用范围. 并验证在对流层大气折射指数变化与较小传播仰角情况下, 窄角抛物方程求解的可靠性. 最后, 运用该算法分别计算标准大气、蒸发波导与表面波导中电磁波传播的损耗值.

关键词: 对流层波导; 抛物方程算法; 传播损耗; 误差

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.024

0 引言

我国东南沿海处于对流层波导高发生地区, 海岸及舰船上运作的雷达系统, 通信和侦察等无线设备通常都会受其影响^[1]. 例如, 会使雷达产生传播盲区、杂波增强等; 对通信系统也会产生相当大的干扰, 严重时会导致通信中断. 因此, 针对对流层波导环境中电磁波传播特性研究的必要性日趋显现; 此外, 开展波导中电波传播研究还关系到战场环境中电磁压制和反压制、电波传播环境的利用和反利用等问题, 具有重大国防和军事价值.

抛物方程算法是在 1987 年, 由 Dockery 首次将其运用到对流层电波传播问题中^[2]; 二十世纪以来, 美国海军研究小组一直致力于抛物方程模型的应用研究, 并完成了基于离散混合傅里叶变换等方法的混合传输模型的技术报告^[3]. 而我国对抛物方程法的研究却起步较晚且多数集中在水声领域, 最近几年才逐渐在电磁计算领域得到关注. 总体说来, 目前国内计算电磁学领域对抛物方程法的研究还处于基础理论研究阶段. 笔者首先由波动方程导出窄角抛物方程, 并针对该推导过程引入的近似量进行分析, 建立误差与传播仰角等因子的关系式, 最后仿真分析了波导中电磁波传播损耗分布情况.

1 波导折射率模型

电磁波传播过程中, 当传播距离较近时, 可以近似认为地表面为平面; 若传播距离大于极限直视距离, 就必须探讨地球曲率的影响. 为了解决这个问题, 可以使用球面分层介质中的斯奈尔定律得到大气修正折射指数^[4]

$$m(z) = n(z) \left(1 + \frac{z}{a_e} \right) \approx n(z) + \frac{z}{a_e}. \quad (1)$$

式中: z 为海平面以上高度; $n(z)$ 为高度 z 处的大气折射指数; a_e 为地球半径, 修正折射指数已经将地球曲率的影响考虑在内. 进而, 可得大气的修正折射率

$$M = N + \frac{z}{a_e} \times 10^6. \quad (2)$$

标准大气的折射率梯度变化为定值, 其折射率剖面为斜直线; 而蒸发波导是由于海面水汽蒸发使得海面上空较小高度范围内的大气湿度急剧减小而形成的, 其修正折射率数学模型可表示为

$$M(z) = M(z_0) + 0.125(z - z_0) - 0.125d \ln \left(\frac{z}{z_0} \right). \quad (3)$$

式中: z_0 为海面粗糙度高度; d 为蒸发波导高度, 当 d 为 0 时, 表示标准大气的折射率模型.

表面波导是由于陆地干暖气团移动到海面上湿冷气团上空, 形成较大的负折射率梯度, 从而构

收稿日期: 2014-09-22; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 河南省科技厅资助项目(112300410055)

作者简介: 杨明珊(1968-), 女, 江西南昌人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电磁波传播, 材料的电磁性能方面研究,
E-mail: qiuzy158371@163.com.

成较强陷获作用的表面波导结构,其射率模型可表示为

$$M(z) = M_0 + \begin{cases} c_1 z, & z < h_1; \\ c_1 h_1 + c_2(z - h_1), & h_1 < z < h_1 + h_2; \\ c_1 h_1 + c_2 h_2 + 0.118z, & z > h_1 + h_2. \end{cases} \quad (4)$$

式中: M_0 为海面粗糙度高度处的修正折射率; c_1 , c_2 分别为表面波导基础层和逆变层的折射率梯度; h_1, h_2 分别为基础层与逆变层的厚度, 当 h_1 为 0 时, 模型表示为不含基础层的表面波导。

2 窄角抛物方程的导出

在折射指数为 n 的各向同性介质中, 场量 ψ 满足 Helmholtz 方程^[5]

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 n^2 \psi = 0. \quad (5)$$

式中: k 为波数; n 为介质的折射指数; 对水平方向的电波传播而言, x 表示水平距离, z 表示垂直方向高度. 该波动方程有以下形式的解

$$\psi(x, z) = u(x, z) \exp(ikx). \quad (6)$$

将式(6)代入方程(5)中, 可得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2ikx \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k^2(n^2 - 1)u = 0. \quad (7)$$

此处, 引入伪微分算子

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2}. \quad (8)$$

假设折射指数 n 沿水平方向上为恒定值, 即 $\frac{\partial n}{\partial x} = 0$, 进而(7)式可以分解为

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} + ik(1 - Q) \right] \left[\frac{\partial}{\partial x} + ik(1 + Q) \right] u = 0. \quad (9)$$

方程(9)有解

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -ik(1 - Q)u. \quad (10)$$

式(10)表示电磁波传播的前向分量(后向分量在此不做讨论). 根据 Q 的近似不同, 可以将式(10)演变成不同形式的抛物型方程^[6], 设 $\varepsilon = n^2(x, z) - 1$, $\mu = \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, 则 $Q = \sqrt{1 + \varepsilon + \mu}$, 对 Q 进行泰勒级数展开, 取前两项^[7]

$$Q_1 = 1 + \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\mu. \quad (11)$$

代入方程(10)中, 可以得到标准窄角抛物方程

$$\frac{\partial^2 u(x, z)}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} + k^2(n^2(x, z) - 1) \cdot u(x, z) = 0. \quad (12)$$

这里使用分步傅里叶变换算法求解该抛物方程, 其解经过变换可得

$$u(x + \Delta x, z) = \exp[ik(n^2 - 1)\Delta x/2] \cdot F^{-1}\{\exp(-ip^2\Delta x/2k)F[u(x, z)]\}. \quad (13)$$

式中: Δx 表示 x 方向上的步进; $p = k \sin \alpha$, 表示垂直空间波数; $F(\cdot)$ 表示傅里叶正变换; $F^{-1}(\cdot)$ 表示傅里叶逆变换; $\exp(-ip^2\Delta x/2k)$ 表示传播媒质对电波的折射效应, 而 $\exp(-ip^2\Delta x/2k)$ 则反映了电波对障碍物的绕射效应^[8]. 抛物方程算法正是基于式(13)逐步计算空间中各点的电波传播损耗值。

3 误差分析

窄角抛物方程是由波动方程逐步近似演变而来, 其推导过程中, 存在近似, 所以不可避免地产生误差. 分析误差产生机理, 并且明确因子引起误差的大小, 有助于提高计算结果的可靠性。

笔者具体对微分算子 Q 的近似所产生误差进行分析, 由(8), (11)式中, Q, Q_1 的表达式, 可得两者的平方差表达式

$$E_{\text{error}} = Q_1^2 - Q^2 = \frac{1}{4}(\varepsilon^2 + \mu\varepsilon + \varepsilon\mu + \mu^2) = \frac{1}{4}[(n^2 - 1)^2 + 2\sin^2\alpha(n^2 - 1) + \sin^4\alpha]. \quad (14)$$

近似过程产生的误差并不是恒定的, 而是随着参数的大小变化而变. 通过变换式(14), 建立误差 E_{error} 与折射指数变化 Δn 、传播仰角 α 两因子之间的关系. 在电磁波传播仰角较小的情况下, $|\mu(u)| \approx \sin^2\alpha$ ^[9], 大气折射指数接近于 1, 其变化量为 Δn , 则 $n = 1 + \Delta n$, 将以上条件与 ε 表达式代入到误差表达式中可得

$$E_{\text{error}} = \frac{1}{4}[|\Delta n|(2 + |\Delta n|) + \sin^2\alpha]^2. \quad (15)$$

其相对误差为

$$E_r = \frac{1}{4}[|\Delta n|(2 + |\Delta n|) + \sin^2\alpha]^2 / \sqrt{1 + \Delta n + \sin^2\alpha}. \quad (16)$$

式中: α 为电磁波传播仰角。

假设 Δn 分别为 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 可得绝对误差、相对误差与传播仰角之间的关系图如图 1 所示。

由图 1 中可以得出, 传播仰角控制在 15° 以内时, 大气折射指数变化小于 0.1 情况下, 绝对误差比较小, 在 0.02 以内, 相对误差也控制在 1%

以内,而 Δn 为到0.2时,绝对误差增大到0.05左右,相对误差为4%左右。

图中曲线趋势表明,传播仰角逐步增大,误差与相对误差都相应增大,从而对计算结果产生较大影响,尤其在传播仰角大于 20° 以后,误差增大更为显著。因此窄角抛物方程不适用于求解传播仰角较大的电波传播过程。一般认为,传播仰角在 10° 以内,使用窄角抛物方程法计算电波传播损耗能达到足够精度。

下文讨论误差与折射指数变化关系,若传播仰角为 5° , 10° , 15° ,则误差与折射指数变化之间的关系图为图2所示。

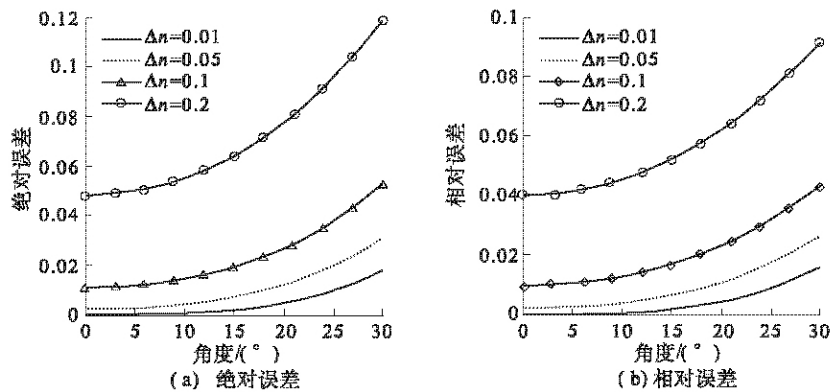


图1 误差与传播仰角关系

Fig. 1 Error and elevation angle relationship

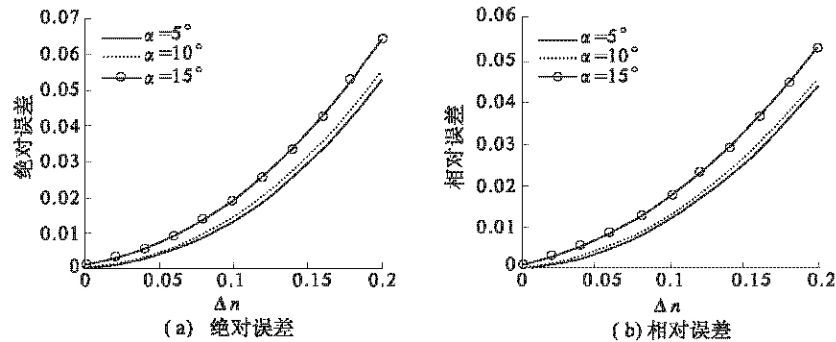


图2 误差与折射指数关系

Fig. 2 Relative error and refractive index relationship

4 数值算例

使用C语言编程,分别计算了标准大气,蒸发波导,含基础层表面波导3种大气结构的电磁波传播损耗分布;其中,天线发射高度在标准大气与蒸发波导中为10 m,表面波导和含基础层表面波导中为15 m,传播仰角为 0° ;蒸发波导高度为20 m;含基础层表面波导,基础层高30 m,逆变层高度50 m;电磁波频率为6 GHz;极化方式为水平极化;波束宽度为0.7;海面相对介电常数为70;

对流层大气当折射指数变化在1.000 25 ~ 1.000 4之间,变化量较小。由图2可知,在3种不同天线发射仰角情况下,由折射指数变化 Δn 引起的绝对误差都在0.001左右,其相对误差也控制在0.1%以内。以上表明折射指数变化引起的误差对计算结果影响较小。

在窄角抛物方程算法计算步长内(一般为100 m ~ 1 000 m之间),折射指数变化更为细小,可认为恒定不变。所以在窄角抛物方程推导过程中,式(7)假定折射指数不随 x 变化而变,对窄角抛物方程精度的影响可以忽略。

电导率为5 s/m;垂直步长为0.2 m,水平步长为100 m。

图3~5分别为标准大气及2种波导类型下,电磁波传播损耗分布伪色彩图。

由图3可知,标准大气中,电磁波是偏离水平面传播的,传输距离有限,在距离发射源40 ~ 60 km处,传播损耗值就达到了160 dB以上,通信及雷达系统已经不能正常使用;图4显示蒸发波导对电磁波出现陷获作用,计算条件下,波导内传播衰减在100 ~ 130 dB之间,衰减值比标准大气要

小. 由图 5 可知, 含基础层表面波导对电磁波的陷获作用明显大于蒸发波导, 同等距离波导内传播衰减也较蒸发波导小并且出现波动情况. 少量电磁波在传输过程中, 向上传播角度大于波导最大陷获角度, 所以表面波导上方出现电波透射出波导情况.

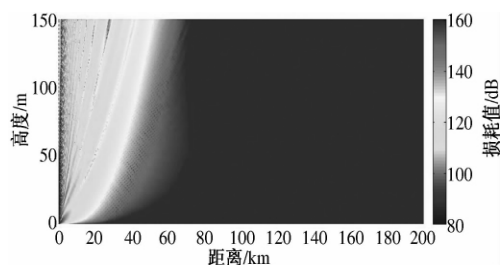


图 3 标准大气

Fig. 3 Standard atmosphere

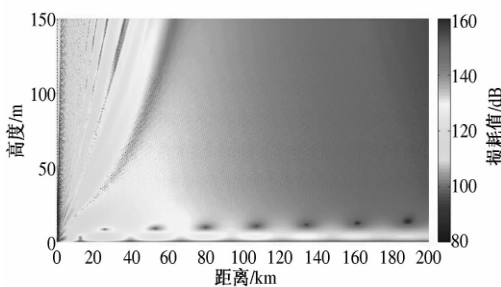


图 4 蒸发波导

Fig. 4 Evaporation duct

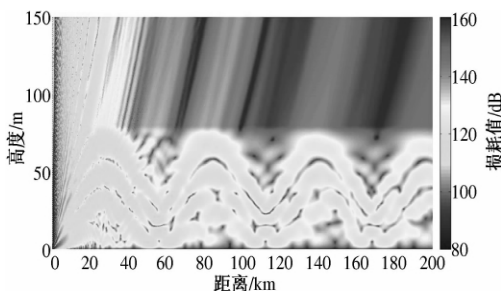


图 5 含基础层表面波导

Fig. 5 Including base layer surface duct

2 种波导类型均出现波导传播现象, 实际情况中, 就有可能实现超视距传播, 将大大利于雷达探测等应用. 然而, 波导上方的区域电磁波传播衰减明显大于波导内区域, 该区域可能成为作业雷达的探测盲区.

5 结论

为了求解海平面上空电磁波传播损耗情况, 将波动方程经过近似, 演变成窄角抛物方程; 笔者分析了窄角抛物方程推导过程中 Q 算子引入的

误差, 并建立了误差与传播仰角、大气折射指数变化的关系式. 结果表明, 算子 Q 通过泰勒近似所推出的窄角抛物方程只适用于传播仰角在 10° 以内的情况, 而求解过程中, 水平方向折射指数的变化引起的误差可以忽略, 即可近似认为 x 方向上, 折射指数为恒定值.

抛物方程算法是目前求解对流层波导中电磁波传播问题的最主要工具, 如何更为准确地求解出电磁波传播衰减值一直是研究人员所探索的问题, 此过程中除了建立准确的对流层波导传输模型外, 减小抛物方程求解过程中可控输入因子引入的误差, 以提高解的准确性也是必不可少的.

参考文献:

- [1] 李宏强. 电磁波在大气波导环境中的传播特性及基于遗传算法的反演研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学理学院, 2009.
- [2] 周晓平, 吴德佩, 柳朝阳, 等. 电波传播混合路径循迹的算法研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(3): 65-68.
- [3] 王红光, 张蕊, 康士峰, 等. 大气波导传播的抛物方程模型研究综述 [J]. 装备环境工程, 2008, 5(1): 11-15.
- [4] 姚展予, 赵柏林, 李万彪, 等. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响 [J]. 气象学报, 2000, 5(5): 606-616.
- [5] LEVY M F. Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2000: 15-20.
- [6] KUTTLER R, DOCKEY G. Theoretical description of parabolic approximation/ Fourier splitstep method of representing electromagnetic propagation in the troposphere [J]. Radio Science, 1991, 26(2): 381-393.
- [7] BENHMAMMOUCH O, CAOUREN N, KHENCHAF A. Influence of sea surface roughness on electromagnetic waves propagation in presence of evaporation duct [C]// Radar Conference-Surveillance for a Safer World. U. S. A: Piscataway, 2009: 1-6.
- [8] OZGUN O. Recursive two-way parabolic equation approach for modelling terrain effects in tropospheric propagation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(9): 2706-2714.
- [9] 姚景顺, 杨世兴. 抛物方程模型在海上电波传播中的应用 [J]. 电波科学学报, 2009, 24(3): 494-497.

(下转第 109 页)

文章编号: 1671-6833(2015)01-0105-05

电力电缆循环加热试验中热力学工况研究

王光斌¹, 杨海马^{1,2}, 杨 晖¹, 陆 峻³, 金智勇³, 马 生¹, 黄影平¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 3. 上海蓝波高电压技术设备有限公司, 上海 200245)

摘 要: 为研究电力电缆热循环载流量试验中电缆的温升特性, 以及介质损耗和环境温度对电力电缆温升的影响, 完善了空气中电缆集中参数等效热路模型, 建立了暂态下对导体损耗、介质损耗和环境温度进行实时修正的热流微分方程. 仿真计算给电缆施加恒定电流时电缆导体、金属套的温升, 介质损耗对温度的工况影响, 电缆热循环载流量试验中电缆各层的暂态温升和自然冷却曲线, 并与实际试验所测得的温升曲线进行拟合验证. 研究结果表明, 高压电力电缆热循环试验中, 介质损耗对电缆温升影响较大, 试验中需要对导体损耗、介质损耗和环境温度进行实时修正.

关键词: 电力电缆; 介质损耗; 热流微分方程; 温升特性

中图分类号: TM247 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.025

0 引言

为保障电力电缆的输送能力和电力电缆设施的安全^[1], 对电力电缆载流量和温升特性的试验和研究显得非常重要. 目前对电缆的相关试验一般按 IEC62067:2006^[2] 进行. 虽然电缆额定载流量和温升计算已十分完善, 但对于特殊结构或特殊敷设条件下的电缆仍提倡试验解决. 例如热循环试验, 一般采用导体电流加热的方式, 每个周期应至少加热 8 h, 加热至规定温度范围保持 2 h, 随后至少自然冷却 16 h. 电缆温升试验耗费高、周期长, 实验室环境单一, 难以模拟室外电缆运行环境, 从而影响了电缆温升特性研究的准确性, 不利于电缆研发制造. 一些仿真模型没有充分考虑外部环境对温升的实时影响^[3], 忽略了高压电力电缆的介质损耗, 对电缆的实际使用留下了安全隐患, 因此有必要模拟电缆实际运行环境, 建立一个较为完善, 实时考虑外部环境温度和介质损耗的热路模型, 从理论上研究电缆的温升特性以及介质损耗和电阻损耗对温升的影响, 并以实验加以验证, 为不同物理参数的电缆试验提供参考, 以减少实际试验周期, 降低试验耗费, 增加测试准确

性, 提高电力电缆长期使用的安全性.

1 仿真模型与方程

1.1 电力电缆温升等值热路模型

计算电力电缆导体及各护层温度时最重要的部分是暂态计算, 在暂态热路中需考虑绝缘层和外护层的热阻以及各层的热容, 此外还需要考虑周围介质的热阻和热容. 电缆中各层的温度不仅是坐标的函数而且是时间的函数, 当高压电力电缆在 $2U_0$ 下进行热循环电压试验时, 电缆的介质损耗不能再忽略, 在等效热路模型的基础上, 不忽略电缆的介质损耗以及金属套损耗时, 其在空气中电缆的集中参数等效热路模型如图 1 所示.

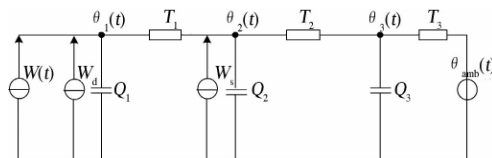


图 1 等效热路模型

Fig. 1 The equivalent thermal circuit model

1.2 温升微分方程

1.2.1 等值热路热流微分方程

由图 1 所示的热路模型可以得出动态条件下

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61374197); 上海市闵行区产学研合作计划项目(2013); 上海市教委创新项目(13YZ111)

通信作者: 杨海马(1979-), 男, 河北邢台人, 上海理工大学讲师, 博士, 主要从事光电智能仪器、光子量子通信和电测试技术等方面的研究, E-mail: snowym@sina.com.

热流微分方程为

$$Q_1 \cdot \frac{d\theta_1(t)}{dt} + \frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{T_1} = W(t) + W_d; \quad (1)$$

$$Q_2 \cdot \frac{d\theta_2(t)}{dt} - \frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{T_1} + \frac{\theta_2(t) - \theta_3(t)}{T_2} = W_s; \quad (2)$$

$$Q_3 \cdot \frac{d\theta_3(t)}{dt} + \frac{\theta_3(t) - \theta_{amb}(t)}{T_3} = \frac{\theta_2(t) - \theta_3(t)}{T_2}. \quad (3)$$

式中: T_1 为绝缘(含内外屏蔽及阻水层)热阻; T_2 为外护层热阻; T_3 为外部热阻; $Q_1 \sim Q_3$ 为电缆各层热容; W_d 为介质损耗; $W(t)$ 为导体损耗; W_s 为金属护层损耗; $\theta_1(t)$ 为导体温度; $\theta_2(t)$ 为金属套温度; $\theta_3(t)$ 为电缆表面温度。

1.2.2 损耗的计算

①导体损耗. 在暂态过程中导体损耗是随电阻和电流而变化的时间函数^[4]. 影响导体电阻的因素除了导体自身固有参数以外, 其次是导体运行时的温度. 计算导体温升时需对导体损耗实时修正, 即对导体电阻进行实时修正. 在稳态电缆电阻计算的基础之上得到暂态下导体运行时的直流电阻为

$$R' = R_0 \times [1 + \alpha_{20}(\theta_1(t) - 20)]. \quad (4)$$

式中: R_0 为 20 °C 时导体单位长度的直流电阻, Ω/m ; α_{20} 为 20 °C 时材料恒定质量温度系数。

得到修正之后导体的交流电阻为

$$R = R_0 [1 + \alpha_{20}(\theta_1(t) - 20)](1 + \gamma_s + \gamma_p). \quad (5)$$

式中: γ_p 为邻近因素; γ_s 为集肤效应因素。

修正后导体损耗的计算为

$$W(t) = \{ R_0 [1 + \alpha_{20}(\theta_1(t) - 20)](1 + \gamma_s + \gamma_p) \} \cdot I^2. \quad (6)$$

②介质损耗. 单位长度的绝缘损耗 W_d 为

$$W_d = \omega \cdot c \cdot U_0^2 \cdot tg \delta. \quad (7)$$

式中: $\omega = 2\pi f$; U_0 为对地电压, V; $tg \delta$ 为在电源系统和工作温度下绝缘损耗因数; c 为单位长度电缆电容, F/m。

金属套损耗 $W_s \approx 0$ 。

1.2.3 热容的计算

各层热容参数为

$$Q_1 = Q_0 + pQ_i; \quad (8)$$

$$Q_2 = (1 - p)Q_i + p'Q_s + Q_{cp}; \quad (9)$$

$$Q_3 = (1 - p')Q_s. \quad (10)$$

式中: Q_0 为导体热容; Q_i 为绝缘热容; Q_s 为外护层热容; Q_{cp} 为金属护套热容。

式(8)~(10)中 p 和 p' 为

$$p = \frac{1}{2\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c}\right)^2 - 1}; \quad (11)$$

$$p' = \frac{1}{2\ln\left(\frac{D_e}{D_s}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_s}\right)^2 - 1}. \quad (12)$$

式中: d_c 为导体外径; D_i 为绝缘外径; D_e 为电缆外护层外径; D_s 为电缆外护层内径。

$T_1 \sim T_3$ 热阻部分的计算参考文献[5-7]。

2 电缆热循环试验仿真与效果

根据上文所建立的热路模型及 1 所列的动态微分方程, 基于 MATLAB 仿真平台结合电缆实际运行环境模拟仿真, 并在实际环境中进行试验测试. 本次试验所选取的电力电缆型号为 YJLW02 290/5 001 × 2 500 单芯电力电缆, 其物理特性参数见表 1。

表 1 YJLW02 290/500 物理特性参数

Tab. 1 The physical parameters of YJLW02 290/500

| 项目 | 导体 | 绝缘 | 金属套 | 外护层 |
|--|-------|--------|-------|-------|
| 外径 d/mm | 61.2 | 138.1 | 155.8 | 175.8 |
| 热容 $Q/(\text{J} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-1})$ | 8 625 | 28 874 | 4 402 | 6 620 |

该电缆的绝缘热阻为 0.45 K · m/W, 外护层热阻 T_2 为 0.45 K · m/W, 外部热阻为 0.13 K · m/W. 敷设方式为空气中单根单芯敷设, 未受日光照射^[8-10], 电缆导体、金属套、表面初始温度为 15.6 °C. 试验过程中采用电流互感器实时监控电缆负荷电流, 现场如图 2 所示。



图 2 测试现场

Fig. 2 Test site

2.1 电缆各层的温升特性及介质损耗的影响

电缆施加负荷电流时, 电缆各层的温度是随时间变化的时间函数. 为了研究给电缆施加恒定电流时电缆各层的温升特性, 分析介质损耗对温升特性的影响, 试验过程中采用电流加热的方式,

从0时给电缆加以2 450 A恒定电流,持续加热30 h. 根据热路模型建立的热流微分方程,在MATLAB软件中分别计算出考虑介质损耗和忽略介质损耗时电缆各层理论温升曲线,并与实际测得的温度曲线进行对比分析. 所得500 kV电力电缆暂态理论温升曲线图,如图3所示.

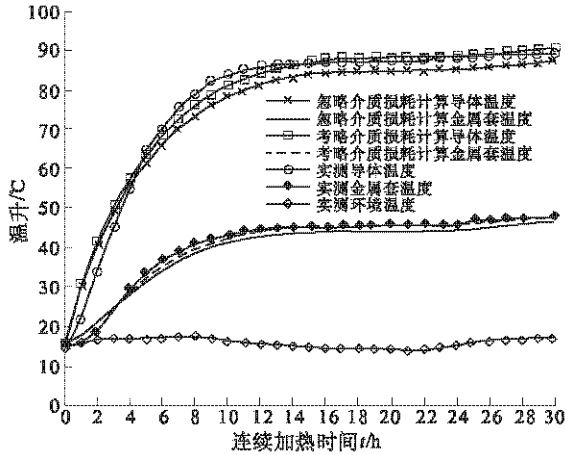


图3 电缆各层的温升曲线

Fig.3 The temperature rise curves of Cable layers

从图3中可以看出:当电缆通以恒定电流后,电缆各层温度在0~8 h上升最快,上升曲线陡峭,在10 h后趋于稳定,此时影响电缆温度主要是环境温度,随着环境温度的变化电缆各层温度有小幅波动.将图3中忽略介质损耗计算导体温度曲线、考虑介质损耗计算导体温度曲线分别与实测导体温度作差取绝对值,曲线如图4所示.

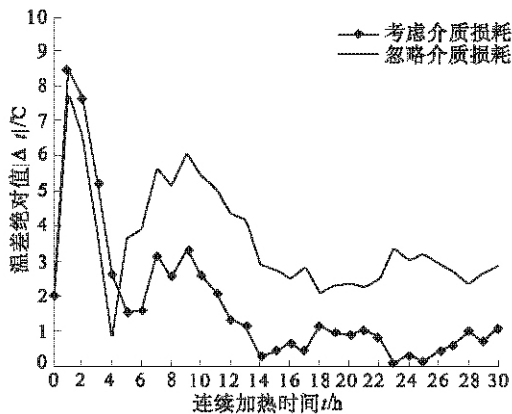


图4 温差绝对值曲线

Fig.4 The absolute value curves of difference in temperature

如图4所示,考虑介质损耗计算导体温度曲线与实测导体温度曲线拟合的更好.考虑介质损耗以后,实测曲线与理论计算曲线存在误差主要因素为:0~8 h电缆周围还未建立稳定温度场,

此时影响电缆温升的主要因素是电缆负荷电流,由于实际测试时,施加电流从0 A逐渐升高至2 450 A,并不是严格意义上的阶跃电流,所以在前1 h内实际测得的温升曲线比理论计算温升曲线上升缓慢.10 h以后电缆周围趋于稳定温度场,影响电缆温升的主要因素为环境温度,由于仿真模拟环境温度跟实地试验环境温度不完全一致,因此考虑介质损耗的理论计算曲线与实测温升曲线不能完全拟合,存在小范围温差.

2.2 不同电流负荷时电缆导体温升仿真及效果

为了研究电缆负荷电流超过、低于理论载流量时电缆的温升特性,试验过程中选取3根物理参数相同的YJLW02 290/5 001×2 500单芯电力电缆,在相同实验环境下进行试验.从0时给3根电缆分别施加2 150,2 450,2 750 A恒定电流(2 450 A为该电缆在环境温度为16 °C下的理论载流量近似值),持续加热24 h,得到500 kV电力电缆施加不同电流时导体温升曲线图,如图5所示.

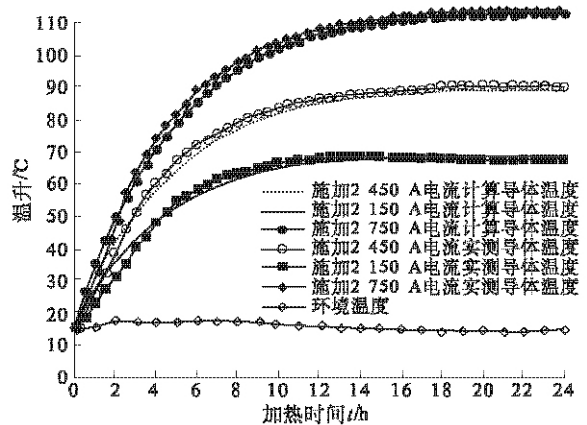


图5 电缆导体的温升曲线

Fig.5 The temperature rise curves of cable conductor

从图5中的理论计算曲线和实际测得温升曲线可以看出:通以2 450 A的电缆在加热10 h后温度逐渐趋于电缆长期运行的最高允许温度90 °C,而通以2 750 A的电缆温度上升快,在加热6 h后就已超过长期安全运行的最高允许温度,并持续上升,在15 h时超过110 °C,通以2 150 A的电缆导体温度在加热10 h后温度趋于70 °C.

2.3 电缆热循环试验模拟仿真及效果

目前超高压电缆系统已经构成了许多城市的供电网络骨干,其可靠性直接决定了城市电力传输系统的可靠性^[11-13].因此需要在电缆系统进入市场前必须对电缆及其附件系统进行型式试验与预鉴定试验,试验一般按照IEC 62067-3:2006

进行,其中热循环载流量试验是尤为重要的试验之一.本次热循环载流量试验中,采用导体电流加热的方式,测试时对电力电缆持续加热 8 h,将电缆导体加热至规定温度范围后保持 2 h,随后至少自然冷却 18 h.试验过程中从 0 时给电缆施加 2 700 A 恒定阶跃电流,连续加热 8 h 后电缆导体温度上升至 90 °C 左右,将电流瞬间降至 2 400 A,并持续加热 2 h,使电缆温度保持在 90 ± 2 °C,10 h 后将电流瞬间降至 0 A,让电缆自然冷却 18 h.根据 2.2 中所列热流微分方程模型,计算出电缆导体、金属套、表面的温升理论曲线,并与实际试验所测得的数据曲线对比分析,试验结果曲线如图 6 所示.

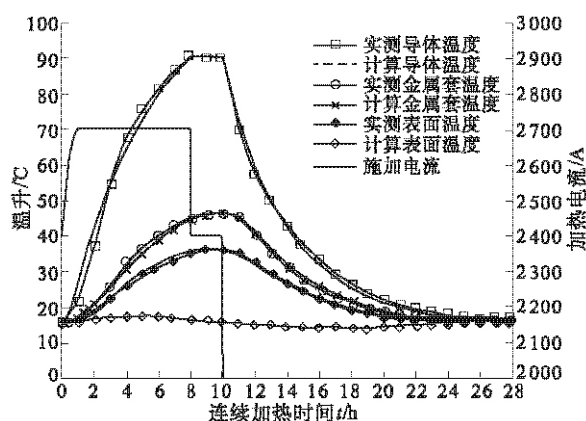


图 6 热循环试验模拟图

Fig. 6 Thermal cycling test simulation diagram

从图 6 可以得知:在 0~8 h 电缆各层温度变化最快;在 8~10 h 给电缆施加的电流为 2 400 A,电缆导体温度趋于 90 °C,10 h 以后,将电流降至为 0 A,此时电缆开始缓慢自然冷却,电缆各层温度开始缓慢下降直至 24 h 逐渐趋于环境温度.

3 结论

(1) 通过实测数据对比分析验证了笔者研究的等效热路模型的正确性,为电缆温升试验提供了较为完善的理论模型,为电缆的研发、选型提供了理论依据.通过与实际测试数据对比分析,可减少实验次数,降低耗费.

(2) 电缆通以恒定负荷电流后,电缆导体、金属套、表面的温升是一个从暂态逐渐趋于稳态的过程.施加电流 0~8 h 内电缆周围还未建立稳定温度场,此时影响电缆温升特性的主要因素是负荷电流,电缆各层温度上升较快.在加热 10 h 后电缆周围温度场趋于稳定,电缆各层温度变化趋于平缓,此时影响电缆温升的主要因素为环境温

度.电缆的自然冷却是一个非常缓慢的过程,电缆导体温度自然冷却 16 h 之后才趋于环境温度.

(3) 高压电力电缆热循载流量环试验中,在 0~8 h 内介质损耗对电缆温升影响不明显,当加热时间超过 10 h,电缆周围温度场趋于稳定时由介质损耗造成的误差为 3~4 °C,因此在电缆长期运行时需考虑介质损耗对电缆温升的影响,防止电缆长期处于过热状态加速绝缘老化,影响使用寿命.

参考文献:

- [1] 王姗姗,孙华东,易俊,等.电力系统安全稳定相关标准对大电网的适用性综述[J].电网技术,2013,37(11):3144-3150.
- [2] IEC 62067—3 Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables, part 3: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150kV ($U_m = 170kV$) up to 500kV ($U_m = 550kV$) Test methods and requirements [S]. 2006.
- [3] 樊友兵,蒙绍新,杨黎明,等.500 kV XLPE 电力电缆热循环电压试验导体温度的确定[C]//深圳:中国电机工程学会,2007:109-112.
- [4] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [5] 刘毅刚,罗俊华.电缆导体温度实时计算的数学方法[J].高电压技术,2005,31(5):52-54.
- [6] International Electrotechnical Commission. IEC 60287—1 Calculation of the current rating of electric cables, part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, section 1: general [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2006. 1994.
- [7] 牛海清,周鑫,王晓兵,等.外皮温度监测的单芯电缆暂态温度计算与试验[J].高压电技术,2009,35(9):2138-2143.
- [8] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等.电缆沟敷设方式下电缆载流量计算及其影响因素分析[J].电力自动化设备,2010,30(11):24-29.
- [9] 杨永明,陈鹏,陈俊,等.基于耦合场的通风电缆沟敷设电缆载流量计算及其影响因素分析[J].电力自动化设备,2013,33(7):139-143.
- [10] 梁永春,李彦明,柴进爱,等.地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J].电工技术学报,2007,22(8):185-189.
- [11] 章健,马旭冰,程晓晓,等.图形化低压电网线损计算与负荷优化配置软件开发[J].郑州大学学报:工学版,2012,33(3):44-47.
- [12] 陆景德,张书鸿,凌惠民,等.排管敷设 XLPE 电缆稳定载流量试验研究[J].电力设备,2007,8(9):

1-5.

[13] 罗涛,陈民铀,曾灿. 电力电缆安全监测中温度场和

电场数值关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010,38(5):20-24.

The Research of Power Cable Cyclic Heating Thermodynamic

WANG Guang-bin¹, YANG Hai-ma^{1,2}, YANG Hui¹,LU Ling³, JIN Zhi-yong³, MA Sheng¹, HUANG Ying-ping¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. Shanghai LANPO High Voltage Technology & Equipment Co. Ltd. Shanghai 200245, China)

Abstract: In order to study the temperature characteristics of the voltage power cables current carrying capacity thermal cycling test and influence of ambient temperature and dielectric loss on temperature rise of power cables, in this paper, we improved the cable lumped parameter model equivalent thermal circuit in the air, We established the heat flow equations of the real-time correction for the conductor loss, dielectric loss and the ambient temperature under transient conditions. We simulated the temperature rise of cable conductor and the metal sleeve when applying a constant current to the cable and the influence of dielectric loss on temperature in the working state. We also simulated the transient temperature rise and natural cooling curve of the each layer of in cable thermal cycling current carrying capacity test and fitted with the actual temperature rising curve which had been measured. The results show that: In the high voltage power cables thermal cycling test, the dielectric loss has greater impact on the cable temperature characteristics. We need to correct the conductor loss, dielectric loss and the ambient temperature in real-time.

Key words: power cable; dielectric loss; differential equation of heat flow; temperature rise characteristic

(上接第 104 页)

Troposphere Radio Waves Propagation in Duct of Parabolic Equation Method and Error Analysis

YANG Ming-shan¹, QIU Zhi-yong¹, DU Xiao-Yan²

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The main error which is introduced in the process of the Narrow-angle parabolic equation derivation is analyzed. Then, the relationship between the approximation error and propagation elevation and atmospheric refraction index changes is established. The established expression ascertains the value of the error brought by the two operators and verifies the reliability of the derivation of narrow-angle parabolic equation in the condition of small changes of propagation elevation and atmospheric refraction index. Finally, the loss values of electromagnetic wave propagation in standard atmosphere, evaporation duct and surface duct are calculated.

Key words: troposphere duct; parabolic equation; propagation loss; error

文章编号: 1671-6833(2015)01-0110-04

拟周期激励下非线性半车模型的混沌振动研究

杨智勇^{1,2}, 梁山¹, 周桐¹

(1. 重庆工程职业技术学院 信息工程学院, 重庆 402260; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘 要: 为了克服单一频率路面激励下车辆悬架模型不能真实反映实际车辆的非线性动力学特性问题,建立了双频拟周期动态路面激励函数,并构建了 4 自由度非线性 1/2 车辆悬架模型. 运用庞加莱图、相位图、功率谱密度分析了车辆 4 自由度非线性半主动悬架模型通过凹凸不平路面时的动力学特性,得到了系统发生混沌振动时的激励振幅和振动特性,即车辆通过凹凸不平路面时的振动特性为:拟周期→过渡态→混沌态. 同时通过调整弹簧刚度系数,有效抑制了混沌振动的发生. 研究结果表明:双频拟周期激励下的 4 自由度非线性半主动悬架模型模拟更能接近实际情况,这有助于汽车悬架的设计和路面铺装设计.

关键词: 拟周期; 非线性车辆; 半主动悬架; 混沌振动

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.026

0 引言

由于车辆系统中悬架、轮胎、弹簧、阻尼元件存在非线性特性,因此当车辆通过凹凸不平的路面时,路面激励可能导致车辆内部发生复杂的非线性动力学现象,如分岔现象、混沌振动等^[1-2]. 这些非线性现象可能会导致车辆振动加剧,增大系统噪声,破坏周边环境,造成元器件磨损和道路早期疲劳损害,甚至威胁乘车舒适性和行车安全^[3-4]. 因此对车辆通过凹凸不平路面产生混沌振动的机理和抑制混沌振动的方法开展研究,对提高驾乘人员舒适性具有重要意义.

近年来,对汽车非线性悬架的混沌振动的机理研究,特别对路面不平度激励下非线性车辆悬架系统的混沌振动的研究已越来越受到人们的关注^[1-7]. 但是由于非线性系统的复杂性,目前模型多是简单的单自由度 1/4 车辆模型和两自由度 1/4 车辆模型. 1/4 车辆模型是一种极其简化的模型,它将汽车简化为一个车轮支撑的振动系统,只能研究车辆在垂直方向的振动,忽略了真实悬架系统很多重要的振动特性,很难提供足够反映悬架系统和车体的实际动态特性的信息,不能代表真实的车辆系统悬架特性^[3-6]. 而 4 自由度 1/2 车辆模型是一种相对接近实际悬架系统的模型,它

可用于研究车身的垂直运动和俯仰运动以及前后 2 车轮的垂直运动,并可研究前后两轮激励输入相位差对系统动态特性的影响. 由于随机路谱表示的路面激励不便于理论研究,因此,路面激励模型多以单一频率或双频的正弦或余弦来近似模拟路面激励,讨论路面位移激励对系统非线性特性的影响^[1-2,7]. 但是单一的正弦频率很难真实地表示路面的真实激励. 目前针对双频拟周期激励下多自由度非线性车辆悬架的混沌振动的研究还鲜见报道. 鉴于以上问题,笔者采用双频正弦拟周期激励来表示凹凸不平的路面,以 4 自由度非线性半车模型为研究对象,研究非线性车辆在路面双频拟周期激励下的混沌振动. 所谓拟周期是指当各个激励频率不可有理通约时称为拟周期^[7]. 笔者首先建立了车辆悬架和路面激励模型,通过分析 Poincaré 截面图、相位图、功率谱等,验证了模型的合理性和系统存在混沌的可能性.

1 车辆模型及运动微分方程

为了得到更具有价值的车辆非线性动力学特性,笔者将车辆看成左右对称的结构,由此建立 4 自由度非线性半车悬架系统模型,其模型力学结构如图 1 所示^[3-4]. 4 自由度非线性半车模型能对前后车轮、车身垂直和俯仰方向的非线性运动

收稿日期: 2014-08-17; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 中央高校基本科研业务基金项目(CDJXS12170002); 重庆市科技项目基金资助项目(KJ112002)

作者简介: 杨智勇(1979-),男,重庆忠县人,重庆工程职业技术学院副教授,博士,主要从事非线性控制理论研究,
E-mail: yzy023@aliyun.com.

作较为完备的研究,同时研究车辆前后轮激励的时间差对车辆悬架的影响,具有较强的理论价值。

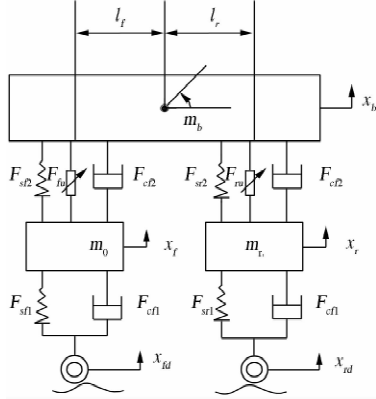


图 1 4 自由度非线性半主动半车悬架模型

Fig. 1 Non-linear 4 - DOF half-active half-vehicle suspension model

在图 1 中, m_b 为车身质量; m_f, m_r 为前后轮非簧载质量; x_f 为 m_f 的垂直位移; x_r 为 m_r 的垂直位移; x_{fd}, x_{rd} 为前后轮受到的外部激励; F_{s1}, F_{s2} 为前后轮悬架非线性阻尼力; F_{c1}, F_{c2} 为前后非线性悬架弹簧力; F_{f1}, F_{f2} 为前后非线性轮胎弹簧力; F_{r1}, F_{r2} 为前后悬架非线性阻尼力; F_{fd}, F_{rd} 为前后悬架主动控制力。

设汽车的簧载质量绕其轴的转动惯量为 J , 根据牛顿第二定律, 系统的运动方程可表示为

$$\begin{cases} m_b \ddot{x}_b = -F_{s2} - F_{c2} - F_{s1} - F_{c1} - m_b g - F_{fd} - F_{rd}; \\ J \ddot{\theta} = (F_{s2} + F_{c2} + F_{fd}) l_f \cos \theta - (F_{s1} + F_{c1} + F_{rd}) l_r \cos \theta; \\ m_f \ddot{x}_f = F_{s2} + F_{c2} - F_{s1} - F_{c1} - m_f g + F_{fd}; \\ m_r \ddot{x}_r = F_{s2} + F_{c2} - F_{s1} - F_{c1} - m_r g + F_{rd}. \end{cases} \quad (1)$$

弹簧的非线性特性分别被表示为

$$F_{s1} = 100^{(n_1-1)} k_{s1} \operatorname{sgn}(\Delta x_{s1}) |\Delta x_{s1}|^{n_1}; \quad (2)$$

$$F_{s2} = 100^{(n_2-1)} k_{s2} \operatorname{sgn}(\Delta x_{s2}) |\Delta x_{s2}|^{n_2}; \quad (3)$$

$$F_{c1} = 100^{(n_{c1}-1)} k_{c1} \operatorname{sgn}(\Delta \dot{x}_{c1}) |\Delta \dot{x}_{c1}|^{n_{c1}}; \quad (4)$$

$$F_{c2} = 100^{(n_{c2}-1)} k_{c2} \operatorname{sgn}(\Delta \dot{x}_{c2}) |\Delta \dot{x}_{c2}|^{n_{c2}}. \quad (5)$$

其中,

$$\Delta x_{s1} = x_f - x_{fd} - s_{f1}; \quad (6)$$

$$\Delta x_{s2} = x_b - x_f - s_{f2} - l_f \sin \theta; \quad (7)$$

$$\Delta x_{c1} = x_r - x_{rd} - s_{r1}; \quad (8)$$

$$\Delta x_{c2} = x_b - x_r - s_{r2} - l_r \sin \theta. \quad (9)$$

式中: s_{f1} 和 s_{r1} 分别表示前后车轮在无激励下的弹性形变; s_{f2} 和 s_{r2} 分别表示前后悬架在无激励下的弹性形变; k_{s1} 和 k_{s2} 分别表示前后轮胎的等效刚度; k_{c1} 和 k_{c2} 分别表示前后悬架的等效刚度。

阻尼器的非线性特性被表示为^[4-5]

$$F_{c1} = c_{f1} \Delta \dot{x}_{c1}. \quad (10)$$

$$F_{c2} = c_{r1} \Delta \dot{x}_{c2}. \quad (11)$$

$$F_{c3} = c_{f2} \Delta \dot{x}_{c3}. \quad (12)$$

$$F_{c4} = c_{r2} \Delta \dot{x}_{c4}. \quad (13)$$

式中: $\Delta \dot{x}_{c1} = \dot{x}_f - \dot{x}_{fd}$; $\Delta \dot{x}_{c2} = \dot{x}_b - \dot{x}_f - l_f \dot{\theta} \cos \theta$;

$\Delta \dot{x}_{c3} = \dot{x}_r - \dot{x}_{rd}$; $\Delta \dot{x}_{c4} = \dot{x}_b - \dot{x}_r - l_r \dot{\theta} \cos \theta$.

式中: c_{f1} 和 c_{r1} 表示前后轮胎的非线性阻尼因子; c_{f2} 和 c_{r2} 表示前后悬架的非线性阻尼因子, 表示为

$$c_{f2} = \begin{cases} c_{f2u}, & \Delta \dot{x}_{c2} \geq 0; \\ c_{f2d}, & \Delta \dot{x}_{c2} < 0. \end{cases} \quad (14)$$

$$c_{r2} = \begin{cases} c_{r2u}, & \Delta \dot{x}_{c4} \geq 0; \\ c_{r2d}, & \Delta \dot{x}_{c4} < 0. \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\Delta \dot{x}$ 是阻尼器的相对速度; c_{i2u} ($i=f, r$) 和 c_{i2d} ($i=f, r$) 是阻尼器拉伸和压缩的阻尼因子。

主动控制力 F_{fd} 和 F_{rd} 表示为: $F_{fd} = c_{fu} \dot{x}_b$; $F_{rd} = c_{ru} \dot{x}_b$.

假设 $x_1 = x_b, x_2 = \dot{x}_b, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta}, x_5 = x_f, x_6 = \dot{x}_f, x_7 = x_r, x_8 = \dot{x}_r$, 则系统的状态方程组可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{m_b} (F_{s2} + F_{c2} + F_{s1} + F_{c1} + F_{fd} + F_{rd}) - g; \\ \dot{x}_3 = x_4; \\ \dot{x}_4 = \frac{\cos \theta}{J} [(F_{s2} + F_{c2} + F_{fd}) l_f - (F_{s1} + F_{c1} + F_{rd}) l_r]; \\ \dot{x}_5 = x_6; \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{m_f} (F_{s2} + F_{c2} + F_{fd} - F_{s1} - F_{c1}) - g; \\ \dot{x}_7 = x_8; \\ \dot{x}_8 = \frac{1}{m_r} (F_{s2} + F_{c2} + F_{rd} - F_{s1} - F_{c1}) - g. \end{cases} \quad (16)$$

设 m_b 前后轴承受的分质量, 分别为 m_{bf} 和 m_{br} , 可计算得

$$\begin{cases} m_{bf} = \frac{m_b l_r}{l_f + l_r}; \\ m_{br} = \frac{m_b l_f}{l_f + l_r}. \end{cases} \quad (17)$$

因此, 车辆悬架垂直方向的静态状态方程可表示为

$$\begin{cases} F_{s_{f1}} = 100^{(n_{f1}-1)} k_{f1} \operatorname{sgn}(s_{f1}) |s_{f1}|^{n_{f1}} = (m_{bf} + m_f) g; \\ F_{s_{r1}} = 100^{(n_{r1}-1)} k_{r1} \operatorname{sgn}(s_{r1}) |s_{r1}|^{n_{r1}} = (m_{br} + m_r) g; \\ F_{s_{f2}} = 100^{(n_{f2}-1)} k_{f2} \operatorname{sgn}(s_{f2}) |s_{f2}|^{n_{f2}} = m_{bf} g; \\ F_{s_{r2}} = 100^{(n_{r2}-1)} k_{r2} \operatorname{sgn}(s_{r2}) |s_{r2}|^{n_{r2}} = m_{br} g. \end{cases} \quad (18)$$

从式(18)可得

$$\begin{cases} s_{f1} = (m_{bf} + m_f g / 100^{(n_{f1}-1)} k_{f1})^{1/n_{f1}}; \\ s_{r1} = (m_{br} g + m_r g / 100^{(n_{r1}-1)} k_{r1})^{1/n_{r1}}; \\ s_{f2} = (m_{bf} g / 100^{(n_{f2}-1)} k_{f2})^{1/n_{f2}}; \\ s_{r2} = (m_{br} g / 100^{(n_{r2}-1)} k_{r2})^{1/n_{r2}}. \end{cases} \quad (19)$$

2 路面激励模型及车辆悬架混沌振动分析参数

笔者用双频正弦拟周期函数表示路面不平度激励,因此路面不平度可近似地用如下等式表示.

$$x_{fd} = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t; \quad (20)$$

$$x_{rd} = A_1 \sin(\omega_1 t + \alpha) + A_2 \sin(\omega_2 t + \alpha). \quad (21)$$

式中: A_1 和 A_2 表示路面激励的振幅; ω_1 和 ω_2 分别表示两个正弦激励的角频率; α 表示激励对前后车辆的滞后延迟, α 的值约等于 $(l_f + l_r)/v$, l_f 和 l_r 是前后车轮和车辆中心位置的距离.

由于系统非线性微分方程的存在,故可采用定步长 4 阶 Runge-Kutta 算法进行仿真研究. 数值仿真的汽车模型参数见表 1^[4, 6].

表 1 数值仿真参数

Tab.1 Parameters for numerical simulation

| 参数 | 参数值 | 参数 | 参数值 |
|--|---------|--|---------|
| m_b/kg | 1 180 | $k_{f1}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | 140 000 |
| m_f/kg | 50 | $k_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | 36 925 |
| m_r/kg | 45 | $C_{f2u}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 500 |
| $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 633.615 | $C_{f2d}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 359.7 |
| $C_{f1}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 10 | $C_{fu}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 2000 |
| $C_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 10 | $C_{ru}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 2000 |
| n_{f1} | 1.75 | n_{f2} | 1.5 |
| n_{r1} | 1.75 | n_{r2} | 1.5 |
| $k_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | 140 000 | $k_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | 30 130 |
| $C_{r2u}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 500 | $C_{r2d}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | 359.7 |
| l_f/m | 1.123 | l_r/m | 1.377 |

3 仿真分析

笔者通过庞加莱图、相位图、功率谱密度图分析车辆通过凹凸不平路面的混沌振动. 在仿真分析中通过调整激励振幅的值进行对比分析. 为了便于研究,假设 $A_1 = A_2 = A$. (其中, A_1 和 A_2 分别表示激励的振幅, ω_1 和 ω_2 分别表示正弦激励函数的角频率, ω_1 和 ω_2 不可有理通约. 选取 $\omega_1 =$

$7.9, \omega_2 = 20.3 + \sqrt{10}^{[7]}$. 仿真研究中通过调整 A_1, A_2 和 n_{f1}, n_{f2} 的值研究车辆通过路面的混沌振动.

当 $A_1 = A_2 = 0.004, n_{f1} = n_{f2} = 1.75$ 时,车辆的运动状态为拟周期,如图 2 所示.

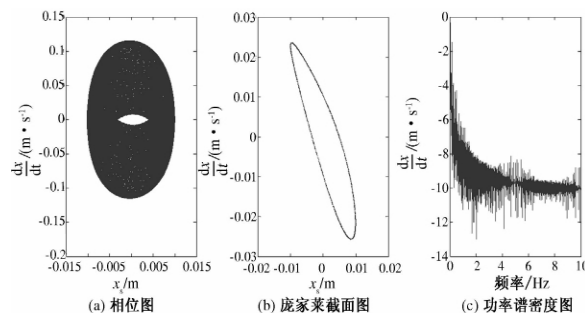


图 2 拟周期运动

Fig.2 Quasi periodic motion

当 $A_1 = A_2 = 0.038, n_{f1} = n_{f2} = 1.75$ 时,拟周期环破裂,有进入混沌运动状态的趋势,笔者将此状态称为过渡运动态,如图 3 所示.

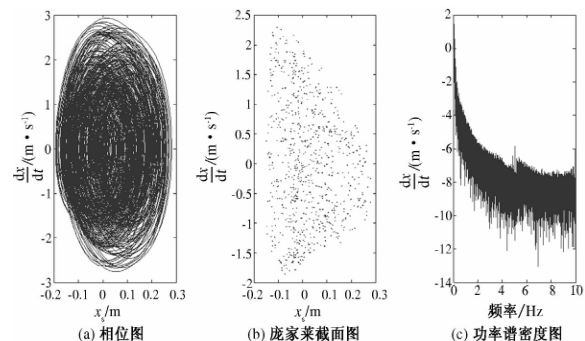


图 3 过渡态运动

Fig.3 The transition state of motion

当 $A_1 = A_2 = 0.04, n_{f1} = n_{f2} = 1.75$ 时,系统运动从过渡态进入到混沌状态,如图 4 所示.

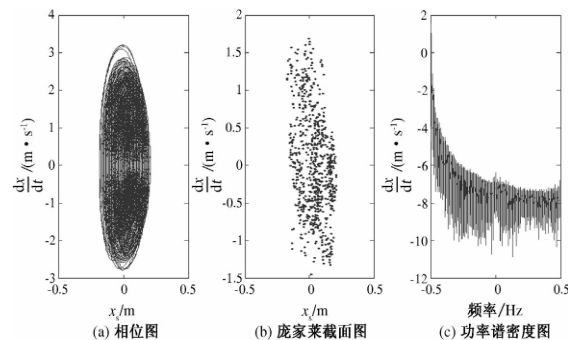


图 4 混沌运动状态

Fig.4 Chaotic motion

为了进一步研究引起车辆发生混沌振动的机理,为车辆悬架设计提供依据参考,论文通过调整

车辆前后悬架弹簧刚度系数进行对比研究. 悬架弹簧刚度系数 $n_{f1} = n_{f2} = 1.25$, 路面激励振幅 A 分别为 0.004, 0.038, 0.04 时系统的运动特性如图 5 ~ 7 所示.

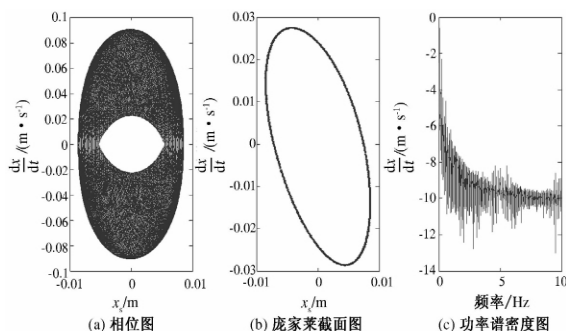


图 5 拟周期运动

Fig. 5 Quasi periodic motion

在路面相同振幅激励下, 通过将前后悬架弹簧刚度系数从 1.75 调整为 1.25 后, 车辆悬架原先的过渡态和混沌态不再存在, 而是做拟周期运动, 这说明了可以通过调整车辆悬架弹簧的刚度系数来改变车辆的运动状态, 提高乘坐舒适性和行车安全性.

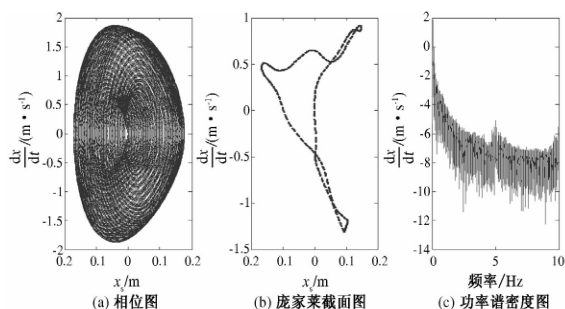


图 6 拟周期运动

Fig. 6 Quasi periodic motion

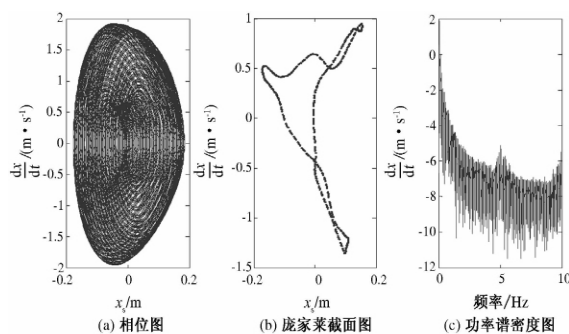


图 7 拟周期运动

Fig. 7 Quasi periodic motion

4 结论

笔者采用数值仿真方法分析了 4 自由度 1/2 非线性悬架模型在双频拟周期激励下的混沌振动. 采用庞加莱图、相位图和功率谱密度证实了系统发生混沌的可能, 同时获得了系统发生混沌振动时激励的振幅. 仿真结果揭示了车辆悬架系统通过凹凸不平路面时的振动特性为拟周期→过渡态→混沌态. 同时在路面激励振幅不变的情况下, 通过调整车辆前后悬架弹簧刚度系数, 有效改变了车辆悬架的运动状态: 车辆从混沌运动状态转变到了拟周期运动状态. 结果验证了可以通过调整悬架弹簧系数来有效避免混沌运动产生. 研究结果对车辆悬架设计和路面铺装具有重要参考意义. 下一步将通过理论方法对系统发生混沌的可能性和振动特性进行推导, 通过对比分析理论推导和仿真分析结果, 为悬架的动力学特性设计和道路路面铺装提供理论依据.

参考文献:

- [1] LIANG Shan, LI Cong-gang, ZHU Qin. The influence of parameters of consecutive speed control humps on the chaotic vibration of a 2-DOF nonlinear vehicle model [J]. Journal of Vibroengineering, 2011, 13 (3): 406 - 413.
- [2] LIU Fei, LIANG Shan, ZHU Qin, et al. Effects of the consecutive speed humps on chaotic vibration of a nonlinear vehicle model [J]. ICIC Express Letters, 2010, 4(5): 1657 - 1664.
- [3] YANG Zhi-yong, LIANG Shan, ZHU Qin. Chaos of a nonlinear half-vehicles suspension system excited by the consecutive speed-control humps [J]. ICIC Express Letters, 2013, 7(11): 3163 - 3168.
- [4] ZHU Qin, ISHITOBI M. Chaos and bifurcations in a nonlinear vehicle model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 275(3): 1136 - 1146.
- [5] 王威, 李瑰贤, 宋玉玲. 四轮激励含相位差的汽车高维非线性超混沌动力学特性研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(3): 102 - 202.
- [6] ZHU Qin, ISHITOBI M. Chaotic vibration of a nonlinear full-vehicle model [J]. Journal of Solids and Structures, 2006, 43(3): 747 - 759.
- [7] 李韶华, 杨绍普. 拟周期激励下滞后非线性汽车悬架的混沌 [J]. 振动与冲击, 2003, 22(3): 61 - 65.

(下转第 118 页)

基于 GIS 的滑坡地质灾害预警预测系统研究

李小根, 王安明

(华北水利水电大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

摘 要: 应用地理信息系统(Geographical Information System, GIS) 技术在对某滑坡地质灾害进行现场调查统计的基础上, 应用刚体极限平衡分析法(SARMA) 及有限元法(FEM) 对该滑坡的稳定性进行了分析研究; 采用灰色系统理论方法对滑坡的发生趋势进行了预测, 开发研制了基于 GIS 的滑坡地质灾害预警预测系统. 系统运行结果表明: 该滑坡的稳定性较好, 水对该滑坡体稳定性影响较大; 开发完成的滑坡地质灾害预警预测系统实现了地质灾害有关数据的统一管理和预测; 构建完成的滑坡地质灾害三维模型能够准确地反映灾害发生地的地质地貌情况; 该系统为实现地质灾害网络地理信息系统(WebGIS) 进行资源共享打下了坚实的基础.

关键词: 地理信息系统; 滑坡; 刚体极限平衡分析法; 有限单元法; 网络地理信息系统

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.027

0 引言

在我国经济建设过程中, 人类活动的一些工程建设经常引发地质灾害的发生, 其中滑坡和泥石流造成的危害最大. 当前国际滑坡灾害研究正由灾害的灾后评估向灾前的预测方向逐步发展^[1], 其中基于 GIS 平台, 将遥感数据和地质数据相结合进行灾前预测、灾中和灾后评估, 是一种有效的方法^[1-2]. 许多学者^[3-6] 对这种评价模式进行了多种途径的尝试, 取得了较好的研究效果. 但这些研究并没有建立适应性广的研究模型^[7-8]. 张桂荣等^[9-10] 的研究工作将这种方法向前又推进了一步, 研究中将气象资料进行实时更新, 将当地的地质条件和人工活动紧密结合在一起, 准确反映了地质灾害发生实际情况.

笔者以某滑坡^[11] 为研究对象, 将滑坡预警预测和实时的地质资料相结合, 在对滑坡进行监测的基础上, 结合工程地质力学原理和灰色系统理论对滑坡的发展趋势进行了深层次的研究, 开发研制了基于 GIS 的地质灾害预警预测系统, 基本实现了滑坡地质灾害的预警预测功能.

1 工程地质概况

本课题中所涉及到的滑坡位于河南省洛三(洛阳—三门峡) 高速公路 K105 + 75 ~ K106 + 410 段南侧, 由 3 个滑坡组成的滑坡群, 这些滑坡中以 K105 + 780 ~ K106 + 060 段 I 号滑坡规模最大, 如图 1 所示, 该滑坡体在平面上呈马蹄形, 南北长 230 m, 东西宽 280 m, 滑动轴方向为 NE5°, 滑体最大厚度 32 m, 平均厚 17.20 m, 滑坡体积达 100 多万 m³, 属深层、巨型滑坡. 高速公路以深挖(最深达 14 m) 路堑形式通过该滑坡体, 路基坐落在滑坡体上, 古滑坡活动和新近填土变形对已建的洛三高速公路构成严重威胁.

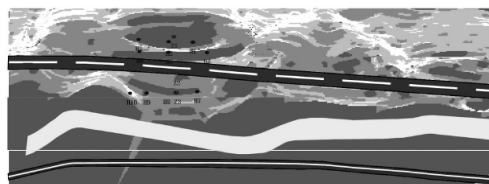


图 1 该滑坡坡度分析图

Fig. 1 Sketch map of the landslide

该段南岸上黄土连续分布, 夹 5 ~ 6 层钙核层和古土壤层, 厚约 70 m, 其下为含漂石的砂卵石

收稿日期: 2014-08-02; 修订日期: 2014-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(514004049); 华北水利水电大学高层次人才科研启动基金资助项目(001319)

作者简介: 李小根(1973-), 男, 河南焦作人, 华北水利水电大学副教授, 博士, 主要研究方向为灾害信息技术, 水利信息技术, E-mail: lixiaogen@ncwu.edu.cn.

层,多成陡崖,厚度 8 ~ 10 m,接着为红色黏土卵石层,多形成陡坡,厚度 10 ~ 30 m. 河谷切割深度达 140 m,原地形坡度很陡,局部直立,平均地形坡度 35° ~ 40°,陡坡下为较为宽阔的河谷,这些都为滑坡提供了有利条件和场所.

2 滑坡监测

长期以来,对滑坡进行预警是一大难题,而监测又是预警的重要物理前提^[12],本课题组从 2002 年 7 月开始在山体滑动危险区内布设监测标志,对滑坡体内部变形进行监测,用以掌握山体滑动的变形动态,具体监测方案及数据成果分析请参见文献[11]. 从监测成果来看该滑坡总体处于稳定状态,地表监测点最大累计位移近 50 mm,位于滑坡的上部,其总体位移方向为东南向,具左旋性质,滑坡下部的岩土体基本没有变形,滑坡深部未发生较大的变形.

3 该滑坡稳定数值模拟分析

当前滑坡稳定性分析的数学模型方法可分为两类^[13-15],一类是基于极限平衡理论的刚体极限平衡法,另一类是数值分析方法. 在本课题研究中采用刚体极限平衡的 SARMA 法和有限元法. 在滑坡的典型位置选取 4 个计算剖面分别进行滑坡体饱水状态和无水状态两种工况下的稳定计算,下文以位于滑坡体后部的 K106 + 025 剖面为例进行说明.

3.1 刚体极限平衡 SARMA 法分析

SARMA 法可比较全面客观反映各种控制滑坡稳定性因素的作用. 为提高计算精度,当滑坡形状非平滑部分剖分块体分的比较小而平滑部分剖分的块体比较大. K106 + 025 剖面高 44 m,长约 150 m,路面距滑面后缘的高度约为 16 m,计算中显示在坡体无水时整体安全系数为 1.97,饱水时为 1.19. 从 4 个剖面的分析来看,在无水的情况下,滑坡的安全系数介于 1.74 ~ 2.14 之间,在饱

水状态时,滑坡的安全系数介于 1.10 ~ 1.20 之间,可见在无水时滑坡处于基本稳定的状态,水的作用对滑坡的稳定影响很大.

3.2 滑坡稳定的有限元(FEM)分析

本次计算采用 ANSYS6.0 版本,采用结构静力中的非线性分析,选用平面四节点单元和 Drucker - Prager 本构模型. K106 + 025 剖面计算时选取计算剖面为滑坡面积 3 倍多,共划分 1 311 个单元和 1 344 个节点,在滑面、坡顶和坡脚处网格进行了加密,在计算剖面的底部和后部边界施加水平方向和竖直方向约束,岩土体物理力学指标参数见表 1,表中括号内为坡体无水时的参数.

对 K106 + 025 剖面和其它三个剖面应力分析计算结果表明: 滑坡体在无水和饱水两种工况下的应力大都表现为压应力,方向沿着滑坡向下,压应力的值并不大,拉应力出现的部位很少,一般出现在计算剖面的后缘顶部,有时在滑坡面上也出现拉应力,但拉应力的值很小.

一般来说,在滑坡面、计算坡面的后缘顶部、路基滑坡的上部、填土和原状土结合部位容易造成拉应力,在滑坡稳定性分析中,这些是应该重点考虑的部位;而从位移计算来看,两种工况下滑坡位移主要发生在滑坡体内,该部位的位移明显大于别的部位,方向竖直向下或者沿着滑坡方向向下,位移值并不是很大,大部分在 5 ~ 12 cm 之间变化.

4 滑坡变形灰色系统预报

灰色系统理论是邓聚龙教授在 80 年代提出的. 目前,该理论已在经济、工农业、地质、军事等各个领域内得到应用,在工程地质中,多用于预测地质体的变形(如滑坡变形预测、洞室围岩变形预测等). 笔者采用灰色系统理论对该滑坡现场变形趋势进行了预测.

常用的灰色系统模型为 GM(1,1) 模型. 首先将原始观测数据 $x^{(0)}$ 作一次累加生成得到 $x^{(1)}$.

表 1 K106 + 025 剖面两种工况下岩土体物理力学指标

Tab.1 physical and mechanical parameter under two conditions in the K106 + 025 section

| 岩土层 | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 内聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 密度/(kg · m ⁻³) |
|------|----------|------------|---------|----------|----------------------------|
| 填土 | 6.0(8.0) | 0.3(0.3) | 28(30) | 16(18) | 1.98(1.86) |
| 粉质粘土 | 5.0(6.0) | 0.35(0.32) | 25(28) | 14(16) | 1.96(1.88) |
| 泥质卵石 | 6.0(8.0) | 0.45(0.40) | 30(32) | 6(10) | 2.02(1.80) |
| 黏土岩 | 8.0(8.2) | 0.3(0.3) | 50(50) | 19(19) | 2.04(2.04) |

注: 括号内为坡体无水时的参数.

$$\begin{cases} x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}; \\ x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}; \\ x^{(1)}(i) = \sum_k x^{(0)}(k). \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为数据个数.

相应的白化微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b. \quad (2)$$

式中: a, b 为待定常数, 可由最小二乘法求得. 在求得 $x^{(1)}$ 后, 经累减还原后而得到预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k). \quad (3)$$

采用后验差检验: 设原始数据列为 $\{x^{(0)}(i)\}$, 预测数据列为 $\{\hat{x}^{(1)}(i)\}$, 其残差为

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), k=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

令 S_1 为原始数据的均方差, S_2 为残差的均方差, 则

$$\begin{cases} S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}(k)]^2; \\ S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}]^2. \end{cases} \quad (5)$$

后验差比值:

$$C = S_2 / S_1. \quad (6)$$

小误差概率:

$$P = \{|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745 S_1\}. \quad (7)$$

根据经验, 一般要对精度划分等级^[12], 若 P, C 都在允许范围之内, 则可计算预测值, 否则, 需进行残差修正, 以保证预测的可靠性, 这时需要建立残差序列模型.

5 滑坡预警预测系统开发

5.1 开发运行环境

CPU: Pentium 500 MHz 以上、内存: 512 MB 以上、显卡: 标准 VGA, 24 位真彩色、ArcGIS Engine 9.3 Runtime、NET Framework 3.5 环境等平台.

5.2 技术路线

技术路线如图 2 所示.

采用理论分析、实验区研究与突出重点相结合的研究方案. 重点有: ①面向实际的滑坡预演过程; ②面向实际的灾害指挥; ③在建立地质灾害虚拟现实仿真平台时, 着重于地质灾害模型与虚拟现实模型的耦合, 实现传统方法与遥感(RS)、数字高程模型(DEM)、地理信息系统(GIS)的有机结合.

滑坡地质灾害三维模型的构建采用分层次的模式. 对研究区域的山体, 采用 CAD 数据和校正测

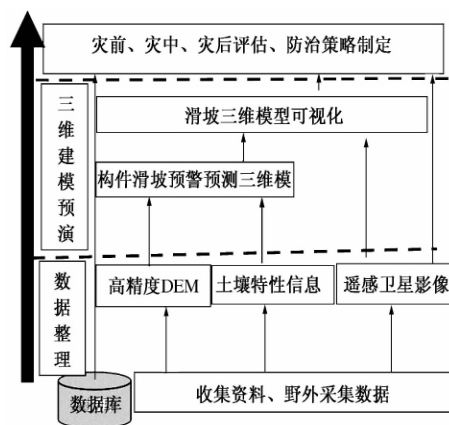


图2 滑坡预警预测系统技术路线

Fig. 2 The early warning technology route of the landslide

量点数据构建精度为 0.5 m 的几何模型, 并附加土壤类型等基本特征, 纹理采用遥感卫星图像, 并在 0.5 m 精度模型基础上构建精度分别为 1, 10, 100 m 共计 4 种层次精度的模型; 对于非核心研究区域, 基于高精度 DEM 构建精度分别为 100 m 和 1 000 m 2 种精度的几何模型, 模型附加土壤特征和用地类型信息, 纹理采用卫星遥感图像.

基于遥感影像提取土壤特征和用地类型信息, 以多个时期的 Landsat-7 ETM+ 图像为基本资料, 综合人机交互式非监督分类法、最大似然法和谱间关系阈值法, 挖掘谱间结构, 利用各地物相分离和时间演变的规律来提取所需信息.

利用 GIS 技术, 集成 DEM, 三维立体动态显示滑坡预演, 为实际的灾害指挥提供依据.

基于地质灾害虚拟现实仿真平台, 对灾前、灾中、灾后进行有效的评估, 进而对滑坡给高速公路的安全造成的危害进行预警、预测, 通过比较后, 决策者可以做出正确的选择, 制定最好的防治策略, 从而避免重大灾害的发生或最大程度上减轻灾害所造成的损害.

以 ArcGIS 为开发平台, 基于 Microsoft SQL Server 2003 关系数据库系统, 采用 C# 开发语言, 研制地质灾害虚拟现实仿真系统, 通过实验区的验证, 检验系统的可行性, 并与传统方法比较, 检验其精度.

5.3 系统功能模块

5.3.1 主控模块

主要完成系统的功能转化任务, 可从主控模块切换至各种监测仪器的数据录入、查询、绘图及预测子模块, 也可从各子模块返回.

5.3.2 工程管理模块

主要完成新监测项目的创建与维护,可将该软件用于其它滑坡监测项目。

5.3.3 数据录入模块

此模块提供了快捷的数据输入和计算功能,只需将原始监测数据输入计算机,软件会自动将监测数据转换为可用于工程实践的位移数据。

5.3.4 数据查询模块

查询模块完成各种监测仪器数据的查询,可按照钻孔编号、钻孔深度、测量时间、方向等控制因素完成对数据库的快速及综合查询。

5.3.5 绘图模块

绘图模块完成对查询数据的绘图操作,可完成各种监测统计曲线,例如对钻孔测斜仪可生成深度—累计位移曲线、深度—时间曲线,对地表监测数据可完成时间—累计位移曲线等,并可根据需要生成年统计曲线、月统计曲线、日统计曲线;另外生成的图形可存为矢量图或点阵图格式,插入文档进行编辑。

5.3.6 预警预测模块

预警预测模块完成对各种监测数据的预测功能,并对预测结果进行误差校验。

5.3.7 地质灾害模拟模块

三维预演滑坡地质灾害发生的过程及发生的趋势。

5.3.8 系统维护模块

系统维护模块完成对数据库的压缩和修复,以及录入地质巡视信息。

6 构建山体三维模型

在 ArcScene 环境下导入山体数字高程模型 (DEM);应用 DEM 本身的高程完成山体高度的拉伸并进行不同山体高度的色彩编辑;完成构建山体发生滑坡时的三维模型如图 3 所示。

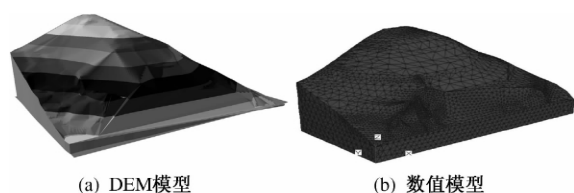


图3 该滑坡三维模型

Fig.3 the 3D model of the landslide

7 结论

①该滑坡总体上处于稳定状态,水对该滑坡

体的稳定影响很大;②开发完成的滑坡预警预测系统,可实现对监测数据的录入、计算、查询、分析、管理等功能,可实现滑坡预警的可视化,对于实现地质灾害网络地理信息系统 (WebGIS) 的资源共享打下了坚实的基础;③该系统可以三维可视化预演多种预防地质灾害调度预案执行的效果,并智能对比评价各个预案在灾后评估中的应用,对防灾策略的制定提供决策支持。

参考文献:

- [1] 殷坤龙,韩再生,李志中. 国际滑坡研究的新进展[J]. 水文地质与工程地质,2000(5):1-3.
- [2] 许强,黄润秋,李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. 地球科学进展,2004,19(3):478-483.
- [3] 吴宜平,殷坤龙. 滑坡数据库管理信息系统[J]. 水文地质工程地质,1997,1:14-16.
- [4] 刘大安,刘小佳. 地质工程监测信息系统开发[J]. 工程地质学报,1997,5(4):351-356.
- [5] 胡新丽,唐辉明. GIS支持的斜坡地质灾害空间预测系统框架设计[J]. 地质科技情报,2002,3(21):99-103.
- [6] 吴振君,邓建辉,闵弘. 基于GIS的滑坡监测信息管理与分析系统[J]. 岩土力学,2004,25(11):1739-1743.
- [7] 罗章,龚福华,宋明健,等. 岩土工程灾害研究进展[J]. 湖南工程学院学报,2005,15(1):87-91.
- [8] 张梁,张业成,罗元华,等. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [9] 张桂荣,殷坤龙. 基于WebGIS的地质灾害信息系统网络数据库建设[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(3):114-118.
- [10] 张桂荣,殷坤龙,刘礼领,等. 基于WebGIS和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学,2005,26(8):1312-1317.
- [11] 黄志全,刘汉东,姜彤. 吉家河滑坡稳定性及监测预报信息系统研究报告[R]. 郑州:华北水利水电学院资源与环境学院,2003.
- [12] 赵其华. 边坡灾害及其防治研究新进展—“香港边坡灾害及其防治讨论会”简介[J]. 地质灾害与环境保护,2000,11(3):276-278.
- [13] 黄志全,刘汉东,姜彤. 边坡系统演化的开放度研究[J]. 工程地质学报,2000,18(6):475-477.
- [14] 张咸恭,王思敬,张倬元. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [15] 林立相,徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法[J]. 山地学报,1999,17(3):235-239.

The Research of the Early Warning System About the Geological Disasters Based on GIS

LI Xiao-gen, WANG An-ming

(School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The GIS technique is used to investigate the statistics of landslide geological disasters, and the grid limit equilibrium method and finite element method (FEM) are used to analyze stability of the landslide, and the gray system theory method is used to forecast deformation trend of the landslide, and the early warning system about landslide geological disasters is completed. System operation results show that: the stability of the landslide is good, the influence of water on the stability of the landslide is bigger; the early warning system about landslide geological disasters which is developed realizes unified management and forecast of the related data of geological disasters; the constructed 3D model of landslide geological disasters can accurately reflect the geological and topographical feature situation of where the disaster happened; the system has laid a solid foundation to realize sharing of the WebGIS of geological disasters resources.

Key words: geographical information system; landslide; rigid body limit equilibrium method; finite element method (FEM) ; WebGIS

(上接第 113 页)

Research on Chaotic Vibration Characteristics of Nonlinear Half Vehicle Model under Quasi-Periodic Excitation

YANG Zhi-yong^{1,2}, LIANG Shan¹, ZHOU Tong¹

(1. College of Information Engineering, Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 402260, China; 2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To overcome the problem that the vehicle suspension model of the single periodic excitation road does not truly reflect the nonlinear dynamics characteristics of the actual vehicle, the paper establishes a quasi-periodic dynamic road excitation function, and builds a four-degree of freedom nonlinear half vehicle suspension model. Using the Poincaré map, phase diagram, power spectral density to analyse the nonlinear dynamics characteristics of the four degrees of freedom semi-active vehicle suspension model on uneven road surface, we obtain the amplitude of chaotic vibration and its vibration characteristics which is quasi-periodic \rightarrow transition state \rightarrow chaotic state as the vehicle through uneven road surface. At the same time, the occurrence of chaotic vibration can be inhibited effectively by adjusting the spring stiffness coefficient. The results show that the simulations of the four degrees of freedom nonlinear semi-active suspension model under dual-frequency quasi-periodic excitation is more closer to the real situation, which helps the design of vehicle suspension and pavement.

Key words: quasi-periodic; nonlinear vehicle; semi-active suspension; chaotic vibration

文章编号: 1671-6833(2015)01-0119-03

立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺及设备

马胜钢, 何宗海, 刘晓瑞, 董攀辉

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 提出了一套新型粉煤灰粉磨工艺, 即立式磨粉机粉磨、分选、收集工艺, 该工艺通过设计新型的立式粉磨系统, 解决了粉煤灰在小颗粒的状态下不易粉磨的难题, 明显地降低了粉磨成本、占地面积、投资成本, 提高了粉磨效率和自动化程度. 该工艺和设备已经在首钢京唐钢铁联合有限公司投入使用.

关键词: 立式磨粉机; 粉磨系统; 粉煤灰

中图分类号: TD453 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.028

0 引言

粉煤灰是从煤燃烧后的烟气中收捕下来的细灰. 在我国, 燃煤热电厂每年所排放的粉煤灰总量逐年增加, 2010 年约 3 亿吨, 不仅污染了环境, 还占用大量土地, 因此, 对粉煤灰治理是刻不容缓的. 由于粉煤灰可用于浇注混凝土、高强度水泥和新型建材^[1]等, 所以对其综合利用, 化害为利, 从而实现经济和社会的协调发展具有十分重要的现实意义和深远的历史意义^[2].

首钢集团为响应国家节能减排的号召, 提出了工业固废粉煤灰再利用项目, 以处理其电厂每年所产生的 30 万吨固体废粉煤灰, 使其变废为宝. 笔者主要研究了立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺, 该工艺提高了粉磨效率, 满足了项目的要求.

1 粉煤灰的处理设备

煤灰粉磨在国内起步较晚^[3], 对其特点与规律的认识还比较肤浅.

目前, 煤灰粉磨设备所用管磨机是由水泥管磨机转变而来, 因此无论是磨内结构还是各项技术参数, 与水泥磨比较都没有大的改变, 缺乏针对性. 粉煤灰管磨机完全套用水泥管磨技术, 在理论上是不科学的, 实践上不可能达到应有的效率. 目前国内粉煤灰管磨机普遍存在的问题是: 磨内物料流速过快, 料球比偏低、严重的“过粉磨”、各项技术参数不合理以及研磨体级配、衬板、隔仓板、

出口篦板结构缺乏针对性^[4]. 同时, 管磨机还具有占地面积大、能量利用率低、生产效率低、一次性投资高、颗粒不均匀性严重等突出缺点.

立式磨粉机则是近年来发展较为迅速的一种粉磨设备, 具有粉磨效率高、电耗低、烘干能力大、允许入磨物料粒度大、粉磨工艺流程简单、占地面积小、土建费用低、噪音低、磨损小、寿命长、操作容易等优点^[5]. 目前市场上应用比较多的立式磨粉机设备有 HRM 系列、MLS 系列^[6]等, 综合各种文献及实验室实验的结果来看, 由于煤灰的细度小(原料煤灰有一半以上可以达到国标二级煤灰), 当前的立式磨粉机结构在粉磨粉煤灰时存在困难^[7].

郑州大学机械工程学院和河南省新乡四达有限公司立足于粉煤灰处理方向, 以实现粉煤灰采用立式磨粉机实现粉磨, 达到国标一级粉煤灰添加料为目标, 开发了粉煤灰的立式磨粉机粉磨工艺.

2 立式磨粉机粉磨工艺

粉煤灰的粉磨工艺框图如图 1 所示. 图 2 为该工艺系统的模拟现场效果图. 图 3 为立式磨粉机模型图. 该新工艺采用立式磨粉机(包括底部的磨机本体和上部选粉机, 两套大旋风处理器、风机、小旋风处理器、管道等组成的闭式系统, 效率 75% 左右), 经过袋式除尘器再次收集(效率 99.99% 左右, 至此气体中所含的颗粒浓度已达到

收稿日期: 2014-07-07; 修订日期: 2014-10-10

基金项目: 首钢集团工业固废粉煤灰再利用项目重点项目

作者简介: 马胜钢(1954-), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 主要从事立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺及设备的研究, E-mail: mashenggang@zzu.edu.cn.

环境排放标准),无尘气体再通过风机和管道连接磨机的进口完成闭式循环.在风机和磨机之间的管道上连接有一套小旋风系统,其特殊意义在于保证磨机内部的压力较大气压为负值,以达到在磨机密封性不是特别好的情况下不会有颗粒通过空隙飘散出去污染环境^[8].

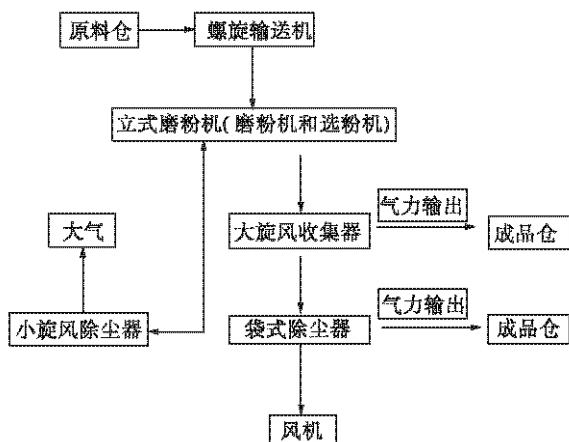


图1 立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺框图

Fig.1 Vertical milling machine grinding process block diagram of fly ash

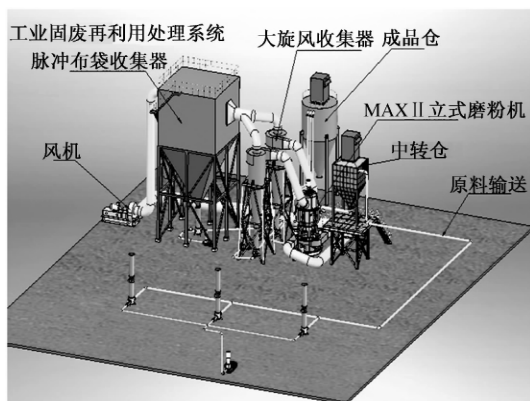


图2 模拟现场效果图

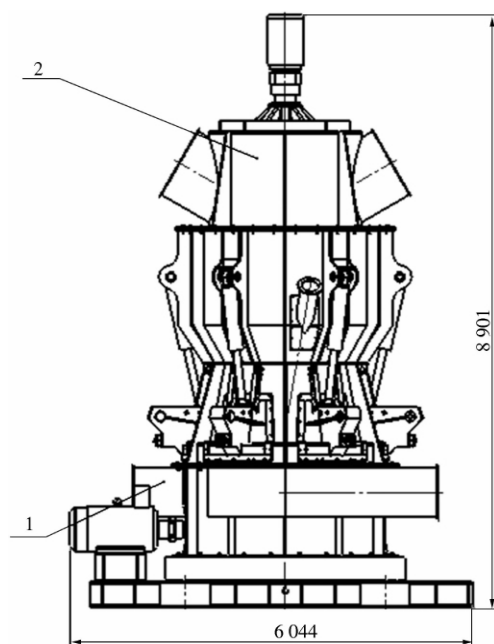
Fig.2 Simulation scene renderings

3 关键工艺设备

3.1 新型立式磨粉机

新型立式磨粉机与传统的立式磨机的区别在于:采用六个均匀分布的轮胎式磨辊,使其在粉磨时增加有效接触面积、减少在颗粒较大时随气流上升的概率、延长了有效粉磨时间、降低了能耗,提高了生产效率.同时采用新的磨辊材料和快速更换机构,以增加其耐磨性和降低更换磨辊辊皮的时间,提高了磨机的使用寿命和维修时间,提高了生产能力降低了维护时间和成本.新型的选粉机机构,采取适当的动态叶片数量、宽度、叶片角

度,提高了选粉机的分级效率和分级精度,同时采用变频器控制电机,大幅度提高了选粉机转笼的转速范围,为生产满足要求的颗粒提供了有效保证^[9].



1—立式磨粉机本体;2—选粉机

图3 立式磨粉机模型图

Fig.3 Vertical milling machine model

3.2 粉煤灰收集器

该设备设计产量为30~35 t/h,分别由两套大旋风收集器和袋式除尘器进行收集,并由气体输送装置进行输送.由于设计的气体输送装置的最大输送能力为12 t/h,所以要求旋风收集器的收集效率约为70%~80%,为此,专门设计了两套大旋风收集器,效率约为75%,在生产条件下的所能收集颗粒等效直径大于5.75 μm.袋式除尘器作为收集成品颗粒的最后装置,其效率大约为99.99%,收集成品量大约为10 t/h.达到了除尘器在留有一定裕度情况下高效地工作,有效地提高了设备利用率,减少了投资和运营成本^[10].值得一提的是:小旋风除尘器控制磨机负压的作用,使其能够在密封性一般的情况下保证磨机的正常生产而不会污染环境.

4 工艺优势

该新型立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺除具有一般磨粉机的优势之外,还具有以下特点:

(1) 立式磨粉机的改进设计使其能够有效地粉磨粉煤灰,使其从管磨机的传统生产模式改进到立式磨机生产模式的大潮流中,有效地降低了

能耗、提高了效率、减少了投资和运营成本;

(2) 闭式系统的设计使系统在运营中进一步降低了成本和能量损耗,也避免了开式系统中袋式除尘器在损坏情况下出现粉煤灰颗粒进入大气污染环境的恶劣工况发生;

(3) 小旋风系统的设计使系统在正常生产时保证磨机内部在负压下生产,避免了密封性不好所可能带来的煤灰污染环境情况,也为工作人员提供了良好的工作环境。

5 工业应用实例

该套立式磨粉机粉磨粉煤灰的生产工艺首先使用于首钢京唐钢铁联合有限公司内部电厂年产30万吨粉煤灰的处理项目——工业固废再利用处理系统。

该系统在现场试车时分为3个阶段。

(1) 选粉机调速为15 Hz,螺旋输送机调速为15 Hz,系统负载30%,连续运行7 d,其后停车检查、维修3 d;

(2) 选粉机调速25 Hz,螺旋输送机调速30 Hz,系统负载60%,连续运转一周,检查维修2 d;

(3) 适当调整选粉机转速,螺旋输送机调速50 Hz,系统100%负载,连续运行一周,维修,总结。

在试车3个阶段期间,24 h值班,记录巡视系统运行情况,同时每天送检成品样本,以及时调整生产参数。

据生产现场记录的资料显示:立式磨粉机能够有效地粉磨粉煤灰、选粉机分选效率比较高、两套旋风除尘器和袋式除尘器的收集和输送能力大约为9~11 t/h、现场工作环境良好。完全满足了

生产需要和环保法律法规的要求。

6 结论

立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺是一种可以明显降低投资和运营成本、提高生产效率、减少占地面积、降低能耗和环境污染的新型工艺,可以大幅度节能减排。该工艺属于国内首创,为粉煤灰的处理开辟了新途径,并且已经得到了成功应用,具有非常好的推广实用价值。

参考文献:

- [1] 陈蕾,戴娟,谈峰,等. 粉煤灰的利用及广义磨粗灰粉磨特性分析[J]. 矿山机械,2004(10):13.
- [2] 郝小非,饶先发,李明周. 我国粉煤灰综合利用现状与展望[J]. 矿山机械,2006,34(10):6-8.
- [3] 黄燕美. 浅析粉煤灰的利用[J]. 福建建材,2013,14(1):20-23.
- [4] 杨春保,朱春启. 开流粉煤灰管磨机效率低的原因及改进[J]. 中国建材报,2008(3):1-2.
- [5] 邓小林. HRM4800 立式磨在5000t/d水泥熟料生产线上的应用[J]. 中国水泥,2009(3):51-55.
- [6] 吴敬. 粉磨设备的发展和应用[J]. 技术与市场,2012,19(11):24-26.
- [7] 段明南,张永杰. 高炉渣微细粉立式磨粉机的工作特性研究[J]. 宝钢技术,2014(1):23-30.
- [8] 魏新利,张海红,王定标. 旋风分离器流场的数值计算方法研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2005,26(1):57-60.
- [9] 綦海军. 立磨选粉机分级流场数值模拟与节能改造研究[D]. 绵阳:西南科技大学机械学院,2012.
- [10] 叶玉奇,钱付平. 基于响应曲面法袋式除尘器清灰性能的数值研究[J]. 环境科学学报,2012,32(12):3087-3094.

Grinding Fly Ash Process and Equipment with Vertical Milling Machine

MA Sheng-gang, HE Zong-hai, LIU Xiao-rui, Dong Pan-hui

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

Abstract: A new ash grinding process was proposed, with the application of vertical grinding mill systems to grinding, sorting, and collection process. The process by designing a new type of vertical grinding system to solve the small particles of fly ash in the state is not easy grinding problem, significantly reducing the grinding costs, footprint, investment costs, improving grinding efficiency and degree of automation. The technology and equipment have been put into use in Shougang Jingtang Iron and Steel Co., Ltd.

Key words: vertical milling machine; grinding system; fly ash

书籍自动翻页扫描装置的设计与应用

裴东杰, 秦营周, 张 峥

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为实现已装订成册的纸质书籍自动翻页, 达到便于阅读和自动扫描的目的, 设计出的一套能够实现连续翻动书页、扫描输出电子文档的装置. 该装置通过分解、模拟人手翻书的动作, 利用机械结构和控制系统达到设计目的. 通过样机研制表明, 该装置能较好地实现书籍自动翻页扫描的功能, 并且其性能稳定, 操作简单, 大大减轻了文印场所书籍翻页扫描作业的劳动强度, 有着重要的实用价值.

关键词: 书籍; 自动翻页; 扫描; 设计

中图分类号: TH122; TP23

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.029

0 引言

目前, 已装订成册的书籍扫描、复印的工作在不拆订的情况下, 近乎全部需要通过手动翻页来完成^[1], 仅有美国、瑞士等少数国家开发出相关产品^[2], 且造价昂贵、体积较大, 国内仍处在研发阶段^[3], 暂无产品问世. 文印店、图书馆、档案室等众多场所存在大量的书籍扫描、复印工作, 完全靠手动翻页来完成, 劳动强度很大, 且枯燥无味^[4], 因此, 笔者设计了一款用于减轻文印工作者劳动强度的书籍自动翻页扫描装置. 该装置由书本夹持机构、翻书运动机构、电子控制系统、扫描存储系统、检测反馈系统等组成, 以达到翻书快速稳定、扫描质量高、错误率低、操作方便的效果, 有着重要的实用价值.

1 装置方案介绍

该书籍自动翻页扫描装置的设计目标是通过机器模拟人手连续翻动书页的动作, 实现无人值守的书籍自动翻页扫描作业. 首先, 将连续翻动书页的运动进行分解为“压一搓一翻一拍”4个循环往复的基本动作; 其次, 通过机构设计依次完成以上4个基本动作; 然后, 建立整个运动的控制系统; 最后, 通过软件设计完成数据存储、输出工作.

2 运动方案的设计

通过机械结构实现书籍翻页的各基本动作的

方案设计是本研究的关键, 每一个基本动作均可有多种方案来实现^[5], 这里根据结构简单、控制方便、运行可靠的原则进行选择、设计.

2.1 书本夹持机构的设计

本装置采用一个“V型支架”和两个动作可控的“夹子”来完成. 将书本摊开放置于支架上, 考虑到书籍的厚度不同, 尤其是较厚书籍摊开后上下页面的错位现状严重^[6], 同时为方便书页的翻动, 通过实验确定“V型支架”的夹角为 120° , 即书籍左右页面的夹角为 120° . 两个由步进电机控制、带动的“夹子”对称置于书籍的两侧, 起到夹持书页的作用, 并能够根据指令控制开合; 同时, 在“夹子”闭合夹紧的过程中, 能够给书页一个向外张拉的摩擦力, 使书页摊平.

2.2 翻书运动结构的设计

首先, 采用摩擦系数适中的橡胶棒, 利用滚动摩擦将书页“搓”起, 利用同步带将动力电机传递给摩擦轮, 同时摩擦轮上要有一定配重, 以保证其摩擦力大小能够将书页“搓”起, 配重的大小由实验确定. 然后, 利用“跳针”插入已“搓”起的书页下, “跳针”沿“V型轨道”移动将书页翻至另一侧, 然后跳针缩回. “跳针”和“V型轨道”的模型如图1、2所示, “跳针”是一根细而长的金属轴, 一端设轴肩, 另一端带螺纹用于装螺母, 轴上套一个直径稍大于轴但小于螺母的弹簧, 末端用螺母锁住, 通过“跳针”轴肩所处导轨层次的变化, 借助弹簧的回复弹力, 形成跳针末端的伸出与缩进

收稿日期: 2014-07-01; 修订日期: 2013-10-09

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(122102210090)

作者简介: 裴东杰(1987-)男, 河南商丘人, 郑州大学实验员, 硕士, 研究领域为CAD/CAM, 数字化设计与优化设计, 光机电一体化设备开发, E-mail: peidongjie@zzu.edu.cn.

运动。“V 形导轨”有两个分层,即轨道 1 和轨道 2,如图 3 所示,两个轨道之间以类似于吊桥的形式相切合,其另一端和轨道 1 铰接。如此即可保证跳针向左滑动时只能在轨道 1 上且末端缩进,向右滑动时只能在轨道 2 上,且末端伸出。最后,配合“夹子”的开合,完成整个翻书动作。

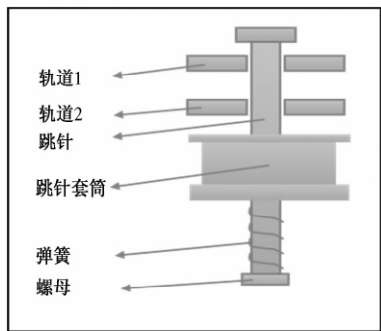


图 1 跳针

Fig.1 Skipping stitch

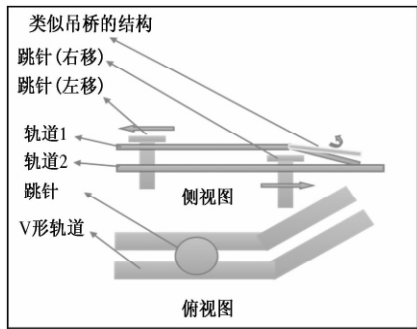


图 2 V 型轨道

Fig.2 The “V” track

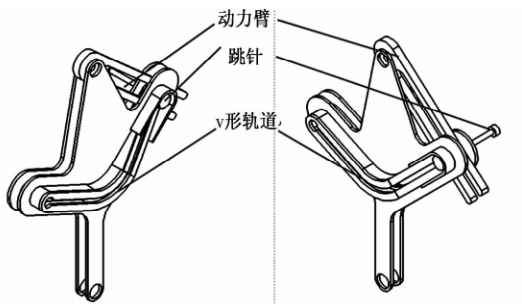


图 3 V 型导轨模型

Fig.3 Model of the “V” tract

3 电子控制系统的设计

电子控制系统的硬件主要由以下元件构成:1 台 PC 机,1 块 STC12C56 控制芯片,3 块步进电机驱动器,5 个步进电机,3 个舵机,5 个光电编码器,1 个红外传感器,2 个高清摄像头。控制的核心部分为对步进电机的闭环控制,还有红外传感器的检测,舵机的控制,与 PC 机的双机通信等模块。

红外传感器的检测是翻页程度检测的方式之

一(另一种为页码的机器视觉检测)^[7],若橡胶棒转动将书页成功搓起,红外传感器的探头即被遮挡,“搓书”动作停止,否则,橡胶棒将会持续转动,直到书页被翻起。

在“跳针”运动时,伴随有一定幅度的圆弧运动,选用舵机作为动力器件,该控制系统选用的 STC12C56 单片机可以输出 4 路硬件 PWM,可以完成 4 个舵机的控制,从而保证翻书机构圆弧运动的顺利进行。

4 扫描存储系统的设计

扫描系统主要包括可调节的摄像头支架和高清摄像头,摄像头支架是用来带动并调节摄像头的方位,以便于在合适的位置扫描书页。摄像头是由电脑驱动,在系统运行时,每当翻页动作完成后,单片机便会向上位机发送翻页完成信号和请求图像采集的控制信号;而上位机在图像采集完毕后,刷新界面显示,并保存当前摄像头捕捉到的画面,同时会向下位机发送拍摄图像完毕,允许系统继续执行翻页的信号,使得下一次翻页继续进行,以此为一个周期,循环往复。当页面扫描工作全部完成后,点击“导出 PDF 文件”按钮,程序将会将拍摄到的所有图像保存为一个 PDF 文档。

此控制系统与 PC 机之间选用 RS232 通信,通信距离较短,数据简单,稳定可靠^[8]。程序基于 Qt 框架开发,具有良好的移植能力,通过简单的修改即可实现在多个平台上运行;摄像头控制部分采用 OpenCV 开源计算机视觉处理库进行控制,为未来可能增加的页码 OCR 识别做好准备。

5 检测反馈系统的设计

针对翻页扫描过程中可能会出现漏页的情况,设计了一个用于漏页补全的检测反馈系统,程序流程如图 4 所示。程序读取 PDF 文档后,需用户手动剔除目录页、附录页等不存在页码或者页码与正文重复的部分,之后由用户设定正文页码在书页中的位置;在完成这些预备工作后,程序将从进行页码识别的部分中随机抽取几张完成页码识别,根据识别结果用户可以选择重设页码所在范围;在确认页码所在范围设置准确后,程序采用随机算法确定页码缺失情况,并直观地反馈给用户;由于受 OCR 识别算法的准确度限制,有可能出现无法确定缺失页面的具体页码的情况,程序会提示用户手动确定无法识别页面的页码,直到所有缺失页都可以被程序确定下来;之后需要用户将这些缺失页手动扫描出来,并添加到程序中,在这些工作完成后,系统便可生成一个完整的 PDF 文档。

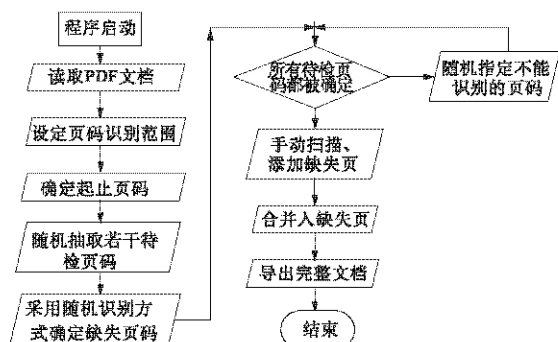


图4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

6 样机及操作方式

完成的书籍自动翻页扫描装置的样机,如图5所示,其主要参数如下:规格:700 mm × 400 mm × 500 mm;适用对象:主流纸质的已装订书籍(包括硬脊书籍);翻页速度:≥0.7 s/页;扫描速度:<0.1 s/页;输出文档格式:PDF;翻页扫描过程错误率:<3%;文档最终错误率:<0.1%。

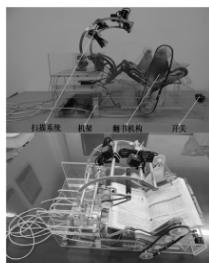


图5 样机

Fig. 5 The model

装置操作简单方便,将待扫描的书本放在“V型支架”上,翻至扫描的起始页面,成120°摊开,

并用“夹子”加持,打开开关,在电脑操作界面中输入需扫描的总页码数,点击开始按钮,即可实现自动翻页扫描;翻页扫描结束,再根据电脑操作界面的提示,剔除不需要的页面,补全遗漏的页面;确认扫描信息无误后,便可以在电脑上得到对应书籍的PDF文档。

7 结论

笔者设计了一套能够对已装订书籍自动翻页扫描的装置,运行稳定高效,操作简单方便,整套设备设计精巧,控制精准,应用机器视觉技术和红外漏翻检测技术的双重反馈,保证自动翻页扫描的快速进行。该装置能够很大程度上减轻文印工作者书籍扫描、复印的劳动强度,可为高校图书馆、小型出版社、文印店等场所带来极大的便利,具有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] 冶建科,赵群飞,周毅,等.一种自动翻页扫描机器人的研制[J].机器人技术与应用,2009(1):30-33.
- [2] RICOH A.自动翻页复印机样品[J].今日电子,1994(9):81-82.
- [3] 王银彪.谱台翻页机构设计[J].机械设计,1997(1):41-42.
- [4] 胡东平.自动翻页扫描仪控制系统的研究[D].长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2011.
- [5] 杨黎明,杨志勤.机构选型与运动设计[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [6] 毛荣滋.自动翻谱器——改变千百年来传统的手翻乐谱方式[J].乐器,2009(2):122-123.
- [7] 宜亚丽,武岳,赵三猛,等.全自动可调式翻页机构设计[J].机械研究与应用,2011(6):79-81.
- [8] 李笑梅,任延东,曹沛新.基于PLC的图书自动扫描系统的研究[J].白城师范学院学报,2013,27(5):33-36.

Design and Application of an Automatic Page Turning and Scanning Device

PEI Dong-jie, QIN Ying-zhou, ZHANG Zheng

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

Abstract: In order to realize bound paper books turn pages automatically to facilitate reading and scanning, a device which can realize continuous pages turning, scanning and outputting electronic document is designed. Through decomposing, simulating the action of pages turning, and using the mechanical structure and control system, the device achieves the design goal. It is shown that the device can fulfill automatic turn pages and scanning by making prototype. It has stable performance, simple operation, and can reduce the labor intensity of books scanning greatly, which has important practical value.

Key words: book; automatic page turning; scanning; design

文章编号: 1671-6833(2015)01-0125-04

单层球形网壳结构的分析及实验研究

马泳涛, 陈天跃, 李伟, 袁涛

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对单层球形网壳进行结构设计. 以网壳承受的风载为设计载荷, 利用 FLUENT 软件得到网壳表面风压分布载荷. 采用单向流固耦合 (FSI) 技术, 将计算得到的表面风压施加到网壳结构分析模型上. 通过结构分析的非线性计算, 得到网壳在风载条件下的应力分布及变形. 以网壳梁截面尺寸最小为优化目标, 得到满足设计指标要求的梁截面尺寸. 通过现场实验, 得到网壳节点位移载荷曲线, 在相同条件下, 将实验结果与仿真模型进行对比, 验证了网壳结构模型的正确性.

关键词: 单层球形网壳; FLUENT; 流固耦合; 优化尺寸; 实验分析

中图分类号: TU312

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.030

0 引言

单层网壳结构是由空间梁构件和具有一定预张力的膜材组成的梁膜混合结构, 该结构具有杆系结构和薄壳结构的优点^[1], 被广泛应用于中小型建筑、工业厂房以及跨度较大的展览馆、航空港等公共建筑, 有广阔的发展应用前景^[2]. 但由于网壳结构中组成的两种基材力学及物理性能相差较大, 并且结构中存在膜的预张力, 致使其在设计过程中无法按照传统的网架结构或薄壳结构设计规范进行计算. 其结构分析及力学性能研究是当前空间结构领域的热点问题^[3].

笔者以有限元法为计算手段, 将网壳的分析分为流场分析和结构场分析两部分. 以单层球形网壳结构的风载为建模条件, 首先对网壳结构进行风场分析^[4-5], 得到网壳中心截面的风压分布. 在结构场分析中, 运用流固耦合技术将风载施加到网壳结构分析模型上, 并通过梁膜结构的非线性分析得出网壳结构截面的优化尺寸. 最后通过网壳结构实物的单点和多点加载实验, 得到了节点的位移载荷曲线, 将实验结果与仿真模型相比较, 验证了实验数据与仿真所得结果在误差允许范围内的一致性, 进一步说明了力学模型的正确性.

1 网壳结构风场分析

1.1 几何模型与计算域

对网壳结构进行风场分析时, 选取理想球以替换实际的网壳结构, 以获得精度较高的风压结构. 理想球面上的风压数值模拟时, 取较合理的封闭求解计算域, 取代开放的风场空间计算域. 根据流场计算域的常规设定可得理想球面网壳风压分析的几何模型^[6], 如图 1 所示.

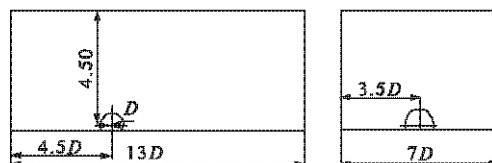


图 1 理想球面网壳风压分析的几何模型

Fig. 1 Geometry model of ideal spherical shell wind pressure analysis

1.2 网格划分

网格划分是计算流体力学数值计算中重要的环节, 网格质量对迭代计算的收敛性以及计算结果的准确性有着较大的影响. ICEM CFD 是专业的流体分析网格划分工具, 其划分的网格质量一般较高, 故选用 ICEM CFD 划分网格. 将已建立的风场分析几何模型导入 ICEM CFD, 经几何修复后定义 INLET、OUTLET、WALL、BALL 等结构部

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51305136)

作者简介: 马泳涛 (1975-), 男, 河南郑州人, 郑州大学讲师, 博士, 研究方向为先进制造技术与结构仿真, E-mail: 925038897@qq.com.

件. 采用四面体非结构化网格划分方法, 得到风场的流体计算模型, 如图 2 所示.

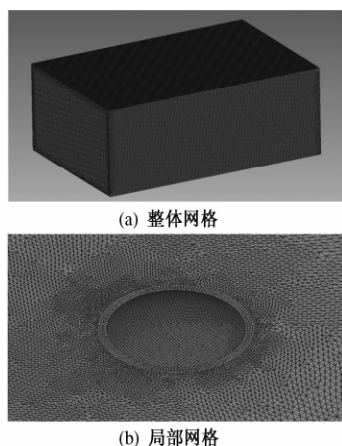


图 2 风场计算的网格模型

Fig. 2 Grid model of wind field computing

1.3 边界条件及求解设置

通过 ICEM 与 FLUENT 之间的接口, 将网格导入 FLUENT 进行计算. 采用速度-压力结算方式, 入口速度 67 m/s (相当于 18 级风速), 出口压力设置为表压力 0 Pa, 壁面按默认值设置.

采用绝对速度方程压力基求解器, 求解定常流动. Model 面板中, 在 Viscous Model 的 Model 中选 $k-\epsilon$ 两方程模型, $k-\epsilon$ Model 选择标准的. 在 Solution 的 Solution Methods 中, 定义动量方程、湍流脉动能和湍流耗散率均采用一阶迎风流离散格式, 其余采用默认设置, 计算模型选标准的 $k-\epsilon$ 模型, 其中

$$k = \frac{3}{2} (vI)^2; \quad (1)$$

$$\epsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l}, l = 0.07L. \quad (2)$$

式中: I 为湍流强度; L 为网壳直径; v 是入口的风速; C_μ 为无量纲经验常数, C_μ 取 0.09.

1.4 网壳结构风场的分析

网壳结构风场分析以其表面风压分布为主, 风场分析结果如图 3 所示. 查看结构表面的迎风面和背风面的风压分布, 之后以表面的风压作为载荷条件导入结构场, 实现流固耦合分析.

网壳中心截面风压数值的比值大小一般可判断风压是否准确. 设定风速的入口是正方向, 压力 P_0 位于过球心水平线和球截面的交点处, 压力 P_n 位于与水平线夹角为 α 的点处, 网壳中心截面示例图如图 4 所示. FLUENT 完成迭代, 其结果收敛后, 便能立刻显示中心截面关键点的风压数值. 网壳结构中心截面的风压分布曲线 ($v = 40$ m/s) 如

图 5 所示, 其横坐标是 α , 纵坐标是比值 P_n/P_0 .

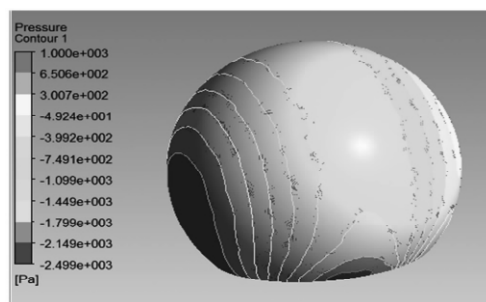


图 3 球面风压分布

Fig. 3 Wind pressure distribution on spherical surface

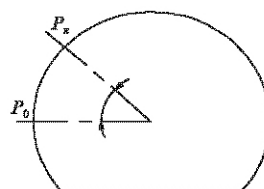


图 4 网壳中心截面示意图

Fig. 4 Diagram of the shell center cross-section

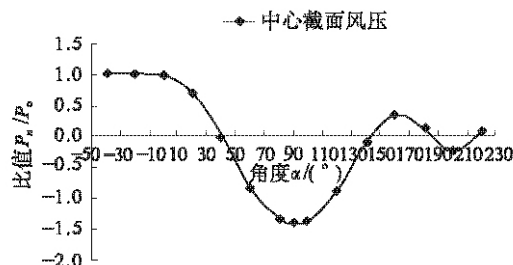


图 5 网壳中心截面风压分布

Fig. 5 Wind pressure distribution of shell center cross-section

1.5 风压分析结果的对比验证分析

为判定所采用风场模型的合理性, 笔者将分析的结果与文献 [7] 中给出的球形结构中心截面风场的数据进行对比. 假设当时的最大风级为 12 级, 速度为 32 m/s. 分析结果和其对比曲线对比如图 6 所示.

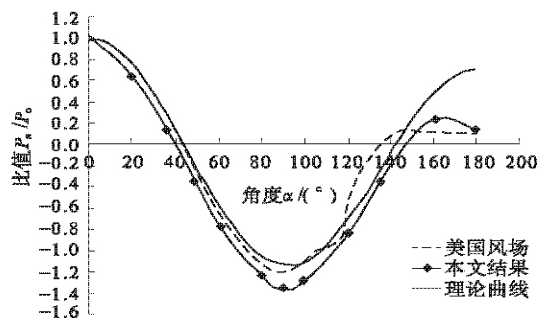


图 6 中心截面的风压曲线对比 2

Fig. 6 The wind pressure curve of center cross-section comparison of 2

对比曲线发现:网壳表面的风压分布情况和参考曲线的趋势相对一致.迎风面的分布情况基本无任何不同,背风面的分布规律却有稍微的偏差,分析其产生的原因主要有:(1)采用划分几何模型网格方法存在差异;(2)影响网壳结构风压分布的矢高不尽相同;(3)风场求解域的几何模型不同.综合上述分析,判定风场计算结果可靠,且精度也可符合后续分析要求.

2 网壳结构梁截面尺寸的优化设计

采用理想球面的风压模型建模方法,进行实际网壳结构风场分析,由于仅研究网壳结构的静态性能,故将风场数值模拟计算的结果传向 ANSYS Workbench 的 Static Structural 中,即进行单向流固耦合^[9],网壳三维模型导入 Static Structural 的 Geometry 后,再次重构模型中的所有线体和面体.重构结束后,在 Static Structural 分析的 Model 的 Static Structural(A5)下定义要满足的刚度和强度条件,不断迭代计算,实现对网壳结构梁截面尺寸的优化设计,以获得满足设计要求条件下的最小截面尺寸.

因为网壳结构的梁长度已经确定,要确定最小截面尺寸,故其优化设计的目标函数为梁的截面积,设计变量为梁的宽度和厚度.

设计变量为

$$\mathbf{x} = [B, H]^T, B \in (0.06, 0.08), H \in (0.01, 0.03);$$

$$\text{目标函数为 } f(\mathbf{x}) = B \cdot H. \quad (3)$$

约束条件为:杆件最大组合应力 $|\sigma_{\max}| \leq 200$ MPa;杆件最小组合应力 $|\sigma_{\min}| \leq 200$ MPa;杆件最大变形为 $D_{\max} \leq 16.25$ mm.

梁优化设计迭代后,通过多次比较,得到比较理想的梁截面尺寸.

3 网壳实物加载实验

网壳的结构设计往往要经实验以测试其性能,通常需要按照实际工况去做静载实验测试.笔者通过在已选好的节点做单点及三点水平加载实验,得到节点位移和杆件应变随载荷的变化曲线,进而评估整个网壳的受力情况,确认了其结构模型设计的合理性.

3.1 实验流程

网壳结构的静载实验加载程序依次按预加载实验、标准荷载实验、破坏实验的流程实施.

3.2 实验环境及仪器

实验地点为空旷的户外,微风且温度适宜的天气,可忽略环境因素对实验的干扰.实验时,在选取做实验的节点上拧好吊环,拉力经拧紧在液压缸上的钢丝绳进行加载,位移百分表量取节点变化位移.

3.3 实验步骤

(1)首先开始网壳预加载实验,以获取荷载与变形关系几乎不变时的初试荷载.

(2)然后进行网壳标准荷载实验,荷载值有次序地按照设定好的规律分步加载,持荷时间需使实验仪器的读数在一定时间稳定.加载至标准荷载时,延长持荷时间.

(3)最后进行破坏实验,荷载大于等于标准荷载且小于破坏荷载的 0.9 倍时,照标准荷载值的 0.1 倍逐步加载;当荷载值大于破坏实验值的 0.9 倍时,取标准荷载值的 5% 逐步加到破坏实验,此时持荷时间与标准荷载实验相同,加至破坏实验荷载时持荷时间变为 1~2 h,每隔 15 min 测取一次荷载和变形值,确保该时间段内变形值无较大变化.

(4)重复以上实验步骤多次.

3.4 单点和三点加载实验与仿真分析

单点加载所选节点的位移实验数据和仿真结果的曲线比较如图 7 所示.

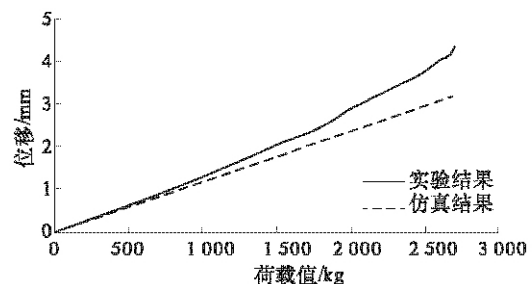


图7 单点加载位移随荷载值变化曲线

Fig.7 Single point displacement curve with load value

三点加载仿真分析时,只有拉力荷载的位置和大小不一样,其他设置均与单点加载设置的一样.三点加载所选节点的实验结果和仿真结果曲线相比较,结果如图 8 所示.

从上面两图可以发现,单点加载和三点加载的实验所得到的曲线均大体是线性变化,且其与仿真分析的输出数据误差在可以接受的范围内,证明了笔者创建的网壳模型比较正确与合适.

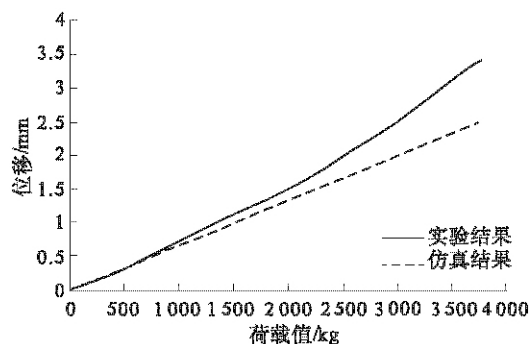


图8 三点测点的位移随荷载值变化曲线

Fig.8 Three point displacement curve with load value

4 结论

(1) 选用理想球面网壳风场分析的模型,经过对实际网壳模型的分析,获取了球面网壳表面的风压分布情况。

(2) 将仿真得到的网壳中心截面的风压分布曲线与已有的有关文献中的风压分布曲线经过比较,间接验证了所建风场模型的准确性及合理性。

(3) 采取单向流固耦合的方法,将流体计算结果耦合到梁膜混合模型的结构分析中,并得到梁截面优化设计尺寸,该分析过程是合理的。

(4) 通过所做的网壳实验,分析了节点位移的变化规律.将获得的实验结果与仿真结果相比较,验证了所建的结构分析模型的正确性。

参考文献:

- [1] 张文福,王秀丽.空间结构[M].北京:科学出版社,2005:5-30.
- [2] 董石麟,姚谏.网壳结构的未来与展望[J].空间结构,1994,(1):3-10.
- [3] 沈祖炎,陈扬骥.网壳与网壳[M].重庆:同济大学出版社,1997:169-197.
- [4] 王文龙.大气风场模型研究及应用[D].湖南:国防科技大学航天科学与工程学院,2009:30-50.
- [5] 吴扬.模拟试验风场建模及应用技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,2011:73-80.
- [6] 孙晓颖,武岳,林斌,等.大庆石油学院体育馆屋面风荷载的风洞试验及CFD数值模拟[J].沈阳建筑大学学报,2006,22(3):558-563.
- [7] ALAN F K, DONALD P. Design of metal space frame[M]. New York: Arcadia Publishing, 1965: 72-74.
- [8] 宋学官,蔡林,张华,等. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012:3-3.

Single-Layer Spherical Shell Structure Analysis and Experimental Study

MA Yong-tao, CHEN Tian-yue, LI Wei, YUAN Tao

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

Abstract: This paper studies the structural design of the single-layer spherical shell. with the wind loads of shell bearing for design load , using FLUENT software to get the shell surface wind pressure distribution . The calculated surface wind pressure is applied to the shell structural analysis model, with unidirectional fluid-solid coupling (FSI) technology. Through the nonlinear calculation of structural analysis, we the stress distribution and deformation of shell under the wind load conditions. With minimizing beam section size of shell as optimization goal, we obtained the size of beam section which satisfies the design requirements. Through field tests, we got the shell node displacement load curve, and compared the results of the experiment with simulation curves under the same conditions to verify the correctness of the shell structures model.

Key words: single-layer spherical shell; FLUENT; fluid solid coupling; dimension optimization; experimental analysis