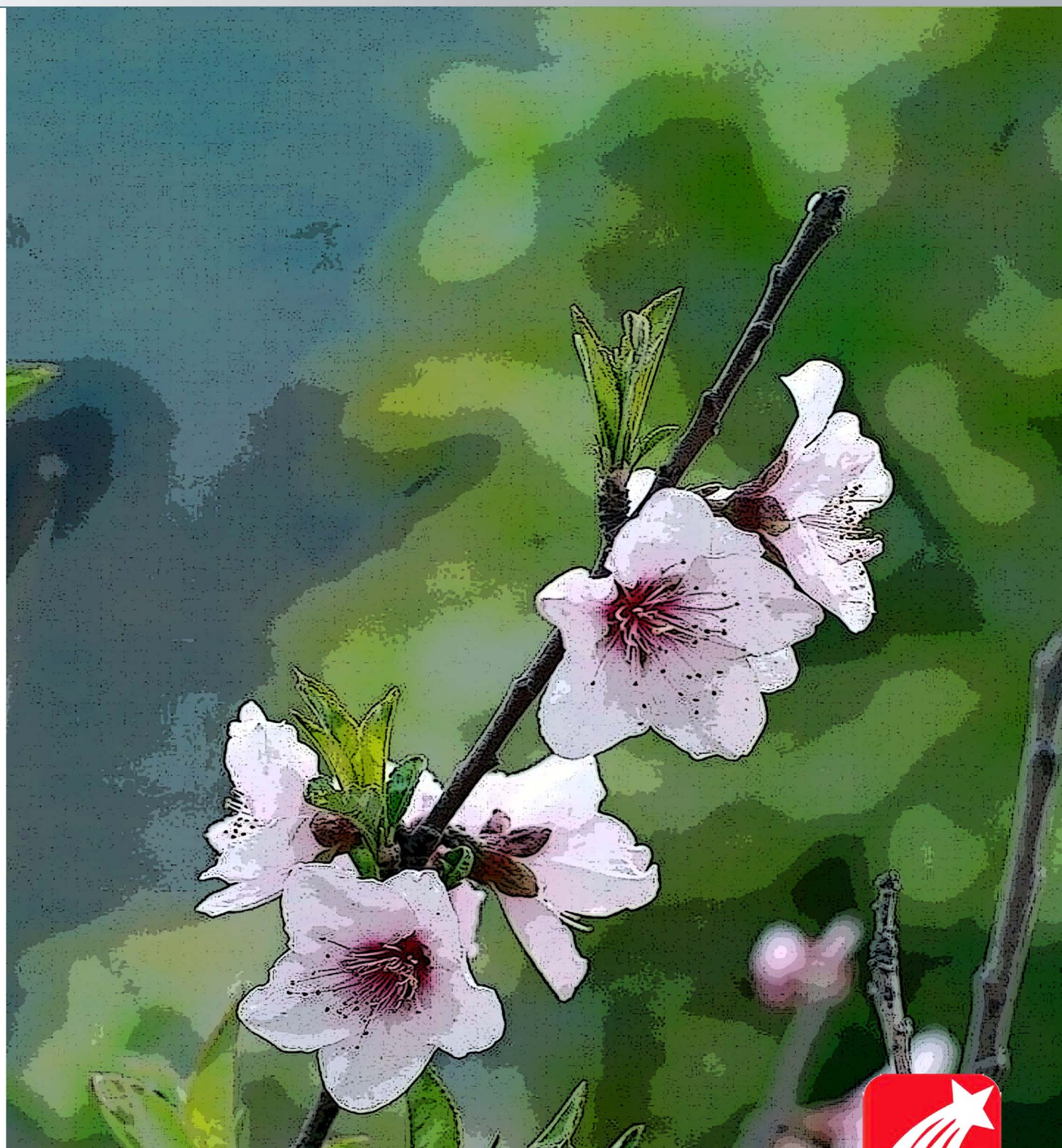


郑州大学学报(工学版)

2016年 第4期



目 次

电气工程

- 永磁直驱风力发电系统最大风能捕获滑模控制..... 刘艳红, 赵景隆(1)
振动对 TBM 液压泵泵轴受力及疲劳寿命影响分析 杨忠炯, 董 栋(6)
电气化铁路单三相组合式变压器电气特性分析..... 夏焰坤(11)
基于改进蚁群算法的专用输电工程电气设备优化选型..... 江岳文, 钱佳琦(15)
考虑土壤电离的接地装置冲击特性分析..... 李景丽, 郭丽莹, 武东亚, 王磊磊, 李渊博(20)

化工与材料工程

- 铁锡复合氧化物催化合成 ϵ -己内酯 章亚东, 马永丽, 马金玲, 赵岩岩, 贾金峰(26)
 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的实验研究 常 春, 孔鹏飞, 赵世强(31)
基于聚酰胺树枝状分子的 QCM 甲醛传感器研究 陈 杨, 李志鑫, 段智明, 徐甲强(36)
稳定性锆镁白云石合成材料的制备、结构和性能研究
..... 孟 维, 马成良, 葛铁柱, 赵 飞, 钟香崇(40)
利用废弃硒鼓墨粉制备 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 气敏材料 章雨勤, 程知萱, 张 源, 胡鹏飞, 徐甲强(44)
石墨烯-氧化钛复合氨敏感材料的制备与特性研究
..... 叶宗标, 郑伟健, 太惠玲, 谢光忠, 蒋亚东(49)
车载甲烷巡检仪的光路优化设计与系统实现..... 李志刚, 陈海永, 詹自力, 王书潜, 郑国锋(53)

土木与交通工程

- 南水北调中线工程潮河段征迁安置风险分析..... 李宗坤, 吴赛, 李定斌, 张西辰(57)
干湿循环条件下水泥改性膨胀土变形和强度试验
..... 王建磊, 王艳巧, 杨广栋, 张扬帆, 姜宏雨(62)
煤直接液化残渣改性沥青及其混合料性能评价 季 节, 王 迪, 石越峰, 徐世法, 索 智(67)
高速铁路斜拉桥与 T 型刚构协作体系车桥耦合振动分析
..... 罗 浩, 郭向荣, 唐俊峰, 岳 健, 刘 泽(72)
高性能灌浆料维修空心板桥铰缝的足尺试验研究..... 闫卫红, 付立军, 赵 军(77)

机械与信息工程

- 基于压电阻抗技术的铝梁损伤定位试验研究..... 李 成, 陈功轩, 铁 瑛, 牛冬冬(82)
电镀电源双环控制系统设计..... 刘 平, 徐 瀚, 臧甲杰, 陈睿科(86)
雾霾污染下基于混沌性的图像去雾算法改进..... 睢 丹, 张亚利, 杨 杰(91)

CONTENTS

【Electrical Engineering】

- Maximum Power Point Tracking of Permanent Magnet Direct Drive Wind Power System Based on Sliding Mode Controller **LIU Yanhong, ZHAO Jinglong** (1)
- The Influence of Vibration on the Force and Fatigue Life of Shaft of TBM Vane Pump **YANG Zhongjiong, DONG Dong** (6)
- Electrical Characteristics of Single-phase and Three-phase Combined Transformer Used in Electrified Railway **XIA Yankun** (11)
- The Optimum Selection of Electrical Equipment Types for Specialized Transmission Project Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm **JIANG Yuewen, QIAN Jiaqi** (15)
- Analysis of the Grounding Device's Impulse Characteristics Considering Transient Ionization Phenomenon of Soil **LI Jingli, GUO Liying, WU Dongya, WANG Leilei, LI Yuanbo** (20)

【Chemical Engineering and Material Engineering】

- Synthesis of ϵ -caprolactone with Fe-Sn Mixed Oxides as Catalysts **ZHANG Yadong, MA Yongli, MA Jinling, ZHAO Yanyan, JIA Jinfeng** (26)
- Study on Production of Ethyl Levulinate from Cellulose Catalyzed by Solid Acid $Al_2(SO_4)_3$ **CHANG Chun, KONG Pengfei, ZHAO Shiqiang** (31)
- Research on the QCM Formaldehyde Sensor Based on Polyamide Dendrimers **CHEN Yang, LI Zhixin, DUAN Zhiming, XU Jiaqiang** (36)
- Preparation and Investigation on the Microstructure and Properties of Stabilized Zirconia magnesia Doloma Refractory Materials **MENG Wei, MA Chengliang, GE Tiezhu, ZHAO Fei, ZHONG Xiangchong** (40)
- Use of Waste Toner Cartridges for Preparing γ - Fe_2O_3 Sensitive Material **ZHANG Yuqin, CHENG Zhixuan, ZHANG Yuan, HU Pengfei, XU Jiaqiang** (44)
- The Fabrication and Investigation of rGO-TiO₂ Based Materials for Ammonia Detection **YE Zongbiao, ZHENG Weijian, TAI Huiling, XIE Guangzhong, JIANG Yadong** (49)
- Optical Path Optimization Design and System Implementation of the Vehicle-mounted Methane Inspection Instrument **LI Zhigang, CHEN Haiyong¹, ZHAN Zili, WANG Shuqian, ZHENG Guofeng** (53)

【Civil Engineering and Transportation Engineering】

- Risk Analysis of Land Requisition and Resettlement in Tidal River Section of the South to North Water Diversion Middle Route Project **LI Zongkun, WU Sai, LI Dingbin, ZHANG Xichen** (57)
- Experimental Research Deformation and Shear Strength on Cement-treated Expansive Soil During Wetting-drying Cycles **WANG Jianlei, WANG Yianqiao, YANG Gangdong, ZHANG Yangfan, JIANG Hongyu** (62)
- Study on the Performances of the DCLR Modified Asphalt Mixtures **JI Jie, WANG Di, SHI Yuefeng, XU Shifa, SUO Zhi** (67)
- Coupling Vehicle-Bridge Vibration Analysis of Collaborated System with Cable-Stayed Bridge and T-shape Rigid Structure on High Speed Railway **LUO Hao, GUO Xiangrong, TANG Junfeng, YUE Jian, LIU Ze** (72)
- Full-scale Experimental Study on Hinge Joint Repair of Hollow Slab Bridge with High-performance Grouting Material **YAN Weihong, FU Lijun, ZHAO Jun** (77)

【Mechanical Engineering and Information Engineering】

- Experimental Research of Damage Localization in Aluminum Beam Based on EMI Technique **LI Cheng, CHEN Gongxuan, TIE Ying, NIU Dongdong** (82)
- The Design of Double Loop Control System for Electroplating Power Supply **LIU Ping, XU Han, ZANG Jiajie, CHEN Ruike** (86)
- Image Remove the Fogfog Algorithm Based on Improvement Chaotic under Haze Pollution **SUI Dan, ZHANG Yali, Yang Jie** (91)

永磁直驱风力发电系统最大风能捕获滑模控制

刘艳红, 赵景隆

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对永磁直驱风力发电系统实现最大风能捕获的问题, 提出一种高阶非奇异终端滑模控制策略. 根据永磁直驱风力发电系统的非线性模型, 基于最佳转矩跟踪的最大功率点跟踪(maximum power point tracking)方法, 将高阶非奇异终端滑模控制应用于永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator)设计转矩控制器和电流控制器, 实现永磁直驱风力发电系统的无风速传感器最大功率点的快速跟踪和稳定控制. 仿真结果验证了所提出的控制方案的有效性.

关键词: 风力发电系统; 永磁同步发电机; 最大风能追踪; 高阶非奇异终端滑模控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.001

0 引言

风电是发展最快的可再生清洁能源. 永磁直驱风力发电系统具有结构简单、故障率低、发电效率及运行可靠性高等优点^[1-2], 是目前变速恒频风力发电的主流系统. 采取有效的控制策略, 使得风力发电系统在较大风速变化范围内实现最大风能追踪, 是风力发电系统研究中的重要内容^[1-6].

风力发电系统具有典型的非线性和参数摄动特性. 为了提高系统的鲁棒性, 多种鲁棒非线性控制方法, 包括模糊逻辑控制^[4]、变增益控制^[5]、积分反演^[6]、反馈线性化^[7]和神经网络控制^[8]等被应用到风力发电系统控制研究中, 但这些方法所设计的控制器结构较为复杂.

滑模控制具有对参数摄动、外部扰动鲁棒性强、响应速度迅速等优点^[9], 且控制器结构简单, 尤其适用于风力发电系统. 目前已有一些文献报道滑模控制在风力发电系统中的应用研究^[10-11], 但以往的研究侧重于滑模流形和控制律的设计, 主要采用一阶滑模, 容易产生高频抖振. 笔者从抑制传统滑模抖振和提高响应速度、控制精度的角度出发, 将高阶非奇异终端滑模控制^[12-13]应用于系统设计转矩外环控制器和电流内环控制器以实现最大风能跟踪. 具体来说, 首先是基于最佳转矩跟踪的最大功率点跟踪方法, 设计非奇异终端滑

模面和高阶滑模控制律, 确定实现最佳转矩跟踪所需要的交轴和直轴参考电流; 然后, 设计高阶终端滑模电流控制器, 在机侧脉冲宽度调制(pulse width modulation)变流器的作用下, 实现参考电流的跟踪, 从而实现在风速变化条件下, 永磁直驱风力发电系统无风速传感器的最大功率点的快速跟踪和稳定控制.

1 永磁同步风力发电系统动态模型

1.1 风力机特性分析

根据贝兹证明, 风力机捕获的功率为

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p(\lambda, \beta) v^3. \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; r 为风力机叶轮半径; v 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, β 为桨距角, λ 为叶尖速比, 满足

$$\lambda = \frac{\omega_r r}{v}. \quad (2)$$

式中: ω_r 为风力机机械角速度.

风力机从风能中获得的气动转矩为

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_r} = \frac{\rho \pi r^3 C_p(\lambda, \beta) v^2}{2\lambda}. \quad (3)$$

风力机气动转矩与风能利用系数直接相关, 后者是桨距角和叶尖速比的非线性函数, 由风机叶轮流型的设计和风力机运行状况决定. 为了充

收稿日期: 2015-12-05; 修订日期: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473265); 教育部博士学科点专项科研基金项目(13A520379)

作者简介: 刘艳红(1970—), 女, 河南孟州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事复杂非线性系统分析与控制、电力系统控制等研究, E-mail: liuyh@zzu.edu.cn.

分利用风能,需使桨距角保持恒定值,此时风能利用系数可以近似地表示为^[5]

$$\begin{cases} C_p(\lambda) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 5 \right) \exp(-21/\lambda_1) + 0.0068\lambda; \\ \frac{1}{\lambda_1} = \left(\frac{1}{\lambda} - 0.035 \right). \end{cases} \quad (4)$$

1.2 永磁同步电机动态模型

在同步旋转(d, q)参考坐标系下,永磁同步电机的电压方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L}u_d; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \omega_e i_d - \frac{\psi_m}{L}\omega_e + \frac{1}{L}u_q. \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_d, i_q, u_d, u_q 分别为定子电流、电压的 d 轴和 q 轴分量; R 为定子相电阻; $L = L_d = L_q, L_d, L_q$ 分别为定子等效 d 轴和 q 轴电感; ψ_m 是永磁体的磁链; ω_e 是发电机转子电角速度。

永磁同步风力发电系统的机械运动方程为

$$\begin{cases} J\dot{\omega}_r + k\omega_r = T_\alpha - T_e; \\ \dot{\theta}_r = \omega_r. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\dot{\theta}_r$ 为机械位置角; J 为机械惯量; k 为阻尼系数; T_e 为电磁转矩。

永磁同步电机通常采用转子磁场定向 $i_d \approx 0$ 矢量控制,同时忽略磁阻转矩,则电磁转矩可以表示为

$$T_e(t) = k_t i_q(t). \quad (7)$$

式中: k_t 为转矩常数。

2 最大风能追踪终端滑模控制

控制目标是设计高阶非奇异终端滑模控制策略在风速变化条件下,实现永磁同步风力发电系统的最大风能追踪。在风力发电系统最大功率点跟踪方法中,最佳转矩控制由于其响应快速及高效率等优点被广泛应用在风力发电系统中^[3]。本节在最佳转矩控制的MPPT方法的基础上,设计高阶非奇异终端滑模控制策略,实现风力机气动转矩对最佳转矩的快速精确跟踪,并且和普通滑模控制相比,高阶滑模有效抑制了控制量的抖振,从而使系统更加稳定地运行在最佳叶尖速比处,保持最大风能利用系数,最大效率地利用风能。

2.1 最佳转矩滑模控制

当风力机工作在最佳叶尖速比 λ_{opt} 处时,获得最大风能利用系数 C_{pmax} ,风力发电系统运行在

最佳气动力矩 T_{opt} 处,由式(2)和(3)有

$$T_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi r^5 C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \omega_r^2 = k_{opt} \omega_r^2. \quad (8)$$

定义变量:

$$\eta_\alpha(t) = \int_0^t T_\alpha(\tau) d\tau, \quad (9)$$

$$\eta_{opt}(t) = \int_0^t T_{opt}(\tau) d\tau = \int_0^t k_{opt} \omega_r^2(\tau) d\tau. \quad (10)$$

其误差为

$$e_T = \eta_{opt} - \eta_\alpha. \quad (11)$$

定理 1 定义转矩非奇异终端滑模面如下:

$$s_T = e_T + \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0}. \quad (12)$$

式中: $1 < p_0/q_0 < 2, p_0$ 和 q_0 为正奇数。非奇异终端滑模面 s_T 用于实现二阶滑模控制,并抑制抖振。

选取滑模面(12),设计如下控制律:

$$i_q^* = i_q^{eq} + i_q^n. \quad (13)$$

$$\begin{cases} i_q^{eq} = \frac{1}{k_t} (k_{opt} \omega_r^2 - k\omega_r - J\dot{\omega}_r); \\ i_q^n = \frac{1}{k_t} \int_0^t \left[\frac{q_0}{p_0} \gamma_0^{-1} \dot{e}_T^{2-p_0/q_0} + \eta_0 \operatorname{sgn}(s_T) \right] dt. \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\eta_0 > 0$,则在控制律作用下, e_T 和 \dot{e}_T 将在有限时间收敛到零。

证明 选取 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{1}{2}s_T^2$ 。则 V_1

沿闭环系统轨线的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_T \dot{s}_T = s_T \left(\dot{e}_T + \frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} \ddot{e}_T \right) = \\ &= s_T \left[\frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} (\ddot{e}_T + \frac{q_0}{p_0} \gamma_0^{-1} \dot{e}_T^{2-p_0/q_0}) \right]. \end{aligned}$$

结合风力发电系统的机械运动方程(6)和在 $i_d \approx 0$ 矢量控制下电磁转矩满足式(7),可知误差动态满足

$$\dot{e}_T = T_{opt} - T_\alpha = k_{opt} \omega_r^2 - J\dot{\omega}_r - k\omega_r - k_t i_q.$$

在控制律(13)的作用下

$$\dot{e}_T = -k_t i_q^n,$$

从而

$$\dot{V}_1 = s_T \frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} \left[-k_t i_q^n + \frac{q_0}{p_0} \gamma_0^{-1} \dot{e}_T^{2-p_0/q_0} \right] =$$

$$s_T \frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} [-\eta_0 \operatorname{sgn}(s_T)] < 0.$$

由于 $1 < p_0/q_0 < 2$,即 $0 < \frac{p_0}{q_0} - 1 < 1$,又 $\gamma_0 > 0, p_0$

和 q_0 为正奇数,则 $\dot{e}_T^{p_0/q_0-1} > 0$ ($\dot{e}_T \neq 0$)。控制器满足 Lyapunov 稳定性条件,故系统状态在有限时间

内到达非奇异终端滑模流形 $s_T = 0$, 在滑模运动中, $e_T(t) = \dot{e}_T(t) = 0$, 实现气动转矩对最佳转矩的跟踪, 进而实现最大风能追踪。

2.2 参考电流跟踪滑模控制

由上节可知, 为实现最佳转矩追踪, 设计了最佳转矩终端滑模控制器, 并由控制器确定了跟踪最佳转矩所需的参考电流 i_q^* , 故需要控制器使得 q 轴电流 i_q 跟踪参考电流 i_q^* , 同时永磁同步电机采用 $i_d \approx 0$ 矢量控制, 故 d 轴参考电流 i_d^* 为 0。本小节采用高阶非奇异终端滑模控制方法设计电流控制器, 保证 q 轴和 d 轴电流在有限时间内收敛到期望参考值。

定义 d 轴和 q 轴电流误差:

$$\begin{cases} e_{i_q} = i_q^* - i_q; \\ e_{i_d} = i_d^* - i_d = -i_d. \end{cases} \quad (15)$$

定理 2 定义 q 轴和 d 轴电流控制非奇异终端滑模面:

$$\begin{cases} s_{i_q} = e_{i_q} + \gamma_1 \dot{e}_{i_q}^{p_1/q_1}; \\ s_{i_d} = e_{i_d} + \gamma_2 \dot{e}_{i_d}^{p_2/q_2}. \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\gamma_1 > 0$; $\gamma_2 > 0$; $1 < p_1/q_1 < 2$; $1 < p_2/q_2 < 2$, p_1, q_1, p_2, q_2 均为正奇数。非奇异终端滑模用于实现二阶滑模控制, 并且抑制抖振。

设计滑模控制律如下:

$$u_q = u_q^{\text{eq}} + u_q^n. \quad (17)$$

$$\begin{cases} u_q^{\text{eq}} = L \left(\dot{i}_q^* + \frac{R}{L} i_q + \omega_e i_d + \frac{\psi_m}{L} \omega_e \right); \\ u_q^n = L \int_0^t \left[\frac{q_1}{p_1} \gamma_1^{-1} \dot{e}_{i_q}^{2-p_1/q_1} + \eta_1 \text{sgn}(s_{i_q}) \right]. \end{cases} \quad (18)$$

$$u_d = u_d^{\text{eq}} + u_d^n. \quad (19)$$

$$\begin{cases} u_d^{\text{eq}} = L \left(\frac{R}{L} i_d - \omega_e i_q \right); \\ u_d^n = L \int_0^t \left[\frac{q_2}{p_2} \gamma_2^{-1} \dot{e}_{i_d}^{2-p_2/q_2} + \eta_2 \text{sgn}(s_{i_d}) \right]. \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\eta_1 > 0, \eta_2 > 0$ 。在控制律作用下, 系统状态在有限时间内到达滑模流形 $s_{i_q} = 0$ 和 $s_{i_d} = 0$, 即 $e_{i_q}, \dot{e}_{i_q}, e_{i_d}, \dot{e}_{i_d}$ 在有限时间内收敛到零。电流控制环的稳定性证明与最佳转矩滑模跟踪控制类似, 故略去。

综合上述讨论, 在高阶非奇异终端滑模电流控制律 (17)、(19) 作用下, 永磁同步发电机 q 轴和 d 轴电流可以快速有效地跟踪参考电流, 进而在最佳转矩滑模控制律 (13) 作用下实现对最佳转矩的跟踪, 使永磁直驱风力发电系统稳定运行在最佳叶尖速比处, 实现最大风能追踪。在具体实

现过程中采用双环路控制策略实现风力机气动转矩对最佳转矩的跟踪, 其中外环为转速反馈环, 内环为电流反馈环。此外, 由于采用最佳转矩控制的最大功率点跟踪方法, 省去了风速传感器, 因而降低了成本, 提高了系统的可靠性。笔者所设计的终端滑模最大风能追踪控制策略结构如图 1 所示。

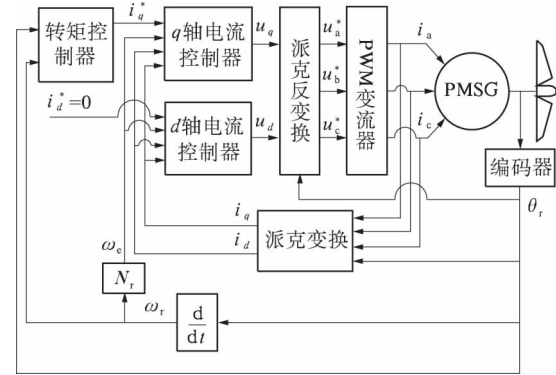


图1 整个系统控制结构图

Fig.1 Configuration of the control system

3 仿真分析

为了验证所设计的永磁同步风力发电系统高阶终端滑模最大风能追踪控制策略的有效性, 基于 MATLAB/Simulink 对系统进行仿真研究。仿真过程中采用 IEC 标准冯卡门频谱模型进行风速模拟, 平均风速为 8 m/s, 湍流强度 $I = 0.15$, 风速变化曲线如图 2 所示。按照文献 [17] 选定叶轮参数, 风力机半径为 3 m, 最佳叶尖速比为 8.1, 最大风能利用系数为 4.8。永磁同步发电机额定功率为 16 kW, 转动惯量为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦系数为 $0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, 转子磁链为 0.272 WB, 极对数为 2, 定子电阻为 3Ω , d 轴和 q 轴电感为 27 mH。仿真采用的高阶非奇异终端滑模控制器参数分别为 $p_0/q_0 = p_1/q_1 = p_2/q_2 = 5/3$, $\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_2 = 20$, $\eta_0 = \eta_1 = 30$, $\eta_2 = 0.05$ 。仿真结果如图 3 ~ 5 所示。

图 3 为系统分别在非奇异终端滑模控制器与传统滑模控制器作用下实际转矩对最优转矩的跟踪曲线。传统滑模控制器的转矩跟踪误差较大, 平均误差为 $14.988 \text{ N} \cdot \text{m}$, 最大误差为 $30.642 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。而高阶终端滑模控制器在整个风速范围内都具有较高的跟踪精度, 转矩跟踪平均误差为 $1.397 \text{ N} \cdot \text{m}$, 相比较可以看出, 高阶终端滑模控制器实际转矩对最优转矩的跟踪响应更快, 有效地提高了转矩的跟踪精度, 且跟踪曲线更加平滑稳定。这是因为一方面非奇异高阶滑模的响应速度优于传统滑模; 另一方面高阶滑模削弱了传统滑模存在的抖振。

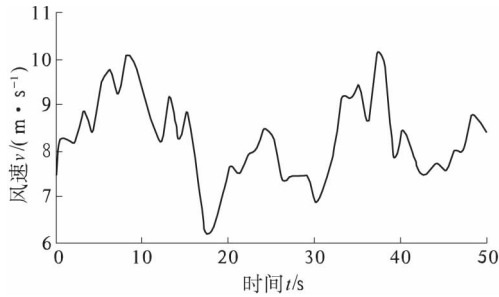


图2 冯卡门频谱模型风速模拟曲线

Fig.2 Wind speed simulation using Von Karman spectrum model

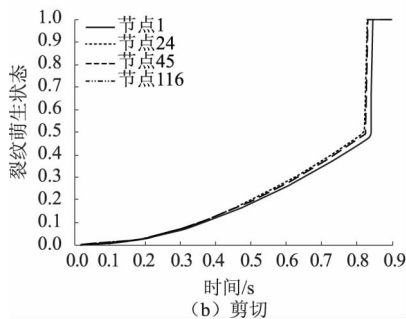
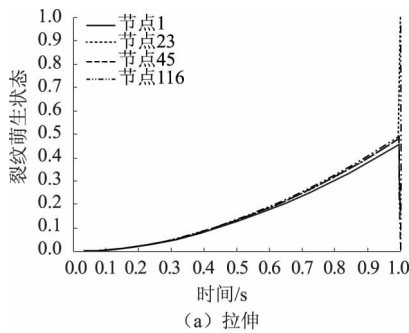


图3 风力机转矩跟踪曲线

Fig.3 Response of the aerodynamic torque

图4与图5分别为风能利用系数曲线和叶尖速比变化曲线。从图中可以看出,在非奇异终端滑模控制器作用下,跟踪响应更加迅速,控制精度更高,稳定性更好,抗干扰能力更强,可以更大效率地利用风能。

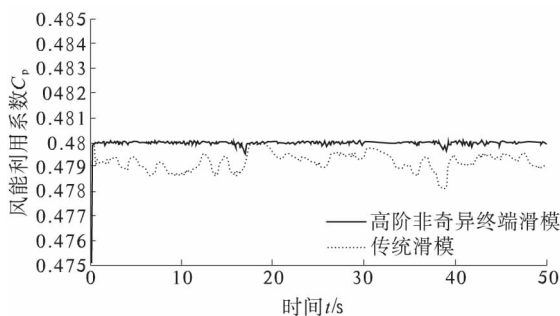


图4 风能利用系数变化曲线

Fig.4 Response of the wind energy utilization coefficient

由仿真结果可知,在模拟自然风情况下,笔者

所设计的终端滑模最大风能追踪控制器能够保证风力机实际转矩快速跟踪风能变化,风能利用系数和叶尖速比均可以快速收敛并且稳定在最优值,从而实现在变风速条件下快速跟踪到最大功率点,使系统稳定在最大功率点附近,验证了笔者所提出的最大风能追踪策略的有效性和正确性。

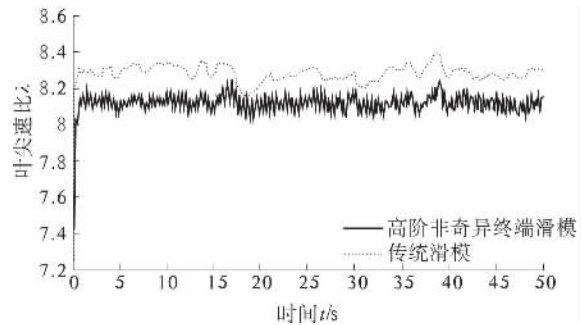


图5 叶尖速比变化曲线

Fig.5 Response of the tip speed ratio

4 结论

笔者提出了一种改进的永磁直驱风力发电系统最大风能追踪双环路终端滑模控制策略,在转速反馈环设计高阶非奇异终端滑模转矩控制器,实现对最佳转矩的跟踪;在电流反馈环通过设计高阶非奇异终端滑模电流控制器,实现对参考电流的跟踪。通过采用最佳转矩控制的MPPT方法,省去了风速传感器,避免了传统风力发电系统最大风能追踪控制策略对风速传感器精度的敏感性。仿真结果表明:笔者所提出的高阶终端滑模控制策略对最佳转矩变化曲线的跟踪具有快速收敛性及具有更高的跟踪精度,使风力发电系统稳定运行在最佳叶尖速比处,实现对最大风能的快速跟踪,该滑模控制策略具有响应速度快、鲁棒性强等特点,且能够有效地克服传统滑模控制中的抖动问题。

参考文献:

- [1] 赵仁德,王永军,张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-111.
- [2] BELTRAN B, BENBOUZID M E, AHMED A T. Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2012, 27(2): 261-269.
- [3] ABDULLAH M A, YATIM A H M, TAN C W, et al. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems[J]. Renewable and sustain-

- able energy reviews, 2012, 16(5): 3220–3227.
- [4] AISSAOUI A G, TAHOUR A. A Fuzzy PI control to extract an optimal power from wind turbine [J]. Energy conversion and management, 2013, 65: 688–696.
- [5] BIANCHI F D, BATTISTA H N D, MANTZ R J. Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [6] PAHLEVANINEZHAD M, EREN S, BAKHSHAI A, et al. Maximum power point tracking of a wind energy conversion system using adaptive nonlinear approach [C] // Proceedings of the 25th annual IEEE applied power electronics conference and exposition. United States: Palm Springs, CA, 2010: 149–154.
- [7] BOUKHEZZAR B, SIGUERDIDJANE H. Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization [J]. Energy conversion and management, 2009, 50(4): 885–892.
- [8] SOARES O, GONCALVES H, MARTINS A, et al. Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems [J]. Renew energy, 2010, 35(8): 1662–1670.
- [9] 王瑗琿, 张强, 王东云, 等. 基于滑模变结构的IPMC跟踪控制系统[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 104–107.
- [10] 郑雪梅, 李琳, 徐殿国. 双馈风力发电系统最大风能追踪滑模变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 923–926.
- [11] 张志刚, 张桂香. 永磁同步风力发电系统滑模变结构矢量组合控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7): 1986–1991.
- [12] YU X H, MAN Z H. Model reference adaptive control systems with terminal sliding modes [J]. International journal of control, 1996, 64(6): 1165–1176.
- [13] FENG Y, ZHENG J F, YU X H, et al. Hybrid terminal sliding-mode observer design method for a permanent-magnet synchronous motor control system [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009, 56(9): 3424–3431.

Maximum Power Point Tracking of Permanent Magnet Direct Drive Wind Power System Based on Sliding Mode Controller

LIU Yanhong, ZHAO Jinglong

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

Abstract: To achieve maximum power point tracking (MPPT) of the permanent magnet direct drive wind power system, this paper proposes a high-order nonsingular terminal sliding-mode control strategy based on the optimal torque control algorithm. According to the nonlinear model of the permanent magnet direct drive wind power system, based on the optimum torque maximum power point tracking method, the high-order nonsingular terminal sliding-mode control is employed to design the torque controller and current controller of permanent magnet synchronous generator (PMSG). It realizes MPPT and stability control of the permanent magnet direct drive wind power system, and it does not need to measure wind speed. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: wind energy conversion system; permanent magnet synchronous generator; maximum power point tracking; high-order nonsingular terminal sliding-mode controller

振动对 TBM 液压泵泵轴受力及疲劳寿命影响分析

杨忠炯^{1,2}, 董 栋²

(1. 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 针对硬岩掘进机(tunnel boring machine, TBM)强振动工况, 分析引起泵轴疲劳失效的两种机理: 载荷与材料性能变化. 建立了泵轴在强振动下的受力仿真模型, 仿真得到泵轴稳态受力幅值随频率及振幅均呈线性增加. 根据经验数据, 获得不同工况下的 S-N 曲线修正模型. 建立泵轴的有限元模型, 加载不同工况的载荷与材料参数, 得到振动参数影响泵轴疲劳寿命的规律. 结果表明: 当振幅小于 3 mm, 频率小于 20 Hz 时, 泵轴总能满足对寿命要求; 当振幅大于 4.8 mm 时, 不能满足其寿命要求; 当频率为 10 Hz 时, 能满足泵轴疲劳寿命的最大振幅为 4.3 mm.

关键词: 硬岩掘进机; 振动; 叶片泵泵轴; 疲劳寿命

中图分类号: TH312 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.002

0 引言

硬岩掘进机(tunnel boring machine, TBM)是用于开挖硬岩地质隧道的大型施工设备, 工作在大功率、强振动的环境下. MB264-311 型 TBM 的撑靴液压系统有 3 台不同的液压泵, 其中包括一台双作用叶片泵, 其工作转速 1 000 r/min, 排量 40 mL/r, 额定工作压力 6.3 MPa, 工程要求其工作寿命在 8 000 ~ 10 000 h. 该叶片泵作为快速收缩及快速伸出回路的辅助泵源, 在工作过程中常发生泵轴断裂问题, 不能满足工程要求^[1-2]. 文献[3-4]分析了交变载荷下结构的静应力疲劳失效. 文献[4]提出了轴承的振动模型. 文献[5-6]分析了振动频率对结构疲劳寿命的影响.

目前, 对振动环境下泵轴的疲劳寿命的研究很少, 因此本研究运用 ANSYS/APDL 参数化建模, 研究了振动环境对泵轴疲劳寿命影响.

1 泵轴疲劳寿命分析原理

图 1 所示为某型叶片泵的装配结构图, 泵轴左端与中部由两个不同型号的轴承支承, 轴的左端第二段通过花键与叶片转子连接, 泵右端通过联轴器与驱动电机相连.

TBM 振动频率在 5 ~ 20 Hz, 振幅在 0 ~ 6 mm. 根据 TBM 某项目实测驱动电机轴附近的振动时域波形可知, 振动频率为 10.24 Hz, 振动加速度为 3.53 m/s².

1.1 振动引起载荷变化

根据泵的装配关系, 将轴承简化为一个弹簧-质量模型, 分析泵轴在径向基础振动下的受力情况, 则该系统为两自由度基础振动模型, 原轴受力模型如图 2 所示.

根据牛顿第二定律, 建立泵轴的受力数学模型如下, 垂直方向受力平衡:

$$\begin{aligned} m(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2 + L_1\theta) + \\ k_2(x_1 - x_2 - L_2\theta) = mg. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: m 为泵轴质量; x_1 为泵轴位移; x_2 为基础振动位移, $x_2 = A \sin \omega t$; k_1 为左端轴承径向刚度; k_2 为右端轴承径向刚度; θ 为泵轴绕质心转动角度; L_1 为质心距泵轴左轴承距离; L_2 为泵轴距泵轴右轴承距离. 而力矩平衡方程为

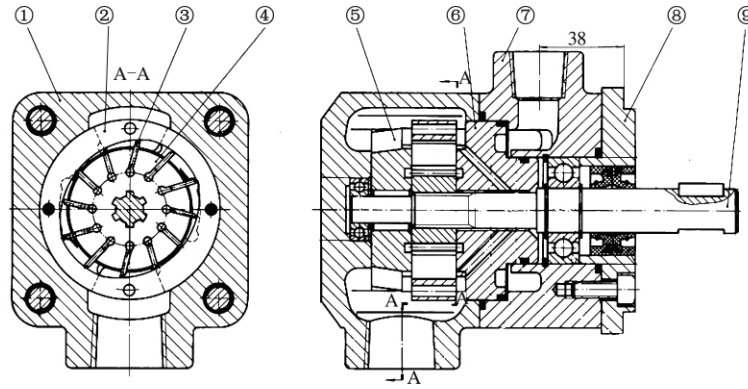
$$\begin{aligned} J_c \ddot{\theta} + k_1(x_1 - x_2 + L_1\theta)L_1 - \\ k_2(x_1 - x_2 - L_2\theta)L_2 = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: J_c 为泵轴质心转动惯量.

收稿日期: 2015-09-08; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035404)

作者简介: 杨忠炯(1963—), 男, 湖南长沙人, 中南大学教授, 博士, 主要从事流体动力学研究, E-mail: yzj7072@126.com.



1—左泵体;2—定子;3—叶片;4—转子;5—左配流盘;6—右配流盘;7—右泵体;8—盖板;9—泵轴。

图1 叶片泵装配图

Fig.1 Assembly drawing of vane pump

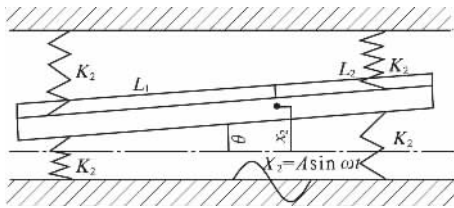


图2 泵轴受力模型

Fig.2 Force model of pump shaft

轴承刚度方程为

$$K = \omega_R^2 \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}. \quad (3)$$

式中: m_1 为轴承座及部分轴承零件的质量和; m_2 为短轴与另一部分轴承零件的质量和; ω_R 为共振

频率; K 为轴承的径向刚度。

根据以上公式,运用 Matlab/Simulink 建立泵轴的受力仿真模型,如图3所示.对振动信号输入采用微分环节,对泵轴位移输出计算采用积分环节,仿真计算结构参数为左轴承径向刚度为 $2.235 \times 10^6 \text{ kg/cm}$,右轴承径向刚度为 $2.125 \times 10^6 \text{ kg/cm}$,质心转动惯量为 47.9 g/mm^2 ,质心到左轴承距离为 98.71 mm ,质心到右轴承距离为 95.29 mm ,泵轴质量为 3.75 kg .模型以固定步长 ode3 (bogacki-shampine) 求解器求解,仿真步长设定为 0.001 s .仿真振动频率为 $1, 10, 20 \text{ Hz}$ 时不同振幅下的泵轴受力情况。

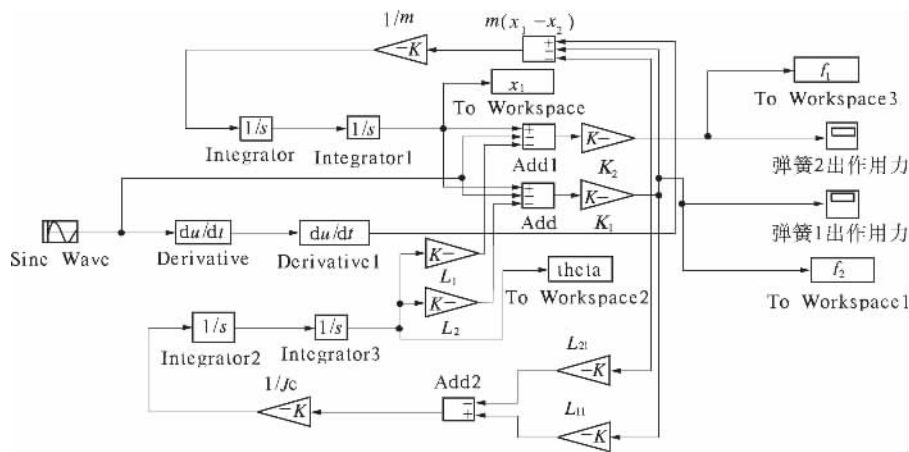


图3 振动下泵轴受力仿真模型

Fig.3 Simulation of force on shaft under vibration

如图4~6所示,泵轴的受力在达到稳定后呈现正弦波动. 1 Hz 时稳态受力的幅值接近零, 10 Hz 时受力幅值达到 223.5 N ; 20 Hz 受力幅值达到 912.5 N . 比较不同频率图中受力幅值发现,随频率增加,泵轴受力幅值有显著增加. 分析受力幅

值随频率增加的变化趋势,发现其相关系数趋近于1,即受力随频率线性增加. 10 Hz 时,振动幅值为 $1, 2, 3, 4, 5 \text{ mm}$ 时所对应的泵轴受力幅值分别为 $44.7, 89.4, 134.1, 178.8, 223.5 \text{ N}$. 分析表明,泵轴受力峰值随振幅同样是线性增加。

1.2 振动引起材料性能变化

根据前人研究,振动对材料性能的影响主要由振动频率引起.文献[5]指出,加载频率对金属材料的疲劳寿命曲线有很大影响.文献[6]通过试验获得 10 Hz 下用 Basquin 方程式描述 S-N 的参数值.方程式为

$$\sigma_a = \sigma_f (N_f)^b. \quad (4)$$

式中: σ_a 为疲劳应力幅; σ_f 为疲劳强度系数,试验值为 1 936; N_f 为疲劳断裂循环数; b 为疲劳强度指数,试验值为 -0.058 5.

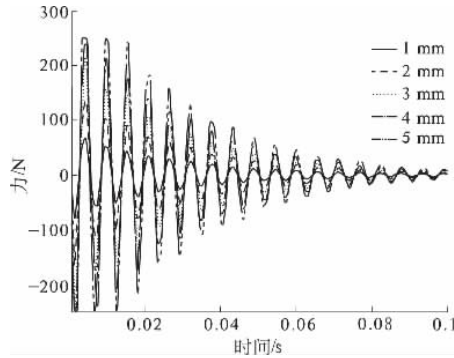


图 4 1 Hz 时不同振幅下的泵轴受力图
Fig. 4 Force on shaft under different amplitude by 1 Hz

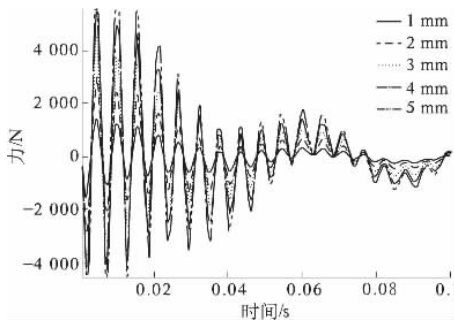


图 5 10 Hz 时不同振幅下泵轴的受力图
Fig. 5 Force on shaft under different amplitude by 10 Hz

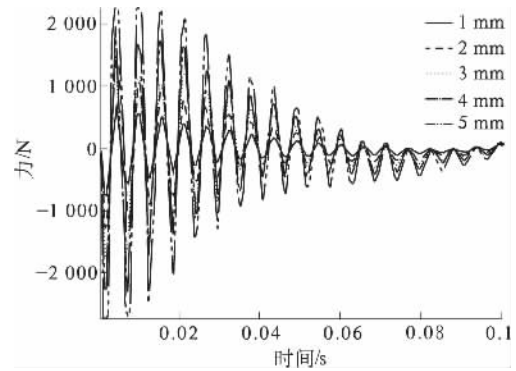


图 6 20 Hz 时不同振幅下的泵轴受力图
Fig. 6 Force on shaft under different amplitude by 20 Hz

2 泵轴模型建立及疲劳分析

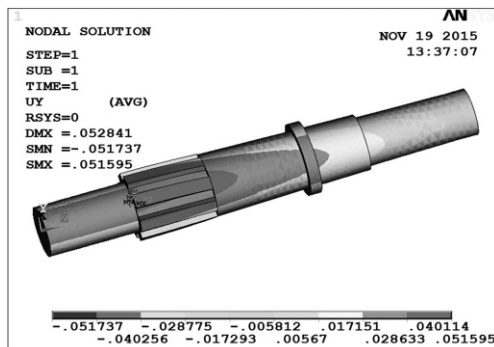
2.1 泵轴有限元建模

根据泵轴的结构参数,运用 ANSYS/APDL 语言参数化建立有限元模型.材料杨氏模量为 2.11×10^{11} Pa,泊松比为 0.277,质量密度为 7.87 g/cm^3 .许用应力 $[\sigma] = 171.57 \text{ MPa}$.由于模型受扭转剪力,选择单元类型为 Solid185,自由划分为 22 996 个节点,118 261 个单元.图 7 为 Y 方向位移与总位移图,图 8 为等效应力图及危险部位图.根据泵轴的安装及受力情况,加载固定约束于轴端,分别在两轴承处加载振动下泵轴受力,由于 ANSYS/Fatigue 模块的局限性,加载受力按受力幅值静态加载,且加载扭矩在花键部位.再由等效应力从图 8(b) 可以看出,最大等效应力即泵轴的危险部位是花键根部.

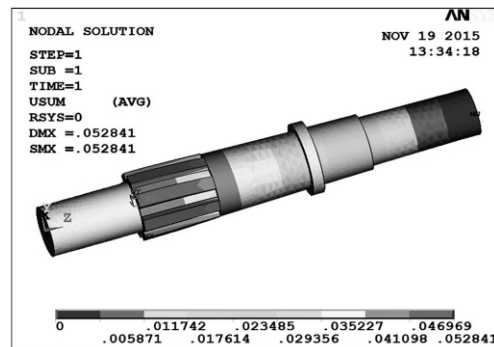
2.2 泵轴疲劳计算分析

(1) 疲劳参数.根据泵轴的结构参数,选择钢材的敏性系数 q 为 0.5,结构的理论应力集中系数 α 为 1.32,根据理论应力集中系数与有效应力集中系数的关系式^[7]:

$$k - 1 = q(\alpha - 1). \quad (5)$$



(a) Y 方向位移图



(b) 总位移图

图 7 Y 方向位移与总位移图
Fig. 7 Y direction and total displacement

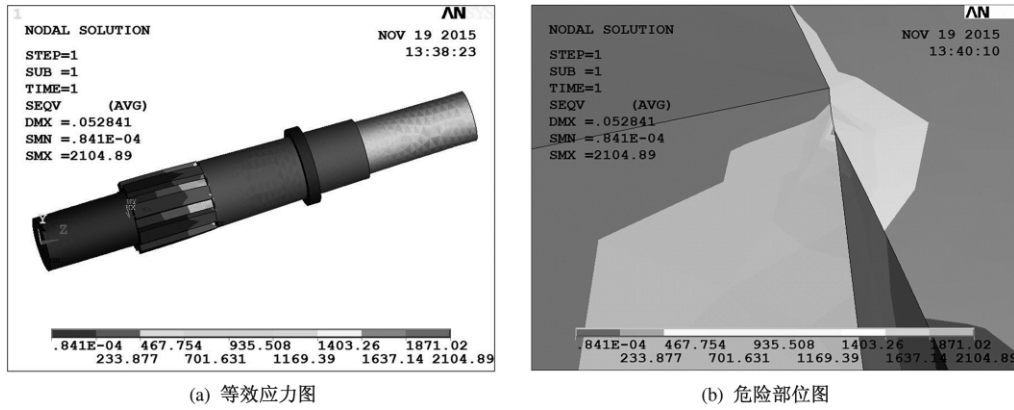


图8 等效应力图及危险部位图

Fig.8 Vonmises and dangerous position

计算得有效应力集中系数为 1.16. 根据钢材截面形状系数图,由于轴为实心轴,所以尺寸效应选择为 1,泵轴表面粗糙度为 1.6,通过精车加工后,其扭转剪切疲劳表面质量系数选择为 0.9.

(2) 疲劳计算结果. 通过对静力分析下危险位置计算,考虑结构的对称性,选择疲劳设置为 1 LOCATION、1 EVENT、2 LOADS 进行疲劳计算分析,其中 2 LOADS 分别为泵受力最大值与最小值. 1 LOCATION 为花键的根部位置. 疲劳应力 s 如表 1 所示.

表 1 疲劳计算存储结果

Tab.1 Result of fatigue calculation MPa

	s_x	s_y	s_z	s_{xy}	s_{yz}	s_{xz}
Loc1	1.3	0.6	1.0	2.4	-29.6	7.9
Loc2	2.6	1.2	2.0	4.9	-59.2	15.9

ANSYS 疲劳计算模块采用简化的弹塑性假设和 Miner 疲劳累积和法则,认为使用应力下的循环次数与该应力下材料的疲劳寿命比值等于 1,即达到疲劳破坏. 根据寿命要求,实际循环次数为 0.6E8.

(3) 振动参数对疲劳寿命影响. 分别运用不同振幅与频率下的泵轴受力进行加载,求得对应的许用疲劳循环次数如图 9 所示.

图 10 为循环次数俯视图,图中左下部深色与浅色形成的交叉线以下表示许用循环次数小于要求循环次数. 从俯视图可以看出,随着振幅与频率增加,许用循环次数线性减小. 当振幅在 3 mm 以下时,频率在 20 Hz 以下都能满足寿命要求;当振幅大于 4.8 mm 时,均不能满足寿命要求;当振幅在 3 mm 与 4.8 mm 之间,由图 10 中深色与浅色交界曲线可以看出,随振幅增加,许用循环次数在近似线性减小,即疲劳寿命线性减小;当频率为

10 Hz 时,满足寿命要求的最大振幅为 4.3 mm.

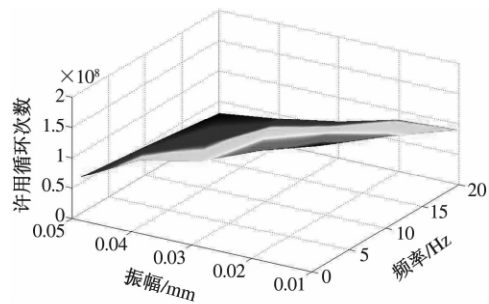


图9 不同振幅与频率下的循环次数图

Fig.9 Allowance cycles under different amplitudes and frequencies

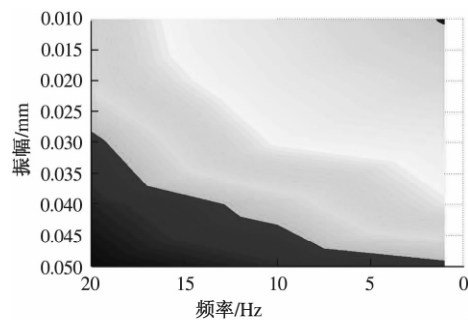


图10 循环次数俯视图

Fig.10 Top view of the allowance cycle number

3 结论

(1) 建立泵轴在振动下的受力仿真模型. 仿真表明,振动下的瞬态受力远大于稳态受力. 同时,随振幅与频率的增加,稳态受力均按线性规律增加.

(2) 建立泵轴有限元模型,花键为危险部位. 当振幅小于 3 mm,频率小于 20 Hz 时,泵轴能满足寿命要求;当振幅大于 4.8 mm 时,不能满足其寿命要求;当振幅在 3 ~ 4.8 mm 之间时,随着振幅与频率增加,许用循环次数即疲劳寿命线性减

小;当频率为 10 Hz 时,能满足泵轴疲劳寿命的最大振幅为 4.3 mm.

参考文献:

- [1] 杨忠炯,李洪宾,周立强,等. 强冲击下先导式溢流阀先导阀芯自激振动仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015,43(4):58-63.
- [2] 刘竹丽,赵敏敏,马朋朋,等. 基于 ANSYS 的斜齿轮副接触分析与可靠性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015,36(2):6-9.
- [3] OST W, DE B P, VAN W J. Failure investigation and redesign of piston and pump shafts [J]. Engineering failure analysis, 2009,16(4):1174-1187.
- [4] 杨大鹏,张雪艳,赵辉,等. 疲劳载荷循环比与频率对裂纹扩展速率的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013,46(1):133-136.
- [5] 刘东星,薛红前,邵闯,等. 不同载荷频率条件下 300M 钢疲劳性能研究[J]. 机械科学与技术, 2011,30(11):1951-1954.
- [6] 罗德扬,宋学曾. 正弦激振测定轴承的刚度和阻尼[J]. 振动测试与诊断, 1983,23(2):21-28.
- [7] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京:科学出版社, 2006:102-122.

The Influence of Vibration on the Force and Fatigue Life of Shaft of TBM Vane Pump

YANG Zhongjiong, DONG Dong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In view of the fact that TBM works under vibration environment, this paper has analyzed two reasons of fatigue of the pump shaft under vibration: the change of loads and the material performance. We build the model of the vane pump by MATLAB/SIMULINK is built. The results of simulation show that the stable force on pump shaft has active linescaple relationship with the frequency and amplitude. According to the empirical data, the S-N curve in different situation was obtained. And the finite element model of the shaft was established. Adding different loads and the material parameters on the model, the influence rules by vibration are obtained. The results indicate that: when the amplitude is below 3 mm and the frequency is below 20 Hz, it can always satisfy the request of fatigue life. It cannot satisfy the request of fatigue life when the amplitude is above 4.8 mm. When the frequency is 10 Hz, the maximum amplitude to satisfy the fatigue life of shaft is 4.3 mm.

Key words: TBM; vibration; vane pump; shaft; fatigue

文章编号: 1671-6833(2016)04-0011-04

电气化铁路单三相组合式变压器电气特性分析

夏焰坤

(西华大学 电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘要: 研究了一种应用于电气化铁路的单相和三相组合式变压器供电系统. 分析了单三相组合式供电系统的结构和工作原理, 以及容量利用率和负序特性. 使用 Matlab/Simulink 首先对单三相组合式供电系统的变压器进行了仿真, 仿真结果表明, 单三相组合式供电系统的结构和原理符合理论分析. 其次, 对组合式变压器构成的同相供电系统进行了仿真验证, 仿真结果表明补偿方案是有效的.

关键词: 组合变压器; 电气化铁路; 容量利用率; 负序; 补偿

中图分类号: TM722 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.003

0 引言

由于电力机车是单相负载, 而电力系统是三相系统, 机车需要从相应变压器取电, 并最大可能地减小负序^[1-2]. 目前牵引变电所的变压器有多种类型, 主要分为三相-两相非平衡变压器、三相-两相平衡变压器^[3-5]、单相变压器等. 经验表明, 平衡变压器具有较好的负序抑制效果, 因此在国内外电铁中得到广泛应用. 但平衡变压器存在接线复杂、制造成本高、难以制造较大容量等不足.

采用不同类型变压器组合也能起到减小负序的作用, 特别适合电气化铁路异相和同相供电^[6]场合. 文献[7-10]研究了同相供电模式, 大多直接在平衡变压器或者单相变压器上进行改造, 采用组合变压器的研究较少. 笔者探讨了组合变压器在异相和同相供电系统上的应用方案.

笔者对三相和单相变压器组合一起的等效平衡变压器方案电气特性进行了研究. 首先分析了组合式变压器结构、原理; 其次分析了组合式变压器绕组容量利用率和负序特性以及同相供电方案应用实例; 最后在 Matlab 仿真平台上进行建模仿真, 仿真结果表明, 组合式变压器具有较好的平衡特性.

1 单三相组合式变压器供电系统结构

由单相 TT 和三相变压器 HMT 组合构成的供电系统结构如图 1 所示, 单相变压器输出电压取自三相系统线电压 B、C 相, 三相变压器输出电压取自三相系统 A 相. 该系统电压相量图如图 2 所示, 从图 2 中可以看出两个变压器次边组合构成两相正交电压, 与平衡接线变压器原理相同.

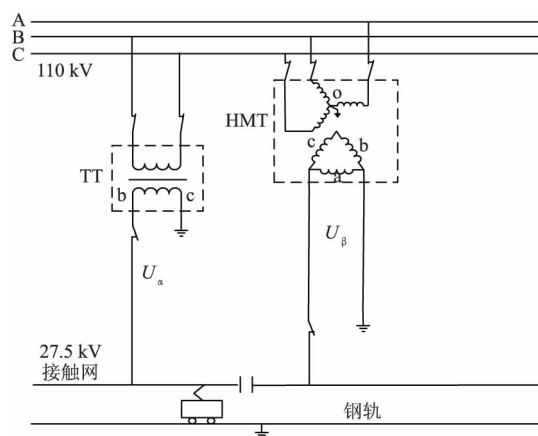


图1 单相和三相变压器构成的电铁牵引供电系统

Fig. 1 Electrified railway power supply system based on the single-phase and three-phase transformer

收稿日期: 2015-09-26; 修订日期: 2015-11-19

基金项目: 四川省教育厅资助项目(16ZB0159); 西华大学重点科研基金资助项目(Z1520909); 四川省电力电子节能技术与装备重点实验室开放课题(szjj2015-068)

作者简介: 夏焰坤(1984—), 男, 湖北黄冈人, 西华大学讲师, 博士, 主要从事电力系统分析和电能质量分析与控制等方面的研究, E-mail: yankunjtdx@126.com.

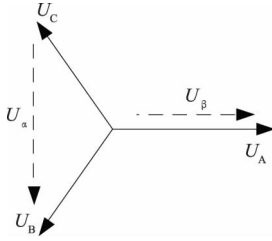


图2 单相和三相变压器电压相量图

Fig. 2 Voltage phasor diagram of the single-phase and three-phase transformer

2 组合变压器容量利用率及负序特性分析

2.1 容量利用率分析

单三相组合式同相供电平衡变压器由单相变压器和三相变压器构成,单三相组合式变压器的接线方式如图3所示。

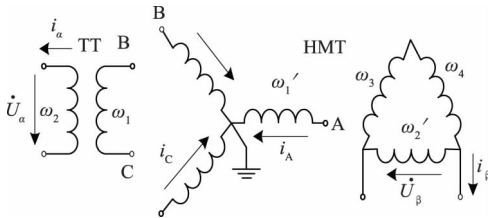


图3 组合式变压器接线图

Fig. 3 Wiring map of the single-phase and three-phase transformer

图3中设单相变压器的输出容量 $S_\alpha = U_\alpha I_\alpha$, 三相变压器的输出容量 $S_\beta = U_\beta I_\beta$, 且有 $S_\beta = k S_\alpha (0 < k < 1)$, 其中 k 为单三相组合式变压器两端口负荷量之比。

由单相变压器的性质知单相变压器次边绕组上的容量为

$$S_1 = U_\alpha I_\alpha = S. \quad (1)$$

由三相变压器的性质可知,次边 Δ 绕组 ω_2' 上的电流为 $\frac{2}{3}I_\beta$, ω_3 、 ω_4 绕组上的电流为 $\frac{1}{3}I_\beta$, 这里若考虑三相变压器按照一重两轻特殊制造, 则有

ω_2' 绕组上的容量为

$$S_2 = U_\beta \cdot \frac{2}{3}I_\beta = \frac{2}{3}kS. \quad (2)$$

ω_3 、 ω_4 绕组上的容量为

$$S_3 = U_\beta \cdot \frac{1}{3}I_\beta = \frac{1}{3}kS. \quad (3)$$

由此可得单三相组合式变压器次边绕组容

量为

$$S_\Sigma = S_1 + S_2 + 2S_3 = \frac{4k+3}{3}S, \quad (4)$$

所以,可得单三相组合式同相供电平衡变压器的绕组容量利用率为

$$\eta = \frac{S + kS}{S_\Sigma} = \frac{3k+3}{4k+3} \times 100\%. \quad (5)$$

由上式可得单三相组合式同相供电平衡变压器的绕组容量利用率与两端口负荷量比 k 的关系如图4所示。

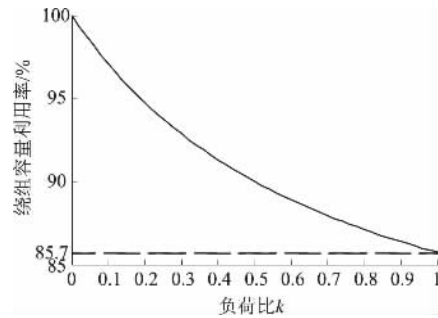
图4 绕组容量利用率与两端口负荷量比 k 的关系图

Fig. 4 Elation between capacity utilization ratio and load ratio

由图4可以看出,当两端口负荷容量相等时,单三相组合式变压器的绕组容量利用率最小为85.7%,最大值为1,对应单相变压器容量利用率.由文献[11]可知,YNvd平衡变压器的绕组容量利用率为80.38%,由此对比可得单三相组合式同相供电平衡变压器在原理上与YNvd平衡变压器一致,但是在绕组容量利用率上要优于YNvd平衡变压器,且制造简单。

2.2 负序特性分析

如图3所示, ω_1 、 ω_1' 分别为单相牵引变压器和高压匹配变压器一次侧绕组,二次侧绕组分别为 ω_2 、 ω_2' , ω_2 构成低压侧 α 相, ω_2' 构成低压侧 β 相。

这里令单相牵引变压器原、次边变比为

$$K_1 = \sqrt{3}U_A/U_\alpha = \omega_1/\omega_2. \quad (6)$$

高压匹配平衡变压器原、次边变比为

$$K_2 = \sqrt{3}U_A/U_\beta = \omega_1'/\omega_2'. \quad (7)$$

假设

$$\begin{cases} U_\alpha = U; \\ U_\beta = mU_\alpha, m < 1. \end{cases} \quad (8)$$

按磁势平衡原理可得,单相变压器原、次边电流变换关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_2/\omega_1 \\ -\omega_2/\omega_1 \end{bmatrix} \dot{I}_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ -\sqrt{3} \end{bmatrix} \dot{I}_\alpha. \quad (9)$$

同理按磁势平衡原理可得,三相变压器原、次边电流变换关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\sqrt{3}\omega'_2/3\omega'_1 \\ -\sqrt{3}\omega'_2/3\omega'_1 \\ -\sqrt{3}\omega'_2/3\omega'_1 \end{bmatrix} \dot{I}_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} 2m \\ -m \\ -m \end{bmatrix} \dot{I}_\beta. \quad (10)$$

根据对称分量法可得,单相变压器单独给机车负载供电和三相变压器单独给机车负载供电时,三相输电线路正序电流和负序电流的表达式分别为

(1) 单相

$$\begin{cases} \dot{I}^+ = 1/3(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \dot{I}_\alpha e^{j90^\circ} \\ \dot{I}^- = 1/3(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \dot{I}_\alpha e^{-j90^\circ} \end{cases} \quad (11)$$

(2) 三相

$$\begin{cases} \dot{I}^+ = 1/3(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} m\dot{I}_\beta \\ \dot{I}^- = 1/3(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} m\dot{I}_\beta \end{cases} \quad (12)$$

若要原边三相对称,则只需将式(11)和(12)中负序分量相加赋值为0,即

$$\dot{I}^- = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} (m\dot{I}_\beta + \dot{I}_\alpha e^{-90^\circ}) = 0. \quad (13)$$

所以次边两相电流满足 $\dot{I}_\alpha = -jm\dot{I}_\beta$, 即当两相的负载功率相同时,原边三相电流负序分量为0;当两相负载功率不相等时,三相侧将有剩余的负序分量。

3 组合变压器在同相供电系统中的应用

组合式变压器特别适合普速和高速电气化铁路同相供电系统的设计或改造,如图5所示。单相变压器 TT 可以作为主变压器,安装容量较大;三相变压器 HMT 经过电力电子变流装置补偿三相系统的负序分量, HMT 安装容量相对较小。ADA 为大功率同相供电变流装置。

该方案的主要特点有:

(1) 方便当前高速铁路牵引变电所同相供电改造。我国新建高速铁路主要采用单相变压器构

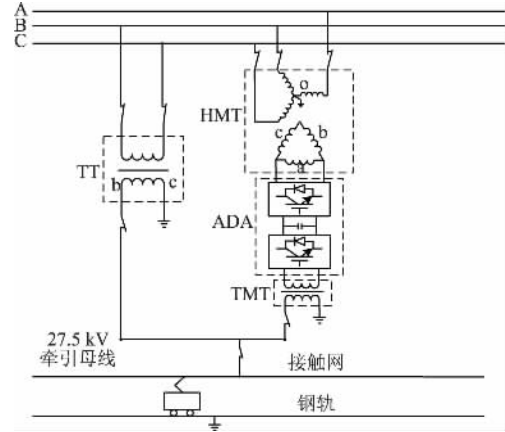


图5 单相和三相变压器构成的同相供电系统结构

Fig. 5 Co-phase power supply system based on the single-phase and three-phase transformer

成 V_V 或 V_X 接线牵引变压器,并且容量较大。在不改变主变基础上,通过增加较小容量三相变压器来实现同相供电,将有助于实现资源高效利用,减小新设备投资;

(2) 可以最大程度减少价格昂贵的同相补偿装置中电力电子变流器的容量及其所占比重,有效减少同相供电装置的一次性投资,其可以提高牵引变电所的供电资源与设备利用率;

(3) 变压器 HMT 次边为三相结构,方便变电所内用电;

(4) 变压器 HMT 次边电压可以灵活设计成较低电压,尽量与电力电子器件耐压水平相匹配,从而省去一个单相降压隔离变压器。

4 建模仿真分析

为验证笔者所提组合式变压器电压和负序关系,在 Matlab/Simulink 平台上进行了仿真验证。仿真模型见图6所示,三相系统电压为110 kV,单相变压器次边电压为27.5 kV。

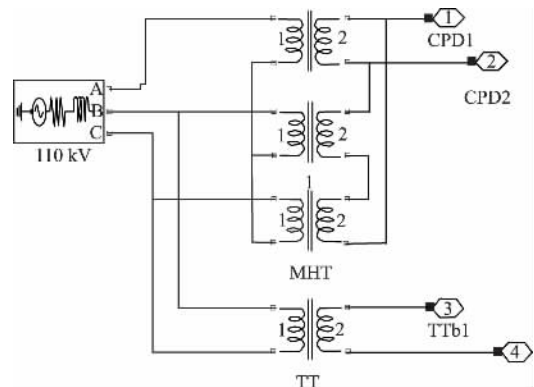


图6 组合变压器仿真模型

Fig. 6 Combined transformer simulation model

4.1 变压器特性仿真

图 7 和图 8 给出了在两单相电压端口分别接 5 MW 有功负载时,组合变压器次边电压和电流波形以及原边电压和电流波形。

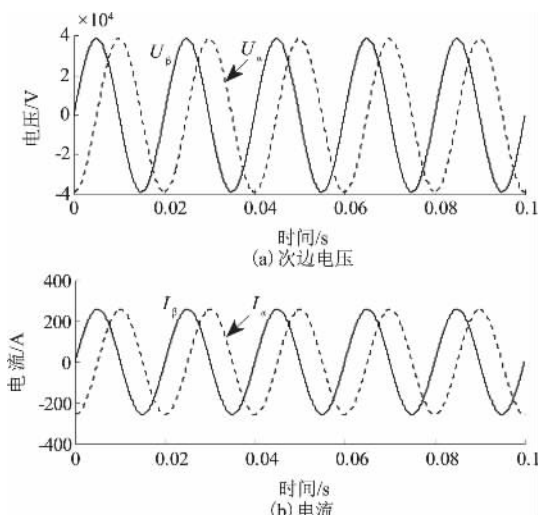


图 7 次边电压和电流波形

Fig. 7 Secondary side voltage and current waveform

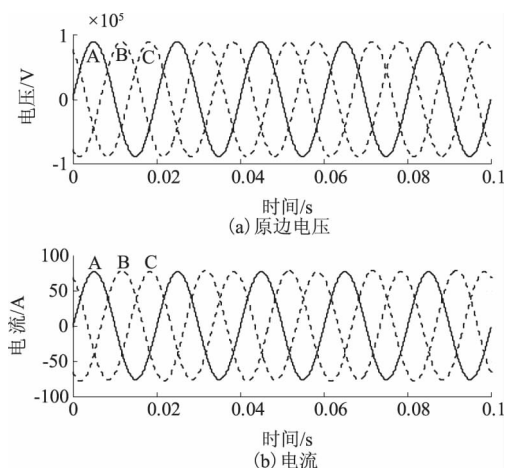


图 8 原边电压和电流波形

Fig. 8 Primary side voltage and current waveform

从以上仿真波形图中可知, \dot{U}_α 超前 \dot{U}_β 90° . 仿真的结论符合图 2 电压向量图中所示的关系. 负载功率相等时三相侧电流完全对称.

4.2 变压器组合式同相供电仿真

牵引负荷为一列满载运行的交直交型车辆, 负荷电流 $i_L(t) = 560\sqrt{2}\sin(\omega t - 25.84^\circ)$, 即负载的视在功率为 14 MVA, 功率因数为 0.9 (滞后), 仿真结果如图 9 所示.

从图 9 可以看出,在未使用补偿的情况下,只有 B、C 两相给负载供电,另一相空载,此时造成三相电力系统负载严重不对称;同相供电装置投入后,负序电流得以完全补偿,此时三相电流波形对称且与电压同相位.

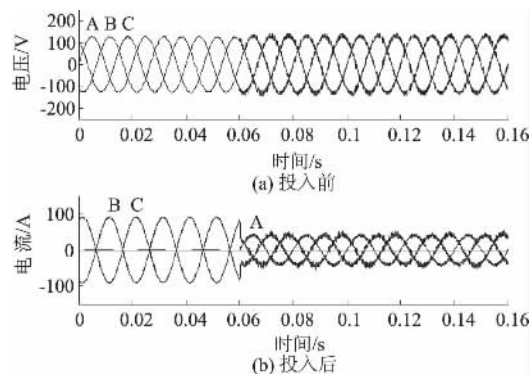


图 9 同相供电装置投入前后效果对比

Fig. 9 The effect with and without co-phase power supply system

5 结论

(1) 组合变压器等效于平衡变压器功能,且具有较高的容量利用率;

(2) 组合变压器适合变电所同相供电改造或设计,经过同相供电系统补偿三相电力系统将有较高的电能质量水平.

参考文献:

- [1] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012.
- [2] 王晓茹,高仕斌. 电力系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [3] 夏焰坤,解绍锋,宿婉,等. 同相供电系统无源补偿方案及参数匹配 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(4): 64-68.
- [4] 吴命利,李群湛. 同相供电对称补偿的接线形式与补偿装置容量选择 [J]. 机车电传动, 2000, 40(5): 15-18.
- [5] 黄军,魏光,周晋,等. YN, vd 平衡变压器负序仿真分析 [J]. 四川电力技术, 2009, 22(2): 81-84.
- [6] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题 [J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 119-124.
- [7] SHU Z L, XIE S F, LI Q Z. Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system [J]. IEEE Trans. on power electron, 2011, 26(2): 334-343.
- [8] SHU Z L, XIE S F, LU K, et al. Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application [J]. IEEE Trans. on Ind. electron, 2013, 60(5): 1831-1839.

(下转第 35 页)

文章编号: 1671-6833(2016)04-0015-05

基于改进蚁群算法的专用输电工程电气设备优化选型

江岳文, 钱佳琦

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 针对专用输电工程的建设现状, 采用优化方法选择输电工程的主要电气设备如高压断路器、输电线路、变压器等, 建立考虑一次性投资、年运行维护费用和停电损失费用的优化模型, 并利用优化模型从众多符合技术参数要求的电气设备中选择成本效益最大化的投资方案, 该方案兼顾经济性与可靠性, 使得年综合运行费用最低。然后采用蚁群算法求解, 针对该算法寻优较慢的缺点, 利用改进的邻域蚂蚁“标兵”学习算法进行寻优, 最后通过对居民专用输电工程算例的计算与分析, 表明该模型和算法的有效性。

关键词: 专用输电工程; 电气设备选型; 改进蚁群算法

中图分类号: TM64

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.004

0 引言

专用输电工程指电网经营企业利用专用工程为某一类用户提供输电服务的工程。根据目前专用工程的建设现状, 可以由用户出资建设, 投运后, 电网经营企业只向用户收取运行维护费; 或由电网经营企业投资建设, 投运后, 电网经营企业向用户收取投资及其回报费、运行维护费两部分; 或第三方(用户和电网经营企业以外的企业)投资建设, 投运后, 电网经营企业只向用户收取运行维护费, 第三方企业向用户收取投资及其回报费^[1]。不论哪种投资建设模式, 专用输电工程电气投资费用中占主要的设备如线路、高压侧断路器、专用变压器等, 可根据输电工程的电气参数和环境状况进行选择与校验, 不同地方或不同项目工程在电气设备的选择方面具有共性。专用输电工程中的土建费用、清赔费用以及变电站类型则对于每个变电站而言都是个案, 不具有共性, 不同的项目工程所产生的费用会相差较多, 不具有可比性。因此, 笔者主要针对专用输电工程中主要电气设备的选择展开研究。

对于输电工程, 为了减少停电时间, 获得较高的可靠性, 需要付出更高的投资, 如何在可靠性和投资费用中寻找一个最佳平衡点, 这是笔者考虑电气设备选型的出发点。传统电气设备的选择是

根据电气量如额定电压和电流大小、环境等条件进行选择, 通过短路电流来校验, 选择满足电气要求的设备^[2]。该方法尚缺乏对设备投资、可靠性等的综合评估, 在众多设备技术参数都满足要求的前提下, 难以综合决策或评估哪类电气设备比较合适。

文献[3]开发了设备选型软件, 即把设备归类, 各类设备选型存入数据库中, 根据用户对设备选择的条件选择相应的设备, 该选择方法类似于传统选择方法。文献[4]把可靠性和经济性结合起来考虑设备的投资费用、检修维护费用、电能损耗费用和停电损失费用, 研究配网开关设置的数量与地点, 采用遗传算法求解, 但并没有涉及设备选型的优化。文献[5]则利用最佳负债配置率方法选择变压器的台数和容量, 以年综合费用目标最小为准则, 兼顾可靠性和经济性。考虑可靠性和经济性相结合, 并应用于电网规划方面的文章较多, 如文献[6-8], 而把二者结合应用在输电工程电气设备综合优化选型上的文献目前较少。笔者基于目前专用输电工程建设的需要, 在所选择的设备都已满足技术参数的前提下, 考虑设备的投资费用、运行维护费用以及可靠性水平等, 使得所选设备年综合费用(包括设备投资费用、电能损耗费用、运行维护费用、停电损失费用等)最低, 并且满足可靠性要求。

收稿日期: 2015-12-03; 修订日期: 2016-03-19

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2013J01176)

通信作者: 江岳文(1977—), 女, 湖南岳阳人, 福州大学副教授, 博士, 主要从事电力系统优化运行研究, Email: jian-gyuewen2008@163.com.

由于蚁群算法在求解组合优化问题上优势明显^[9],笔者拟采用该算法进行设备的选型优化,实现专用输电工程主要电气设备的选择,在可靠性与经济性的权衡中寻找最优设备选型组合,满足设定的目标和约束。

1 专用输电工程设备优化选型数学模型

专用输电工程的电气设备主要包括高压断路器、输电线路、变压器等。考虑这些设备的投资费用、运行维护费用、电能损耗费用以及由于设备故障而导致的缺电成本费用。在满足设定可靠性水平要求下,以年综合费用最小为目标函数,具体如下。

目标函数:

$$\min F = A + C + L. \quad (1)$$

约束条件:

(1) 主要电气设备投资资金的约束

$$\sum_{m=1}^e P_m \leq W. \quad (2)$$

(2) 专用输电工程可靠性要求

$$\sum_{m=1}^e \beta_m T_{\text{LOSS}} \leq t_h. \quad (3)$$

式中: A 为设备每年的等值投资费用; C 为专项输电工程的年运行维护费用与电能损耗费用之和; L 为因为设备故障而造成的年停电损失费用; P_m 为设备一次性投资费用; e 为主要电气设备元件个数; W 为规划的主要电气设备总投资金额上限; t_h 为专用输电工程年允许停电小时数上限; β_m 为设备的年故障次数; T_{LOSS} 为设备故障后平均修复时间。

式(1)中, A 采用等额资金回收算法求得设备每年的等值投资费用,即

$$A = \sum_{m=1}^e P_m \frac{h(1+h)^{n_m}}{(1+h)^{n_m} - 1}. \quad (4)$$

式中: h 为年投资回报系数; n_m 为设备使用年限。

式(1)中, C 为年运行费用,包括一年中各类设备的运行维护费用和电能损耗费用,即

$$C = \sum_{m=1}^e \alpha_1 P_m + \alpha \Delta A. \quad (5)$$

式中: α_1 为设备检修维护费率,按照目前电网经营企业的平均运行维护成本设置; α 为损耗的电能电价; ΔA 为变压器和线路年有功电能损耗之和,按最大负荷损耗时间 τ 来估算电能损耗费用如下:

$$\Delta A = \Delta A_l + \Delta A_t = \Delta P_{\text{max}} \cdot \tau + n_t \cdot \Delta P_0 \cdot (8760 - T_{\text{out}}) + n_t \left(\frac{S_{\text{max}}}{n_t \cdot S_n} \right)^2 \Delta P_k \cdot \tau. \quad (6)$$

式中: ΔA_l 、 ΔA_t 为线路、变压器年有功电能损耗; ΔP_{max} 为线路最大负荷损耗有功功率; n_t 为变压器的台数; S_{max} 为变电站最大负荷; S_n 为变压器的额定容量; ΔP_0 、 ΔP_k 为变压器空载功率损耗和负载功率损耗; T_{out} 为变压器停电检修的时间。

式(1)中, L 为停电损失费用,即

$$L = \rho \sum_{m=1}^e \beta_m T_{\text{LOSS}} \cdot P_{\text{LOSS}}. \quad (7)$$

式中: P_{LOSS} 为设备故障后的失负荷功率; ρ 为缺电成本,元/kWh。

2 基于蚁群算法的专用输电设备选型

专用输电工程的主要电气设备包括专用输电线路、高压断路器、变压器等。笔者采用蚁群算法对设备进行选型,即寻优变量为不同类型设备型号的组合,使得目标函数(1)在满足约束条件(2)、(3)的前提下最优。

2.1 蚁群算法(ant colony optimization, ACO)

生物学家研究发现,自然界中的蚂蚁觅食是一个群体性行为,并非单只蚂蚁在独自寻找食物。因为蚂蚁在寻找食物的过程中会释放一种信息素,并且还能接收到其他蚂蚁释放的信息素。在寻找食物过程中,有的路径上信息素浓度特别高,表征这条路径离食物源最近。于是越来越多的蚂蚁移到该条路径上,其它路径上的信息素随着时间的推移逐渐衰减,最终形成了一个最短的路径,即问题的最优解^[10]。

根据专用输电线路电气设备的配置,电气设备主要形成的集合有高压断路器集合 B_c 、输电线路集合 L_c 、变压器集合 T_c 等等。每一个集合中有 h_b 、 h_l 、 h_t 等型号的设备,每一种型号设备代表 1 个节点。节点与节点之间形成路径,如图 1 所示。

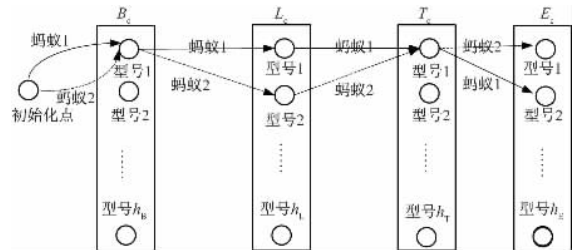


图1 蚂蚁寻优路径示意图

Fig. 1 The search route for ants

每只蚂蚁每次只能从一个集合中选取一个节

点,并到下一个集合中选取一个节点,直至所有集合中都选取一个节点,则表示完成了一次任务,并形成一解.假设在 t 时刻,蚂蚁 k 在 B_c 集合的节点 i 选取 L_c 集合中节点 j 的概率为

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in L_c} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & f \in L_c; \\ 0, & f \notin L_c. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 表示设备 i 与设备 j 之间信息素的浓度,设初始 $\tau_{ij}(0) = \tau_0$,即各路径上信息素相等; $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数, $\eta_{ij}(t) = F_j^{-1}$, F_j 表示所选择的 j 设备的年综合费用,包括年等值投资费用、电能损耗费用、年运行维护费用以及由于 j 设备故障引起的停电损失费用; α 、 β 分别代表信息素重要因子和启发函数重要因子.

完成一次完整的设备选择后每只蚂蚁走过的路径即为问题的一个解,所有蚂蚁构成的解形成解空间,使目标函数(1)最优的解即为本次计算的最优解.在所有蚂蚁完成一次路径寻优结束后,即进行信息素浓度更新,信息素浓度更新后再参与下一次路径的寻优,更新式如下:

$$[\tau_{ij}(t+1)] = (1 - \rho)[\tau_{ij}(t)] + \Delta\tau_{ij}. \quad (9)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^n \Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{f_k(x)}, & (a); \\ 0, & (b). \end{cases} \quad (10)$$

式中:(a)指第 k 只蚂蚁选择从某一设备集合中的设备 i 至另一集合中设备 j 的路径,如果不是,则(b)成立; $f_k(x)$ 为文中的目标函数(1)的值; ρ 为信息素挥发因子.

针对蚁群算法搜索速度较慢的特点^[11],为了增加蚂蚁之间交流信息的机会,通过蚂蚁之间的相互学习、相互合作更快寻找到最优“食物路径”.笔者提出充分发挥单只蚂蚁与邻域之间的协作与学习策略:即为各只蚂蚁随机配置一定数目的邻居.假设蚂蚁 k 与其邻里蚂蚁 b 之间通过各自适应值的比较,发现 $f_k(x) \leq f_b(x)$ ($f_b(x)$ 为蚂蚁 k 邻里之间适应值最小),则蚂蚁 k 为一只寻找食物源的“标兵”,其经过的路径将作为邻域之间的最佳路径;否则为一只寻找食物源的“后进生”,需要向邻域蚂蚁 b 学习,式(11)则反映了“后进生”蚂蚁和“标兵”协作与学习的过程.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \Delta\tau_{ij}^k + \text{rand}(0,1) (\Delta\tau_{ij}^b - \Delta\tau_{ij}^k). \quad (11)$$

通过(11)式蚂蚁之间的邻域学习,增强邻域蚂蚁在“标兵”蚂蚁所经过的节点 i 与节点 j 这条支路上的信息素浓度,吸引更多蚂蚁选择“标兵”

蚂蚁的路径,从而提高程序寻优的效率.

2.2 程序流程设计

基于改进蚁群算法(IACO)的输电工程设备选型优化算法流程图如图2所示.

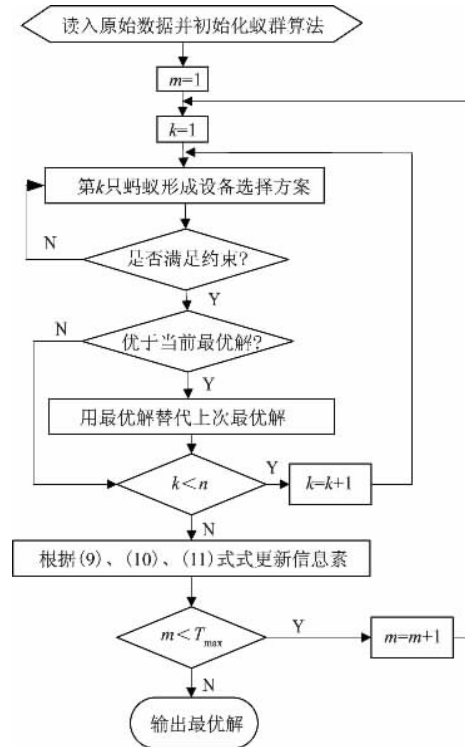


图2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flowchart

3 算例分析

10 kV 专用输电工程,为某一居民小区供电,线路长度 826 m,配变容量选择 2 000 kVA(2 台)或 1 250 kVA(3 台),该工程最大负荷为 3 560 kVA.该小区最大年负荷利用小时数 3 000 h,功率因数平均为 0.95,年最大负荷损耗时间为 1 400 h,变压器年平均利用率为 0.8,年投资回报系数 $i = 8\%$, $\alpha_1 = 2.2\%$; $\alpha = 0.5$ 元/kWh; $\rho = 35$ 元/kWh.

蚁群算法参数:蚂蚁数 $n = 15$; $\alpha = 1$; $\beta = 5$; $\rho = 0.1$; 最大迭代次数 $T_{\max} = 50$; $Q = 100$. 主要电气设备型号备选表见表 1~3.

表1 断路器备选型号表

Tab.1 Types for breakers

型号	$\beta_m /$ (次·a ⁻¹)	$T_{\text{LOSS},m} /$ h	$P_m /$ 万元	n_m / a
BA	5.0	0.8	0.80	6
BB	3.0	0.8	1.45	10
BC	3.0	0.8	4.35	10
BD	2.0	0.8	7.89	15
BE	0.9	0.8	4.96	15
BF	0.6	0.8	8.75	15

表2 线路备选型号表

Tab.2 Types for lines

型 号	$r/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$x/(\Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{m})$	$\beta_m/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	T_{LOSS}/h	$P_m/\text{万元}$	n_m/a
LA	1.26	0.399	5.038 6	6.5	11.25	20
LB	1.26	0.399	5.038 1	6.5	12.08	20
LC	0.9	0.389	5.029 7	6.5	12.79	20
LD	0.63	0.379	5.021 3	6.5	14.02	20

表3 变压器备选方案表

Tab.3 Types for transformers

方 案	容量/ (kVA · 台 ⁻¹)	$\Delta P_0/\text{kW}$	$\Delta P_k/\text{kW}$	$\beta_m/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	T_{LOSS}/h	$P_m/(\text{万元} \cdot \text{台}^{-1})$	n_m/a
TA	2 000/2	2.85	17.8	0.138	151	81	15
TB	2 000/2	2.85	17.8	0.129	151	105	15
TC	1 250/3	1.95	12.8	0.138	151	57	15
TD	1 250/3	1.95	12.8	0.129	151	74	15

3.1 电气设备选型比较

笔者分析5种不同的目标函数即考虑设备投资费用、运行费用和停电损失费用之和;考虑设备投资费用和运行费用之和;仅考虑电气设备投资费用;仅考虑设备运行费用;仅考虑停电损失费用,得出采用改进的蚁群算法选择设备组合的结果如表4所示。

表4 方案比较

Tab.4 Results of cases compare

目标	断路器 型号	线路 型号	变压 器方 案	目标函 数值/ 万元	实际年 综合运 行费用/ 万元	供电 可靠 率
$\min F = A + C + F(a)$	BF	LD	TA	503.21	503.21	0.993 73
$\min F = A + C$	(b) BA	LD	TA	56.567	588.07	0.992 53
$\min F = A$	(c) BA	LA	TA	39.691	593.54	0.992 51
$\min F = C$	(d) BA	LD	TA	16.594	588.07	0.992 53
$\min F = L$	(e) BF	LD	TD	435.11	543.77	0.994 00

由表4可以看出,采用不同的建设目标,则选择的设备不同,其供电可靠性和年综合运行费用也不同。其中,目标(c)只考虑投资费用的大小,该建设方案所产生的年运行费用最高,比综合考虑经济性与可靠性的投资方案(a)高出90.33万元。由于缺电成本高达35元/kWh,因此以不考虑可靠性成本为建设方案的目标(b)所造成的停电损失费用比(a)多出88.95万元。综合考虑经济性与可靠性的投资方案(a)的可靠性虽然比仅考虑可靠性的投资方案(e)略差,但实际年运行费用下降了7.5%,这一点也充分说明可靠性与经

济性对项目的建设和运行起到相辅相成的作用。仅考虑可靠性则会造成过多的投资和年运行费用;仅考虑可投资,则需要付出较大的缺电成本,成本效益不能达到最大化。

3.2 算法优越性比较

由于寻优路径为专用工程主要电气设备的选型,寻优路径较少,寻优速度较快,无论是标准算法还是改进的邻域蚂蚁“标兵”学习算法耗时都比较短。但通过运行程序20次,改进的蚁群算法能取得更快的收敛速度,寻优时间缩短近16.2%,采用ACO的平均收敛时间为0.26s,采用IACO的平均收敛时间为0.22s。20次运行中最优收敛曲线见图3所示。

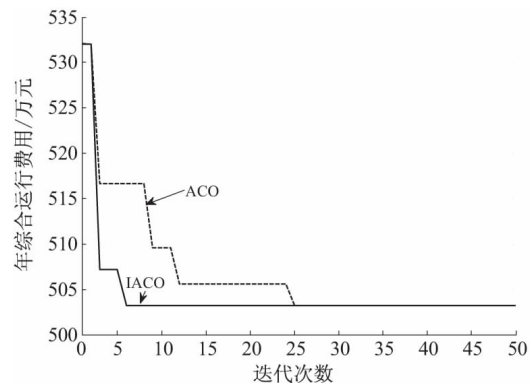


图3 标准蚁群算法与改进蚁群算法收敛速度比较

Fig.3 Comparison of the convergence between ACO and IACO

4 结论

笔者根据专用输电工程的建设特点,提出利用优化方法对主要电气设备如高压断路器、输电线路、变压器等进行选型,考虑设备的投资费用、年运行维护费用和停电损失费用,以年综合费用最小为目标,受约束于可靠性和总投资水平,采用改进的蚁群算法对问题进行求解,通过算例计算分析得出:

(1) 形成的优化模型能有效地把可靠性和经济性进行结合,选择的主要电气设备投资方案既具有较高的供电可靠性,又具有年综合运行费用最低的特点;

(2) 蚁群算法具有对组合优化问题求解的优越性,为了提高其搜索的速度,采用蚂蚁邻域学习法进行改进,算例结果表明该方法的有效性;

(3) 模型与算法也可用于对专用输电工程经济性、可靠性、运行费用等多角度的定量评估,评价输电工程项目的合理性与科学性。

参考文献:

- [1] 董军,蒋雪. 输电项目评价研究现状综述 [J]. 华东电力, 2010, 38(3): 314-318.
- [2] 马翠萍. 苏丹 ASSALAYA 增压泵站电气一次优化设计与设备选型 [J]. 水科学与工程技术, 2010(3): 74-76.
- [3] 韩娜,许跃进. 农村低压电网规划设计应用软件开发 [J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(4): 119-123.
- [4] 史燕琨, 王东, 孙辉, 等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 136-141.
- [5] 殷德聪, 许跃进, 吴昊, 等. 基于最佳配置负载率的配电变压器容量优化与配置 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 145-149.
- [6] 程林, 焦岗, 田浩. 可靠性与经济性相协调的配电网规划方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 106-110.
- [7] 颜伟, 吕冰, 赵霞, 等. 分布式风电源与配网联络线协调规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 1-6.
- [8] ZIARI I, LEDWICH G, GHOSH A, et al. Integrated distribution systems planning to improve reliability under load growth [J]. IEEE Trans on power delivery, 2012, 27(2): 757-765.
- [9] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Transactions on evolutionary computations, 1997, 1(1): 53-66.
- [10] 焦留成, 邵创创, 程志平. 一种求解连续空间约束优化问题的蚁群算法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 20-23.
- [11] HO S L, YANG S, BAI Y, et al. An ant colony algorithm for both robust and global optimizations of inverse problems [J]. IEEE transactions on magnetics, 2013, 49(5): 2077-2080.

The Optimum Selection of Electrical Equipment Types for Specialized Transmission Project Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm

JIANG Yuewen, QIAN Jiaqi

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University Fuzhou, 350116, China)

Abstract: This paper discusses the construct situations of specialized transmission project. The main equipment was selected by optimum ways, such as high voltage breakers, lines and transformers. The optimized mode takes one-off investing cost, annual operation and maintenance cost and outage cost into account. The cost-effectiveness maximization investing case was determined by the optimized mode from many feasible equipments. This case is economic and reliable. At the same time, it has the lowest synthetically cost for every year. This paper uses improved ant colony optimization algorithm to solve optimum selection of equipments because of a slower convergence speed of the normal algorithm. Neighboring ants learn from "example ant" in order to search superior routes. The calculation and analysis for resident transmission project proves the effectiveness of mode and algorithm is proved.

Key words: specialized transmission project; optimum selection of equipment; improved ant colony optimization algorithm(IACO)

文章编号: 1671-6833(2016)04-0020-06

考虑土壤电离的接地装置冲击特性分析

李景丽¹, 郭丽莹¹, 武东亚², 王磊磊¹, 李渊博¹

(1 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2 国网河南省电力公司河南电力调度控制中心, 河南 郑州 450052)

摘要: 试验及实际运行经验表明, 接地装置冲击特性是影响输电线路防雷性能的重要因素. 笔者以土壤电离过程中的动态、分布式土壤参数为基础, 对典型接地装置建立冲击特性有限元模型; 根据仿真计算结果与模拟试验结果从电磁场角度分析了典型接地装置的冲击散流机理及散流规律; 同时定量计算了冲击电流作用下土壤参数及注入电流参数对土壤电离区域体积的影响规律, 在此基础上分析了土壤电离对典型接地装置接地电阻、跨步电压、接触电压等接地参数的影响. 结果表明, 土壤电离现象对冲击散流特性和冲击接地参数的影响在高幅值注入电流、高电阻率地区更明显. 该研究结果可为输电线路冲击接地降阻新措施的提出提供理论支持.

关键词: 接地装置; 冲击特性; 土壤电离; 有限元分析

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.005

0 引言

随着电力系统的发展, 输电线路运行的统计数据显示, 线路防雷措施的设计目标与实际统计数据差异较大, 这些差异说明目前对输电线路雷击事故的本质认识还不充分.

目前国内外学者对接地装置冲击特性的研究主要集中在以下3个方面: 建立更加准确的计算接地装置冲击特性的数值计算模型^[1-3]; 采用模拟试验、真型试验的方法研究接地装置冲击特性、冲击散流规律^[3-5]; 土壤击穿机理^[6-7]、土壤击穿场强^[8]、土壤电离区域介电参数^[9-12]的理论和试验研究. 其中, 文献[4]考虑土壤电离过程对典型接地体冲击特性进行试验和仿真, 研究表明: 土壤动态电离现象在冲击散流过程中的影响不可忽视. 文献[5]对典型接地体冲击散流规律的模拟试验研究认为: 接地导体周围散流土壤中的电场强度由接地导体向无穷远处亦呈现不均匀分布特征, 因此土壤中电离程度不同.

笔者建立可准确模拟冲击散流过程中土壤电参数的时变性和空间分布特征接地装置冲击特性

模型; 基于此模型及模拟试验结果分析了典型接地装置动态冲击散流机理. 同时定量计算了冲击电流作用下土壤参数及注入电流参数对土壤电离区域体积的影响规律; 并对典型接地导体在不同地质和不同冲击注入电流下, 土壤电离对冲击散流参数的影响程度进行了定性分析.

1 接地装置动态有限元模型

1.1 土壤火花放电特性模拟

雷电流经杆塔、接地装置流散入地的过程中, 在土壤中产生瞬变电磁场. 试验研究发现, 当土壤电场强度超过一定值后, 电压和电流不再是线性关系, 呈现非线性电学现象^[9]. 文献[10]通过对大量的冲击特性试验数据详尽地分析认为: 土壤火花放电区域的剩余土壤电阻率与原始土壤电阻率比值呈正态分布, 可以采用其平均值7%进行等效. 另外, 文献[3, 5]对典型接地体冲击散流规律的模拟试验认为: 接地体分支间的电磁屏蔽效应、高频冲击电流下钢制接地导体的电感效应, 使得冲击泄漏电流沿接地体的分布呈现不均匀形态.

收稿日期: 2015-08-25; 修订日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307152)

作者简介: 李景丽(1983—), 女, 河南周口人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电力系统防雷与接地技术研究, E-mail: lijingli1022@zzu.edu.cn.

由上述分析可知,冲击电流沿接地导体流散过程中,由接地导体向外土壤中的电场强度呈现减小趋势,因此接地装置流散高幅值雷电流时,沿接地导体向外的土壤中依次存在.其中电弧放电区、火花放电区、半导体区及恒定电导区4个区域的土壤电离区域示意图如图1所示.

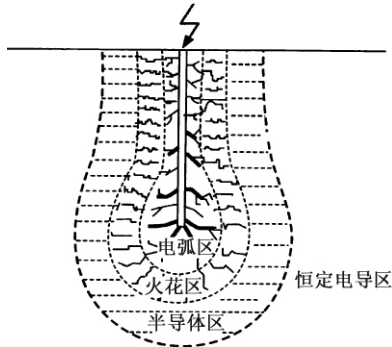


图1 土壤电离区域示意图

Fig. 1 The soil ionization model under impulse current

综上所述,高幅值冲击电流散流过程中土壤电阻率为受瞬态电场控制的分布式时变参数,为此笔者在有限元模型中设定任一时刻离散土壤单元电阻率为上一时刻该单元电场强度的函数,准确模拟冲击散流过程中土壤电阻率随电场强度变化而变化的动态过程.

1.2 接地装置数学模型

冲击电流经接地装置流散将在土壤中产生瞬变电磁场,建立散流过程数值计算模型时位移电流不可忽略,接地体散流的动态物理过程可由以下时域拉普拉斯方程描述:

$$D(\varphi(x,y,z)) = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 \varphi) + \nabla \cdot (\gamma \nabla \varphi) = 0. \quad (1)$$

且控制方程需满足以下边界条件:

- a) 无穷远处为电位为零,即: $\varphi = 0, r \rightarrow \infty$.
- b) 地表面电绝缘,即:

$$\left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) [n \cdot (\nabla \varphi)] = 0. \quad (2)$$

- c) 在注入电流的导体截面上,满足:

$$\int_s - \left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla \varphi \cdot n \, ds = I. \quad (3)$$

- d) 不同参数的介质分界面上均满足:

$$\begin{cases} \varphi^+ = \varphi^-; \\ \left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) + \nabla \varphi^+ \cdot n^+ = \left(\gamma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) - \nabla \varphi^- \cdot n^-. \end{cases} \quad (4)$$

其次,有限元法适合于有限的求解空间,利用空间几何坐标变换法^[11]处理开域电磁场问题.

2 接地装置冲击散流特性

为分析接地装置冲击散流机理及其影响因素,采用考虑火花放电特性的接地装置冲击特性对中心引流的水平接地体、星型接地体、十字形接地体建立模型.冲击电流选用8/20 μs 双指数雷电流波,其波形如图2所示,冲击电流幅值为50~100 A不等,土壤电阻率选为115和1 000 $\Omega \cdot \text{m}$.

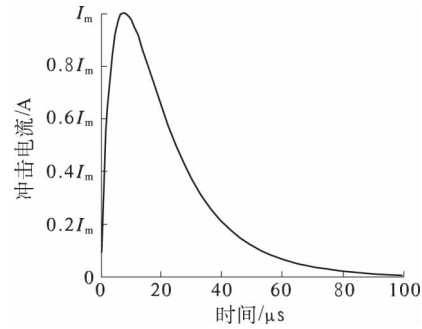


图2 8/20 μs 冲击雷电流波形图

Fig. 2 The 8/20 μs impulse lightning current waveform

2.1 接地装置冲击散流机理

为分析土壤电离对散流规律的影响,图3分别列出注入电流峰值 $I_m = 100 \text{ A}$ 、土壤电阻率 $\rho = 1 000 \Omega \cdot \text{m}$ 时,冲击电流峰值时刻距离十字形接地极0.001 m处土壤电场强度和导电率分布.由图3(a)可知,电场强度沿接地导体分支的分布极不均匀,接地导体端部周围土壤中的电场强度较大,土壤在强电场作用下的火花效应使得接地导体端部土壤电阻率下降,冲击电流更偏向于沿电阻率较小的导体端部散流进入大地.散流比重的增加使导体端部的电场强度进一步加大,甚至产生强烈的电弧通道,加大了冲击电流的散流比重,使端部效应更明显.大冲击电流下的土壤动态电离使得接地导体周围土壤的电导率呈不均匀分布,如图3(b)所示.由图3可知,土壤的最大电导率达到0.013 S/m,即局部土壤电阻率最低达到76.92 $\Omega \cdot \text{m}$,与原来的1 000 $\Omega \cdot \text{m}$ 相比,降幅很大.

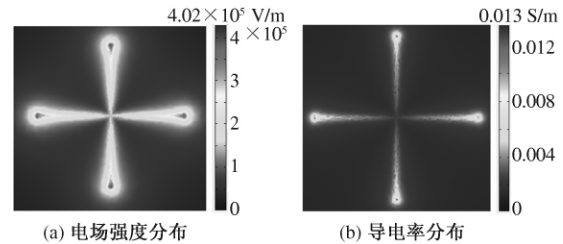


图3 十字型接地极周围土壤电场强度和导电率分布

Fig. 3 Conductivity and electrical field distribution in the soil

2.2 接地装置冲击散流规律及其影响因素分析

为分析接地装置结构对冲击散流规律的影响,将接地导体分支从电流注入点到末端平均分成5段,依次记为1~5号,由导体散流的对称性,选取任一散流分支分析即可.根据仿真计算结果,图4绘出了土壤电阻率为 $115\ \Omega\cdot\text{m}$,冲击电流幅值为 $24\ \text{A}$ 时,3种水平放射型接地装置冲击泄漏电流沿接地导体分支的分布规律.由图可知,3种典型水平接地装置的各导体分支上相对漏电流的变化趋势基本相同,均呈现明显的端部效应,并且导体分支数越多,端部效应越明显.其中中心注入单根水平接地极末端导体段的相对漏电流是其首端的1.5倍;星型接地极末端导体段的相对漏电流是其首端的2倍;十字形接地极末端导体段的相对漏电流是其首端的2.86倍.因此,在接地装置优化设计时,应尽量降低注入点附近导体分支数,提升接地导体利用效率.

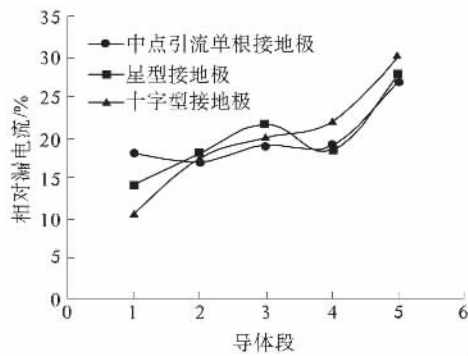


图4 放射型水平接地极散流对比

Fig. 4 Relative leakage current distributions of horizontal radiating grounding rods

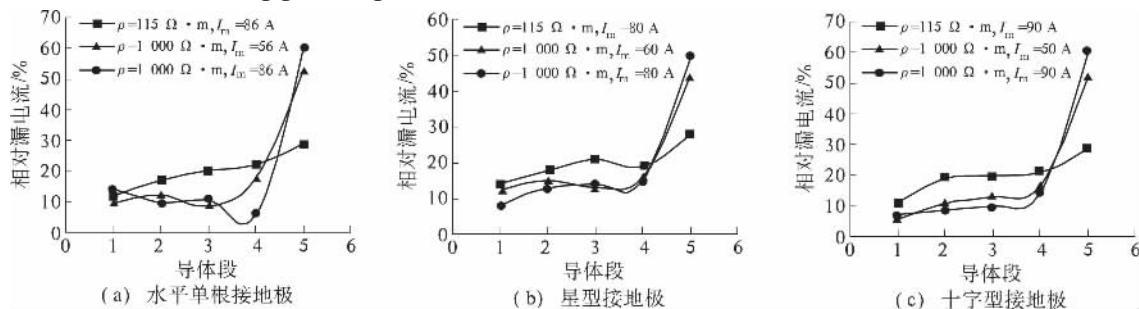


图5 冲击电流峰值时刻水平接地体散流规律

Fig. 5 Relative leakage current of the horizontal grounding electrodes at peak of injection current

3 土壤电离对接地参数影响分析

3.1 土壤电离对冲击接地电阻的影响

为了定量分析土壤电离对冲击接地电阻的影响,图6绘出了不同冲击电流幅值和土壤电阻率下中心注入单根水平接地极的冲击接地电阻时域波形.另外,对土壤电离区域进行体积分得出土壤

为分析土壤电阻率、冲击电流幅值对冲击散流规律的影响,根据数值计算结果分别绘出了3种典型接地装置冲击散流分布情况,如图5所示.由图5可知:当土壤电阻率相同时,注入电流峰值越大,3种接地装置中首末端导体段散流比重的不均匀程度均越明显.如星型接地极在电阻率为 $\rho=1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 土壤中,冲击电流幅值 $I_m=60\ \text{A}$ 时,末端导体段的相对漏电流是首端导体段的3.67倍;当冲击电流幅值 $I_m=80\ \text{A}$ 时,末端导体段的相对漏电流为首端导体段的6.25倍.这是由于在相同接地体结构和土壤结构下,冲击电流幅值愈大,末端电场强度亦相对较大,土壤电离现象更加明显,而冲击电流更倾向于从电阻率更小的末段导体周围土壤中散流,进而加剧了导体分支泄漏电流的不均匀程度.

图5亦表明在相同注入电流下,土壤电阻率越高散流越不均匀,导体分支首末端散流比重的差距越大.以十字形接地极为例,在注入冲击电流幅值 $I_m=90\ \text{A}$ 下,土壤电阻率 $\rho=115\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,导体分支末端导体段的相对漏电流是其首端的2.64倍;而土壤电阻率 $\rho=1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,导体分支末端导体段的相对漏电流是其首端的8.71倍.这是因为当接地导体周围土壤的电阻率较大时,对于电阻率较大的土壤介质,冲击电流更趋向于沿着金属导体流向末端并在末端周围土壤集中散流,因此,接地导体分支末端土壤电离现象更加明显,从而加剧了导体分支散流的不均匀性.

电离区域体积的时域图,如图7所示.由图6可以看出,考虑土壤动态电离现象时,接地极的接地电阻不再是定值.接地电阻随着冲击电流的增大而逐渐减小,当达到冲击电流峰值时,接地电阻达到最小值.以中心注入单根水平接地极在冲击电流幅值 $I_m=50\ \text{A}$ 、土壤电阻率 $\rho=1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 为例,冲击接地电阻的降幅达到42.54%.

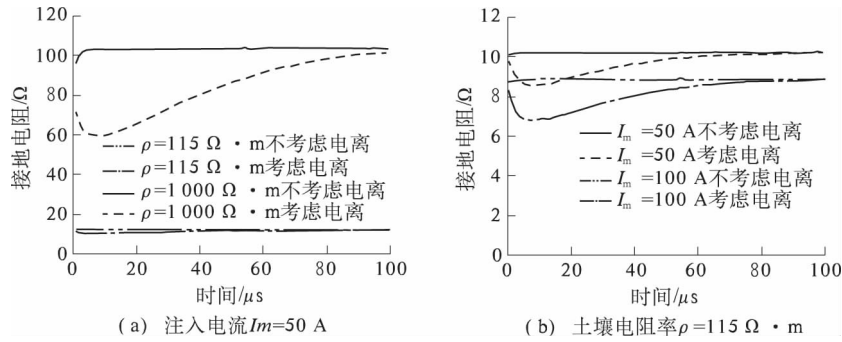


图6 中心注入单根水平接地极接地电阻时域图

Fig. 6 The electric resistance of the horizontal grounding

同时,由图6亦可看出,土壤动态电离使冲击接地电阻降低的现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.如图6(a)所示,当注入电流为50 A时,土壤电阻率 $\rho=115 \Omega \cdot m$ 下的冲击接地电阻最小值较之不考虑土壤电离时降低了16.17%,而土壤电阻率 $\rho=1000 \Omega \cdot m$ 下的冲击接地电阻最小值较不考虑土壤电离时降低了42.53%.这是由于高土壤电阻率下冲击电流沿接地导体分布的不均匀程度更明显,接地导体末端土壤电离现象更加剧烈,如图7所示,两种情况下冲击电流峰值时刻的土壤电离区域体积分别为 0.571 cm^3 和 30.218 cm^3 .由图6(b)可以看出,当土壤电阻率为 $115 \Omega \cdot m$ 时,注入的冲击电流幅值 $I_m=50$ A下的冲击接地电阻较不考虑土壤电离时减小了16.17%;冲击电流幅值 $I_m=100$ A下的冲击接地电阻较之不考虑土壤电离时降低了23.49%.这是由于在高幅值冲击电流作用下,泄漏电流沿接地导体分布的不均匀程度更明显,接地导体末端土壤电离现象更加剧烈,如图7所示,两种情况下冲击电流峰值时刻的土壤电离区域体积分别为 0.571 cm^3 和 7.159 cm^3 .

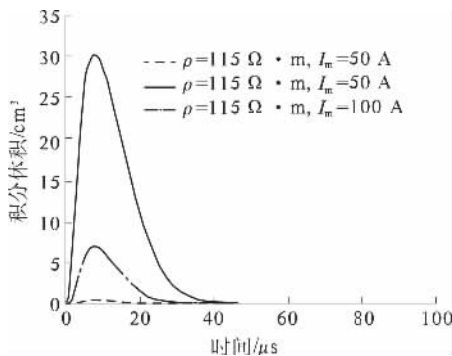


图7 中心注入的单根水平接地极土壤电离区域面积

Fig. 7 Transient ionization phenomenon area in the soil of the horizontal grounding

图8分别绘出了土壤电阻率 $\rho=115 \Omega \cdot m$ 、

注入冲击电流峰值 $I_m=100$ A时,3种水平接地装置冲击接地电阻的时域分布图.由图8可知,土壤电离使得单根水平接地极、星型接地极和十字形接地极冲击接地电阻分别降低了20.47%、16.13%和14.99%.这是由于接地导体分支间的电磁屏蔽作用使得端部效应随接地导体分支数的增多而更加明显,从而星型和十字形接地导体土壤电离区域与单根水平接地极相比更加局限于导体最端部,限制了土壤电离区域的相对体积.根据数值计算结果对土壤电离区域进行体积分可得3种接地极结构的土壤电离区域体积分别为 6.775 、 4.628 和 3.58 cm^3 .

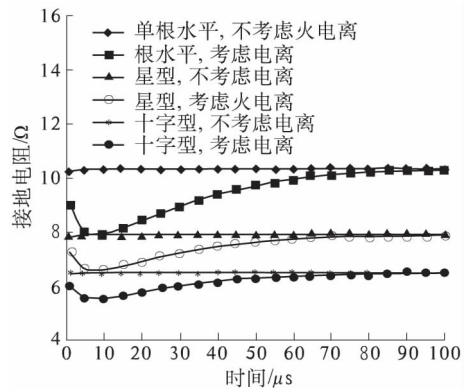


图8 单点注入多方向散流接地极接地电阻对比

Fig. 8 Comparing with the electric resistance of the horizontal grounding

3.2 土壤电离对接触电压和跨步电压的影响分析

为了分析土壤电离对接触电压和跨步电压的影响,图9和图10分别绘出了中心注入的单根水平接地极在垂直于接地导体方向上的接触电压相对值(以不考虑土壤电离时接触电压最大值为基准)和垂直于接地导体方向且距离接地极0.6 m处的跨步电压相对值(以不考虑土壤电离时跨步电压最大值为基准).由于土壤电离作用,与接地装置电位接近的区域整体向外延伸,同时

轴向上电压梯度减小,从而接触电压和跨步电压都有明显的降低;除此之外,接触电压和跨步电压降低的现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.如图9(a),10(a)所示,当注入电流为50 A时,土壤电阻率 $\rho=115\ \Omega\cdot\text{m}$ 下的接触电压和跨步电压较之不考虑土壤电离分别降低了30.3%和13.5%,而土壤电阻率 $\rho=1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 下的接触电压和跨步电压较之不考虑土壤电离分

别降低了67.9%和46.6%.由图9(b)、10(b)所示,当土壤电阻率 $\rho=115\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,注入的冲击电流幅值 $I_m=50\ \text{A}$ 下的接触电压和跨步电压较不考虑土壤电离分别降低了30.3%和13.5%,而冲击电流幅值 $I_m=100\ \text{A}$ 下的接触电压和跨步电压较不考虑土壤电离时分别降低了42.3%和21.6%.

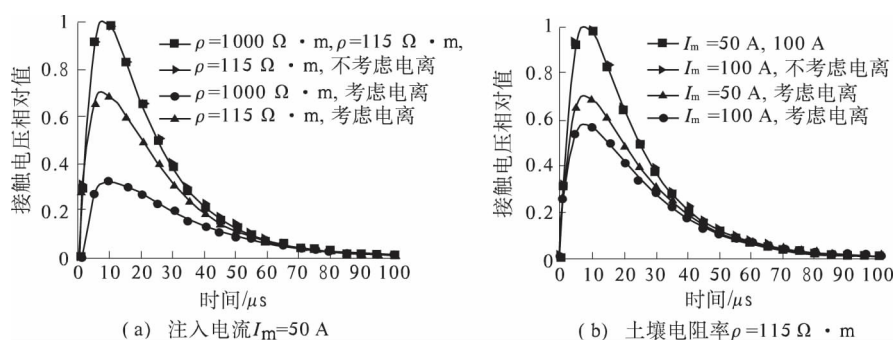


图9 接地装置的接触电压

Fig. 9 Touch voltage of the horizontal grounding

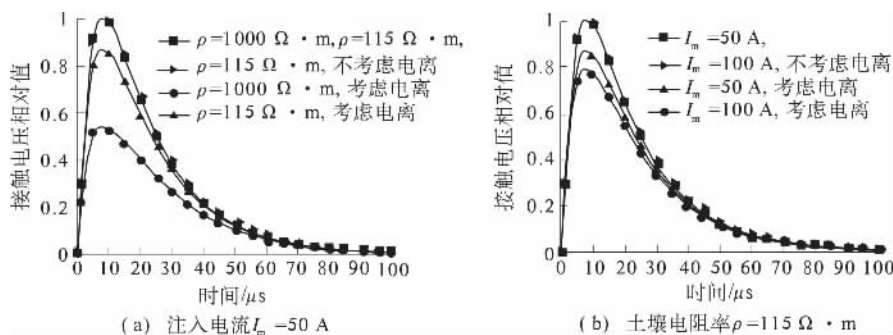


图10 距离接地装置0.6 m处的跨步电压

Fig. 10 Step voltage of the point 0.6 m away from the horizontal grounding

4 结论

笔者基于有限元模型分析了典型接地结构的冲击散流机理及其影响因素,并详细分析了土壤动态电离现象对接地参数的影响,对实际接地设计有一定的参考价值.所得结论如下:

(1) 冲击散流过程中泄漏电流沿接地导体的分布呈现明显的“端部效应”,注入点相连的分支数愈多、土壤电阻率愈大、冲击电流幅值愈高,泄漏电流分布的不均匀性愈强烈.

(2) 土壤电离现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流条件下更加剧烈,因此,土壤电离引起的冲击接地电阻降低现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.

(3) 土壤电离现象使得接地体附近地面的接触电压和跨步电压都有明显的降低.并且土壤电

离使接触电压和跨步电压降低的现象在高土壤电阻率和高幅值冲击电流下更加明显.

参考文献:

- [1] ZENG R, GONG X H, HE J L, et al. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization [J]. IEEE Trans on power delivery, 2008, 23(2): 667-675.
- [2] 朱时阳,袁涛. 分层土壤中接地装置冲击散流特性的有限元分析模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2304-2309.
- [3] LI J L, YUAN T, YANG Q, et al. Numerical and experimental investigation of grounding electrode impulse-current dispersal regularity considering the transient ionization phenomenon [J]. IEEE Trans on power delivery, 2011, 26(4): 2647-2658.
- [4] 袁涛,李景丽,司马文霞,等. 土壤电离动态过程

- 对接地装置冲击散流的影响分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1606–1612.
- [5] 杨财伟,司马文霞,袁涛. 冲击电流下接地极屏蔽效应试验研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 2609–2615.
- [6] FLANAGAN T M, MALLON C E, DENSON R, et al. Electrical breakdown characteristics of soil [J]. IEEE Trans on nuclear science, 1982, 29(6): 1887–1890.
- [7] SNOWDON D P, BEALE E S, VANLINT V A J. Effect of gaseous ambient on the initiation of breakdown in soil [J]. IEEE Trans on nuclear science, 1986, 33(6): 1669–1674.
- [8] OETTLE E E. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes [J]. IEEE Trans on power delivery, 1989, 3(4): 2020–2029.
- [9] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] LIU Y Q. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results [C] // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. Boston, USA: IEEE Press, 2003: 794–799.
- [11] WANG J P, LIEW A C. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents [J]. IEEE Trans on power delivery, 2005, 20(3): 2160–2165.
- [12] VISACRO S, ALIPIO R. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes [J]. IEEE Trans on power delivery, 2012, 27(2): 927–934.

Analysis of the Grounding Device's Impulse Characteristics Considering Transient Ionization Phenomenon of Soil

LI Jingli¹, GUO Liying¹, WU Dongya², WANG Leilei¹, LI Yuanbo¹

(1 School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2 Henan Electric Power Dispatching & Controlling Center, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The tests and actual operating experience show that the impact characteristics of grounding device characteristics are important factors about lightning protection performance of transmission lines. In this paper, based on the dynamic soil ionization process and distributed soil parameters, we established the finite element model of the impulse characteristics of grounding device. According to the simulation results and test results, we analyzed the mechanism and law of diffuser impact about typical grounding device from the electromagnetic field. And we calculated quantitatively the influence of the soil parameters and injection current parameters to the soil volume ionization region under the impact of current action. On the basis of these, we also analyzed soil ionization effect on typical ground resistance, step voltage, contact voltage and other parameters of the ground. The results show that the soil ionization phenomena has a great influence on the impulse diffuser characteristic and impulse grounding parameters, especially in the area of high resistivity and high injected current. the findings can provide theoretical support for new measures of reducing the impact grounding resistance.

Key words: grounding device; impact properly; transient ionization phenomenon of soil; finite element analysis

文章编号: 1671-6833(2016)04-0026-05

铁锡复合氧化物催化合成 ϵ -己内酯

章亚东, 马永丽, 马金玲, 赵岩岩, 贾金峰

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 在分子氧-苯甲醛体系, 由共沉淀法制备的 Fe-Sn-O 复合氧化物作为催化剂, 催化分子氧化环己酮合成 ϵ -己内酯, 通过单因素实验, 得到适宜的合成条件: 常温常压下, 以环己酮用量为 5 mmol 计; n (苯甲醛) : n (环己酮) = 3:1; 1,2-二氯乙烷 20 mL; 氧气流速 20 mL/min; 反应时间 4 h; 反应温度 55 °C. 该条件下, ϵ -己内酯收率达到 98.8 %, 选择性达到 99.0%; 采用 SEM、XRD 等对催化剂的结构进行表征; 催化剂重复使用 5 次仍保持较高活性.

关键词: Fe-Sn-O 复合氧化物; 环己酮; 苯甲醛; ϵ -己内酯

中图分类号: TQ426.94

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.006

0 引言

ϵ -己内酯是一种重要的化工中间体, 常用于合成聚己内酯(PCL), PCL 常用作生物降解塑料、医用高分子材料, 此外低聚量的 PCL 还可用于合成革、胶黏剂、涂料等^[1-2]. ϵ -己内酯可由氧化环己酮进行缩合酯化重排反应^[3]合成. 传统氧化剂包括过氧酸类以及过氧有机醇类, 其中过氧酸类对设备有较大的腐蚀性; 过氧有机醇价格昂贵^[4-6]. 双氧水与分子氧是比较环保的氧化剂, 逐渐被科学研究者所关注, 杨志旺等^[2]采用双氧水作为氧化剂, 用氧化环己酮制备 ϵ -己内酯, 在 70 °C 反应 8 h 时, ϵ -己内酯收率达 85.1%, 但双氧水易分解, 运输不方便. 氧气作为氧化剂无污染, 来源丰富^[7-8], 但氧化能力有限, 需使用催化剂, 常用的催化剂主要有均相催化剂与非均相催化剂, 由于非均相催化剂易于从反应体系分离并重复使用, 所以成为近年来研究的热点, 如负载锡的分子筛、负载铁的黏土及负载锡的水滑石等非均相催化剂^[9-11], Kawabata^[12]采用负载铁的 MCM-41 作为催化剂, 分子氧作为氧化剂, 催化氧化环己酮合成 ϵ -己内酯, 可使目标产物收率达 77 %, 但上述催化剂存在制备复杂或活性低等缺点, 所以探索出高活性高选择性以及易于回收利用

的催化剂具有重大意义.

笔者选用 Fe-Sn-O 复合氧化物作为催化剂, 制备简单, 活性以及选择性均比较高, 可重复使用, 同时笔者还考察了各个因素对收率的影响, 对催化剂进行了系列表征, 并探讨了催化机理.

1 实验部分

1.1 主要试剂与仪器

环己酮、九水硝酸铁、五水四氯化锡、苯甲醛, AR, 国药集团化学试剂有限公司; GC9800 型气相色谱仪, 上海科创色谱仪器有限公司; D8 型 X 射线衍射仪(德国布鲁克公司); 扫描电子显微镜(JSM1500F).

1.2 催化剂制备

在 250 mL 圆底三口瓶中加入 2 mol/L 的无水碳酸钠溶液, 滴加一定摩尔比的 SnCl_4 与 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 混合溶液, 边滴边搅拌, 使用 2 mol/L 的氢氧化钠溶液调节 pH = 10, 继续搅拌 2 h, 然后 333 K 下静置 40 h, 抽滤, 去离子水洗涤至中性, 373 K 干燥 24 h, 以 7 K/min 在马弗炉内上升至一定温度 T_1 , 煅烧一段时间 t_1 . 碾碎催化剂到一定颗粒度, 超声作用 2 h. 同样方法制备不同底物的催化剂. 所得催化剂以 $\text{M-N-}x\text{-}T_1\text{-}t_1$ 表示(M、N 为金属离子; x 为 M 与 N 的摩尔比).

收稿日期: 2015-10-27; 修订日期: 2015-12-22

基金项目: 河南省高校科技创新人才计划资助项目(2010HASTIT037)

作者简介: 章亚东(1965—), 男, 河南正阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事精细有机合成方面的研究, E-mail: zzuzhangyadong@126.com.

1.3 ϵ -己内酯的合成过程

向带有冷凝管的50 mL的四口圆底烧瓶中加入20 mL 1,2-二氯乙烷,90 mg 催化剂,5 mmol 环己酮,20 mmol 苯甲醛,加热搅拌,常温常压下以15 mL/min 体积流量通氧气,反应温度 $T_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,反应5 h,反应结束后离心分离出催化剂,过滤除去少量结晶出的苯甲酸.气相检测,检测结果见图1,保留时间及其对应物质见表1,由图1和表1可知,反应所得的 ϵ -己内酯与平行产物苯甲酸沸点相近,并且高温下 ϵ -己内酯易聚合,后续采用减压精馏分离 ϵ -己内酯.

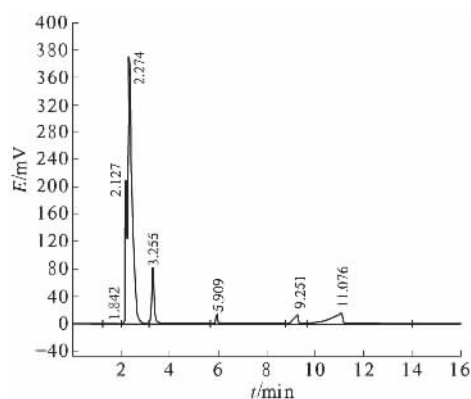


图1 反应液气相色谱图

Fig.1 The gas chromatogram of reaction liquid

表1 保留时间与物质对应表

Tab.1 Retention time and material table

保留时间/min	物质	保留时间/min	物质
2.127	氯仿	5.909	环己酮
2.274	1,2-二氯乙烷	9.251	ϵ -己内酯
3.255	甲苯	11.076	苯甲酸

2 结果与讨论

2.1 催化剂的筛选

催化剂对反应收率有较大影响.实验考察了以5 mmol 环己酮为反应底物,20 mmol 苯甲醛为共氧剂,20 mL 1,2-二氯乙烷为溶剂,常温常压下以15 mL/min 体积流量通氧气,50 $^{\circ}\text{C}$ 下加热搅拌5 h,合成方程式如下:



实验结果如表2所示.从表2可以看出,催化剂煅烧温度由450 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐增加时,反应收率先增加后减少,在850 $^{\circ}\text{C}$ 反应收率达到最大(如实验3;实验7;实验11).煅烧温度引起煅烧产物物相的改变,实验结果表明850 $^{\circ}\text{C}$ 所形成的催化剂所

具备的物相活性最高.铁锡摩尔比在1:1时催化剂活性最高,金属复合氧化物的催化活性与其含有的d轨道空穴数量有关,含较多d轨道空穴的铁原子与金属锡形成的复合氧化物时d轨道空穴数量相对减少,由实验结果可以推测铁锡摩尔比在1:1时所具备的数量为较佳数量,催化性能较好.故合适的催化剂为Fe-Sn-1:1-850-5.

表2 催化剂对收率的影响

Tab.2 The impact on yield by catalysts

序号	催化剂	转化率/%	收率/%
1	Fe-Sn-1:1-450-5	85.6	83.7
2	Fe-Sn-1:1-600-5	93.5	91.0
3	Fe-Sn-1:1-850-5	94.9	93.9
4	Fe-Sn-1:1-900-5	94.5	86.7
5	Fe-Sn-1:2-450-5	83.2	68.9
6	Fe-Sn-1:2-600-5	89.4	69.3
7	Fe-Sn-1:2-850-5	95.3	90.3
8	Fe-Sn-1:2-900-5	90.2	87.9
9	Fe-Sn-2:1-450-5	64.5	54.2
10	Fe-Sn-2:1-600-5	76.7	69.7
11	Fe-Sn-2:1-850-5	91.3	84.4
12	Fe-Sn-2:1-900-5	87.2	76.5

2.2 醛还原剂的筛选

醛在合成过程中起还原剂作用,对反应收率影响较大.仅改变加入醛的种类,并使用2.1所筛选的催化剂,保持其他合成条件不变,考察醛的种类其对反应收率的影响,结果见表3.

表3 醛对收率的影响

Tab.3 The impact on yield by aldehydes

序号	醛	转化率/%	收率/%
1	正丁醛	89.6	84.5
2	丙烯醛	74.5	56.4
3	戊二醛	56.5	55.3
4	苯甲醛	94.9	93.9

表3表明,苯甲醛充当共氧剂收率最高,可达93.9%,效果较好,这是因为反应过程中醛首先被氧气氧化为过氧酸,然后过氧酸的质子氢与环己酮分子结构中的羰基氧结合,同时过氧酸根与环己酮的羰基碳发生亲核作用,形成过渡中间体,而后过渡中间体发生分子内重排,苯甲酸根作为离去基团离去,同时得到目标产物.所以重排过程是反应过程中一个关键过程.而重排过程中,苯甲酸根结构由于存在羰基与苯环的共轭效应,因此,作为离去基团更加稳定,有利于产物的生成,故而苯甲醛是较好的还原剂.

2.3 催化剂用量的选择

催化剂用量在催化合成中也至关重要. 保持其他反应条件不变, 同 2.2 节, 仅改变加入催化剂的用量, 考察其对收率的影响, 结果见图 2, 加入催化剂, 反应选择性大幅度提高, 当催化剂量增加时, 收率先增加后趋于平稳, 催化剂可降低所需活化能使反应物分子易于活化, 当催化剂达到与底物量相适应的量时, 继续增加其用量不再使反应加速, 反应趋于平衡, 故合适催化剂用量为 80 mg.

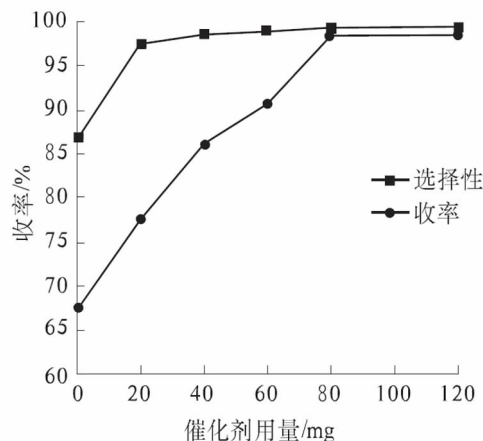


图 2 催化剂用量对反应的影响

Fig. 2 The impact on yield by catalyst dosages

2.4 醛酮摩尔比的影响

向 5 mmol 环己酮, 20 mmol 苯甲醛, 20 mL 1,2-二氯乙烷的反应体系中, 加入 90 mg 所筛选出的催化剂, 50 °C 下加热搅拌 5 h, 改变加入苯甲醛的摩尔量, 考察不同苯甲醛与环己酮的摩尔比对反应收率的影响, 结果见图 3.

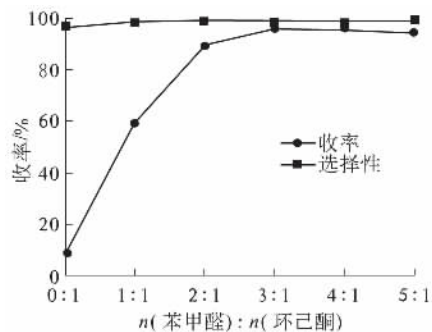


图 3 不同的苯甲醛与环己酮的摩尔比对反应的影响

Fig. 3 The impact on yield by molar ratio of benzaldehyde to cyclohexanone

图 3 表明, 随苯甲醛用量的增加, 反应收率增加, 当苯甲醛与环己酮摩尔比为 3:1 时, 反应收率最高, 继续增加苯甲醛的用量, 收率有所下降, 这是由于苯甲醛用量过大时, 降低了环己酮的相对浓

度, 因此, 适宜的苯甲醛环己酮的摩尔比为 3:1.

2.5 反应温度与反应时间的影响

其他条件同 2.4 节, 改变反应温度以及反应时间, 考察其对收率的影响, 结果见图 4, 反应温度由 45 °C 增加到 55 °C, 反应收率增加, 反应温度继续增加时, 收率降低. 当反应温度过低时, 反应物中活化分子数量太少, 不利于反应进行; 当反应温度过高时, 氧气在反应液中的溶解度下降, 也不利于反应进行. 随着反应的进行, 反应收率增加, 反应进行 4 h 时, 反应收率可达 98.7 %, 反应时间继续增长时, 反应收率不再增加, 所以较佳的反应温度与反应时间分别为 55 °C 与 4 h.

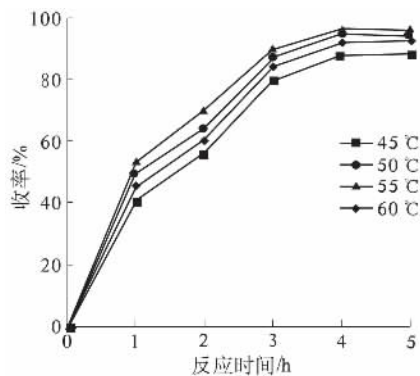


图 4 反应温度与反应时间对反应收率的影响

Fig. 4 The impact on yield by reaction Temperature and reaction time

2.6 氧气流量影响

其他反应条件如 2.5 节, 常温常压下, 仅改变氧气流速, 考察其对反应的影响, 结果见图 5, 当氧气流速增大时, 反应收率先增加后下降, 而过大的氧气流速易将反应原料带出体系, 使收率降低, 所以较佳的氧气流速为 20 mL/min.

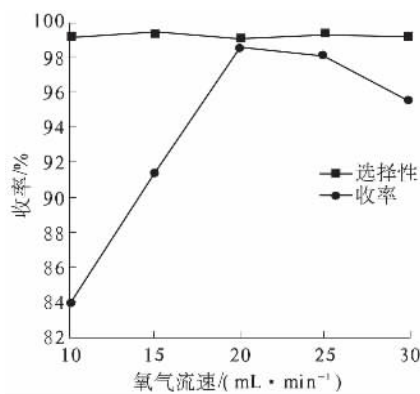


图 5 氧气流速对反应收率的影响

Fig. 5 The impact on yield by oxygen flow rate

2.7 催化剂重复性实验

在单因素所得反应条件下, 对催化剂的重复性进行考察. 结果表明, 新制备的催化剂催化氧化环

己酮制备 ϵ -己内酯,可使环己酮转化率达99.9%, ϵ -己内酯选择性达99.0%,收率达98.8%,对催化剂洗涤、干燥后,重复使用,反应5次后,活性与选择性仍然可以达到97.5%以及96.3%,此催化剂可多次重复使用,适于工业化生产。

2.8 催化剂表征

通过扫描电子显微镜以及X射线衍射仪对催化剂进行表征。结果见图6~7。对比新制备的催化剂的XRD图谱(图6(a))、SEM图谱(图7(a))与重复使用5次后的催化剂的XRD图谱(图6(b))、SEM图谱(图7(b)),重复使用5次后催化剂的XRD峰型以及形貌基本无变化,表明催化剂在使用时结构没被破坏。图6(a)曲线中衍射峰 26.584° 、 33.874° 、 37.949° 在标准图库中分别对应 SnO_2 (PDF NO. 71-0652)的特征峰,其中衍射峰 26.584° 、 33.874° 分别对应于正方晶形 SnO_2 的110与101晶面,说明催化剂含有正方晶型结构;图6(a)曲线中衍射峰 24.200° 、 33.211° 与标准图库中的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (PDF NO. 71-0652)的特征峰相对应,表明催化剂是由正方晶型的 SnO_2 与 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 两种氧化物组成。

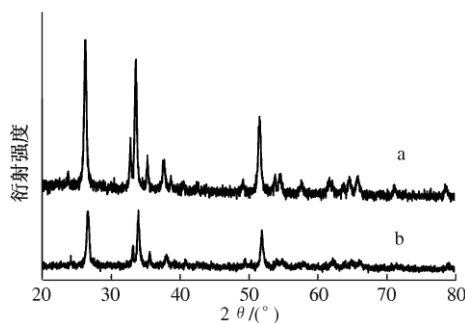
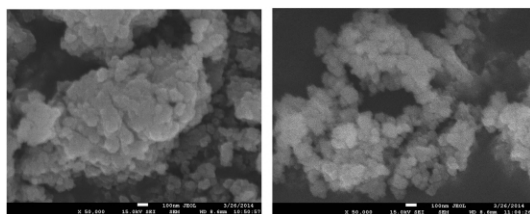


图6 催化剂的XRD表征图谱

Fig. 6 XRD patterns of the catalyst



(a) 新制备的催化剂

(b) 使用5次后的催化剂

图7 催化剂的SEM图

Fig. 7 SEM images of catalyst

2.9 催化机理探讨

催化反应过程如图8所示。 Fe-Sn-O 复合氧化物中铁为过渡金属,铁原子的d轨道中未占用的d电子或空穴较多,催化过程中, Fe-Sn-O 复合氧化物的L酸中心与氧中的孤对电子配位结合,

电子由氧气流入d轨道空穴,并将氧传递给苯甲醛形成过苯甲酸,活化的过苯甲酸上的 H^+ 将环己酮的羰基氧质子化,过氧酸根对羰基碳亲核进攻,进而与相邻的碳原子发生分子内重排,酸根离去,形成目标产物。

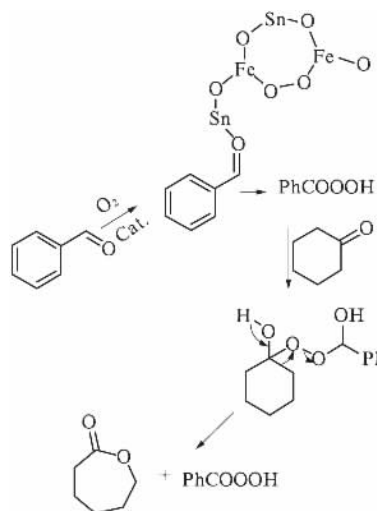


图8 可能的反应机理

Fig. 8 The possible catalytic mechanism

3 结论

实验所制备催化剂 Fe-Sn-O 复合氧化物制备简单,活性及选择性高,重复性好。通过单因素实验得到适宜的反应条件为:

常温常压下,以环己酮用量为5 mmol计, $n(\text{苯甲醛}):n(\text{环己酮}) = 3:1$;催化剂 Fe-Sn-O :1-850-5用量80 mg;1,2-二氯乙烷20 mL;氧气流速20 mL/min;反应温度 55°C 持续反应4 h;环己酮转化率可达99.9%; ϵ -己内酯选择性可达99.0%;收率可达98.8%;催化剂重复使用5次后依然保持较高活性,可使反应收率达96.3%。

SEM、XRD表明催化剂中含有 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 以及正方晶形 SnO_2 ,重复使用5次后形貌基本无变化。

参考文献:

- [1] 黎树根,李长存. ϵ -己内酯产业现状及其应用[J].合成纤维工业,2013,36(1):46-49.
- [2] 杨志旺,马振宏,牛棱渊,等.SBA-15负载硅钨酸催化环己酮 Baeyer-Villiger 氧化[J].催化学报,2011,32(3):463-467.
- [3] 韩巧,卢会杰,王敏灿,等. γ -己内酯的合成研究[J].郑州大学学报(自然科学版),1999,31(2):88-89.
- [4] BAJ S, CHROBOK A, SLUPSKA R. The Baeyer-Villiger

- er oxidation of ketones with bis(trimethylsilyl) peroxide in the presence of ionic liquids as the solvent and catalyst [J]. *Green Chem*, 2009, 11(2): 279–282.
- [5] MARIA E N, ROSSELLA M, ANDREA O, et al. Baeyer-villiger oxidation with potassium peroxomonosulfate supported on acidic silica gel. [J]. *J Org Chem*, 2005, 70(26): 10879–10882.
- [6] KOO D H, KIM M, CHANG S. WO₃ nanoparticles on MCM-48 as a highly selective and versatile heterogeneous catalyst for the oxidation of olefins sulfides and cyclic ketones [J]. *Org Lett*, 2005, 22(7): 5015–5018.
- [7] DUTTA B, JANAN S, BHUNIA S, et al. Heterogeneous Baeyer-Villiger oxidation of cyclic ketone using tert-BuOOH as oxidant [J]. *Appl Catal A*, 2010, 382(1): 90–98.
- [8] LI Yuefang, GUO Mingqi, YIN Shuangfeng, et al. Graphite as a highly efficient and stable catalyst for the production of lactones [J]. *Carbon*, 2013, 55: 269–275.
- [9] YANG Z W, NIU L Y, MA Z H, et al. Fabrication of highly active Sn/W mixed transition-metal oxides as solid acid catalysts [J]. *Transition Met Chem*, 2011, 36(3): 269–274.
- [10] BELAROU L S, SOROKIN A B, FIGUERAS F, et al. Comparative Baeyer-Villiger oxidation of cyclohexanone on Fe-pillared clays and iron tetrasulfophthalocyanine covalently supported on silica [J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2010, 13(4): 466–472.
- [11] CORMA A, NAVARRO M T, RENZ M. Lewis acidic Sn(IV) centers grafted onto MCM-41 as catalytic sites for the Baeyer-Villiger oxidation with hydrogen peroxide [J]. *J Catal*, 2003, 219: 242–246.
- [12] KAWABATA T, OHISHI Y, ITSUKI S, et al. Iron-containing MCM-41 catalysts for Baeyer-Villiger oxidation of ketones using molecular oxygen and benzaldehyde [J]. *J Mol Catal*, 2005, 236: 99–106.

Synthesis of ϵ -caprolactone with Fe-Sn Mixed Oxides as Catalysts

ZHANG Yadong, MA Yongli, MA Jinling, ZHAO Yanyan, JIA Jinfeng

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

Abstract: The ϵ -caprolactone was synthesized by cyclohexanone in the oxygen-benzaldehyde system, Fe-Sn-O mixed oxide prepared by coprecipitation being as catalyst. The proper conditions were obtained by single factor experiments. Based on 5 mmol cyclohexanone at ambient temperature and pressure, the proper conditions were as follows: the molar ratio of benzaldehyde to cyclohexanone being 3:1, the oxygen flow ratio being 20 mL/min, the amount of 1,2-dichloroethane being 20 mL, reaction temperature being 55°C, reaction time being 4 h. The yield of 98.8 % and selectivity of 99.0 % of ϵ -caprolactone were obtained. The structure of the catalyst was characterized by the measures of SEM and XRD. And the catalyst can be reused for five times without significant loss in activity and selectivity.

Key words: Fe-Sn-O mixed oxide; cyclohexanone; benzaldehyde; ϵ -caprolactone

文章编号: 1671-6833(2016)04-0031-05

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的实验研究

常 春, 孔鹏飞, 赵世强

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 以 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 为固体酸催化剂, 考察其在乙醇/甲苯体系中催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的工艺, 探讨了共溶剂甲苯的体积分数、反应温度、催化剂用量以及反应时间对乙酰丙酸乙酯产率的影响, 同时考察了该催化剂对不同碳水化合物化合物的催化作用及其重复利用性. 结果表明: 在甲苯体积分数为 10%, 反应温度为 180 °C, 催化剂用量为 0.8 g, 反应时间为 3 h 时, 纤维素醇解转化为乙酰丙酸乙酯的摩尔产率高达 51.6%; 果糖、葡萄糖、蔗糖和菊糖转化生成乙酰丙酸乙酯的摩尔产率分别为 54.31%、47.3%、51.4% 和 49.6%, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 对碳水化合物醇解生成乙酰丙酸乙酯具有良好的普遍适用性. 该催化剂经回收重复使用 5 次后依然具有良好的催化活性.

关键词: 纤维素; 乙酰丙酸乙酯; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 醇解

中图分类号: TQ352.2

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.007

0 引言

生物质能作为一种可再生能源, 在能源结构系统中的战略地位日益突出. 纤维素是世界上最丰富的天然生物质, 占植物界碳含量的 50% 以上, 植物每年通过光合作用可产生近 1.5 亿吨纤维素类物质, 是自然界取之不尽的可再生资源, 利用纤维素可再生资源转化制备新型绿色生物质基化学品是实现生物质转化利用的重要方式之一^[1]. 乙酰丙酸乙酯是一种新型的绿色生物质基化学品, 具有广泛的工业应用价值, 可由纤维素直接醇解转化而来^[2]. 如何利用纤维素资源生产乙酰丙酸乙酯已经引起该领域的广泛关注. 目前, 用于纤维素醇解反应的催化剂有液体酸、离子液体和固体酸等. 文献 [3] 报道了 0.02 mol/L H_2SO_4 是纤维素醇解作用最好的催化剂, 但该催化剂依然存在污染问题. 文献 [4] 报道了 1-(1-乙烯丙基)-4-甲基咪唑四氟硼酸盐催化纤维素醇解, 该催化剂尽管稳定而且容易回收, 但是制备过程复杂、成本高. 文献 [5] 报道了金属氯化物催化纤维素制乙酰丙酸, 其中以氯化铬的催化效果最好, 但是氯化铬在反应中容易分解生成氧化铬. 文献 [6] 也曾报道了固体酸 USY 催化纤维素生成乙酰

丙酸乙酯, 该催化剂具有热稳定性且易回收, 但乙酰丙酸乙酯的摩尔产率为 14.95%. 因此, 开发“绿色”、低廉且高效的催化剂是实现纤维素醇解过程的关键. 笔者采用金属盐 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 进行纤维素的转化, 该催化剂具有价廉易得、催化效率高、易回收等优点. 继而对以 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 为固体酸催化剂催化纤维素制备乙酰丙酸乙酯的工艺进行研究, 为固体酸在该领域中的应用提供参考.

1 实验部分

1.1 实验材料及设备

纤维素(粒径 90 μm); 乙酰丙酸乙酯, 分析纯, 上海阿拉丁有限公司; 无水乙醇, 分析纯, 天津风船试剂有限公司; 十八水合硫酸铝, 分析纯, 天津风船试剂有限公司. 实验采用容积为 100 mL 间歇式高压反应釜(河南省予华仪器有限公司), 气相色谱仪(杭州科晓 GC1690) 和液相色谱仪(Agilent 1260).

1.2 实验步骤

将 0.8 g 纤维素和一定比例的 40 mL 甲苯/乙醇以及硫酸铝催化剂加入到 100 mL 高压釜中, 然后将高压釜加热至设定温度反应一定时间(将达到设定温度时刻记为零时), 随后迅速冷却中止反应. 反应后的产物经真空抽滤分离得到液相

收稿日期: 2015-09-15; 修订日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21176227)

作者简介: 常春(1973—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事生物质能源化方面的研究, E-mail: chun-chang@zzu.edu.cn.

产物和固相产物,将得到的液相产物用无水乙醇定容至 100 mL,再经 0.22 μm 微孔有机滤膜过滤,之后分别使用气相色谱仪和液相色谱仪进行分析。

1.3 产物分析及计算

利用气相色谱仪(GC1690),对液相产物中的乙酰丙酸乙酯(ethyl levulinate, EL)进行定量分析。气相色谱的条件为:FFAP 毛细管柱(30 m \times 0.32 mm \times 0.33 μm ,大连中汇达科学仪器有限公司),氢火焰离子化检测器(FID)。程序升温:柱温 90 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min,然后以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速度升至 210 $^{\circ}\text{C}$,再保持 10 min,气化室温度 240 $^{\circ}\text{C}$,检测器温度 250 $^{\circ}\text{C}$,进样量 1 μL ,分流进样,载气为氮气。

$$\text{EL 摩尔产率} = \frac{m_1/M_1}{m_0/M_0} \times 100\%.$$

采用高效液相色谱仪对液相产物中的 5-乙氧基甲基糠醛(5-ethoxymethyl furfural, EMF) 和乙酰丙酸(levulinic acid, LA) 进行定量分析。液相色谱条件:Agilent 1260 Series HPLC 系统,HPX-87H 柱(300 mm \times 7.8 mm),示差检测器,紫外检测器(280 nm),柱温为 65 $^{\circ}\text{C}$,流动相为 5 mM H_2SO_4 ,流速为 0.6 mL/min,进样量为 20 μL 。

$$\text{EMF 摩尔产率} = \frac{m_2/M_2}{m_0/M_0} \times 100\%.$$

$$\text{LA 摩尔产率} = \frac{m_3/M_3}{m_0/M_0} \times 100\%.$$

式中: m_0 、 m_1 、 m_2 和 m_3 分别为纤维素、EL、EMF 和 LA 的质量,g; M_0 为纤维素的摩尔质量,162 g/mol (以单糖计); M_1 为 EL 的摩尔质量,144 g/mol; M_2 为 EMF 的摩尔质量,154 g/mol; M_3 为 LA 的摩尔质量,116 g/mol。

1.4 催化剂的回收

除去产物定量分析所用的反应液,将剩余的反应液置于旋转蒸发仪中蒸去其中的乙醇和甲苯,直至形成稠密溶液。然后将二氯甲烷加入其中并均匀摇晃,硫酸铝被分离出来。在将深棕色的二氯甲烷去除后,固体硫酸铝用二氯甲烷多次洗涤,直至溶液变成无色,最后将得到的硫酸铝在室温下干燥回收。

2 结果与讨论

2.1 共溶剂的影响

2.1.1 共溶剂的选取

为了使酸催化反应过程生成更多的目标产物

并减少副产物的产量,学者们尝试着在反应体系中加入共溶剂。文献[7]以稀硫酸为催化剂考察不同的反应体系对生物质水解过程中产物的影响。研究发现:在酸催化过程中加入弱极性有机溶剂作为共溶剂,一方面使脱水过程减弱,另一方面能促进糖类化合物更快地降解,从而提高乙酰丙酸乙酯的产率。甲苯(极性为 2.4)是一种常见的弱极性有机溶剂,而且沸点较低(110.6 $^{\circ}\text{C}$),便于通过蒸馏回收。文献[8]在对一系列有机溶剂进行筛选时,确定甲苯是碳水化合物醇解产物中 EL 的优良萃取剂。因此,本试验选用甲苯作为共溶剂。

2.1.2 共溶剂体积分数的影响

在甲苯/乙醇总体积为 40 mL、催化剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 用量 0.6 g 和纤维素 0.8 g、反应温度 180 $^{\circ}\text{C}$ 和反应时间 2 h 的条件下,考察甲苯体积分数对产物产率的影响,其结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,甲苯的体积分数由 0% 增加到 50% 时,EL 的产率先升高后降低;在 10% 处,EL 摩尔产率达到最大值 45.5%。这是因为少量的共溶剂能够将中间产物 5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethyl-furfural, HMF) 保护起来,之后在催化剂的作用下开环生成 LA,LA 进一步酯化生成 EL,从而抑制了副反应的发生以及腐殖质的生成^[9]。然而随着甲苯体积分数的增加,EL 的产率逐渐下降,这可能是因为中间产物 HMF 未能在催化剂的作用下开环生成 LA,而是与乙醇醚化生成 EMF,并且 EMF 在甲苯的保护下比较稳定。这可能是因为甲苯能够提供一个疏水的环境,阻止了 EMF 进一步降解。由图 1 可以看出,甲苯体积分数为 10% 时,EL 的摩尔产率最高,故后续试验均采用体积分数为 10% 作为甲苯的加入量。

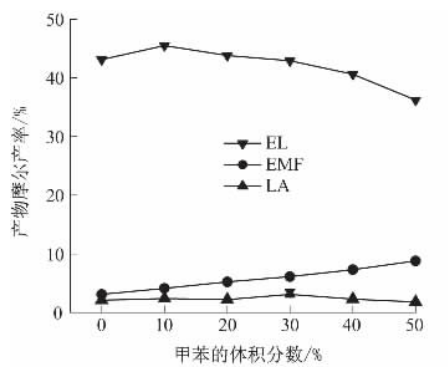


图 1 甲苯体积分数对产物产率的影响

Fig. 1 Effect of toluene content on the products yields

2.2 反应温度的影响

在甲苯体积分数 10%、催化剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 用量 0.6 g 和纤维素 0.8 g 及反应时间 2 h 的条件下,考察反应温度对产物产率的影响,其结果如图 2 所示. 由图 2 可以看出,当温度由 160 °C 升到 170 °C 时,EMF 的摩尔产率由 4.2% 升至 5.1%,这可能是因为 170 °C 时有利于纤维素降解为单糖,进而发生转化. 但由于 EMF 在高温下不稳定^[10],所以当温度超过 170 °C 时,EMF 的产率逐渐下降. EL 的摩尔产率在 180 °C 达到最大值,为 45.5%. 当温度超过 180 °C 时,EL 产率逐渐下降,这是因为 EL 在高温下不稳定,容易发生副反应^[11],同时腐殖质增多. 并且由于 LA 与乙醇容易发生酯化反应,因此反应过程中 LA 含量一直较少. 因此,选取 180 °C 作为 EL 醇解体系的适宜条件.

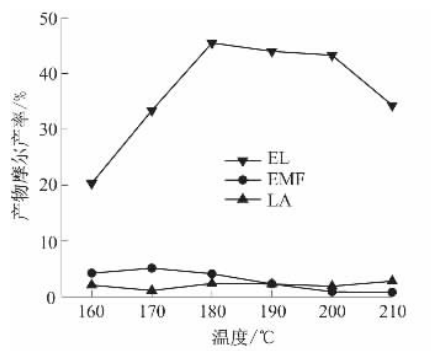


图2 反应温度对产物产率的影响

Fig.2 Effect of reaction temperature on the products yields

2.3 催化剂用量的影响

在甲苯体积分数 10%、纤维素 0.8 g、反应温度 180 °C 和反应时间 2 h 的条件下,考察催化剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 用量对产物产率的影响,其结果如图 3 所示. 从图 3 可看出,EMF 的摩尔产率在催化剂用量 0.2 g 时达到最大值 9.0%,而后继续增加催化剂的量,EMF 的产率下降,这表明催化剂酸度较大时不利于 EMF 生成. EL 的摩尔产率随着催化剂用量的增加而升高,在 0.8 g 时达到最大值 47.0%,而后基本不变,这说明此时反应达到平衡.

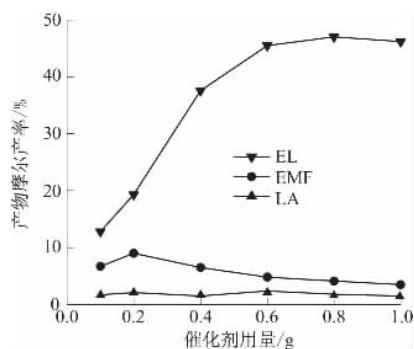


图3 催化剂用量对产物产率的影响

Fig.3 Effect of catalyst dosage on the products yields

2.4 反应时间的影响

在甲苯体积分数为 10%、催化剂量为 0.8 g 和纤维素为 0.8 g、反应温度为 180 °C 的条件下,考察反应时间对产物产率的影响,其结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出,纤维素转化为 EMF 在 1 h 时达到最大值,可能是因为纤维素降解速度较慢,而且降解生成的糖一部分转化为 EMF,一部分转化为 EL. 1 h 后,EMF 产率下降,这是因为较低的温度和较长的反应时间有利于 EMF 的生成,而 180 °C 远远高于 EMF 的最佳生成温度^[12]. EL 的摩尔产率随着时间的延长逐渐增大,在 3 h 时达到最大值 51.6%,并达到反应平衡.

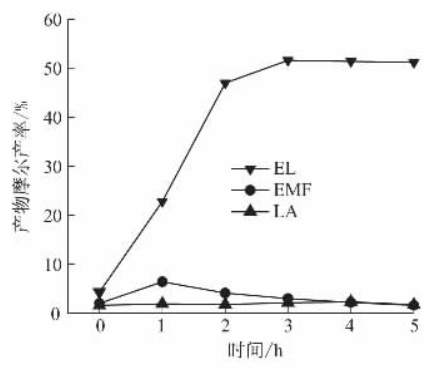


图4 反应时间对产物产率的影响

Fig.4 Effect of reaction time on the products yields

2.5 不同原料的影响

在甲苯体积分数为 10%、催化剂量为 0.8 g、反应温度为 180 °C 和反应时间为 3 h 的条件下,考察催化剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 对其他碳水化合物的催化作用,其结果如表 1 所示. 从表中看出,分别以果糖和葡萄糖为单元的糖类转化生成的 EL 产率相差不多. 这表明, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 在生物质醇解生成 EL 的转化中具有良好的普遍适用性. 这是因为 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 水解产生的 Al^{3+} 是 Lewis 酸中心,具有使葡萄糖向果糖转化的异构功能;而 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 在乙醇溶液中又能够提供 Bronsted 酸中心,促进果糖脱水转化为羟甲基糠醛,进而转化为 EL^[13].

表1 不同原料对合成乙酰丙酸乙酯的影响

Tab.1 Effect of various substrates on synthesis of EL %

原料	EL 摩尔产率	EMF 摩尔产率	LA 摩尔产率
纤维素	51.6	3.0	2.1
果糖	54.3	1.3	2.1
葡萄糖	47.3	2.8	1.7
蔗糖	51.4	2.1	2.0
菊糖	49.6	1.3	2.1

2.6 催化剂的重复利用

将回收的催化剂在甲苯体积分数为 10%、催化剂量为 0.8 g 和纤维素为 0.8 g、反应温度为

180 ℃ 和反应时间为 3 h 的条件下,考察其重复利用性. 由图 5 可知,催化剂在重复利用 5 次后仍具有良好的活性.

2.7 纤维素转化生成乙酰丙酸乙酯的途径

结合实验结果及相关文献,提出在甲苯/乙醇体系中 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 催化纤维素降解的可能反应路径,如图 6 所示. 该过程是一个复杂的、连续的多步串联反应: 在 B 酸作用下,纤维素水解成葡萄糖; 之后在 L 酸作用下,葡萄糖异构化为果糖,同时 B 酸又能够促进果糖脱水,从而进一步转化,最后生成 EL.

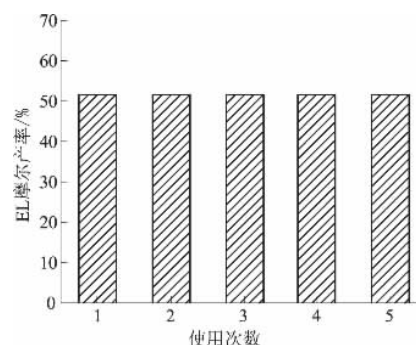


图 5 催化剂重复使用次数对 EL 产率的影响
Fig. 5 Effect of catalyst reuse times on EL yields

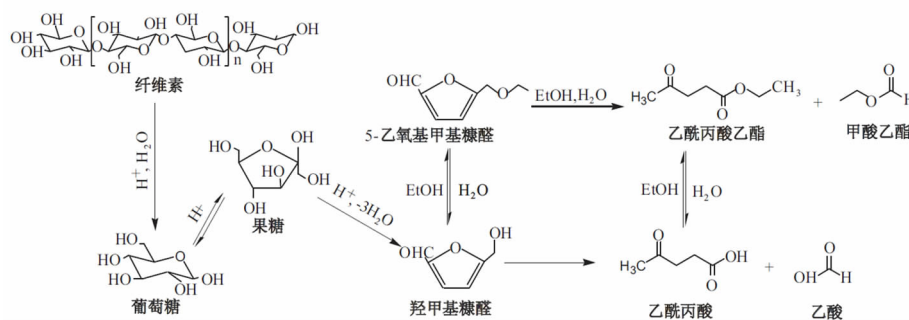


图 6 乙醇/甲苯体系中 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 催化降解纤维素的反应路径

Fig. 6 Reaction pathway for $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ catalyzed conversion of glucose in ethanol/ methylbenzene medium

3 结论

(1) 固体酸 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 能够提供 Lewis 酸中心和 Bronsted 酸中心,选择性催化纤维素合成乙酰丙酸乙酯. 在甲苯体积分数为 10%, 反应温度为 180 ℃, 催化剂用量为 0.8 g, 反应时间为 3 h 的条件下, 纤维素转化为 EL 的摩尔产率最高, 为 51.6 %.

(2) 适量共溶剂甲苯的引入,能够在一定程度上保护中间产物羟甲基糠醛,进而使 EL 产率增加.

(3) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 对果糖、葡萄糖、蔗糖和菊糖等转化生成 EL 具有良好的普遍适用性; 而且,经回收重复使用 5 次后依然具有良好的催化活性.

(4) 作为典型的酸催化反应,纤维素水解反应所需的催化剂必须具有足够的酸量、酸强度. 兼有 Lewis 酸中心和 Bronsted 酸中心的催化剂能够有效催化生物质醇解制备乙酰丙酸酯.

参考文献:

- [1] 张智峰. 纤维素改性研究进展 [J]. 化工进展, 2010, 29(8): 1493-1501.
- [2] CHANG C, XU G Z, JIANG X X. Production of ethyl levulinate by direct conversion of wheat straw in ethanol media [J]. Bioresource technology, 2012, 121: 93-99.
- [3] WU X Y, FU, LU X Y. One-pot preparation of methyl levulinate from catalytic alcoholysis of cellulose in

near-critical methanol [J]. Carbohydrate research, 2012, 358: 37-39.

- [4] AMARASEKARA A S, WIREDLI B. cidic ionic liquid catalyzed one-pot conversion of cellulose to ethyl levulinate and levulinic acid in ethanol-water solvent system [J]. Bioenergy research, 2014, 7(4): 1237-1243.
- [5] PENG L C, LIN L, ZHANG J H, et al. Catalytic conversion of cellulose to levulinic acid by metal chlorides [J]. Molecules, 2010, 15(8): 5258-5272.
- [6] 孙培勤, 赵世强, 常春, 等. 固体酸 USY 催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的实验研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 22-26.
- [7] GARVES K. Acid catalyzed degradation of cellulose in alcohols [J]. Journal of wood chemistry and technology, 1988, 8(1): 121-134.
- [8] TANG X, SUN Y, ZENG X H, et al. Novel Process for the extraction of ethyl levulinate by toluene with less humins from the ethanolysis products of carbohydrates [J]. Energy fuels, 2014, 28(7): 4251-4255.
- [9] WANG H L, DENG T S, WANG Y X, et al. Efficient catalytic system for the conversion of fructose into 5-ethoxymethylfurfural [J]. Biomass technology, 2013, 136: 394-400.
- [10] YANG Y, HU C W, MAHDI M. Abu-Omar. Conversion of glucose into furans in the presence of AlCl_3 in an ethanol-water solvent system [J]. Bioresource technology, 2012, 116: 190-194.

- [11] XU H, CAROLINE L, ALFONS L, et al. Reaction pathways of glucose during esterification: effects of reaction parameters on the formation of humin type polymers [J]. *Bioresource technology*, 2011, 102(21): 10104–10113.
- [12] ZHANG Z H, WANG Y M, FANG Z F, et al. Synthesis of 5-ethoxymethylfurfural from fructose and inulin catalyzed by a magnetically recoverable acid catalyst [J]. *Chem Plus Chem*, 2014, 79(2): 233–240.
- [13] XU X L, ZHANG X L, ZOU W J, et al. Conversion of carbohydrates to methyl levulinate catalyzed by sulfated montmorillonite [J]. *Catalysis communications*, 2015, 62: 67–70.

Study on Production of Ethyl Levulinate from Cellulose Catalyzed by Solid Acid $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

CHANG Chun, KONG Pengfei, ZHAO Shiqiang

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

Abstract: Ethyl levulinate (EL) was prepared by $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ as solid acid catalyst from cellulose in ethanol. The effects of different parameters such as the content of organic solvent, reaction temperature, catalyst dosage and reaction time on EL yield were studied. And the catalysis and the effect of catalyst reuse times on EL yield were further investigated. The optimal reaction conditions for alcoholysis reaction were as follows: ethanol/toluene volume ratio 9:1, reaction temperature 180 °C, catalyst dosage 0.8g, reaction time 3h. The yield of EL is up to 51.6% under this condition. And under the same condition, the yields of EL from fructose, glucose, sucrose, and inulin were 54.3%, 47.3%, 51.4% and 49.6%, respectively. All the results showed that $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ not only had good universal applicability, but still remained high catalytic activity after being used for five times.

Key words: cellulose; ethyl levulinate; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; alcoholysis

(上接第14页)

- [9] DAI N Y, LAO K W, WONG M C, et al. Hybrid power quality conditioner for co-phase power supply system in electrified railway [J]. *IET power electron*, 2012, 5(7): 1084–1094.
- [10] LAO K W, DAI N Y, LIU W G, et al. Hybrid power quality compensator with minimum DC operation voltage design for high speed traction power systems [J]. *IEEE Trans. on power electron*, 2013, 28, (4): 2024–2036.
- [11] 陈民武, 李群湛, 张丽艳. 新型 YNvd 接线变压器阻抗匹配与等值模型研究 [J]. *变压器*, 2010, 47(6): 23–26.

Electrical Characteristics of Single-phase and Three-phase Combined Transformer Used in Electrified Railway

XIA Yankun

(School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: In this paper, one single and three phase combined transformer power supply system applied to electrified railway was studied. The structure and principle of single and three phase combined power supply system and the negative sequence were analyzed. Matlab/Simulink is used to simulate the traction transformer and the compensation scheme. The simulation shows the correctness of the analysis of single and three phase combined power supply system. It also shows the compensation scheme for single and three phase combined co-phase supply system is effective.

Key words: combined transformer; electrified railway; capacity utilization ratio; negative sequence; compensation.

基于聚酰胺树枝状分子的 QCM 甲醛传感器研究

陈 杨, 李志鑫, 段智明, 徐甲强

(上海大学 理学院化学系, 上海 200444)

摘 要: 以乙二胺为核通过 Michael 加成和酰胺化缩合反应合成了 0.5~4.0 代的聚酰胺树形分子, 采用核磁共振(NMR)、红外光谱(FI-IR)进行了结构表征, 并将其作为敏感材料与 QCM(石英晶体微天平)换能器相结合构建谐振式甲醛传感器。研究表明: 由于该树状分子表面富氨基官能团, 对甲醛有着良好的特异性响应, 其高度的黏性, 也使其能稳定地在 QCM 表面成膜, 经过反复测定, 该传感器具有高度的重复稳定性。

关键词: 聚酰胺; 树枝状分子; QCM; 甲醛检测; 气体传感器

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.008

0 引言

树形分子最早被提出和研究是在 20 世纪 80 年代, 科学家通过迭代方法得到了分子分布结构, 提出重复合成思想^[1]。到 1985 年 Tomalia 首次提出聚酰胺树枝状分子的概念^[2]。聚酰胺树枝状分子是一种新型高分子化合物, 它是通过 Michael 加成的重复反应得到具有树枝状结构的超大分子: 分子形状大小可控, 内部有空腔, 末端官能团可修饰。不同于传统的有机小分子, 它处于中、大分子交界范围, 并可以发展成为纳米级粒子载体^[3]。这些优点使聚酰胺树枝状分子在纳米杂化材料、液晶高分子、自组装高分子、新型医药分子和催化剂等领域被科学家重视^[3-4]。聚酰胺树形分子有自己的特色: 良好的水溶性、溶液黏度低、表面功能基团易修饰、无毒副作用和生物相容性好等。

石英晶体微天平(QCM)技术发展于 20 世纪 60 年代, 是一种利用石英晶振对质量的敏感性原理制备的新型传感器^[5]。晶振表面吸附待测物质引起质量增加从而发生谐振频率的漂移。现今, QCM 技术已经发展到几乎涵盖了每个领域^[6]。它具有如下优点: 响应灵敏度高、选择性良好、便于实现自动化、仪器设置简单、操作使用方便等。也正是这些优点引起了各国科学家们的研究兴趣, 使之成为传感器领域的热门之一^[7]。

课题组基于 QCM 平台开发了湿度、甲醛、甲基膦酸二甲酯(DMMP)、甲苯等传感器^[8-9], 取得了较大的进展。而功能化的氨基材料也是近年来研究的热点^[10]。笔者结合 PAMAM 和 QCM 的优点, 通过反复的 Michael 加成和酰胺化缩合反应制得了 0.5~4.0 代聚酰胺树枝状分子(PAM-AM), 将其作为敏感材料应用于 QCM 平台上, 开发出一种重复性好、选择性佳、灵敏度高的甲醛传感器, 得到了较好的结果。

1 实验

1.1 原料与仪器

乙二胺(EDA)(A. R.)、丙烯酸甲酯(MA)(A. R.)、甲醇(A. R.)、去离子水。

25 mL 蒸馏瓶若干、样品瓶若干, 真空旋蒸仪一台、QCM 元件、电子天平、恒温磁力搅拌器、超声波清洗仪等。

1.2 树枝状聚酰胺分子的合成

(1) 0.5 代树枝状 PAM 分子的合成。于 25 mL 蒸馏瓶中取 1.0 g EDA, 溶解于 2.0 g 甲醇, 制得甲溶液(冰水浴中匀速搅拌); 称取 7.17 g MA, 溶于 3 g 甲醇, 制得乙溶液。甲乙溶液中 $n(\text{MA}):n(\text{EDA})=5$ 。将乙溶液用滴液漏斗缓慢滴加至甲溶液, 磁力搅拌器搅拌。滴加完毕后将装有溶液的 25 mL 蒸馏烧瓶转移至 35 °C 水浴锅内, 匀速搅

收稿日期: 2015-11-26; 修订日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371021; 51301101)

通信作者: 徐甲强(1963—), 男, 河南卫辉人, 上海大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为气湿敏传感器、电池材料、催化材料等功能材料, E-mail: xujiaqiang@shu.edu.cn。

拌,氩气为保护气,在此条件下反应 72 h. 72 h 后,45 °C 下在真空旋蒸仪中旋蒸除去剩余 MA 及甲醇,最后得 0.5 代聚酰胺(0.5G PAM) 分子产物,生成反应方程式如图 1 所示.

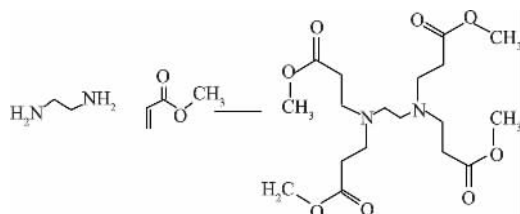


图1 0.5 代 PAM 合成图

Fig.1 Synthesis of 0.5G PAM

(2) 1.0~4.0 代树枝状 PAM 分子的合成. 于 25 mL 蒸馏瓶中称取 1.7 g EDA,溶于 3.0 g 甲醇制得甲溶液,置于冰水浴(0~5 °C)中匀速搅拌. 称取 1.0 g 0.5 代 PAM,溶于 4 g 甲醇得到乙溶液. 甲乙溶液中 $n(\text{EDA}) : n(0.5\text{G PAM}) = 10$. 乙溶液用滴液漏斗缓慢滴加进甲溶液中. 25 mL 蒸馏烧瓶转移至 35 °C 水浴锅内,氩气为保护气,磁力搅拌器匀速搅拌 72 h. 然后在 45 °C 下在旋蒸仪旋蒸除去剩余 EDA 及甲醇,最后得到 1.0 代 PAM 聚酰胺树形分子. 按 0.5 代 PAM 的合成方法,将 MA 与 1.0 代 PAM 的摩尔比定为 10,重复此前步骤,得到 1.5 代产物. 如此逐步反应,最终制得 1.0~4.0 代 PAM 分子. 4.0 代 PAM 分子如图 2 所示.

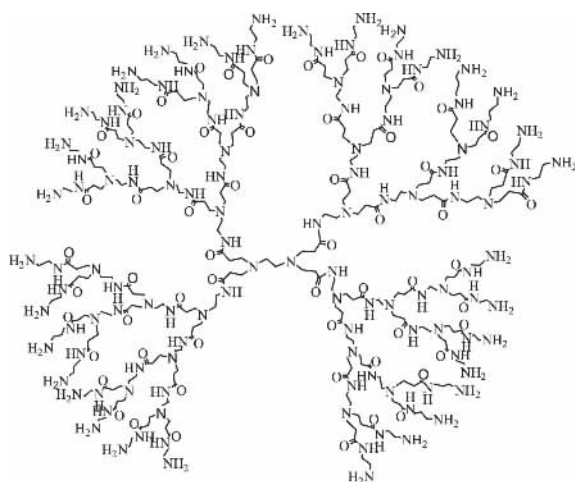


图2 4.0 代 PAM 分子结构图

Fig.2 Molecular structure of 4.0G PAM

1.3 IR 图谱分析

采用日本岛津傅立叶变换红外光谱仪表征合成产物的化学键,识别其中官能团. 扫描范围: 400~4 000 cm^{-1} ,分辨率: 4 cm^{-1} ,样品采用 KBr 压片制成.

1.4 核磁共振氢谱分析

采用核磁共振仪,以氘代氯仿为溶剂,配制成树形分子溶液,进行 ^1H NMR 测试,以确认合成分子结构.

1.5 涂覆后 QCM 元件的气敏性能的测试

(1) 元件制作. 实验采用成都威斯特传感技术有限公司生产的石英晶体微天平,基频 10 MHz. 将晶振置于乙醇溶液中超声 20 min 后用去离子水冲净(如此重复两次),在红外干燥箱里干燥 10 min 备用. 取 2.0 代聚酰胺树枝状分子用乙醇溶解得相应浓度的目标溶液,再用微型注射器涂覆至石英天平表面,干燥后得测试元件若干.

(2) 甲醛响应重复性测试. QCM 元件连接在检测仪器上,对同一元件重复进行低浓度甲醛的测试响应. 以此判断 QCM 的响应灵敏度及其重复性好坏.

(3) 对 VOCs 气体的选择性检测. 依次将甲醛气体换为同浓度的丙酮、甲基磷酸二甲酯(DMMP)、乙醇、甲苯、苯对同一 QCM 元件进行测试,判断其对不同气体响应的选择性.

(4) 对甲醛气体进行阶梯进样. 甲醛气体浓度成倍依次增加,观察 QCM 的响应曲线,以此判断 QCM 对不同浓度甲醛的敏感性.

2 结果与讨论

2.1 红外图谱分析

为了证明所合成的产物中含有目标官能团,笔者进行了红外光谱表征. 以 0.5 代 PAM 分子为例,如图 3 所示,在 2 955 cm^{-1} 和 2 838 cm^{-1} 分别出现了亚甲基的不对称伸缩振动和对称伸缩振动特征峰,而 1 443 cm^{-1} 处出现了亚甲基的弯曲振动吸收峰,由此证明了亚甲基的存在;在 1 749 cm^{-1} 出现的强吸收峰是羰基的伸缩振动峰,证明了羰基的存在;在 1 200 cm^{-1} 附近和 1 186 cm^{-1} 处出现了酯基的对称和不对称伸缩振动峰,证明了酯基的存在.

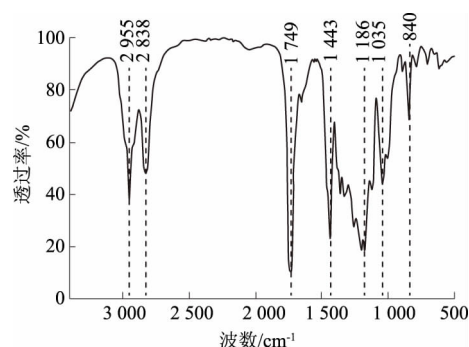


图3 0.5 代 PAM 分子红外表征图

Fig.3 FI-IR of 0.5 generation PAM

2.2 核磁共振氢谱分析

对提纯产物进行 $^1\text{H-NMR}$ 表征, 氘氯为溶剂. 0.5 代分子核磁氢谱图如图 4 所示, 以 0.5 代 PAM 分子为例, 其 $^1\text{H-NMR}$ 谱图中 4 个峰面积比为 4:2:2:1, 与目标结构中氢原子的数目比相符. 化学位移 3.6 左右处出现的单峰为末端甲基上的 H, 化学位移 2.7、2.3 左右出现的三重峰分别为连接羰基和季胺的亚甲基上的 H, 在 2.5 左右对应的是两个氮原子间亚甲基上的 H. 没有杂峰出现表明合成产物得到了纯化.

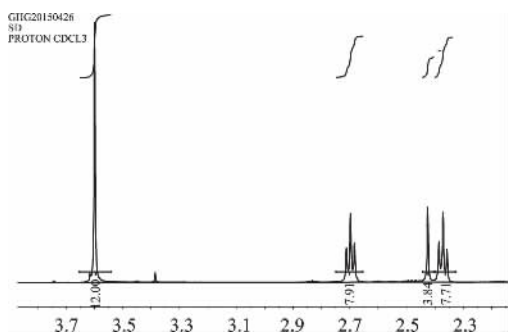


图 4 0.5 代分子核磁氢谱图

Fig. 4 Molecular H-NMR of 0.5 generation PAM

2.3 气敏性能测试

2.3.1 低浓度甲醛重复性测试

图 5 是以 2.0 代聚酰胺树枝状分子为敏感材料制作 QCM 传感器, 并将其置于浓度为 37 mg/m^3 的甲醛环境中的响应性能测试图. 由图 5 可以看出, 2.0 代聚酰胺树枝状分子材料对于 37 mg/m^3 的甲醛气体具有快速可逆的响应, 响应时间为 5 ~ 10 s, 恢复时间为 10 ~ 15 s. 在重复测试中, 可以看到频率的漂移在几赫兹左右, 响应相当稳定. 该敏感材料对甲醛气体具有高的灵敏度和可逆的响应性能.

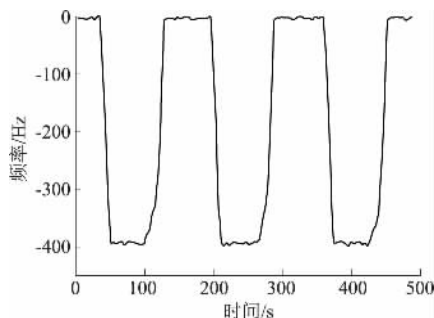


图 5 低浓度甲醛进样测试响应

Fig. 5 Responses of PAM to 37 mg/m^3 HCHO

2.3.2 对 VOCs 气体的选择性测试

图 6 是以 2.0 代聚酰胺树枝状分子作为敏感材料制作的 QCM 传感器, 分别对 37 mg/m^3 的甲

醛、丙酮、DMMP、乙醇、甲苯、苯的响应测试图. 从图中可以看到, 该传感器对 37 mg/m^3 的甲醛响应值接近 400 Hz, 对于其它气体的响应值均不超过 100 Hz, 这说明传感器对甲醛的选择性优良.

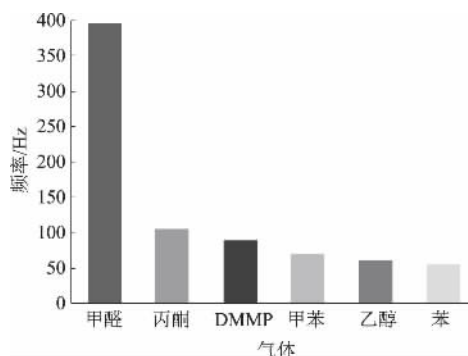


图 6 VOCs 气体选择性测试响应

Fig. 6 Responses of PAM to various gases.

2.3.3 低浓度甲醛阶梯进样测试

图 7 是以 2.0 代聚酰胺树枝状分子为敏感材料制成的 QCM 传感器对甲醛阶梯进样的响应测试图. 每次进样 7.5 mg/m^3 , 可见每次响应值增加约 80 Hz, 并且随着甲醛浓度的增加, 响应值是直线上升的.

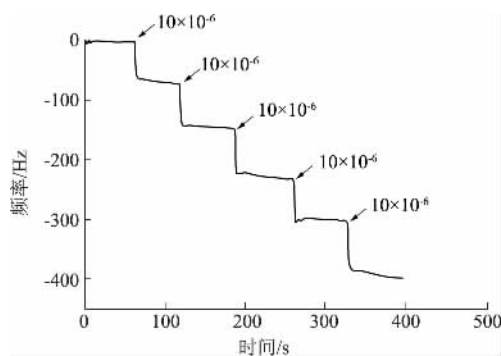


图 7 低浓度甲醛阶梯进样测试响应图

Fig. 7 Responses of PAM to increasing concentration HCHO

2.3.4 不同代数 PAM 对甲醛响应测试

为了验证不同代数的树形分子对甲醛分子的响应性能图, 合成了 1.0 ~ 4.0 代的树形分子, 并对其性能做了对比. 如图 8 所示, 可以看出, 从 1.0 ~ 2.0 代, 又有氨基分子数的增加, PAM 作为传感器材料, 其对 37 mg/m^3 甲醛气体响应值由 348 Hz 上升至 395 Hz, 而从 3.0 代以后又会出现较大的下降. 其原因是: 当树形分子表面的氨基基团密度过高时, 它本身较易吸附其它干扰物, 如水分子、二氧化碳等使其吸附性能大大降低. 因此, 2.0 代聚酰胺树枝状分子作为敏感材料是最优选择.

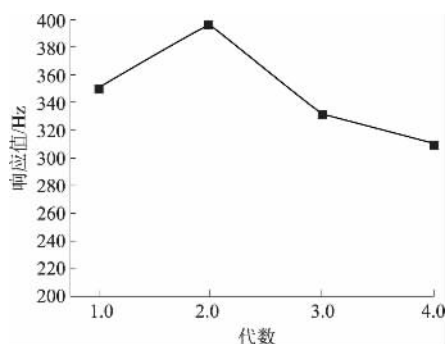


图8 不同代数树形分子对甲醛响应测试图

Fig.8 Responses of different generations of PAM to HCHO

3 结论

(1) 通过 Michael 加成反应和酰胺化反应在温和的条件下合成了树枝状聚酰胺分子. 红外光谱和核磁共振谱的结果证实了聚酰胺树枝状分子的合成.

(2) 将树形分子的研究与应用扩展到气体传感器领域,以聚酰胺树枝状分子为敏感材料的甲醛 QCM 传感器经反复测定灵敏度有较大提高;响应时间在 10 s 以内;重复性好;选择性好、对甲醛的响应值比其他 VOCs 气体的 4 倍以上;制作使用简单,成本较低.

参考文献:

- [1] BUHLEIER E W, WEHNER W, VOGTLE F. "Cascade" and "nonskid-chain-like" syntheses of molecular cavity topologied [J]. *Synthesis*, 1978, 2 (4): 155 - 158.
- [2] TOMALIA D A, BAKER H, DEWALD J, et al. A new class of polymers: starburst-dendritic macromolecules [J]. *Polym. J*, 1985, 17: 117 - 132.
- [3] ESFAND R, TOMALIA D A. Poly (amidoamine) (PAMAM) dendrimers: from biomimicry to drug delivery and biomedical applications [J]. *Drug Discov today*, 2001, 6(8) : 427 - 436.
- [4] HAN L, HUANG R Q, LIU S H. Peptide-Conjugated PAMAM for targeted doxorubicin delivery to transferrin receptor overexpressed tumors [J]. *ACS publications*, 2010, 32(5) : 2156 - 2165.
- [5] SAUERBERY G. The use of quartz oscillators for weighing thin layers and for microweighing [J]. *Z Phys*, 1959, 155: 206 - 222
- [6] 王振强, 杨明庆, 贺军辉, 等, 不同种类敏感膜修饰的 QCM 气体传感器研究现状 [J], *化学进展*, 2015, 27(2/3) : 251 - 266.
- [7] 白鹏利, 陈名利, 常智敏. 基于 QCM 技术的甲醛传感器研究进展 [J]. *材料导报*, 2015, 29 (26) , 110 - 112.
- [8] ZHU Y H, LI H, XU J Q, et al. Monodispersed mesoporous SBA-45 with novel morphologies: Controllable synthesis and morphology dependence of humidity sensing [J]. *Cryst Eng Comm*, 2011, 13, 402 - 405.
- [9] ZHENG Q, ZHU Y H, XU J Q, et al. , Fluoroalcohol and fluorinated-phenol derivatives functionalized mesoporous SBA-45 hybrids: high-performance gas sensing toward nerve agent [J]. *Journal of materials chemistry*, 2012, 22: 2263 - 2270
- [10] 范忠雷, 李瑞瑞. 表面铜离子印迹聚胺硅胶材料的吸附行为 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36 (6) : 30 - 37.

Research on the QCM Formaldehyde Sensor Based on Polyamide Dendrimers

CHEN Yang, LI Zhixin, DUAN Zhiming, XU Jiaqiang

(Department of Chemistry, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: By using ethylenediamine as a core, we synthesized 0.5 to 4.0 generation of polyamide dendrimers with Michael addition and amidation condensation reaction. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Fourier Infrared Spectrum (FI-IR) were employed to characterize the structural of polyamide dendrimers. Polyamide dendrimers acting as sensitive material was combined with transducer of QCM(quartz crystal microbalance) to build a microgravimetric formaldehyde sensor. The research results showed that: the QCM sensor had a good specificity response to formaldehyde, for the rich amino functional groups on the molecular surface. The high viscosity of the dendrimers made it steady on the QCM surface and the sensor presented repetitive stability in repeated measurements.

Key words: polyamide; dendrimer; QCM; formaldehyde detection; gas sensor

文章编号: 1671-6833(2016)04-0040-04

稳定性锆镁白云石合成材料的制备、结构和性能研究

孟 维, 马成良, 葛铁柱, 赵 飞, 钟香崇

(郑州大学 高温材料研究所 河南省高温功能材料重点实验室, 河南 郑州 450052)

摘 要: 以白云石、菱镁矿、硅石和锆英石为原料, 采用二步煅烧和消化工艺制备出了 CaO 含量为 35%, C/S 比(CaO/SiO_2 分子比) 为 2.5, ZrO_2 含量分别为 2%、4%、6%、8% 的稳定性锆镁白云石合成材料. 研究了烧成过程中材料的物相变化, 测定了 1 500 ℃、1 550 ℃、1 600 ℃、1 650 ℃ 烧后材料的体积密度、显气孔率、线收缩率和抗水化性, 并采用 SEM 分析了材料的显微结构. 结果表明: 1 000 ℃ 时, 锆英石分解生成 CaZrO_3 , 1 100 ℃ 后硅酸钙开始生成, 1 300 ℃ 后 CaO 完全反应; 随烧成温度提高, 材料的致密度提高, 1 600 ℃ 烧后材料的体积密度增加到 $3.11 \sim 3.16 \text{ g/cm}^3$; 1 650 ℃ 烧后材料的水化增重为 0.03% ~ 0.07%, f-CaO 转变为稳定的硅酸钙和 CaZrO_3 等物相, 材料的抗水化性显著改善.

关键词: 稳定性锆镁白云石; 锆英石; 抗水化性; 物相组成; 显微结构

中图分类号: TQ175.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.009

0 引言

在碱性耐火材料资源中, 白云石远比菱镁矿丰富, 并且分布广泛, 因此发展 MgO-CaO 质耐火材料, 有利于保护储量相对较少的菱镁矿资源, 而且可以就地取材, 更加经济合理^[1]. MgO-CaO 质耐火材料取代镁铬砖用于水泥回转窑的高温带, 可以避免六价铬(Cr^{6+}) 导致的污染^[2-3]. 但是由于材料中的 f-CaO 极易水化, 限制了材料的生产和使用. 通过提高煅烧温度^[4-6]、加入促烧结助剂^[7]、表面包覆的方法^[8] 可以提高白云石质材料的抗水化性能, 但 f-CaO 的存在仍然影响着 MgO-CaO 材料的使用, 尤其是在容易接触水分或是潮湿的条件下^[9]. 减少材料中的 f-CaO 相, 使其中的 CaO 以稳定的耐水化的物相, 如硅酸钙、锆酸钙、钛酸钙等存在, 可以明显改善材料的易水化性^[10]. β - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{SO}_2$ 与水泥熟料有良好的相容性, 并且有利于黏挂窑皮^[11]; ZrO_2 的引入可以提高材料的抗侵蚀性和抗热震性^[12-13].

笔者采用二步煅烧和消化工艺, 以白云石、菱镁矿、硅石和锆英石为原料, 在利用原料中杂质的基础上, 通过调整各原料配比, 制备出以方镁石、 β - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (简称为 C_2S)、 $3\text{CaO} \cdot \text{SO}_2$ (简称为

C_3S) 和 CaZrO_3 为主晶相的稳定性镁白云石材料, 研究不同 ZrO_2 含量对材料的烧结和抗水化性的影响, 并对材料的显微结构进行了分析.

1 实验部分

1.1 实验原料

实验所用各原料的化学成分如表 1 所示. 其中菱镁矿为级外矿, 含有较高量的 SiO_2 . 为防止在降温过程中 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 发生 $\beta \rightarrow \gamma$ 晶型转变而使试样发生开裂, 采用 H_3BO_3 (分析纯, 99.5%) 作为 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的晶型稳定剂. 白云石和菱镁矿轻烧后, 按表 2 所示配料. 其中, CaO 含量和 C/S 比分别固定为 35% 和 2.5, ZrO_2 含量为 2%、4%、6%、8%, 分别标记为 Z2、Z4、Z6、Z8.

1.2 实验内容

白云石和菱镁矿经破碎后分别在 1 000 ℃ 和 850 ℃ 下轻烧 2 h; 冷却后的白云石加入足量的水使其消化, 之后加入轻烧菱镁矿、硅石、锆英石和稳定剂后共同细磨; 烘干后加入 5% 的水做结合剂, 在 120 MPa 的压力下压制成 $\Phi 36 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的圆柱型试样; 经充分干燥后, 分别在 900 ~ 1 650 ℃ 下保温 3 h, 冷却后取出进行性能测试.

检测内容包括: 烧后试样的化学成分分析; 试

收稿日期: 2016-01-26; 修订日期: 2016-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51172210; 51472220); 郑州市科技研究与发展项目(112PCXYZ114)

作者简介: 孟维(1984—), 男, 北京人, 博士研究生, 主要从事耐火材料研究, E-mail: mwmwei@163.com.

样的线收缩率; 体积密度、显气孔率根据 GB/T 2999—2002 进行测定; 物相组成和显微结构分别用 X 射线衍射仪(PHILIPS X'Pert Pro) 和扫描电子显微镜(JSM 5610LV) 检测, 并用能谱分析仪(INCA X-act) 对试样进行微区元素分析。

抗水化性的测试采用高压煮沸法: 将试样破碎至 5 ~ 3 mm 后 110 ℃ 烘干至恒重, 称取试样水化前的重量(精确至 0.01 g), 把试样放入 100 mL 的烧杯中并在上面盖上表面皿, 置于高压釜中 0.3 MPa(约 125 ℃) 下保持 2 h, 取出后 110 ℃ 下烘干至恒重, 称取试样水化后的重量。用水化增重率来表征试样的抗水化性能, 实验配比如表 2 所示。

表 1 原料的化学成分

成分	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	LOI
白云石	20.82	30.47	0.72	0.37	0.51	—	45.56
菱镁矿	42.74	2.32	9.67	0.76	1.98	—	41.26
硅石	—	0.31	98.94	0.42	0.33	—	—
锆英石	—	—	32.92	0.058	0.31	66.23	—

表 2 实验配比

编号	轻烧白云石	轻烧菱镁矿	硅石	锆英石	H ₃ BO ₃ (外加)
Z2	53.7	37.1	8.2	3.01	0.25
Z4	52	39.4	6.6	6.01	0.25
Z6	50.2	41.6	5.1	9.02	0.25
Z8	48.5	43.9	3.6	12.02	0.25

2 结果与讨论

2.1 加热过程中的物相变化

图 1 为 900 ~ 1 300 ℃ 烧后 Z8 试样的物相变化。由图 1 可知, 经 900 ~ 1 300 ℃ 处理后, 主晶相

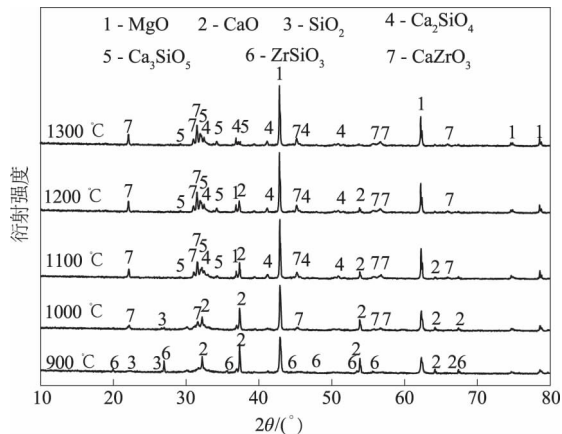


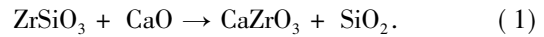
图 1 900 ~ 1 300 ℃ 烧后 Z8 试样的物相变化

Fig. 1 Evolutions of phase composition of specimen Z8 after fired between 900 ~ 1 300 ℃

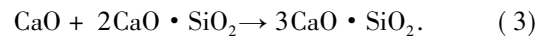
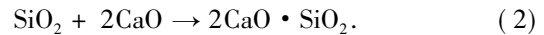
方镁石的衍射峰逐渐增强。较高的烧成温度, 有利于促进晶体的生长和提高结晶程度。

900 ℃ 烧后, 物相中存在 CaO、SiO₂ 和 ZrSiO₃ 相。在此温度下, 锆英石尚未开始分解, 同时 CaO 和 SiO₂ 也未开始反应。

在 1 000 ℃, ZrSiO₃ 峰消失, CaZrO₃ 开始生成, 未出现硅酸钙的衍射峰, 因此主要是 CaO 在促进 ZrSiO₃ 分解的同时与其发生固相反应:



1 100 ~ 1 200 ℃ 时, SiO₂ 峰消失, CaO 和 SiO₂ 开始反应生成新物相 β -2CaO · SiO₂ 和 3CaO · SO₂:



1 300 ℃ 后, CaO 峰消失, f-CaO 完全反应生成稳定的 β -2CaO · SiO₂、3CaO · SO₂ 和 CaZrO₃。

2.2 试样的化学成分分析

表 3 为烧后试样的化学成分分析。由表 3 可知, 在 4 组试样中, CaO 的含量在 34.85% ~ 35.03% 之间, ZrO₂ 的含量分别为 1.97%、4.01%、6.03%、7.88%, 与实验设计相符。原料中的杂质(Fe₂O₃ 和 Al₂O₃) 含量在 1.44% ~ 1.79% 之间。

表 3 试样的化学成分

成分	Z2	Z4	Z6	Z8
MgO	46.60	45.41	43.67	42.36
CaO	35.03	34.92	34.89	34.85
SiO ₂	14.61	14.22	13.83	13.44
ZrO ₂	1.97	4.01	6.03	7.88
Fe ₂ O ₃	1.18	1.13	1.04	1.01
Al ₂ O ₃	0.61	0.31	0.54	0.46

2.3 线收缩率

图 2 为试样在 1 500 ~ 1 650 ℃ 烧后的线收缩率。由图 2 可知, 随着烧成温度的增加, 烧后试样的线收缩率明显提高。当温度由 1 500 ℃ 提高到 1 600 ℃ 时, 试样的线收缩率从 17.2% ~ 18.5% 增加到 25.0% ~ 24.8%; 当温度进一步提高至 1 650 ℃ 时, 线收缩率略有下降, 为 24.5% ~ 24.8%。因此, 较适宜的烧成温度为 1 600 ℃, 1 600 ℃ 后继续提高温度会引起过烧现象。

2.4 体积密度和显气孔率

图 3 给出不同温度烧后试样的体积密度和显气孔率。由图可知, 随着烧成温度的增加, 烧后试样的显气孔率明显降低, 体积密度相应提高。当烧成

温度由 1 500 ℃ 增加到 1 600 ℃ 时,体积密度由 2.51 ~ 2.66 g/cm³ 增加到 3.11 ~ 3.16 g/cm³,显气孔率由 13.7% ~ 15.8% 降低到 4.3% ~ 5.7%;烧成温度提高至 1 650 ℃ 时,材料的体积密度和显气孔率变化不大. 经 1 650 ℃ 烧后, Z8 试样 ($AP = 4.3\%$, $BD = 3.16 \text{ g/cm}^3$) 的致密度最高,主要是由于锆英石的分解促进反应烧结的同时生成了较多的高密度的 CaZrO_3 ($\rho = 4.62 \text{ g/cm}^3$).

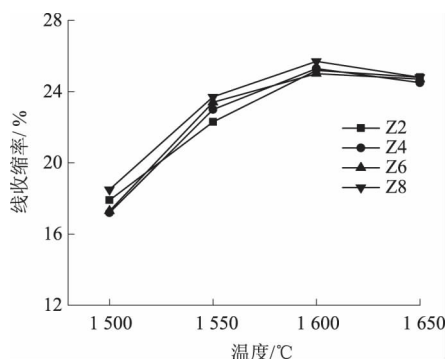


图2 试样在 1 500 ~ 1 650 ℃ 烧后的线收缩率
Fig. 2 Liner shrinkage of specimens after fired between 1 500 ~ 1 650 ℃

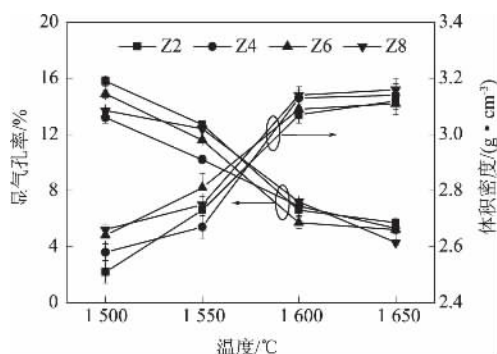


图3 不同温度烧后试样的体积密度和显气孔率
Fig. 3 The bulk density and apparent porosity of the specimens after sintered at different temperatures

2.5 抗水化性

测得试样的抗水化性如图 4 所示. 从图 4 可

以看出,随着烧成温度的提高, Z2、Z4、Z6、Z8 试样的抗水化性逐渐提高. 1 600 ℃ 和 1 650 ℃ 烧后试样的质量增加率降低至 0.03% ~ 0.07%; 在 4 组试样中, 试样 Z8 在各温度烧后均有最低的水化增重. 合成的稳定性锆镁白云石材料中, f-CaO 转化为以硅酸二钙和硅酸三钙为主的高熔点物相, 高温烧成后试样的显气孔率显著降低, 结构更加致密, 降低了水分的渗入和反应程度, 水化增重减少. 较高含量的 CaZrO_3 有利于减小材料中参与水化反应的比重, 从而提高抗水化性能.

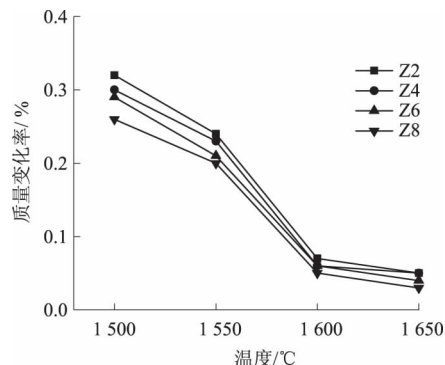


图4 不同温度烧后试样的抗水化性
Fig. 4 Hydration resistance of specimens after sintered at different temperatures

2.6 显微结构

试样 Z2 和 Z8 的显微结构如图 5 所示. 结合能谱分析表 4 可知, 其中浅灰色为硅酸二钙和硅酸三钙, 深灰色为方镁石, 白色圆形颗粒为 CaZrO_3 . 方镁石颗粒以孤岛状分布在硅酸钙的连续体中; 圆形/椭圆形 (2 ~ 5 μm) 的 CaZrO_3 颗粒以聚集体或是孤立状分散在方镁石的晶界和三相点附近, 当 CaZrO_3 含量较低 (Z2 试样) 时, 主要以孤立状晶体颗粒分散在基体中, 同时含有少量聚集体, 当 CaZrO_3 含量较高 (Z8 试样) 时, 以部分大的团聚状颗粒和大量的分散颗粒存在于基体中.

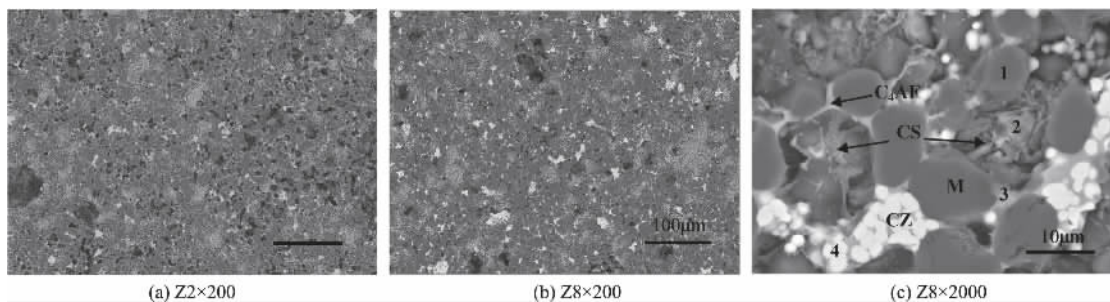


图5 试样 Z2 和 Z8 的 SEM 照片
Fig. 5 SEM photographs of specimen Z2 and Z8

CaZrO_3 的生成促进了方镁石和硅酸钙之间的直接结合,减小晶界之间的孔隙.在方镁石和硅酸钙的晶界周围,包裹着白色的 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF),在促进液相烧结的同时,它还可以起到传质的作用,促进了 CaZrO_3 团聚体的生成,与 CaZrO_3 同时填充在孔隙和晶界处,提高材料的抗水化性能.

表4 图5(c)中各点的能谱分析结果
Tab.4 EDS analysis of points in Fig. 5 (c) %

Point	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Zr
1	43.33	56.33	—	—	0.33	—	—
2	50.94	14.19	0.72	6.71	26.45	0.99	—
3	66.94	3.75	3.02	1.13	19.9	4.48	0.83
4	44.27	1.27	—	—	27.52	0.42	26.52

3 结论

以白云石、菱镁矿,硅石和锆英石为原料,制备了以方镁石、硅酸钙和锆酸钙为主要物相的稳定性锆镁白云石合成材料.在 $1\,000\,^\circ\text{C}$ 反应生成 CaZrO_3 , $1\,100\,^\circ\text{C}$ 后硅酸钙开始生成, $1\,300\,^\circ\text{C}$ 后 f-CaO 消失.随烧成温度提高,材料的致密度增大,经 $1\,600\,^\circ\text{C}$ 烧后材料的体积密度增加到 $3.11 \sim 3.16\,\text{g}/\text{cm}^3$,经 $1\,650\,^\circ\text{C}$ 烧后,材料的的水化增重率减小至 $0.03\% \sim 0.07\%$.原料中的 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 与 CaO 反应生成低熔点的 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,起到了促进烧结的作用; CaZrO_3 晶体分布在方镁石晶界处,提高了材料的直接结合程度.

参考文献:

- [1] 钟香崇.我国镁质耐火材料发展的战略思考[J].硅酸盐通报,2006,25(3):91-95,139.
- [2] 陈肇友.水泥回转窑烧成带用无铬耐火材料[J].耐火材料,2010,44(6):404-408.
- [3] 黄世谋,薛群虎.水泥回转窑烧成带用耐火砖无铬化研究进展[J].耐火材料,2014,48(1):70-73,76.
- [4] 吴占德,蒋明学.镁钙系耐火材料的研究现状[J].耐火材料,2009,43(2):136-139.
- [5] 张兴业.我国合成镁钙耐火原料及制品的发展[J].耐火材料,2009,43(2):131-135.
- [6] 王宏联,崔庆阳,薛群虎,等. MgO-CaO 耐火材料性能研究进展[J].耐火材料,2010,44(1):67-70,74.
- [7] AYGUL Y H. Effect of iron oxide addition on the hydration resistance and bulk density of doloma[J]. J Eur Ceram Soc,2007,27:1651-1655.
- [8] GHOSH A, H S. Sintering behaviour and hydration resistance of reactive dolomite[J]. Ceram Intern,2012,38:1315-1318.
- [9] LI Z, ZHANG S, LEE W E. Improving the hydration resistance of lime-based refractory materials[J]. Intern Mater Rev, 2008,53(1):1-20.
- [10] 谭浩然,严东生.稳定白云石砖制造工艺的研究[J].硅酸盐,1960(1):1-17.
- [11] 王杰曾,陈旭峰,陆纯煊,等.水泥回转窑用特种稳定性镁白云石砖的研制与应用[J].耐火材料,1992,26(5):267-269.
- [12] 张国平,欧阳世翥,钟香崇,等.水泥窑用碱性耐火材料的高温力学性能研究[J].郑州大学学报(工学版),2011,32(1):54-58.
- [13] OBREGÓNÁ, RODRÍGUEZ-GALICIA J L, LOPEZ-CUEVAS J L, et al. MgO-CaZrO_3 -based refractories for cement kilns[J]. J Eur Ceram Soc,2011,31(1/2):61-74.

Preparation and Investigation on the Microstructure and Properties of Stabilized Zirconia magnesia Doloma Refractory Materials

MENG Wei, MA Chengliang, GE Tiezhu, ZHAO Fei, ZHONG Xiangchong

(High Temperature Ceramics Institute, Henan Key Laboratory of High Temperature Functional Ceramics, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Stabilized magnesium dolomite zirconium refractory materials were prepared from natural dolomite, magnesite, silica and zirconia by two-stage calcination. The specimens were in the CaO content of 35% and C/S molar ratio of 2.5, ZrO_2 was set in the amount of 2%, 4%, 6%, 8%. Phase compositions after fired at different temperature were analyzed and the resulting bulk densities, apparent porosities, liner shrinkages as well as hydration resistance of the sintered materials were investigated. Microstructures were observed by SEM accompanied with EDS. The results show that: zircon decomposes after $1\,000\,^\circ\text{C}$ and forms calcium zirconate, calcium silicate appears after fired at $1\,100\,^\circ\text{C}$ and CaO disappears from $1\,300\,^\circ\text{C}$; compactness increases with the increasing of the firing temperature, and bulk densities reach $3.11 \sim 3.16\,\text{g}/\text{cm}^3$; weight gained after sintered at $1\,650\,^\circ\text{C}$ is in the range of $0.03\% \sim 0.07\%$. The transformation of f-CaO into stabilized forms, such as calcium silicate and calcium zirconate promotes the hydration resistance of the materials significantly.

Key words: stabilized zirconia magnesia doloma; zircon; hydration resistance; phase composition; micro-structure

文章编号: 1671-6833(2016)04-0044-05

利用废弃硒鼓墨粉制备 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 气敏材料

章雨勤, 程知萱, 张源, 胡鹏飞, 徐甲强

(上海大学理学院化学系, 上海 200444)

摘要: 利用废旧硒鼓经过废旧硒鼓破碎磁选装置处理得到的黑色有机墨粉作为原料, 采用环境友好的低沸点有机溶剂处理除去表面有机物, 通过 500 °C 煅烧处理即可得到棕褐色的磁性氧化铁材料. 经 XRD 测定发现, 该方法处理得到的氧化铁为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; 扫描电镜 SEM 显示, 其形貌为均匀的圆颗粒状, 平均粒径在 200 nm 左右. 气敏性能测试结果表明, 与商业 Fe_2O_3 相比, 这种 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 材料对 VOCs(乙醇、丙酮等) 气体有较好的气敏响应和选择性, 有望在挥发性有机化合物气体检测方面取得应用.

关键词: 废弃硒鼓墨粉; $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; 纳米材料; 气敏性质; VOCs

中图分类号: X705 **文献标志码:** A doi: 10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2016. 04. 010

0 引言

随着激光打印机和复印机的广泛使用, 加上现代化办公对其配件的质量和数量的要求, 使得这些设备的更新速度越来越快, 作为耗材的硒鼓的废弃量也越来越多. 据 2011 年统计, 我国每年消耗的硒鼓约 6 000 万只, 而残留在硒鼓中的有机墨粉约占 14.42%^[1]. 这些平均粒径在 8 ~ 12 μm 之间^[2], 肉眼根本看不到的有机墨粉颗粒对人体的危害极大, 若漂浮在大气中, 会在频繁接触的情况下被吸入人体呼吸道和肺部, 引起不适或疾病. 倘若简单地埋于地下, 将会造成土壤的严重污染. 因此对废旧硒鼓中的残余墨粉进行资源化利用具有非常重要的现实意义.

早在 2004 年刘漫青等^[3]就提出了一种废弃墨粉再生的机制. 首先对废墨粉进行前处理, 再按照传统的墨粉生产工艺重新制成新品墨粉. 但这种方法会影响墨粉的品质, 不能作为高质量墨粉使用. 董金庆等^[4]发明了一种资源化利用废弃墨粉的方法, 让废弃墨粉中的有机物经高温裂解转化为燃油, 固态渣体作为水泥添加剂进行利用, 从而实现其资源化利用. 但是该方法由于成本过高, 并未进入广泛的实际应用. 程知萱等^[5]发明了一种将废弃墨粉制备成超细氧化铁红颜料的方法,

实现了对废弃墨粉的资源化利用.

墨粉的主要成分为树脂、染料、电荷调节剂、辅助添加剂、磁粉(单组分墨粉使用)/载体(双组分墨粉使用)^[2]. 其中, 磁粉的主要成分是 Fe_3O_4 , Fe_3O_4 经氧化后可用于制备 Fe_2O_3 . 目前, 简单的对废弃墨粉进行高温直接焚化处理费用也很高, 因此, 将墨粉表面有机物去除进行资源化利用也是一种资源化利用的途径.

金属氧化物半导体纳米材料(如 ZnO 、 SnO_2 、 WO_3 、 Fe_2O_3 等) 由于具有独特的物理、化学及生物性能, 其生长、制备以及应用引起了人们极大的兴趣^[6-7]. 其中, Fe_2O_3 尤其是 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料在磁性、催化、气敏等方面的广泛应用而备受关注^[8]. 目前, 已报道的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料的制备方法有很多, 如热分解法、固相法、化学共沉淀法、溶胶-凝胶法、超声化学法以及微乳液法等^[9-12]. 而笔者是利用废弃硒鼓的残余墨粉作为原料, 制备 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉体材料, 并对其气敏性能进行了测试. 结果表明, 与商业 Fe_2O_3 相比, 这种处理方法得到的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 材料对 VOCs(乙醇、丙酮等) 具有较好的响应和选择性, 有望在挥发性有机化合物检测方面取得应用. 相对于 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 其他制备方法, 这种处理工艺简单, 在实现对废弃硒鼓墨粉的资源化利用的同时可减少废弃物的排放, 有利于保护环境.

收稿日期: 2015-09-26; 修订日期: 2015-11-19

基金项目: 上海市宝山科委产学研合作项目(CXY-2012-40)

通信作者: 程知萱(1963—), 女, 上海人, 上海大学副教授, 博士, 主要从事功能无机材料方面的研究, E-mail: zxcheng@shu.edu.cn.

1 实验

1.1 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料的制备

将收集到的废弃硒鼓置于废旧硒鼓破碎磁选装置中,经过破碎、磁选、风力分选等程序,依次得到金属(铁、铝)、塑料、最后收集到黑色的有机墨粉。将收集到的墨粉置于烧杯中,用适量环境友好的低沸点有机溶剂浸泡以除去墨粉表面的有机物,离心、干燥得到黑色粉末。将该黑色粉末置于马弗炉中 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧,得到棕褐色的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉体材料。

1.2 气敏材料的表征及性能测试

所得产品的形貌测定采用 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜(日本电子公司),扫描电压为 20 kV 。样品的物相分析采用 DX-2700 X 射线粉末衍射仪(丹东浩元仪器有限公司), $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0.154\text{ 056 nm}$), 30 mA , 40 kV ,扫描步长为 $0.03^\circ/\text{s}$,记录从 10° 到 90° 的数据。

取适量样品置于玛瑙研钵中,研磨均匀后滴入适量黏结剂,调成糊状后涂覆到带两个 Au 电极和 4 根 Pt 导线的 Al_2O_3 陶瓷管上,如图 1 所示^[13]。红外灯烘干后,于马弗炉中 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧 2 h ,冷却至室温。将涂好材料的陶瓷管的 4 根铂电极丝和加热丝两端都焊接在底座上,然后再在 5 V 的直流电压下老化一周,即得到所需的气敏元件。气敏性能测试采用 WS-30A 气敏元件测试仪(郑州炜盛电子科技有限公司),采用静态旁热式测量与气敏元件串联的负载电阻 R_L 上的输出电压来反映气敏元件的特性,计算气敏元件的电阻变化。在加热电压 V_h : $3 \sim 5.5\text{ V}$ 范围内测定对丙酮、乙醇、氨水、苯、甲醛、甲苯 6 种气体的灵敏度,气体灵敏度 S 用 R_a/R_g 表示(R_a , R_g 分别表示元件在空气和检测气氛中的电阻)。实验采用的测试条件: V_c 为 5 V ; 负载电阻 R_L 为 $10\text{ M}\Omega$; 环境湿度为 $46\%\text{ RH}$ 。

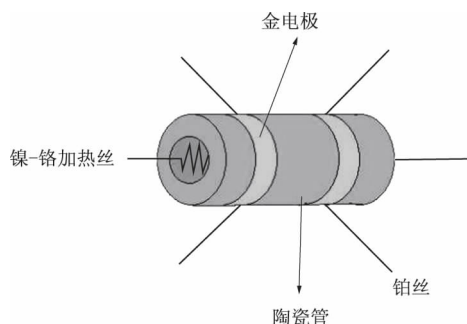


图1 气敏元件陶瓷管

Fig.1 Schematic diagram of ceramic tube

2 分析与讨论

2.1 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料的表征

图2是产品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粉体和商业 Fe_2O_3 的 XRD 图谱。图中产品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粉体和商业 Fe_2O_3 峰型基本保持一致,且主要的衍射峰与 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (JCPDS: 25-1402) 标准峰完全相符,表明二者均为四方晶系^[14]。

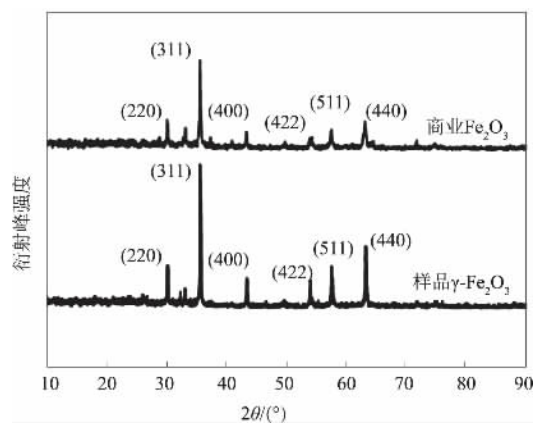


图2 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粉体和商业 Fe_2O_3 的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanopowders and commercial Fe_2O_3

图3(a)、3(b)和3(c)分别是原墨粉、有机溶剂处理后的墨粉和煅烧得到的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粉体的 SEM 图。由图3(a)和3(b)可见,原墨粉粒径大约在 $5 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$,大小比较均匀。经有机溶剂处理后,颗粒粒径增大($30 \sim 50\text{ }\mu\text{m}$),可能是由于原来包裹在墨粉表面的有机物经有机溶剂处理后溶解,将原先均匀分散的颗粒黏结起来使得颗粒变大。图3(c)是煅烧后得到的产物 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粉体的 SEM 图,从图中可以看出,该产物 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 为分散均匀的球形颗粒,平均粒径在 200 nm 左右。

2.2 气敏性能测试

元件的最佳工作温度是指元件在相同浓度的气体下响应最高时所对应的工作温度。通常情况,气体传感器的气敏性能会受工作温度的影响,所以首先要确定气敏元件的最佳工作温度。图4所示为样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料和商业 Fe_2O_3 对体积分数为 100×10^{-6} 丙酮以及乙醇的响应灵敏度与工作温度的关系曲线图。从图4(a)和4(b)可看出,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 在 $280\text{ }^\circ\text{C}$ 时对丙酮的响应最佳,在 $330\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对乙醇的响应最佳。而商业 Fe_2O_3 对丙酮、乙醇响应最佳温度均出现在较高的 $330\text{ }^\circ\text{C}$ 。并且,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 对丙酮和乙醇的响应均比商业 Fe_2O_3 高。

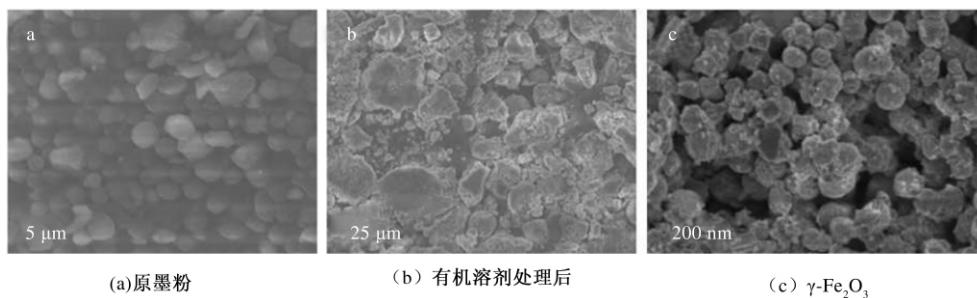


图3 各种墨粉的SEM图

Fig.3 SEM patterns of various toners

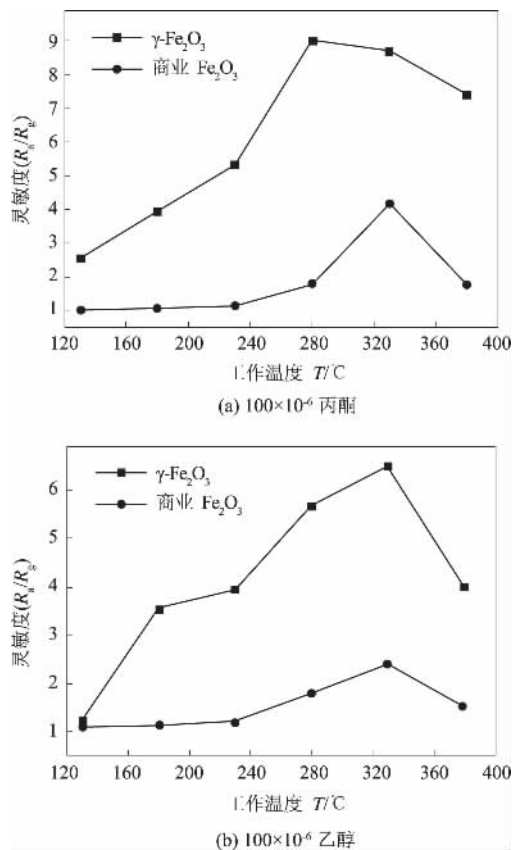
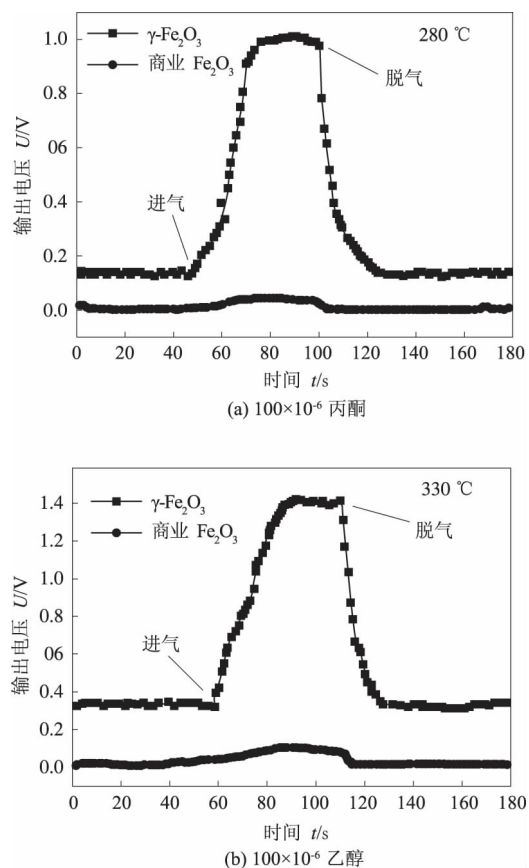
图4 样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料和商业 Fe_2O_3 对不同气体的响应灵敏度与工作温度的关系曲线图Fig.4 The response curves of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanomaterial and commercial Fe_2O_3 sensors at different working temperatures to various gases

图5(a)为在最佳工作温度280℃时,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料和商业 Fe_2O_3 对 100×10^{-6} 丙酮的响应-恢复特性曲线,图5(b)为在330℃,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料和商业 Fe_2O_3 对体积分数为 100×10^{-6} 乙醇的响应-恢复特性曲线.从图中可以看出,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料对丙酮和乙醇的响应均远高于商业 Fe_2O_3 材料.

响应和恢复时间是气体传感器的重要性能参数.响应时间 t_{res} 定义为元件接触被测气体后,负

图5 最佳工作温度下,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料和商业 Fe_2O_3 对不同气体的响应-恢复曲线图Fig.5 The response and recovery characteristics of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanomaterial and commercial Fe_2O_3 sensors to various gases during optimal working temperature

载电阻 R_L 上的电压由 U_0 变化到 $U_0 + 90\%(U_x - U_0)$ 所需的时间,恢复时间 t_{rev} 定义为元件脱离被测气体后,负载电阻 R_L 上的电压由 U_x 恢复到 $U_0 + 10\%(U_x - U_0)$ 所用的时间^[15].其中 U_0 为初始电压, U_x 为响应达到饱和值时的电压.样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料对丙酮的响应时间约为23 s,恢复时间约为20 s;对乙醇的响应时间约为24 s,恢复时间约为13 s.由于商业 Fe_2O_3 对丙酮和乙醇气体不敏感,因此无法准确测定其响应及恢复时间

(因误差太大,没有意义)。

图6(a)为280℃时,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料和商业 Fe_2O_3 两种气敏元件的响应灵敏度随丙酮浓度变化曲线图。从图中可以看出,随着丙酮浓度的增加,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 气敏元件响应值增加,而商业 Fe_2O_3 响应值基本不变。图6(b)为在330℃时,两种粉体材料气敏元件的响应灵敏度随乙醇浓度变化曲线图,可以看出随着乙醇浓度的增加,样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 元件响应值增加,而商业 Fe_2O_3 元件响应值的变化幅度很小。

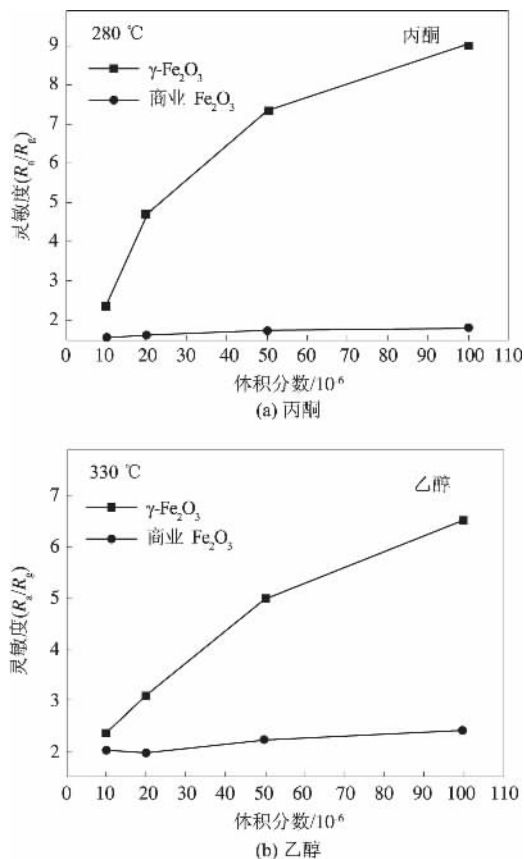


图6 样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料和商业 Fe_2O_3 的响应灵敏度与气体浓度的关系曲线图

Fig. 6 The response curves of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanomaterial and commercial Fe_2O_3 sensors in different gases concentration

为了研究样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 对丙酮、乙醇的选择性,分别对浓度均为 100×10^{-6} 的氨水、苯、甲苯、甲醛等在工作温度为280℃下进行了测试,如图7所示。测试发现该材料对氨水、苯、甲苯、甲醛的灵敏度都很低,唯独对丙酮和乙醇的灵敏度较好,由此可知,由废弃墨粉处理所得的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 对丙酮、乙醇有着较好的选择性,有望在丙酮及乙醇的检测方面取得应用。

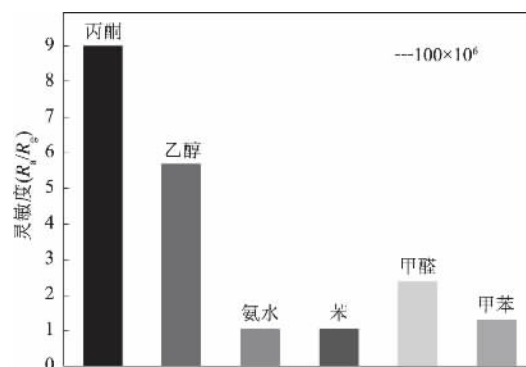


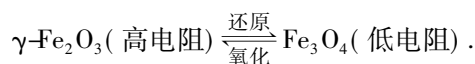
图7 样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料对不同气体的响应

Fig. 7 Responses of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanomaterial sensors to various gases

2.3 气敏机理分析

有机墨粉中存在少量的起控制墨粉流动性作用的 SiO_2 ^[16],它是一种原子晶体,导电性差,会残留在样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粉体材料中,使得样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料的体电阻增大,从而使该材料在空气中的电阻 R_n 升高,而 $S = R_n/R_g$,所以样品 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉体材料气敏性能会高于商业 Fe_2O_3 。

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 作为一种体电阻控制型材料,当接触到还原性气体(丙酮、乙醇)时, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 被还原成 Fe_3O_4 ,产生的 Fe^{2+} 空位使得材料的体电阻降低。当还原性气体脱附后, Fe_3O_4 又重新被空气中的氧气氧化成 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$,使得材料的体电阻升高^[17]。其过程可简单表示为



3 结论

笔者利用废弃硒鼓墨粉作为原料,用低沸点、环境友好的有机溶剂除去墨粉表面的有机物,经煅烧制备出了 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒,平均粒径在200 nm左右,并对其气敏性能进行研究。结果表明,与商业 Fe_2O_3 相比,该方法得到的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 材料在280℃时对丙酮的响应较好,在330℃时对乙醇的响应较好。并且相对于其他气体来说,该材料对丙酮和乙醇有较好的选择性,有望在挥发性有机化合物检测方面取得应用。

参考文献:

- [1] 黄庆,王景伟,王鹏程,等. 废弃硒鼓资源化技术研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2014, 31(2): 104-108.
- [2] 王威,王宝群,刘京玲,等. 墨粉的制备及发展概况

- [J]. 中国材料进展, 2012, 31(1): 1-7.
- [3] 刘漫青, 刘树果. 废弃墨粉的再生机理及工艺 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 60-61.
- [4] 董金庆. 复印机废弃墨粉处理工艺 [J]. 技术与市场, 2003(1): 16-16.
- [5] 程知萱, 杨桂兴, 宋玲玉, 等. 一种利用废弃硒鼓墨粉制备超细氧化铁红颜料的方法: 102796402 [P]. 2012-11-28.
- [6] ZHANG S F, REN F, WU W, et al. Controllable synthesis of recyclable core-shell $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ @ SnO_2 hollow nanoparticles with enhanced photocatalytic and gas sensing properties [J]. Physical chemistry chemical physics, 2013, 15(21): 8228-8236.
- [7] 刘志芳, 刘新红, 黄亚磊, 等. 纳米 ZrO_2 对 Al-Si 复合 Al_2O_3 -C 材料性能、组成和结构的影响 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(5): 15-19.
- [8] SEN T, SHIMPI N G, MISHRA S, et al. Polyaniline- $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanocomposite for room temperature LPG sensing [J]. Sensors and actuators b, 2014, 190: 120-126.
- [9] REDDY C V G, SEELA K K, MANORAMA S V. Preparation of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ by the hydrazine method-Ap-plication as an alcohol sensor [J]. International jour-nal of inorganic materials, 2000, 2(4): 301-307.
- [10] SUN Y K, MA M, ZHANG Y, et al. Synthesis of nanometer-size maghemite particles from Magnetite [J]. Colloids and surfaces a: Physicchemical and en-gineering aspects, 2004, 245(1/3): 15-19.
- [11] RAY I, CHAKRABORTY S, CHOWDHURY A, et al. Room temperature synthesis of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ by sonochemi-cal route and its response towards butane [J]. Sensors and actuators b, 2008, 130(2): 882-888.
- [12] 姜国华, 姜继森. $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子的(湿)固相研磨法制备研究 [J]. 高等学校化学学报, 2004, 25(3): 405-408.
- [13] 杨敏, 刘晓旻, 赵旭东, 等. $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米纤维的丙酮敏感特性 [J]. 高等学校化学学报, 2014, 35(8): 1615-1619.
- [14] BISWAL R C. Pure and Pt-loaded gamma iron oxide as sensor for detection of sub ppm level of acetone [J]. Sensors and actuators b, 2011, 157(1): 183-188.
- [15] 徐甲强, 刘艳丽, 牛新书. ZnSnO_3 纳米粉体的合成及其气敏特性研究 [J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(3): 321-324.
- [16] 蒋立琴, 黄甦. 墨粉的结构及鉴别方法研究进展 [J]. 信息记录材料, 2010, 11(5): 44-46.
- [17] MING J, WU Y Q, WANG L Y, et al. CO_2 -assisted template synthesis of porous hollow bi-phase $\gamma\text{-}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles with high sensor property [J]. Journal of materials chemistry, 2011, 21(44): 17776-17782.

Use of Waste Toner Cartridges for Preparing $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Sensitive Material

ZHANG Yuqin, CHENG Zhixuan, ZHANG Yuan, HU Pengfei, XU Jiaqiang

(Department of Chemistry, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The waste drums are used after crushing processing magnetic separation device to get black organic toner as raw materials. Then we use the environmentally friendly low boiling point organic solvent treatment to remove organics on the surface of toners, and the brownish magnetic iron oxide materials is obtained by 500 °C calcination treatment. XRD experiments found that the products are $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ crystal; scanning electron micro-scope (SEM) found that $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ particulates present uniform particle size of about 200 nm. Gas sensing test results show that compared with commercial Fe_2O_3 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ material obtained with this method have a good response and selectivity to VOCs (ethanol, acetone, etc.). The materials are expected to achieve detection of volatile organic compounds.

Key words: waste toner cartridge; $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; nanomaterial; gas sensing property; VOCs

文章编号: 1671-6833(2016)04-0049-04

石墨烯-氧化钛复合氨敏感材料的制备与特性研究

叶宗标^{1,2}, 郑伟健^{1,2}, 太惠玲^{1,2}, 谢光忠^{1,2}, 蒋亚东^{1,2}

(1. 电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054; 2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要: 利用四异丙醇钛和氧化石墨(GO), 采用水热法制备了还原氧化石墨烯/氧化钛(rGO-TiO₂) 纳米复合敏感材料, 通过傅里叶红外(FTIR) 和紫外可见光谱(UV-vis) 对复合材料结构进行了表征. 气敏特性结果表明, 复合敏感材料对氨气(NH₃) 具有良好的室温响应-恢复特性; 与单一的rGO相比, 复合敏感材料表现出更高的响应(rGO-TiO₂ 对 10×10^{-6} NH₃ 响应为 -0.027, rGO 为 -0.007) 和更好的重复性. 此外, 还分析了复合材料对 NH₃ 的气体敏感机理.

关键词: 水热法; 石墨烯; 氧化钛; 复合敏感材料; 氨气

中图分类号: X511 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.011

0 引言

随着人们健康意识的提高, 室内空气污染的问题受到越来越多的关注. 化学性污染物是室内污染的主要物质, 一般包括甲醛、一氧化碳、苯系物、氨气、氡及其子体和悬浮颗粒等. 其中氨气作为一种无色有毒气体广泛存在于人类生产活动中. OSHA (职业安全与健康标准委员会) 已经制定了 NH₃ 浓度安全界限: 短暂(15 min) 暴露体积分数不得超过 30×10^{-6} ; 长时间(8 h) 暴露体积分数不得超过 25×10^{-6} ^[1]. 根据调查分析可知, 传统的金属氧化物基氨气传感器普遍受制于高温工作和低灵敏度等问题, 因此, 发展高性能室温氨气传感器极为迫切和重要.

作为一种新型敏感材料, 石墨烯巨大的比表面积、极高的电导率、极低的本征噪声以及对电子授受变化极敏感特性, 使其在传感器领域引起关注^[2]. 然而, 研究表明: 单一石墨烯材料对气体分子的本征吸附力较弱, 因此其对气体分子的响应能力受到严重制约^[3]. 目前普遍的做法是将石墨烯材料与其他功能材料(如金属氧化物、聚合物等) 进行复合来提高单一石墨烯材料的气体敏感特性^[4]. 新疆大学贾殿赠教授团队^[5] 根据原位固

态化学反应的合成路线制备了 SnO₂-石墨烯纳米复合材料, 实现了对甲醛气体的有效检测. 北京理工大学胡长文教授团队^[6] 利用紫外光辅助还原法获得了还原氧化石墨烯(rGO)-WO₃ 纳米包裹复合材料, 该材料对乙醇蒸汽具有良好的响应特性. 吉林大学张彤教授团队^[7] 利用水热法制备了 rGO-ZnO 复合材料, 研究了其对二氧化氮的敏感性能, 相比于单一石墨烯, 复合材料具有更优异的响应性能. 但以石墨烯-氧化钛复合材料为气敏薄膜的研究目前较少, 因此, 笔者利用四异丙醇钛和氧化石墨为原料, 采用水热法制备还原氧化石墨烯-氧化钛(rGO-TiO₂) 纳米复合材料, 并对复合材料的结构特征及其对 NH₃ 的室温敏感特性进行了研究.

1 实验

1.1 复合薄膜传感器制备

石墨片和四异丙醇钛购自美国 Sigma. 采用经典的 Hummer 法制备氧化石墨烯乙醇溶液(0.2 mg/mL). 取 0.05 mL 四异丙醇钛加入到 6 mL 氧化石墨烯乙醇溶液中充分混合, 磁力搅拌 30 min; 然后在上述棕色溶液中逐滴加入 10 mL 去离子水, 混合溶液逐渐形成白色浑浊, 继续磁力

收稿日期: 2015-09-03; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61101031; 61176006; 61421002)

通信作者: 太惠玲(1979—), 女, 甘肃宁夏人, 电子科技大学副教授, 博士, 主要从事气体传感器方向的研究, E-mail: taitai1980@uestc.edu.cn.

搅拌 5 h. 将最终的溶液加入到密闭反应容器中, 在 130 ℃ 下保持 10 h, 即得到还原氧化石墨烯-氧化钛复合溶液.

气喷和测试装置示意图如图 1 所示. 运用传统 MEMS 工艺制备叉指电极(IDEs)作为传感器件, 依次采用丙酮、酒精和去离子水进行清洗. 取 1 mL 上述复合溶液, 采用气喷工艺(如图 1(a)所示)在 IDEs 上沉积复合薄膜, 然后置入 70 ℃ 真空干燥箱干燥 12 h, 获得复合薄膜传感器. 通过上述相同工艺获得单一还原氧化石墨烯材料和单一还原氧化石墨烯薄膜传感器.

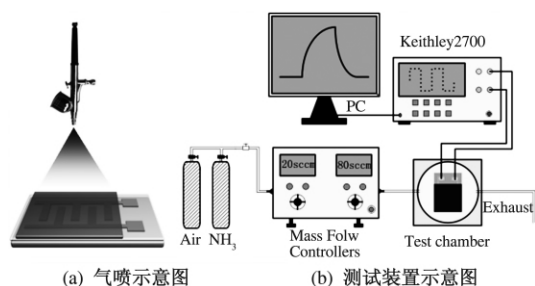


图 1 气喷和测试装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of spray method and measurement

1.2 复合薄膜测试和表征

测试平台如图 1(b) 所示. 室温下采用动态配气系统进行气敏特性测试, 将待测传感器置于密闭腔室中, 流量控制器(MT50-4, 北京美唐仪器有限公司)调控测试气体浓度, 以洁净空气作为载气; Keithley2700 实时记录传感器电阻变化, 并由 PC 端实时收集. 采用 UV-1700 Pharmaspec 型紫外可见分光光度计(190 ~ 1 100 nm)和 Spectrum 400 型傅氏转换红外线光谱分析仪(美国, PerkinElmer)进行薄膜的光谱特性测试.

定义传感器的响应值 R , $R = (R_{\text{gas}} - R_{\text{air}}) / R_{\text{air}}$, 其中 R_{gas} 表示传感器在待测气体中的电阻; R_{air} 表示传感器在空气中的电阻.

2 结果与讨论

2.1 光谱吸收特性

敏感薄膜的紫外-可见光谱吸收特性如图 2 所示. 由图 2(c) 可见, GO 膜在 230 nm 处有明显的吸收峰位. 经过水热还原后, 吸收峰发生了由 230 ~ 270 nm 的明显红移(图 2(d)), 意味着石墨烯网格上的含氧官能团已经被有效地去除^[8].

此外, 根据 rGO-TiO₂ 薄膜在 300 ~ 400 nm 波

段线性部分向 x 轴外推的吸附边界可以发现, 相较于 GO-TiO₂ 薄膜而言, rGO-TiO₂ 纳米复合膜的吸附边界有明显的红移, 这可能是由于在长时间水热环境下, rGO 网格和 TiO₂ 纳米粒子之间强烈的界面相互作用造成的^[9].

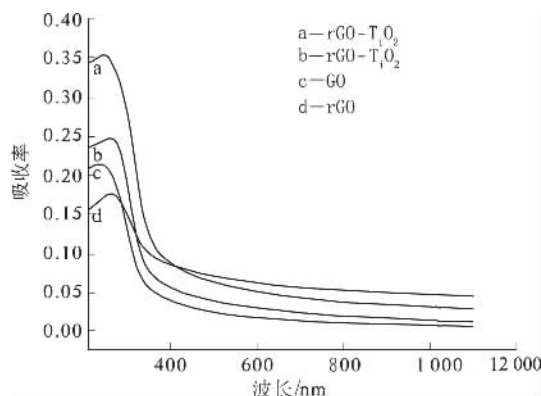


图 2 不同薄膜的紫外-可见光谱吸收图

Fig. 2 UV-Vis spectra of sensitive films

GO、rGO、GO-TiO₂、rGO-TiO₂ 薄膜的红外光谱图如图 3 所示. 对于 GO, 在 1 111 cm⁻¹ (C—O), 1 218 cm⁻¹ (C—O—C) 和 1 731 cm⁻¹ (C=O) 有较强的吸收峰位, 而 1 573 cm⁻¹ 处的吸收峰可以认为是未氧化部分石墨烯网格的苯环骨架振动引起的. 经过水热还原后, C—O—C 峰位消失, 新出现的 1 427 cm⁻¹ (C—OH) 峰位预示着大部分的含氧官能团得到有效去除和还原^[10], 苯环的 C—C 骨架振动峰位则转移至 1 635 cm⁻¹. 相比较而言, GO-TiO₂ 样品与 GO 峰位较为类似, 然而 GO-TiO₂ 在 400 ~ 450 nm 有一个较强的 Ti—O—Ti 吸收峰, 该峰为典型的 TiO₂ 吸收峰. GO-TiO₂ 经过水热还原以后的 rGO-TiO₂ 复合薄膜(图 3(a)) 在 1 000 ~ 1 700 cm⁻¹ 范围内, 大部分吸收峰位减弱或消失, 400 ~ 480 nm 的吸收峰位明显增强, 意味着复合材料中石墨烯和氧化钛之间具有较强的相互作用, 除了 Ti—O—Ti 键作用以外, 可能还存在 Ti—O—C 键的作用^[11].

2.2 传感器氨敏特性

单一 rGO 薄膜和 rGO-TiO₂ 复合薄膜在体积分数为 10 × 10⁻⁶ NH₃ 浓度下的 4 次重复响应曲线如图 4 所示. 由图可见, 在引入电子供体 NH₃ 气体分子后, 单一 rGO 薄膜(图 4(a)) 电阻发生明显下降, 这是因为 rGO 在制备过程中残余的含氧基团或缺陷造成的电子吸附而形成了 N 型导电特性, 当脱离 NH₃ 气体引入空气(Air)后, 电阻迅速恢复到初始水平.

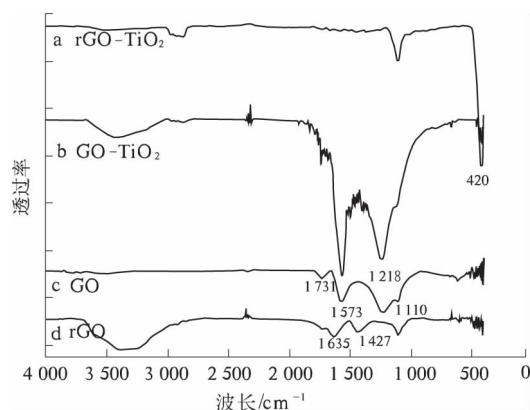
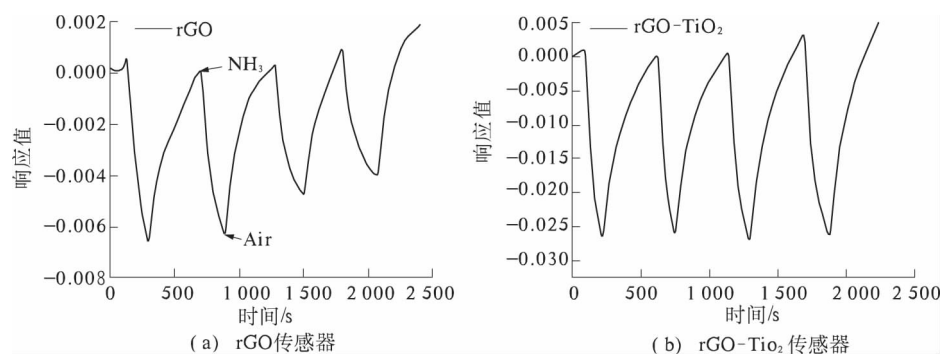


图3 不同薄膜的红外光谱吸收图

Fig. 3 FTIR spectra of different films

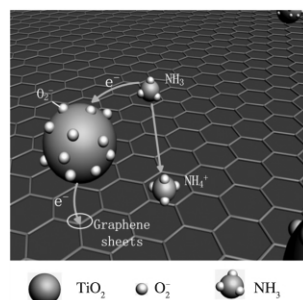
图4 两种不同传感器对 10×10^{-6} 的 NH_3 4 次重复响应曲线Fig. 4 Response of rGO and rGO-TiO₂ based sensors

2.3 复合薄膜响应机理分析

复方薄膜响应机理模型图如图5所示。当作为电子供体的 NH_3 分子扩散到敏感薄膜表面时,一部分气体分子会以物理吸附的形式附着在石墨烯表面,另一部分 NH_3 分子将从敏感薄膜中获得质子并同时释放一个电子,形成 NH_4^+ 的铵盐中间态,产生的电子吸附在 N 型石墨烯网格中,从而造成石墨烯多数载流子增大,最终引起敏感薄膜电导率增大,电阻下降。这是一个可逆的吸附-解吸附过程,当 NH_3 排出后, NH_4^+ 会释放质子转变成 NH_3 ,敏感薄膜失去电子导致电导率恢复至初始状态,空气中的氧能加速这个解吸附过程。然而,当物理吸附的 NH_3 分子足够多时,将阻碍 NH_3 分子与石墨烯网格之间的得失电子过程,如图4(a)所示,导致敏感薄膜的响应能力减弱。在引入 TiO_2 以后,分析认为被 TiO_2 纳米颗粒锚定的石墨烯网格减少了对 NH_3 分子的物理吸附,避免复合材料对 NH_3 产生响应衰减,实现稳定的重复响应,如图4(b)所示。此外, TiO_2 在石墨烯的气敏过程中起到重要的催化作用,如图5所示,其中石墨烯作为导电网络充当电子授受载体的角色,两者之间存在有效的协同效应。然而,在一般情况下, TiO_2 表面只有在高温下

与单一 rGO 相比, rGO-TiO₂ 复合薄膜气体传感器对 $10 \times 10^{-6} \text{NH}_3$ 具有更大的电阻变化,如图4(b)所示,其响应达到 -0.027(单一石墨烯传感器响应仅有 -0.007)。此外, rGO-TiO₂ 复合薄膜传感器具有更好的重复性,在每次响应-恢复循环过程中具有稳定的响应值和基线恢复性能,而单一 rGO 薄膜传感器的响应值在第二个 10×10^{-6} 响应-恢复周期后明显减小,这可能是由于在石墨烯网格上物理吸附积累的 NH_3 分子减弱了 NH_3 与石墨烯网格之间的电子转移。

才能够产生具有较强催化能力的催化离子(O_2^- 或 O^-),而在室温下, TiO_2 表面只会产生催化能力较弱的 O_2^- 离子。根据文献^[12]报道, O_2^- 能够加速对 NH_3 等还原性较强的气体得失电子过程。因此,在气体响应过程中, NH_3 分子释放的电子将首先转移至 TiO_2 表面,然后再转移至石墨烯网格表面,引起薄膜电导率变化。当 NH_3 排出后,电子向相反的过程转移,完成一次响应恢复过程。在此过程中,由于石墨烯和 TiO_2 之间的紧密键合作用, O_2^- 离子能有效降低气体分子得失电子的能量势垒,增加气敏过程的电子转移数量,从而增强复合薄膜对 NH_3 的响应特性。

图5 rGO-TiO₂ 复合传感器氨敏机理模型图Fig. 5 Schematic illustration of sensing mechanism of rGO-TiO₂ based sensor to ammonia

3 结论

笔者利用水热法制备了石墨烯/氧化钛(rGO-TiO_2) 纳米复合薄膜气体传感器. 且通过光谱吸收表征结果表明, 复合材料之间存在较强的相互作用. 其中相较单一的石墨烯薄膜, rGO-TiO_2 复合薄膜对 NH_3 具有更高的响应(约 4 倍) 和更好的重复性, 分析认为是 TiO_2 在石墨烯的气敏过程中起到了重要的催化作用. 这一研究有助于开发可室温工作、高灵敏的 NH_3 气敏元件.

参考文献:

- [1] MANI G K, RAYAPPAN J B B. A highly selective room temperature ammonia sensor using spray deposited zinc oxide thin film [J]. *Sens actuators B*, 2013, 183: 459–466.
- [2] WILLIAMS G, SEGER B, KAMAT P V. TiO_2 - graphene nanocomposites. UV-assisted photocatalytic reduction of graphene oxide [J]. *ACS Nano*, 2008, 2 (7): 1487–1491.
- [3] SCHEDIN F, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene [J]. *Nat Mater*, 2007, 6(9): 652–655.
- [4] HUANG X L, HU N T, GAO R G, et al. Reduced graphene oxide-polyaniline hybrid: preparation, characterization and its applications for ammonia gas sensing [J]. *J Mater Chem*, 2012, 22(42): 22488–22495.
- [5] CAO Y L, LI Y Z, JIA D Z, et al. Solid-state synthesis of SnO_2 -graphene nanocomposite for photocatalysis and formaldehyde gas sensing [J]. *RSC Adv* 2014, 86(4): 46179–46186.
- [6] QIN J W, CAO M H, LI N, et al. Graphene-wrapped WO_3 nanoparticles with improved performances in electrical conductivity and gas sensing properties [J]. *J Mater Chem* 2011, 43(21): 17167–17174.
- [7] LIU Sen, YU Bo, ZHANG Hao, et al. Enhancing NO_2 gas sensing performances at room temperature based on reduced graphene oxide - ZnO nanoparticles hybrids [J]. *Sens Actu B*, 2014, 202: 272–278.
- [8] SHENG K X, BAI H, SUN Y P, et al. Layer-by-layer assembly of graphene/polyaniline multilayer films and their application for electrochromic devices [J]. *Polymer*, 2011, 52(24): 5567–5572.
- [9] SHER S M S A, PARK A R, ZHANG K, et al. Green synthesis of biphasic TiO_2 -reduced graphene oxide nanocomposites with highly enhanced photocatalytic activity [J]. *ACS Appl Mat Inter*, 2012, 8(4): 3893–3901.
- [10] LONG M C, QIN Y L, CHEN C, et al. Origin of visible light photoactivity of reduced graphene oxide/ TiO_2 by in situ hydrothermal growth of undergrown TiO_2 with graphene oxide [J]. *J Phys Chem C*, 2013, 117: 16734–16741.
- [11] NGUYEN-PHAN T D, PHAM V H, SHIN E W, et al. The role of graphene oxide content on the adsorption-enhanced photocatalysis of titanium dioxide/graphene oxide composites [J]. *Chem Eng J*, 2011, 170 (1): 226–232.
- [12] DHIVYA P, PRASAD A K, SRIDHARAN M. Nanostructured TiO_2 films: enhanced NH_3 detection at room temperature [J]. *Ceram Int*, 2014, 40(1): 409–415.

The Fabrication and Investigation of rGO-TiO_2 Based Materials for Ammonia Detection

YE Zongbiao^{1,2}, ZHENG Weijian^{1,2}, TAI Huiling^{1,2}, XIE Guangzhong^{1,2}, JIANG Yadong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The reduced graphene oxide (rGO)- TiO_2 composite sensitive materials were fabricated through hydrothermal method by using titanium isopropoxide and GO. The structure of composite was characterized by UV-Vis spectroscopy and the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The response results showed rGO-TiO_2 composite sensor performed better response values (-0.027) and repeatability to 10 ppm NH_3 than that of rGO sensor (-0.007) at room temperature. Moreover, the sensing mechanism of composite sensor was studied.

Key words: hydrothermal method; graphene; titanium oxide; sensitive composite; ammonia

车载甲烷巡检仪的光路优化设计与系统实现

李志刚¹, 陈海永¹, 詹自力², 王书潜¹, 郑国锋¹

(1. 河南汉威电子股份有限公司 国家认定企业技术中心, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 多次反射腔体是激光吸收光谱气体传感器的核心组件, 其结构和性能直接影响到整个设备的灵敏度和稳定性. 分析了 White 腔、Herriott 腔、CEAS 腔等国内外主要应用的多次反射腔体的设计方案和工作原理, 设计和制作了 96 次反射腔体, 并应用在车载激光甲烷巡检仪上. 通过燃气公司的实际应用表明, 该设备极大地提高了燃气巡检的效率, 缩短了燃气巡检的周期, 有效地减少了爆燃事故的发生.

关键词: 激光吸收光谱技术; 多次反射腔体; White 腔; Herriott 腔; 车载; 燃气泄漏巡检仪

中图分类号: TN216

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.012

0 引言

近几年来, 由于天然气管道泄漏导致事故频发, 造成人民生命财产的巨大损失. 目前, 国内燃气管网主要通过人工携带便携仪沿燃气铺设管道巡检, 效率低, 巡检周期长. 为了预防和避免事故的发生, 需要研发一套高效的甲烷泄漏检测系统, 迅速准确地测量道路上甲烷的含量.

采用激光光谱吸收技术研制的巡检仪^[1]具有反应速度快、灵敏度高、抗气体干扰等特点, 适用于车载巡检设备快速、高效的需要. 多次反射腔体是这种巡检仪的核心组件, 其性能将影响到整个设备的灵敏度和稳定性.

当一束光强为 I_0 的光通过待测气体时, 如果光源覆盖该待测气体的吸收谱线, 在相应的谱线处发生光强衰减. 根据比尔-朗伯特 (Beer-Lambert) 定律^[2], 出射光强 I 与入射光强 I_0 关系为

$$I = I_0 \cdot \exp[-\alpha(v)CL]. \quad (1)$$

式中: $\alpha(v)$ 为气体吸收系数; L 为光通过待测气体的光程; C 为待测气体的浓度. 在近红外波段, 气体的吸收系数很小, 满足 $\alpha(v)CL \ll 1$, 将式 (1) 傅里叶展开为

$$I_2 \propto \alpha(v)CL. \quad (2)$$

式中: I_2 为二次谐波信号. 可以看出, 二次谐波信号和浓度成正比, 同时也与气体通过的光程成正

比. 为了提高检测灵敏度, 需要增加激光通过气体的光程^[3-4]. 为了增加通过气体的激光光程, 出现了几种多次反射腔体, 主要有 White 腔^[5]、Herriott 腔^[6-9]以及 CEAS 腔^[10]等. White 腔采用 3 个曲率半径相同的球面凹面反射镜, 光束在 3 个反射镜之间来回反射, 适用于大孔径红外光的入射, 由于需要采用 3 个反射镜, 结构稳定性较差. 传统的 Herriott 腔采用两个曲率半径相同的球面凹面反射镜, 同轴平行放置. 若光线以特定角度入射, 就会在两个镜面间来回反射. CEAS (cavity-enhanced absorption spectroscopy) 腔是近年来出现的一种腔体, 由于不适用车载设备, 此处不再研究. Herriott 腔仅需要两个反射镜, 结构简单, 并且对机械扰动具有固有的稳定性. 但是传统的 Herriott 腔存在结构上的缺陷, 笔者对其进行改进, 作为车载甲烷巡检仪的多次反射光路.

1 多次反射腔体设计

两个凹面反射镜同轴平行放置, 当满足以下条件时, 光线就会在两个镜面间来回反射. 经过 N 次反射后, 从入射点射出, 光斑在镜面上呈圆周均匀分布.

$$N \cdot \theta = 2m\pi. \quad (3)$$

$$d/R = 1 - \cos \theta. \quad (4)$$

$$N = 2pm + k. \quad (5)$$

收稿日期: 2015-11-10; 修订日期: 2015-12-26

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2013BAD17B04)

通信作者: 詹自力 (1965—), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事纳米材料和气敏元件研究, E-mail: zhanzili@zzu.edu.cn.

式中: N 表示总的反射次数; θ 为相邻次数光斑之间的夹角(投射到同一个反射镜上); m 为完成 N 次反射需要走过 m 个 2π 周期; d 为两个凹面镜之间的距离; R 为凹面镜的曲率半径; p 为每个镜子上每个周期里的光斑数; $k = \pm 2, \pm 4, \dots, \pm 2n$.

采用曲率半径 $R = 1\ 300\ \text{mm}$ 的凹面镜, 每个周期里有 5 个点, 即 $p = 5$. 同一个镜面上两个相邻光斑之间的夹角为 2θ , 假设之间分布 10 个点, 则式(6)成立, 取 $m = 10$, 则变为式(7).

$$\theta \cdot 2p - 360^\circ = \frac{2 \cdot \theta}{m}. \quad (6)$$

$$\theta \cdot 10 - 360^\circ = \frac{1}{5} \cdot \theta. \quad (7)$$

根据式(5)得出 $\theta = 36.73^\circ$, 根据式(4)得出 $d = 258.162\ 3\ \text{mm}$.

综上所述, $R = 1\ 300\ \text{mm}$, $d = 258.162\ 3\ \text{mm}$, $\{N, m, k, p\} = \{98, 10, -2, 5\}$.

根据 Herriott 腔体的重入条件, 光线以 36.73° 入射, 则光线在两个反射镜中间反射 98 次以后, 从入射点射出. 如果在入射镜的适当位置开孔, 则可以在光线进入入射点之前把光线引出. 否则采用传统的 Herriott 腔体, 由于入射点和出射点是在同一点, 且二者的夹角很小, 若要避免准直器和探测器在结构上的干涉, 如图 1 所示, 则 L 就要很大, 结构件显得笨重. 因此, 在 $N = 96$ 的地方开孔, 提前把光线引出. 这样, 腔体的长度方向就可以短一些.

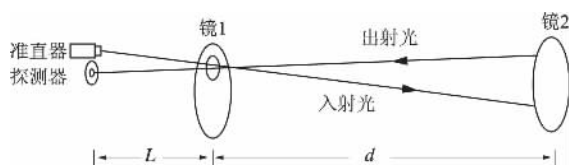


图1 准直器与探测器在同一端

Fig.1 The collimator and detector at the same end

采用上述方案制作多次反射腔体, 在入射孔的位置安装光纤准直器, 出射孔的位置安装探测器.

2 车载激光甲烷检测仪系统设计

该系统由车前采气单元、车内检测单元、车内控制器、远程监控中心 4 部分组成, 如图 2 所示. 车前采气单元把道路上的空气吸到车内检测单元内, 车内检测单元检测空气中甲烷气体的浓度信息, 车内控制器显示、播报浓度信息, 并通过无线网络把巡检信息上传至远程监控中心. 一旦发现泄漏事件, 远程监控中心能及时协调处理.

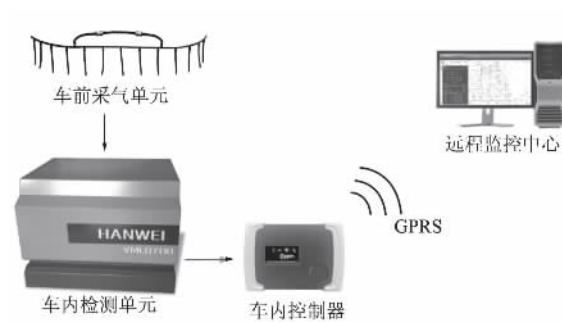


图2 系统组成图

Fig.2 Photo of system composition

系统设计框图如图 3 所示, 可分为气路设计、光路设计和电路软硬件设计等部分, 下面分别介绍.

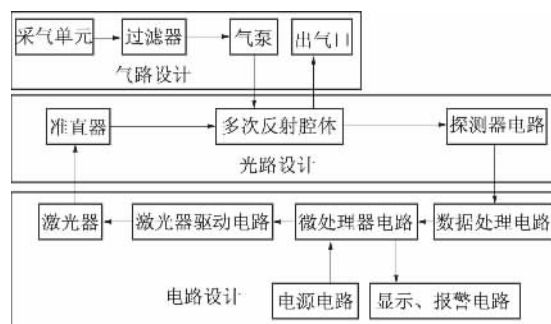


图3 系统设计框图

Fig.3 System design block

2.1 气路设计

气路设计主要包括车前采气单元设计、气泵选型、过滤器选型等部分. 车前采气单元根据汽车前保险杠量身定制, 具有流线型的外观, 便于巡检员驾驶.

由于空气中含有灰尘和水汽, 如果被吸入进多次反射腔体, 会污染镜面, 导致反射镜的反射率降低, 因此需要对灰尘和水汽进行过滤.

2.2 电路硬件设计

激光器驱动电路产生调制信号, 驱动激光器产生所需波长的激光. 激光通过光纤耦合到多次反射腔体的光纤准直器里, 在腔体里经过多次反射后, 到达接收端. 接收端的光电转换电路如图 4 所示, 包括光电转换与前置放大电路.

光信号包含了气体的浓度信息, 经光电二极管转换成电信号. 前置放大电路的目的是把光电二极管输出的电流信号转换成电压信号. 运算放大器是前置放大电路的核心部件, 其性能指标, 如频率响应、开环增益、输入偏置电流以及噪声性能均对前置放大电路有重要影响. R 是反馈电阻, 通

过改变 R 值,改变光信号转换为电信号的大小.

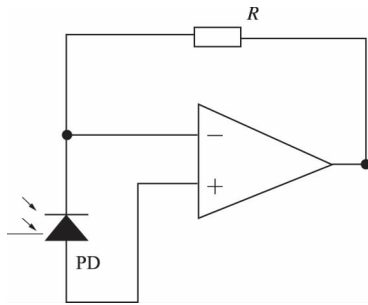


图 4 光电转换电路图

Fig. 4 Diagram of photoelectric conversion circuit

经过光电转换后的电压信号,通过如图 5 所示的锁相放大电路,主要功能是用来提取反映气体浓度信息的二次谐波信号.锁相放大电路^[11-12]是利用互相关原理设计的同步相干检测器,通过被测信号与参考信号的比较,提取与参考信号同频的信号分量.因此能大幅度地抑制噪声,提高探测灵敏度和信噪比.由于要提取的是正弦波的二次谐波信号,因此参考信号采用的是正弦波的二倍频信号.

二次谐波信号经过滤波电路处理以后,由 AD 转换器转换为数字信号,送给微处理器进行处理,然后通过显示部分显示输出.当有气体泄漏时,就会发生共振吸收,通过提取二次谐波信号,根据式 (2) 就可计算出气体的浓度.

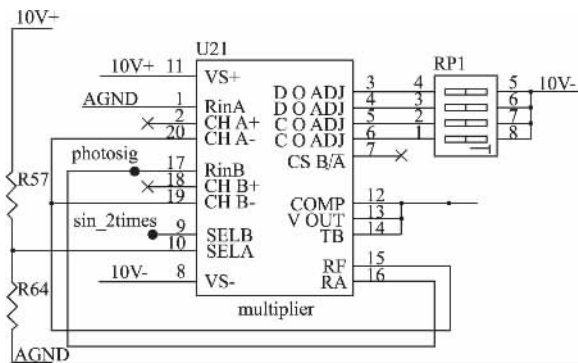


图 5 锁相放大电路

Fig. 5 Diagram of lock-in amplifier circuit

2.3 电路软件设计

微处理器部分的主要功能是测量气体的浓度信息,其程序流程图如图 6 所示.

显示部分的主要功能是接收、显示 MCU 数据,并在浓度达到报警值时发出声光报警,其程序流程图如图 7 所示.

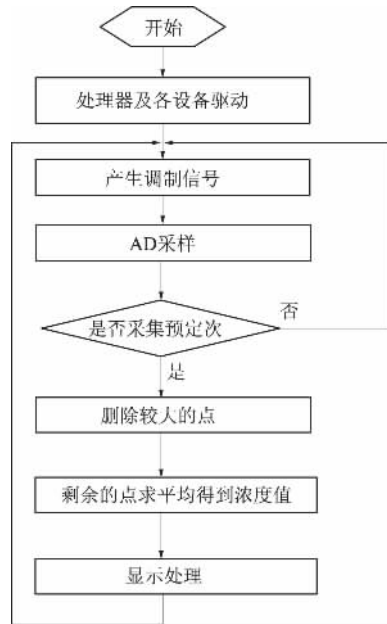


图 6 微处理器工作流程图

Fig. 6 Microprocessor work flow chart

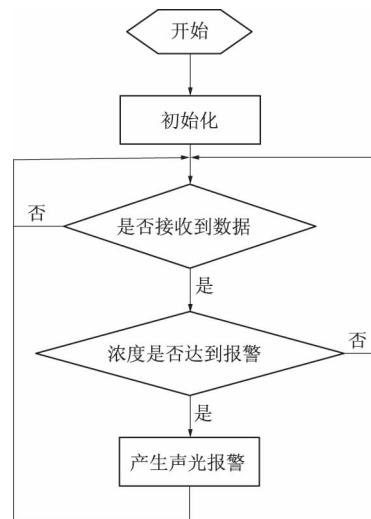


图 7 显示程序流程图

Fig. 7 Display program flow chart

3 试验与结果分析

采用上述系统,在实验室的静态测试结果如表 1 所示.由表 1 可以看出,实际的测试结果与标准气浓度基本一致,该系统的检测精度为 1%.

表 1 实验室测试结果

Tab. 1 Test results in the lab

序号	标气体积分数/ 10^{-6}	测量结果/ 10^{-6}
1	5	5
2	20	19.8
3	500	505
4	1 000	990

把上述系统安装在汽车上,在某燃气公司进

行实际的巡检工作. 在埋有燃气管道的道路上以 30 km/h 的速度行驶, 巡检仪报警, 体积分数为 5×10^{-6} . 经过在地面上钻眼、取样等进一步排查, 确认为中压管线断裂. 燃气公司立刻派出施工队进行抢修, 避免了爆燃事故的发生.

该检测系统跟传统的手持检测仪相比, 提高了测试效率和测试的准确性, 并且降低了人工检测成本. 采用人工巡检需要 4 个月才能把该城市的燃气管道巡检一遍, 采用车载激光甲烷巡检仪只需要一周时间就能完成, 缩短了巡检周期, 能够尽早发现微小泄漏并及时抢修, 把爆燃事故扼杀在萌芽状态.

4 结论

笔者设计了 96 次反射腔体, 该腔体灵敏度高, 即使是微小的泄漏也能检测到; 由于采用激光光谱吸收技术, 其选择性好, 只对甲烷有反应, 能有效避免汽车尾气等其它气体的干扰. 安装有车载甲烷泄漏检测系统的汽车在行驶时, 实时对道路两侧的燃气管道进行监测, 提高燃气巡检效率, 缩短巡检周期, 更好地保障燃气管网运行的安全, 减小或避免燃气管网爆炸、起火事件的发生.

参考文献:

- [1] 尚中锋, 张青云, 陈海永, 等. 基于车载激光甲烷泄漏检测系统 [C] // 2011 中国仪器仪表与测控技术大会论文集. 北京: 中国仪器仪表学会, 2011.
- [2] 王汝琳, 王咏涛. 红外检测技术 [M]. 北京: 化学工

业出版社, 2006: 27 - 29.

- [3] BRASSINGTON D J. Tunable diode laser absorption spectroscopy for the measurement of atmospheric species [J]. Spectroscopy in environmental science, 2001, 55: 2083 - 2089.
- [4] BARES W L. Tunable Fiber laser source for methane detection at 1.68 μm [J]. Boston. Proceedings of SPIE, Chemical, Biochemical and environmental fiber sensors, 1992, 9(9): 98 - 109.
- [5] WHITE J U. Long optical paths of large aperture [J]. Opt Soc AM, 1942, 32(5): 285.
- [6] HERRIOTT D R. Kogelnik H, Kompfner R, Off-axis paths in spherical mirror interferometers [J]. Appl Opt, 1964, 3(4): 523 - 526.
- [7] HERRIOTT D R, Schulte H J. Folded optical delay lines [J]. Appl Opt, 1965, 4(8): 883 - 889.
- [8] PIERCE J R. Theory and design of electron beams [J]. Van Nostrand, 1954, 6(2): 194 - 197.
- [9] CHRISTOPHER G, CHRISTOPHER R. Multilaser herriott cell for planetary tunable laser spectroscopy [J]. Appl Opt, 2007, 46(28): 6923 - 6935.
- [10] BAER D, PAUL J, GUPTA M, et al. Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated cavity output spectroscopy [J]. Appl Phys, 2002, 75(2/3): 261 - 265.
- [11] 高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 154 - 182.
- [12] 张厥盛, 郑继禹, 万心平. 锁相技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 5 - 10.

Optical Path Optimization Design and System Implementation of the Vehicle-mounted Methane Inspection Instrument

LI Zhigang¹, CHEN Haiyong¹, ZHAN Zili², WANG Shuqian¹, ZHENG Guofeng¹

(1. National-recognized Enterprise Technology Center, Henan Hanwei Electronics Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;
2. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Multiple-pass cell is the core component of the laser absorption spectrum gas sensor, and its structure and performance directly affect the sensitivity and stability of the whole device. This paper analyzes the design scheme and the working principle of the mainly used multiple pass cells both at home and abroad, such as White cell, Herriott cell, CEAS cell etc.. This papers also designs and manufactures a 96 times cell, and applies it in a vehicle-mounted laser methane inspection instrument successfully. The practical application of the gas company shows that the instrument greatly improves the efficiency of gas inspection, shortens the period of gas pipeline inspection, effectively reduces the occurrence of deflagration accident.

Key words: TDLAS; multiple pass cell; White cell; Herriott cell; vehicle-mounted; natural gas leakage detection

南水北调中线工程潮河段征迁安置风险分析

李宗坤¹, 吴赛¹, 李定斌², 张西辰²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省人民政府移民工作领导小组办公室, 河南 郑州 450008)

摘 要: 针对南水北调中线工程征迁安置风险因素较多, 且随着工作的进展风险因素不断变化的问题, 以潮河段为例, 在分析征迁安置工作特点和风险来源的基础上, 通过构造 WBS-RBS 判断矩阵对风险进行动态识别, 采用层次分析法(AHP)和风险度理论计算各子工作的权重和风险度, 并按照5级风险标准对征迁安置风险进行综合评价。结果表明, 潮河段征迁安置工作总体风险水平为3级中等风险, 其中安置阶段风险较大, 风险等级为4级, 与工程调研结果基本一致, 应给予特别重点关注。

关键词: 南水北调中线工程; 征迁安置; WBS-RBS; 层次分析法; 风险度

中图分类号: TV68; TV211.3

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.013

0 引言

南水北调中线工程线路长、影响范围广, 涉及的行政区域和单位部门较多, 存在着众多不确定性风险因素。目前针对征迁安置风险分析的研究相对较少, 崔志清等^[1]分析了京石段永久征地工作中存在的主要问题和原因。信增标等^[2]讨论了南水北调工程征迁安置工作评价内容和方法。单木双等^[3]对南水北调中线工程生产安置模式进行了探讨。这些都是对征迁安置工作的经验总结和问题分析, 缺乏系统的风险理论应用研究。关于移民安置风险方面, 国内外取得了较多的研究成果, Cernea^[4]提出了移民贫困、风险与重建模型。施国庆等^[5]结合农村养老保险对水库移民安置方式进行了探讨。杨帆等^[6]运用模糊数学理论对珊溪水利工程移民安置工作进行了风险分析与评价。杜瑞芳等^[7]基于BP神经网络模型对水库移民后期扶持效果风险进行了深入分析。但是征迁安置工作与主体工程建设联系紧密, 受工程进度和设计方案的影响较大, 且在国家政策、补偿标准等方面与移民安置存在很大的不同。显然现阶段的研究很少考虑征迁安置与移民安置的差别以及实施过程中的风险变化对整体工程目标的影响。笔者结合工程实例, 运用WBS-RBS和AHP深入分析和计算影响征迁安置实施的风险因素, 采用

风险度理论和5级风险标准对工程总体风险和各阶段风险水平进行了综合评价。

1 工程概况

南水北调中线工程潮河段位于河南省郑州市境内, 全长45.847 km, 共布置各类建筑物80座, 计划施工总工期32个月, 概算总投资15.48亿。2010年6月, 潮河段征迁安置工作全面开始。工程建设用地1582.32 hm², 其中永久征地749.19 hm² (包括管理机构用地0.31 hm²), 临时征地833.13 hm² (包括按永久补偿50.72 hm²), 居民搬迁涉及新郑市、中牟县和航空港区的11个乡镇(办)55个行政村209人, 生产安置人口7737人, 拆迁房屋面积31331.28 m², 涉及拆迁副业15家、企业6家、单位4家, 影响各类专项管线248条。

2 风险识别

2.1 WBS-RBS

工作结构分解(WBS)^[8]是将一个整体工作或目标按照工作特性和要求逐层分解为若干互相独立的结构单元, 作为项目管理的对象。而风险结构分解(RBS)^[8]是一种类似于WBS的风险分解方法, 通过RBS将工程所遇到的风险逐层分解, 得到不同层次的子风险。最后通过构建WBS-RBS矩阵,

收稿日期: 2016-01-13; 修订日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379192)

作者简介: 李宗坤(1961—), 男, 河南邓州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水利水电工程健康诊断与风险管理方面的研究, E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn.

直观地识别出各个工作阶段的风险因素。

2.2 基于 WBS-RBS 的征迁安置风险动态识别

征迁安置风险随着工作的进展和外部环境的变化而不断变化,上一工作阶段重要的风险因子,到下一阶段可能转化为可忽略或更重要的风险。基于风险因子的时效动态特性,笔者采用 WBS-RBS 矩阵对征迁安置风险因素进行全面动态识别。首先按照工作内容和风险来源进行 WBS 分解和 RBS 分解,分别见图 1~2。



图 1 WBS 分解结果

Fig. 1 Result of WBS decomposition

结合征迁安置工作的实际需要和便于计算分析的考虑,遵循全面性、动态性、实用性和定性与定量相结合的原则,通过资料收集、现场调研以及相关人员的信息反馈,在对工作和风险进行分解的基础上,建立 WBS-RBS 风险识别矩阵对各工作阶段风险因素进行有效识别,从而多方位、多角度地反映征迁安置实施过程的风险状况,如表 1 所示。

表 1 WBS-RBS 风险识别矩阵表

Tab. 1 Risk identification matrix table of WBS-RBS

1 级 2 级		R_1					R_2				R_3				R_4			R_5	
工作	工作	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{21}	R_{22}	R_{23}	R_{24}	R_{31}	R_{32}	R_{33}	R_{34}	R_{41}	R_{42}	R_{43}	R_{51}	R_{52}
W_1	W_{11}	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
	W_{12}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
	W_{13}	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	W_{14}	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	W_{15}	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0

从构建的风险识别矩阵可以看出:征地工作 W_1 中,社会风险 R_1 和技术风险 R_4 所占比重较大,2 级子风险因素较多,征地过程当中,占地房屋调查稍有遗漏偏差,很容易引起群众不满。拆迁工作 W_2 中,社会风险 R_1 和管理风险 R_3 属于关键因素,政府与当地群众的沟通协调以及管理人员的能力素质对拆迁工作影响较大,不文明拆迁现象是导致社会冲突的主要原因。安置工作 W_3 中,社会风险 R_1 和经济风险 R_2 相对较为重要,资金补偿不及时、安置标准太低,群众的生产生活水平很难得到保障,是引发群众矛盾的主要因素。因此,建管人员应当采取针对性措施,凭经验灵活处理各种矛盾纠纷,尽可能避免社会风险因素发生。



图 2 RBS 分解结果

Fig. 2 Result of RBS decomposition

续表 1

1 级	2 级	R ₁					R ₂				R ₃				R ₄			R ₅	
		R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₂₁	R ₂₂	R ₂₃	R ₂₄	R ₃₁	R ₃₂	R ₃₃	R ₃₄	R ₄₁	R ₄₂	R ₄₃	R ₅₁	R ₅₂
W ₂	W ₂₁	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1
	W ₂₂	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	W ₂₃	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1
	W ₂₄	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
	W ₂₅	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
W ₃	W ₃₁	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0
	W ₃₂	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	W ₃₃	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
	W ₃₄	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	W ₃₅	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

注:表中数值为 0 表示该工作无此风险;数值为 1 表示该工作包括此风险。

3 风险计算

3.1 层次分析法

层次分析法(AHP)^[9-10]是将复杂的问题逐层分解为清晰直观的递阶层次结构,通过元素间的两两比较与权重计算,确定各级子元素相对决策目标的重要程度。具体过程如下:

(1) 根据 1~9 标度原则,构建各风险元素相对准则层的判断矩阵:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 表示风险因素 U_i 相对于 U_j 的重要性程度。 a_{ij} 的取值及意义见表 2,若 $i = j$,则 $a_{ij} = 1$,反之 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。

表 2 1~9 标度取值及意义

Tab. 2 Value and significance of 1 to 9 scale

标度	意义	标度	意义
1	U_i 与 U_j 同等重要	7	U_i 比 U_j 强烈重要
3	U_i 比 U_j 稍微重要	9	U_i 比 U_j 极端重要
5	U_i 比 U_j 明显重要	2/4/6/8	上述中间状态取值

(2) 根据判断矩阵 A 计算各准则下风险因素的相对权重。采用方根法首先计算 A 中每行元素的几何平均值:

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

将几何平均值向量归一化处理后,获得各元素的相对权重向量: $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 。

(3) 检验判断矩阵的一致性。首先计算判断矩阵 A 的最大特征值 $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i}$,然后利用一致性指标 $CR = \frac{CI}{RI}$ 对判断矩阵进行一致性检验。若 $CR < 0.1$,则判断矩阵的一致性满足要

求^[11]。其中, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, RI 为平均随机一致性指标,其取值根据矩阵阶数 n 按表 3 选取。

表 3 平均随机一致性指标取值

Tab. 3 Value of the mean random consistency index

阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

3.2 风险度理论

风险度^[12]是用来描述风险发生概率和损失程度的一种定量分析方法,其计算公式为

$$D = P \cdot Q \quad (3)$$

式中: D 为风险度; P 为风险发生的可能性程度; Q 为风险造成的损失程度。根据模糊数学理论, P 和 Q 的取值范围均为 1~5,其取值的语言描述见表 4; D 的取值可用来划分风险等级, D 值越大表示风险等级越高。笔者采用 5 级风险标准划分风险等级,见表 5。

表 4 P 和 Q 中各数值语言描述表

Tab. 4 Language description table of each value in P and Q

取值	P 值含义	Q 值含义
1	几乎不可能发生	损失极小
2	较小可能会发生	损失很小
3	较大可能会发生	损失较大
4	很可能会发生	损失很大
5	极可能会发生	损失非常大

表 5 D 值及风险等级语言描述表

Tab. 5 Language description table of value in D and risk rank

D 取值	风险等级	风险水平	风险可接受性	对策
[1, 3]	1 级	低风险	可以忽略	给予注意
(3, 6]	2 级	较低风险	不能忽略	稍微关注
(6, 10]	3 级	中等风险	可以接受	给予重视
(10, 16]	4 级	较高风险	不希望有	特别重点关注
(16, 25]	5 级	高风险	不可接受	必须立即处理

专家打分法是计算各 2 级子风险权重和风险度的核心,为确保专家打分的准确性和可靠性,在使用专家打分法时需遵循以下准则:① 选择具有丰富的征迁安置工作经验和风险管理知识背景,并对该工程项目较为熟悉的专家进行打分,同时还要考虑专家的职称、学历、工龄、专业等综合因素.② 建立各风险因素的判断矩阵时,从工程质量安全、沿线社会稳定、群众生产生活水平恢复、主体工程顺利推进等角度,综合考虑各风险因素对工程目标的影响程度.③ 对各风险因素的风险度打分时,应充分掌握并利用已知的判断条件.如专家在对社会风险打分时,应考虑该地区民风素养、政府对当地群众的管控能力以及群众对同区域同时段的其他征迁安置项目的补偿期望等情况.

3.3 基于 AHP 和风险度理论的权重和风险度计算

根据风险识别结果,分别利用 AHP 法和风险度理论计算各层因素权重和风险度,具体过程如下:

(1) 以各 2 级子工作为准则,建立各 2 级子风险的判断矩阵,计算各风险因素的权重并作一致性检验.

(2) 利用专家打分法计算各 2 级子风险相对各 2 级子工作的风险度.

(3) 根据各 2 级子风险的权重和风险度按下式进行加权运算,求出各 2 级子工作的风险度.

$$D_{ij} = \sum_{l=1}^n A_{ijl} D_{ijl}. \quad (4)$$

式中: D_{ij} 为各 2 级子工作 W_{ij} 的风险度; A_{ijl} 为各 2 级子风险 R_{ij} 在各 2 级子工作准则下的权重; D_{ijl} 为各 2 级子风险对各 2 级子工作的风险度; n 为各 2 级子工作包含的子风险数.

(4) 根据各 2 级子工作的权重和风险度,计算各 1 级子工作的风险度,以此类推从而求出项目总风险度.

以 W_{11} 为例,由表 1 可知,影响 W_{11} 的 2 级子风险包括 R_{11} 、 R_{13} 、 R_{24} 、 R_{33} 、 R_{41} ,运用层次分析法计算各风险因素相对 W_{11} 的权重分别为 0.374 6、0.249 2、0.201 8、0.077 3、0.097 1,一致性指标为 0.039 4,满足要求.利用专家打分法计算各子风险对 W_{11} 的风险度分别为 12、9、8、4、6,则 W_{11} 的风险度 $D_{11} = 9.244 2$.同理,算出所有 2 级子工作的风险度和权重,见表 6.

表 6 各子工作风险度和权重计算结果表

Tab. 6 Calculation result table of risk degree and weight in each sub-work

1 级子工作	1 级子工作权重	2 级子工作	2 级子工作权重	2 级子工作风险度
征地 W_1	0.319 1	用地范围核定 W_{11}	0.142 8	9.244 2
		用地申请 W_{12}	0.053 4	6.253 7
		土地勘测定界 W_{13}	0.298 0	9.452 8
		土地权属划分 W_{14}	0.142 6	8.063 9
		地面附着物核查 W_{15}	0.363 2	10.568 4
拆迁 W_2	0.278 8	制定拆迁方案 W_{21}	0.165 6	6.509 4
		发布拆迁公告 W_{22}	0.082 8	4.254 0
		组织沟通协调 W_{23}	0.288 3	7.326 8
		签订拆迁协议 W_{24}	0.082 8	4.142 3
		房屋、企业、单位拆除 W_{25}	0.380 5	8.784 5
安置 W_3	0.402 1	安置人口计算 W_{31}	0.281 4	11.431 4
		安置方式选择 W_{32}	0.168 3	10.827 3
		安置区建设 W_{33}	0.413 5	12.314 7
		临时用地复垦 W_{34}	0.068 4	9.874 5
		专业项目复建 W_{35}	0.068 4	9.605 9

由表 6 不难看出,在征地工作 W_1 中,地面附着物核查 W_{15} 风险度最高;拆迁工作 W_2 中,房屋、企业、单位拆除 W_{25} 风险最大;而在安置工作 W_3 中,安置区建设 W_{33} 、安置人口计算 W_{31} 和安置方式选择 W_{32} 均为容易发生 4 级较高风险的关键子工作,需要给予重点关注.

4 风险评价

以各 1 级子工作为准则,根据表 6 的计算结

果,求出各 1 级子工作的风险度分别为: W_1 的风险度 $D_1 = 9.459 3$; W_2 的风险度 $D_2 = 7.228 0$; W_3 的风险度 $D_3 = 11.463 6$. 则征迁安置工作总体风险度 $D = 9.643 1$.

由评价结果和表 5 可知,南水北调中线工程潮河段征迁安置总体风险水平为 3 级中等风险.其中安置工作风险最大,风险等级为 4 级较高风险,主要是因为安置区医疗、教育等基础设施建设受国家政策和当地经济、社会发展水平影响较大,

征迁安置标准与库区移民标准存在明显差别,后期扶持政策相对不够完善,使得一些问题在实施过程中无章可循,主要依靠有关人员凭经验解决,从而容易引发社会矛盾。相对而言,征地和拆迁工作风险水平较低,均为3级中等风险,这与潮河段征迁安置负责部门认真组织分工、深入核查实物指标,创造性地采取许多针对性的风险预防应急措施,为工程顺利实施创造良好的社会环境密不可分。

5 结论

南水北调中线工程征迁安置工作情况复杂,实施难度较大。笔者根据征迁安置工作特点和风险特性,通过构造WBS-RBS矩阵对征迁安置实施过程的风险因素进行全面动态识别,并运用层次分析法(AHP)和风险度理论计算出各子工作的风险度。最后以潮河段征迁安置工作为例,对项目整体风险进行综合评价,评价结果较为可靠,说明该方法具有较好的合理性与实用性,可为同类线型工程征迁安置风险分析提供借鉴。

参考文献:

- [1] 崔志清,刘延峰,唐文忠.南水北调中线干线工程京石段永久征地实施中存在问题及对策研究[J].南水北调与水利科技,2008,6(S2):217-219.
- [2] 信增标,何长宽,刘玉宏.南水北调征迁安置工作评价内容和评价方法探讨[J].南水北调与水利科技,2008,6(S2):208-210.
- [3] 单木双,赵春锁,王保东,等.南水北调中线工程生产安置模式探讨[J].南水北调与水利科技,2008,6(S2):223-225.
- [4] CERNEA M M. The risks and reconstruction model for resettling displaced populations [J]. World Development, 1997, 25(10): 1569-1587.
- [5] 施国庆,陈琛.农村水库移民养老保险安置方式研究[J].人民黄河,2010,32(6):1-2.
- [6] 杨帆,余建星.水利工程移民安置工作的风险分析与评价[J].水利学报,2005,36(10):78-81.
- [7] 杜瑞芳,姚凯文.基于BP神经网络模型的水库移民后期扶持效果风险评价[J].水电能源科学,2014,32(1):153-156.
- [8] 葛巍,李宗坤,王文娇,等.基于WBS-RBS和AHP的土石坝施工期风险评估[J].人民黄河,2013,35(6):121-123.
- [9] 李宗坤,叶青,李锋.基于未确知网络分析法的土石坝风险分析研究[J].郑州大学学报(工学版),2012,33(1):11-15.
- [10] 李玉民,郭利利,刘旻哲.基于AHP-TOPSIS的物流园区综合竞争力评价模型研究[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(6):125-128.
- [11] 刘铮,吴小萍,杨立国.层次分析法及消去与选择转换法在铁路环评中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2007,28(3):56-60.
- [12] 李宗坤,张亚东,宋浩静,等.基于施工进度计划的建设工程施工期风险分析[J].水力发电学报,2015,34(6):204-211.

Risk Analysis of Land Requisition and Resettlement in Tidal River Section of the South to North Water Diversion Middle Route Project

LI Zongkun¹, WU Sai¹, LI Dingbin², ZHANG Xichen²

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. The Immigration Work Leading Group Office of Henan Province People's Government, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: In view of the problem that the risk that exists in land requisition and resettlement of the south to north water diversion middle route project is so much and changes with the implementation progress, This paper taking Tidal River section as an example, on the basis of analyzing work characteristics and risk origin, identifies risks fully dynamically through building WBS-RBS matrix and calculates the weight and degree of risks based on AHP and risk degree theory. Finally, it makes comprehensive evaluation according to the level 5 risk criteria. The result shows that the overall risk is level 3 medium with the greatest risk ranking level 4 in resettlement phase, which is basically consistent with the engineering investigation result and should be specially focused on.

Key words: south to north water diversion middle route project; land requisition and resettlement; WBS-RBS; AHP; risk degree

干湿循环条件下水泥改性膨胀土变形和强度试验

王建磊¹, 王艳巧², 杨广栋², 张扬帆², 姜宏雨²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 为了探究干湿循环作用对水泥改性膨胀土力学性质的影响, 以合肥地铁1号线太湖路车站基坑膨胀土为试验对象, 进行了不同水泥掺入比和不同养护龄期的水泥改性膨胀土直剪试验, 确定了最佳水泥掺入比以及最佳养护龄期. 在此基础上, 进行了干湿循环条件下膨胀土和水泥改性膨胀土的胀缩变形试验和直剪试验. 试验结果表明: 膨胀土的胀缩变形过程并不完全可逆, 随干湿循环次数的增多, 抗剪强度逐渐减小, 绝对胀缩率逐渐增大, 并最终趋于稳定; 水泥改性后的膨胀土抗剪强度明显提高, 水稳性显著提升, 胀缩性明显减弱; 经水泥改性后, 膨胀土受干湿循环作用的影响显著减小.

关键词: 干湿循环; 膨胀土; 水泥改性; 变形; 强度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.014

0 引言

膨胀土是一种主要由强亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石组成的, 具有膨胀结构以及多裂隙性、强胀缩性和强度衰减性的高塑性黏土^[1-2]. 膨胀土吸水膨胀, 失水收缩, 在自然条件下极易发生反复干缩湿胀, 在含水率较低时具有很高的强度, 表现为质地坚硬, 然而一旦遇水湿化即发生膨胀变形, 且强度急剧下降^[3-4]. 因此, 膨胀土地基上的建筑物受到干湿循环作用而遭到破坏的工程事例屡见不鲜.

由于膨胀土的工程性质较差, 在工程实际中, 通常采用水泥、石灰等方式对膨胀土进行化学改性. 其中, 水泥改性膨胀土具有改性效果明显, 水稳性好, 污染小等优点^[5-7], 已被广泛运用到实际工程中. 目前, 国内学者已对水泥改性膨胀土做了一系列研究, 李红炉等^[8]对水泥改性膨胀土的干密度及自由膨胀率进行室内研究, 结果表明, 水泥改性膨胀土随着拌和后放置时间的增长, 压实干密度先减小后增大, 同时土体的自由膨胀率前期快速减小, 7 d后逐渐趋于稳定. 刘志彬等^[9]对水泥改性膨胀土内微观孔隙进行了定量研究, 发现改性膨胀土中存在较多窄缝状孔隙, 同时水泥的掺入使得膨胀土内的微孔体积显著减小. 黄斌

等^[10]对南阳段膨胀土进行了水泥改性试验研究, 研究发现随水泥掺量的增加, 膨胀土胀缩特性降低, 但掺量达一定程度后, 水泥掺量的增加对胀缩特性的抑制效果并不明显. 赵春吉等^[11]对水泥改性强膨胀土进行理化试验研究, 从微观角度分析了水泥改性膨胀土的机理. 然而, 对于水泥改性膨胀土在反复干湿循环过程中的变形以及强度变化特征的研究鲜有报道. 因此, 有必要研究干湿循环条件下水泥改性膨胀土的变形和强度变化规律.

笔者以合肥地铁1号线太湖路车站建设工程中的膨胀土为试验对象, 进行干湿循环条件下素膨胀土和改性膨胀土的变形和强度试验, 从而得出干湿循环作用对水泥改性膨胀土变形与强度的影响以及水泥改性对抑制膨胀土干湿循环作用的效果, 为膨胀土地区水泥改性的设计与施工提供科学合理的依据.

1 试样材料及制样方法

1.1 膨胀土及水泥基本物理特性

试验用土取自合肥地铁1号线太湖路车站, 埋深14 m, 颜色为淡黄色, 其基本物理性质指标见表1.

1.2 试样制备

根据土工试验规范^[12], 将从现场取回来的土

收稿日期: 2015-12-30; 修订日期: 2016-01-19

基金项目: 中央高校基金科研业务费专项基金(2014B36614)

通信作者: 王艳巧(1983—), 女, 安徽萧县人, 河海大学讲师, 博士, 主要从事边坡加固处理方面研究, E-mail: wanygyq0726@163.com.

料进行翻晒风干,过 2 mm 筛.为了使水泥与土样拌合均匀,将试验所用的水泥过 0.5 mm 筛.按照试验设定含水率(水与烘干素土的质量比) 22.5% 和不同水泥掺入比(水泥与烘干素土的质量比),称取试样所需土样和水泥量,将水泥均匀拌入到土

中,然后均匀加入蒸馏水搅拌,使水泥改性土样含水率达到控制含水率.将配好含水率的改性土样放入密闭塑料袋内,24 h 后取出土样.土样采用液压千斤顶一次压实成环刀样,试样高度 20 mm,直径 61.8 mm,试样初始干密度为 1.60 g/cm^3 .

表 1 土样基本物理特性

Tab. 1 The basic physical properties of soil samples

液限 $w_p/\%$	塑限 $w_L/\%$	塑性指标 I_p	比重 G	自由膨胀率 $F_s/\%$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{max}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
48.5	23	25.5	2.47	62	22	1.58

2 试验方案

2.1 最佳水泥掺量确定

将水泥改性膨胀土(水泥掺入比为 3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%) 环刀样放入恒温恒湿养护室内(温度 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度 90% 以上) 养护 28 d,再将养护后的试样放入单联直剪仪内,在竖向荷载为 200 kPa 下进行快剪试验,得出试样的抗剪强度,试验结果如图 1 所示.由图 1 可知,随着水泥掺量的增加,水泥改性膨胀土的强度不断增加,当水泥掺量小于 5% 时,随着水泥掺量的增加,水泥改性膨胀土的抗剪强度增加较快;当水泥掺量大于 5% 时,水泥改性膨胀土抗剪强度增加较为缓慢,同时当水泥掺量大于 7% 时,水泥改性土的强度增加并不明显,因此对于该试验的膨胀土,水泥改性的最佳水泥掺量约为 5%.在实际施工时,考虑到拌和工艺、造价及现场施工等因素,还需进行校核试验,以综合确定施工用的水泥掺量.

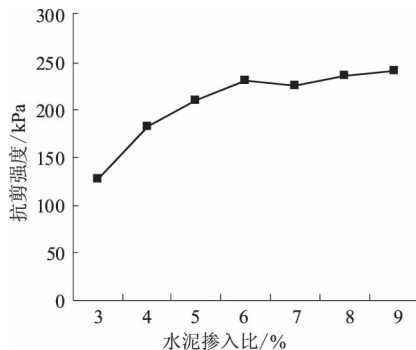


图 1 抗剪强度与水泥掺入比关系

Fig. 1 The relationship between shear strength and cement content

2.2 最佳养护龄期确定

将水泥改性膨胀土(选择最佳水泥掺入比 5%) 环刀样放入恒温恒湿养护室内养护 0、1、3、5、7、14、28 d,并将养护后的试样放入直剪仪内,在竖向荷载 200 kPa 下进行快剪,得出试样的抗

剪强度,试验结果如图 2 所示.由图 2 可知,水泥改性膨胀土的抗剪强度随养护龄期的增加而增加.当龄期为 5 d 时,水泥改性土的强度达到 70% 左右.试样养护至 7 d 后,抗剪强度增加缓慢,养护 14~28 d 后,抗剪强度基本保持不变.因此对于该试验的膨胀土,水泥改性的最佳养护龄期约为 28 d.

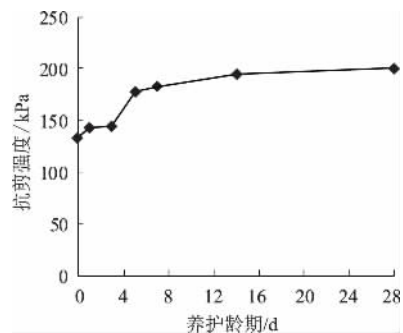


图 2 抗剪强度与养护龄期关系

Fig. 2 The relationship between shear strength and curing age

2.3 干湿循环试验

根据 2.1 和 2.2 的试验结论,将水泥改性膨胀土(水泥掺入比为 5%) 试样放入标准养护室内,养护 28 d,素膨胀土试样不养护.试验装置主要由千分表、环刀、透水石以及水箱等部分组成.干湿循环试验步骤如下:

(1) 失水收缩过程.将试样放在自然条件下风干,对其进行失水收缩,每隔一定时间记录一次试样高度,当含水率为 11% 时,失水收缩阶段结束,至此试样完成失水收缩过程.为了加快试样风干速率,在环刀试样的顶部采用多孔板.

(2) 吸水膨胀过程.将失水后的试样放在透水石上,用吸水球直接向水箱内注水,为使试样吸水均匀,在加水过程中,保持水面在透水石顶部以下,在透水石上加一张滤纸以防土体黏附其上,当千分表读数稳定时,认为试样已吸水饱和,至此试

样吸水膨胀过程结束. 试样完成一次干湿循环.

(3) 重复进行步骤(1)、(2), 完成若干次干湿循环, 在干湿循环过程中每隔一定时间记录试样高度变化.

(4) 将干湿循环结束后的试样放入单联直剪仪内, 同时对试样在竖向荷载为 100、200、300、400 kPa 下以相同速率进行快剪, 得出试样在各级荷载下的抗剪强度.

对土体进行 4 次干湿循环, 干湿循环过程中含水率变化范围为 11% ~ 38%, 控制含水率为 20%, 控制过程如图 3 所示.

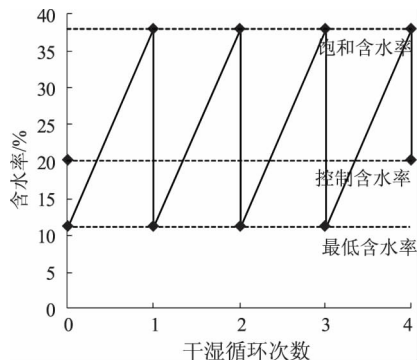


图3 干湿循环过程示意图

Fig. 3 Sketch of wetting-drying cycle

3 试验结果分析

3.1 试样变形结果及分析

试样经过 4 次干湿循环后, 其高度变化如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 随循环次数的增加, 原膨胀土和改性后膨胀土试样经吸水饱和后高度均逐渐增大, 干缩状态时高度也逐渐增大; 且前两次高度变化幅度较大, 后两次高度变化趋于平缓, 相比较膨胀土经水泥改性后变形不明显.

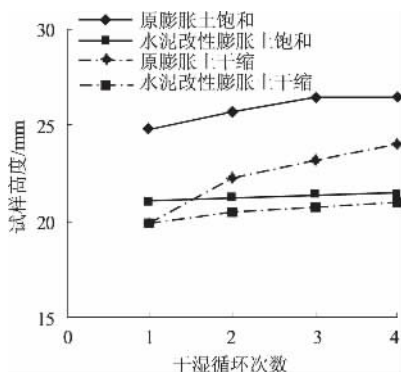


图4 干湿循环过程中试样高度变化

Fig. 4 Variation of height of specimen under wetting-drying cycle

为分析干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形变化规律, 分别用绝对胀缩率来描述试样胀缩程度

及变化趋势. 并定义绝对膨胀率 η_{wi} 和 η_{di} 来表征整个循环过程中试样的胀缩程度及其变化, 即

$$\eta_{wi} = |(h_{wi} - h_0) / h_0| \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_{di} = |(h_{di} - h_0) / h_0| \times 100\% \quad (2)$$

式中: h_{wi} 为试样某次循环浸水饱和后的高度, mm; h_{di} 为某次试样失水干缩后的高度, mm; h_0 为制样时的高度, mm; i 为循环次数. 由测试结果及式(1)和(2)计算出水泥改性膨胀土和未改性膨胀土在干湿循环中的绝对胀缩率, 由于第一次干湿循环是从制样含水率 20% 开始循环, 因此第一次的绝对收缩率无法计算得出.

图 5 和 6 分别表示了原膨胀土与水泥改性膨胀土绝对膨胀率、绝对收缩率随干湿循环次数的增加而变化的趋势.

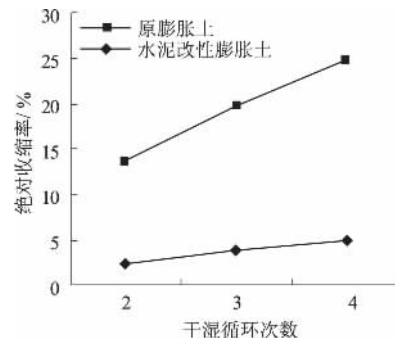


图5 干湿循环过程中绝对收缩率变化曲线

Fig. 5 Curves of absolute shrinkage under wetting-drying cycle

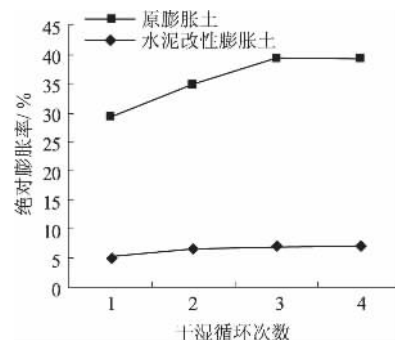


图6 干湿循环过程中绝对膨胀率变化曲线

Fig. 6 Curves of absolute expansion under wetting-drying cycle

从图 5 和图 6 可以看出, 随循环次数增加试样的绝对膨胀率逐渐增加, 这主要是由于试样在初始状态下干燥开裂后, 其土体原有的结构遭到破坏, 导致土颗粒间的胶结变弱, 结构力逐渐消失^[13]. 随着干湿循环次数的增加, 土颗粒间的胶结进一步变弱, 吸水后试样的膨胀性逐渐体现出来, 在第 2、3 次干湿循环中这种现象表现非常明显. 因此, 在饱和状态下, 试样的高度不断增加, 同时水泥改性膨

胀土绝对胀缩率较原膨胀土明显减小,变形的幅度约为原膨胀土的20%,说明膨胀土经水泥改性后,土体的水稳性得到了显著的提高.水泥经过水化反应产生的钙离子,在碱性环境中能与黏土矿物的二氧化硅、三氧化二铝等反应,生成不溶于水的硅酸钙水化物、铝酸钙水化物等,这些新生成的结晶化合物在水中和空气中逐渐硬化,不仅增大了土体的强度,同时也提高了水稳性^[14].

3.2 抗剪强度结果及分析

改性前后膨胀土试样经过4次干湿循环后,其抗剪强度分别如图7和图8所示.从图7可以看出,原膨胀土经干湿循环后抗剪强度明显下降,在前两次干湿循环中强度衰减的较为明显,之后强度基本趋于稳定^[15],这主要是由于在反复干湿循环过程中,裂隙会逐步发育,土体的破坏也不断累积,使土体逐渐趋于松弛,从而导致土体的干密度减小.同时干湿循环对土的粒间联结造成损伤,进一步促成了土体松散的排列结构,形成更大的孔隙空间,所以随着干湿循环次数的增加,试样的抗剪强度逐渐降低.由于膨胀土经水泥改性后,膨胀土的水稳性显著增强,土体的粒间联结能力增强,干湿循环对土的粒间联结损伤减弱.因此,水泥改性膨胀土经干湿循环后强度下降并不明显,从图8可以明显看出.为进一步分析改性后膨

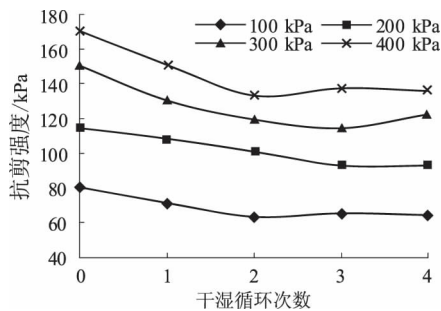


图7 干湿循环过程中原膨胀土抗剪强度变化曲线

Fig.7 Curves of expansive soil shear strength under wetting-drying cycle

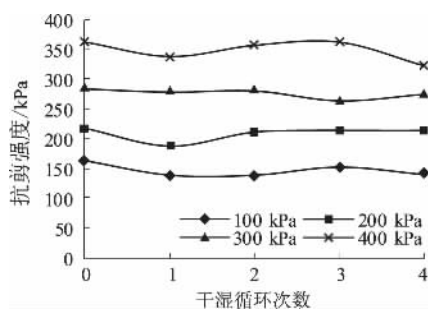


图8 干湿循环过程中水泥改性土抗剪强度变化曲线

Fig.8 Curves of cement-treated expansive soil shear strength under wetting-drying cycle

土强度提高原因,将改性前原膨胀土与水泥改性后膨胀土黏聚力与内摩擦角随干湿循环变化规律分别示于图9和图10中.由图可见,原膨胀土经过干湿循环后,黏聚力和内摩擦角均有明显下降.同时水泥改性膨胀土黏聚力先减小后增大,而内摩擦角先增大后减小,这主要是由于改性后膨胀土,经过28 d的养护后,快剪破坏为脆性破坏,剪切面并不平整.但是从总体上来看,膨胀土经水泥改性后内摩擦角以及黏聚力均明显提高.

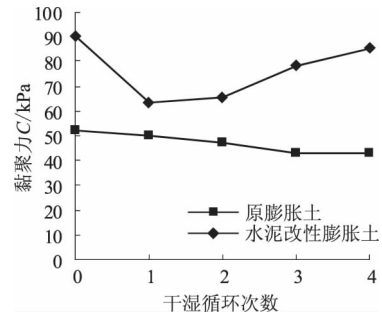


图9 干湿循环过程中黏聚力变化曲线

Fig.9 Curves of cohesive value under wetting-drying cycle

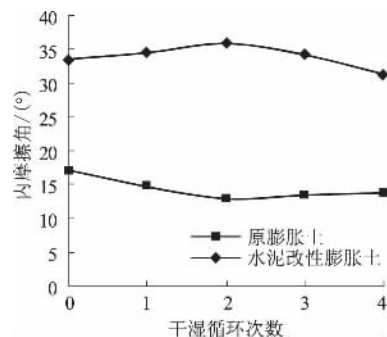


图10 干湿循环过程中内摩擦角变化曲线

Fig.10 Curves of internal friction angle under wetting-drying cycle

4 结论

笔者研究了干湿循环条件下水泥改性膨胀土强度及胀缩变形的变化规律,可以得到如下结论:

(1) 水泥改性膨胀土能明显地提高膨胀土的抗剪强度,随着水泥掺量及养护龄期的增加,改性膨胀土的抗剪强度逐渐增大,并趋于稳定.

(2) 试样干缩湿胀变形并不完全可逆.随干湿循环次数的增多,改性前后膨胀土的绝对胀缩率均在逐渐增加,在第1、2次循环过程中其变形的变化幅度较大,之后基本趋于稳定.水泥改性膨胀土较原膨胀土,绝对胀缩率明显减小.

(3) 原膨胀土经历干湿循环作用后抗剪强度明显下降,黏聚力和内摩擦角均有明显下降,并且

在前两次干湿循环中强度衰减的较为明显. 水泥改性膨胀土较原膨胀土内摩擦角以及黏聚力均明显提高, 且经历干湿循环作用后强度并未发生明显下降.

参考文献:

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984: 1-20.
- [2] 杨果林, 刘义虎, 黄向京. 膨胀土处置理论与工程建设新技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 1-7.
- [3] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936-1941.
- [4] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802.
- [5] 李东森, 夏熙临, 陈丛丛, 等. 石灰、水泥及砂改性膨胀土工程特性的试验研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 25-27.
- [6] LORENZO G A, BERGADO D T. Fundamental parameters of cement-admixed clay-new approach [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130(10): 1042-1050.
- [7] BROMS B B. Stabilization of soft clay with lime columns [C] // Proceedings of the seminar on soil improvement and construction techniques on soft ground. Singapore: Nanyang Technological Institute, 1984: 120-133.
- [8] 李红炉, 徐秋达. 水泥改性膨胀土干密度与自由膨胀率试验研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 216-219.
- [9] 刘志彬, 施斌, 王宝军. 改性膨胀土微观孔隙定量研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 526-530.
- [10] 黄斌, 聂琼, 徐言勇, 等. 膨胀土水泥改性试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26(11): 27-30.
- [11] 赵春吉, 赵红华, 常艳, 等. 水泥改性强膨胀土理化试验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(6): 604-611.
- [12] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [13] 张家俊, 龚壁卫, 胡波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2729-2734.
- [14] 熊海帆. 膨胀土水泥改性试验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2010.
- [15] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50.

Experimental Research Deformation and Shear Strength on Cement-treated Expansive Soil During Wetting-drying Cycles

WANG Jianlei¹, WANG Yianqiao², YANG Gangdong², ZHANG Yangfan², JIANG Hongyu²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to reveal the influence of wetting-drying cycles on the mechanical of cement-treated expansive soil, the expansive soil obtained from excavation of Hefei Metro Line 1 Taihu Road Station was taken as test object. The optimal cement ratio and curing period were determined, direct shear test was conducted under different cement ratio and curing period cement-treated expansive soil. Based on this, expansive soil and cement-treated expansive soil variation of deformation and strength test was conducted under wetting-drying cycles. It was shown that the swelling-shrinkage deformation of expansive soils was not completely reversible. Under wetting-drying cycles, shear strength of expansive soil decreased, the total ratio of swell-shrink increase and stabilized finally. Cement modified expansive soil can improve the shear strength of expansive soil and the swell-shrink of expansive was decline obviously. Variation of cement-treated expansive soil significantly decreased during wetting-drying cycles.

Key words: wetting-drying cycle; expansive soil; cement treatment; deformation; shear strength

文章编号: 1671-6833(2016)04-0067-05

煤直接液化残渣改性沥青及其混合料性能评价

季 节^{1,2,4}, 王 迪^{1,2}, 石越峰^{2,3}, 徐世法^{2,3}, 索 智^{2,3,4}

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 首都世界城市顺畅交通协同创新中心, 北京 100044; 4. 北京节能减排关键技术协同创新中心, 北京 100044)

摘 要: 为了研究煤直接液化残渣(direct coal liquefaction residue, DCLR)改性沥青混合料性能, 制备10% DCLR(与基质沥青质量比)改性沥青混合料和复合 DCLR(2% SBS + 15% 橡胶粉 + 10% DCLR)沥青混合料, 并与热拌沥青混合料以及 SBS 改性沥青混合料性能对比。试验结果表明: DCLR 的掺入可以提高沥青混合料的高温稳定性和水稳定性, 但对其低温性能有损伤; 复合 DCLR 沥青混合料的低温性能得到了很大程度的提高, 其高低温性能和水稳定性明显高于 SBS 改性沥青混合料。

关键词: 道路工程; DCLR; DCLR 改性沥青混合料; 复合 DCLR 改性沥青混合料; 路用性能

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.015

0 引言

煤直接液化生产过程中要产生占投煤量30%的煤直接液化残渣(direct coal liquefaction residue, DCLR)。DCLR 含有30%~50%的重质油和沥青烯类物质, 是一种十分宝贵的可开发成沥青改性剂潜在资源之一。国内目前对 DCLR 只能作为废弃物处理, 这不但污染环境, 还浪费了宝贵的自然资源。因此合理开发利用 DCLR, 研究 DCLR 对道路沥青的改性效果, 对环境保护、经济发展、科学进步都有着重要的意义。

从上个世纪开始, 学者们开始研究 DCLR 的性能, Lytle 等^[1]对 DCLR 的特性进行了研究; Khare 等^[2]研究了 DCLR 的性质, 发现了 DCLR 的基本结构及其热解特性; 王寨霞等^[3]发现随着 DCLR 掺量的提高, DCLR 改性沥青的针入度和延度逐渐下降, 而软化点呈上升趋势; 何亮^[4]通过熔融共混方法制备了 DCLR 改性沥青, 确定环氧大豆油掺量为25%, 提纯残渣最佳掺量为7%~21%; 郑丽珍^[5]在 DCLR 掺量为7%条件下对基质沥青进行改性, 改性沥青的针入度、软化点都得到了提高; 张艳荣^[6]发现当 DCLR 加入量为5%时, 可以满足50号沥青的标准; 季节等^[7]对

DCLR 与沥青共混物的性能进行了研究, 发现 DCLR 的加入可显著提高沥青的高温性能, 但会降低其低温性能; 赵永尚等^[8]对 DCLR 改性沥青混合料的性能进行了测试, 结果表明 DCLR 的加入可显著提高混合料的抗车辙能力。

综上, 国内外大部分研究普遍认为 DCLR 加入到沥青后, 沥青的高温性能得到提升, 低温性能受到损害。但是大部分研究停留在 DCLR 改性沥青性能的层面上, 复合改性措施和 DCLR 改性沥青混合料性能这两方面研究却很少有人涉及。

1 试验材料技术性质及制备工艺

1.1 试验材料技术性质

基质沥青采用韩国 SK 公司生产的 SK-90 沥青, DCLR 来自中国神华煤制油化工有限公司内蒙生产的副产品, SBS 和橡胶粉分别来自中国石化燕山石油化工有限公司和安泰橡胶有限公司。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[9]测试试验材料的性能。SK-90 沥青和 DCLR 性能见表1~2。SBS 和橡胶粉的相关技术指标均满足要求。集料采用石灰岩, 分别是粒径9.5~20 mm粗集料, 4.75~9.5 mm 粗集料, 0~4.75 mm 细集料, 矿粉使用石灰岩磨细矿粉, 根据

收稿日期: 2015-10-15; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478028); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(PXM2013-014210-000165)

作者简介: 季节(1972—), 女, 河南信阳人, 北京建筑大学教授, 博士, 主要从事道路材料方面的研究, E-mail: jijie@bucea.edu.cn.

JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》^[10]测试试验材料的性能,见表3~5。

表1 SK-90 沥青的性能

Tab. 1 The properties of SK-90

指标	测试值	技术要求	试验方法
25℃ 针入度/(0.1mm)	81.0	80~100	T 0604
软化点/℃	51.0	≥45	T 0606
10℃ 延度/cm	51.8	≥20	T 0605
60℃ 动力黏度/(Pa·s)	218.4	≥160	T 0620
RTFOT 质量变化/%	+0.1	±0.8	T 0608
后残 针入度比/%	64.1	≥57	T 0604
留物 10℃ 残留延度/cm	8.0	≥8	T 0605
PG 分级	64~22	T 0627/T 0628	

表2 DCLR 性能

Tab. 2 The properties of DCLR

指标	测试值
表观密度/(g·cm ⁻³)	1.12
密度/(g·cm ⁻³)	1.23
含水量/%	0.6
25℃ 针入度/(0.1 mm)	2.0
软化点/℃	170.0

表5 粗集料的性能

Tab. 5 The properties of coarse aggregate

试验项目	粒径 4.75~9.5mm	粒径 9.5~20mm	技术要求	试验方法
表观相对密度/(g·cm ⁻³)	2.80	2.85	≥2.60	T 0308
毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	2.71	2.76	—	T 0308
石料压碎值/%	—	21.2	≤2	T 0316
洛杉矶磨耗损失/%	—	17.8	≤28	T 0317
水洗法 <0.075 mm 颗粒含量/%	0.1	0.2	≤1	T 0310

1.2 SBS、DCLR 和复合 DCLR 改性沥青制备工艺

(1) SBS 改性沥青的制备. 首先,将 SK-90 沥青加热至 160℃,使其成为流动状态. 其次,加入 3.4% SBS(与 SK-90 沥青质量比)与沥青进行共混,在 170℃ 下低速剪切(4 000 r/min) 0.5 h,然后加入一定的橡胶油和稳定剂. 最后,将 SBS 改性沥青在 180℃ 下发育 0.5 h.

(2) DCLR 改性沥青的制备. 首先,将 SK-90 沥青加热至 140℃,使其成为流动状态;其次,将 DCLR 加热至 190℃,成熔融状态;最后,将熔融状态的 DCLR 与基质沥青分别按质量比为 10% 进行共混,为了保证 DCLR 与沥青共混后的均匀性,采用剪切仪将共混物在 160℃ 下低速剪切(4 000 r/min) 1.5 h.

(3) 复合 DCLR 改性沥青的制备. 首先,称取

表3 细集料的性能

Tab. 3 The properties of fine aggregate

试验项目	试验结果	技术要求	试验方法
表观相对密度/(g·cm ⁻³)	2.78	≥2.60	T 0328
毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	2.68	—	T 0330
棱角性/s	43.2	≥30	T 0345
砂当量/%	65.0	≥60	T 0334

表4 矿粉性能

Tab. 4 The properties of mineral powder

试验项目	测试结果	技术标准	试验方法
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.73	≥2.5	T 0328
含水量/%	0.52	≤1	T 0332
<0.075mm	100	100	
粒度 范围 <0.15mm	99.75	90~100	T 0327
<0.6mm	88.56	75~100	
亲水系数	0.71	<1	T 0353
塑性指数	2.8	<4	T 0354

质量分数为 10% DCLR 改性沥青,加热至 160℃,使其成为流动状态;其次,加入 2% SBS(SBS 与基质沥青质量比)与沥青进行共混,在 190℃ 下低速剪切(4 000 r/min) 0.5 h;最后,加入 15% 橡胶粉(橡胶粉与基质沥青质量比)与沥青进行共混,在 190℃ 下低速剪切(4 000 r/min) 1 h. 最后,将复合 DCLR 改性沥青在 180℃ 下发育 0.5 h.

2 试验结果与分析

2.1 SBS、DCLR 和复合 DCLR 改性沥青的性能

由于 DCLR 改性沥青的低温性能相对较差,为进一步提高 DCLR 改性沥青的低温性能,采用复合改性剂(2% SBS + 15% 橡胶粉)对 DCLR 改性沥青再次进行复合改性. 根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[9]中的

相关规定对 SK-90 沥青、SBS 改性沥青、DCLR 改性沥青、复合 DCLR 改性沥青的性能进行测试,见表 6。

从表 6 可以看出:

(1) 相比 SK-90 沥青,DCLR 及复合 DCLR 改性沥青的针入度下降,软化点升高,高温等级也得到了提升,说明 DCLR 及复合 DCLR 的加入可以显著改善沥青的高温性能,相对而言,复合 DCLR 对沥青的高温性能提高幅度更大. 复合 DCLR 改性沥青的高温等级要比 SBS 改性沥青的高温等级高出一个等级. 这是由于 DCLR 中含有大量沥青质,而且会吸附沥青中的油分,与此同时 SBS 和橡胶粉会在沥青中发生溶胀和溶解作用,改变了沥青的胶体结构和组分比例^[11]. 在这 3 种改性剂的同时作用下,复合 DCLR 改性沥青的高温性能得到了极大的增强.

(2) 加入 DCLR 或复合 DCLR 后,改性沥青的低温延度明显下降,低温等级下降,说明 DCLR 及复合 DCLR 的加入降低了沥青的低温性能. 相对而言,DCLR 对沥青的低温性能损伤更大,其延度从原来的 51.8 cm 下降到 5.7 cm,几乎下降了 90%. 采用复合 DCLR 之后,低温性能较 DCLR 改性沥青提高了两个等级,与 SBS 改性沥青相

当. 这是因为 SBS 吸收沥青中的软组分,在沥青中形成网状结构,提升了沥青的塑性. 同时橡胶粉的存在赋予了复合 DCLR 改性沥青更多的弹性和变形能力,大大提高了 DCLR 改性沥青的低温性能.

2.2 混合料配合比设计

采用 AC-20 型沥青混合料,其级配见表 7.

按照马歇尔设计方法确定 AC-20 沥青混合料的最佳沥青用量为 4.2%. 其中,DCLR 及复合 DCLR 改性沥青混合料的制备按照湿法进行.

2.3 混合料高温性能

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[9]中 T 0719—2011 对不同沥青混合料进行车辙试验,见表 8. 从表 8 可以看出:

(1) SK-90 沥青混合料、SBS 改性沥青混合料、DCLR 改性沥青混合料以及复合 DCLR 改性沥青混合料的动稳定度均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[12]中夏热区 1-4 的相关技术要求,其中复合 DCLR 改性沥青混合料的动稳定度最大,DCLR 改性沥青混合料和 SBS 改性沥青混合料的动稳定度次之,SK-90 沥

表 6 不同沥青的性能

Tab. 6 The properties of different asphalt

指标	SK-90 沥青	DCLR 改性沥青	复合 DCLR 改性沥青	SBS 改性沥青	试验方法
25°C 针入度/(0.1mm)	81.0	35.1	33.4	61.2	T 0604
软化点/°C	51.0	59.2	77.5	65.4	T 0606
10°C 延度/cm	51.8	5.7	12.2	68.2/32.3(5°C)	T 0605
质量变化/%	+0.1	+0.2	-0.1	-0.2	T 0608
RTFOT 后 针入度比/%	64.1	69.3	79.5	64.2	T 0604
残留物 10°C 残留延度/cm	8.0	4.2	9.7	39.6/21.8(5°C)	T 0605
PG 分级	64-22	70-16	82-28	76-28	T 0627/T 0628

表 7 AC-20 沥青混合料的级配

Tab. 7 The gradation of AC-20 asphalt mixture

AC-20 级配	通过筛孔(方筛孔,mm)百分率/%											
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.50	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
级配上限	100.0	100.0	92.0	80.0	72.0	56.0	44.0	33.0	24.0	17.0	13.0	7.0
级配下限	100.0	90.0	78.0	62.0	50.0	26.0	16.0	12.0	8.0	5.0	4.0	3.0
设计级配	100.0	95.0	85.0	71.0	61.0	41.0	30.0	22.5	16.0	11.0	8.5	5.0

表 8 不同沥青混合料的高温稳定性能

Tab. 8 The high-temperature performances of the different asphalt mixtures

混合料类型	45 min 车辙 深度/mm	60 min 车辙 深度/mm ⁻¹	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	技术标准/ (次·mm ⁻¹)
SK-90 沥青混合料	7.545	8.213	943.88	≥800
SBS 改性沥青混合料	4.321	4.591	2 452.38	≥2 400
DCLR 改性沥青混合料	4.541	4.784	2 604.86	≥2 400
复合 DCLR 改性沥青混合料	2.157	2.221	9 867.65	≥2 400

青混合料的动稳定度最小. 复合 DCLR 改性沥青混合料的动稳定度是 SK-90 沥青混合料动稳定度的 10 倍, DCLR 改性沥青混合料或 SBS 改性沥青混合料的 3 倍.

(2) SK-90 沥青混合料的车辙深度最深, DCLR 改性沥青混合料和 SBS 改性沥青混合料次之, 复合 DCLR 改性沥青混合料最小, 其中复合 DCLR 改性沥青混合料的 60 min 车辙深度是 DCLR 改性沥青混合料或 SBS 改性沥青混合料的 50%, SK-90 沥青混合料的 25%. 说明 DCLR 的加入可以显著改善沥青混合料的高温性能, DCLR 改性沥青混合料的高温性能已达到 SBS 改性沥青混合料的水平. 同时, 复合 DCLR 的加入可以进一步显著提高沥青混合料的高温性能. 这主要是因为复合 DCLR 改性沥青中加入了 15% 橡胶粉和 2% SBS, 从而进一步提高了混合料的高温抗变形能力.

2.4 混合料低温性能

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[9] 中 T 0715—2011 的相关规定对不同沥青混合料进行了低温弯曲破坏试验, 见表 9. 由表 9 可以看出:

(1) 复合 DCLR 改性沥青混合料的低温破坏应变最大, 其次是 SBS 改性沥青混合料和 SK-90 沥青混合料, DCLR 改性沥青混合料的低温破坏应变最小, 已不满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[12] 中冬温区的技术要求, 说明 DCLR 的加入对沥青混合料的低温性能有负面影响, 这主要是因为 DCLR 的加入增加了沥青混合

料的低温脆性, 使得沥青混合料的低温抗裂性变差.

(2) 相对与 DCLR 改性沥青混合料, 复合 DCLR 改性沥青混合料的低温性能得到了改善, 其低温破坏应变提高了 80%, 已高于 SBS 改性沥青混合料的水平, 说明 SBS 和橡胶粉的加入, 使混合料中产生了完整的网状结构, 为混合料提供了足够的粘结力, 从而提高了混合料的低温抗裂性能.

2.5 水稳定性

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[10] 中 T 0709—2011 和 T 0729—2011 对不同沥青混合料进行了浸水马歇尔试验和冻融劈裂强度试验, 见表 10. 由表 10 可知:

SK-90 沥青混合料、SBS 改性沥青混合料、DCLR 改性沥青混合料以及复合 DCLR 改性沥青混合料的残留稳定度和残留强度比都满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[12] 中半干区的相关技术要求, 其中复合 DCLR 改性沥青混合料的残留稳定度最大, 其次是 SBS 改性沥青混合料和 DCLR 改性沥青混合料, 热拌沥青混合料最低, 说明 DCLR 的加入, 可以显著提高沥青混合料的水稳定性, 基本上达到 SBS 改性沥青混合料的水平, 尤其是复合 DCLR 的加入可进一步提高沥青混合料的水稳定性. 这主要是因为 DCLR 中存在杂原子, 提高了沥青与矿料之间的黏附性, 而复合 DCLR 中的 SBS 和橡胶粉的存在会进一步提高沥青与矿料之间的黏结力, 增大了沥青膜的抗剥离能力, 提高了混合料的水稳定性.

表 9 不同沥青混合料的低温性能

Tab. 9 The low-temperature performances of different asphalt mixtures

混合料类型	抗弯拉强度/MPa	弯曲劲度模量/MPa	破坏应变/ $\mu\epsilon$	技术标准/ $\mu\epsilon$
SK-90 沥青混合料	7.59	2 828	2 683	$\geq 2\ 000$
SBS 改性沥青混合料	9.63	3 137	2 798	$\geq 2\ 500$
DCLR 改性沥青混合料	5.89	3 795	1 552	$\geq 2\ 500$
复合 DCLR 改性沥青混合料	7.58	2 708	3 070	$\geq 2\ 500$

表 10 不同沥青混合料的水稳定性

Tab. 10 The water stabilities of the different asphalt mixtures

混合料类型	残留稳定度/%	技术标准/%	TSR/%	技术标准/%
SK-90 沥青混合料	80.05	≥ 75	76.38	≥ 70
SBS 改性沥青混合料	84.40	≥ 80	84.15	≥ 75
DCLR 改性沥青混合料	83.64	≥ 80	83.78	≥ 75
复合 DCLR 改性沥青混合料	100.05	≥ 80	86.61	≥ 75

3 结论

(1) 确定了 DCLR 及复合 DCLR 改性沥青的制备工艺,保证沥青的均匀性。

(2) 结合针入度体系和 SHRP PG 测试结果,可知加入 DCLR 之后,沥青的高温性能得到提升,但低温性能有所下降。复合 DCLR(SBS + 橡胶粉)改性沥青不仅低温性能得到大幅度提升,而且高温性能进一步加强,从 SHRP PG 分级体系上看,复合 DCLR 改性沥青的性能优于 SBS 改性沥青。

(3) 通过路用性能测试,发现 DCLR 改性沥青混合料的高温性能、水稳定性能基本上达到 SBS 改性沥青的水平,但其低温性能明显存在不足。复合 DCLR 改性沥青混合料的低温性能得到明显改善,高低温性能和水稳定性能均高于 SBS 改性沥青混合料。

参考文献:

- [1] LITTLE J M, HEIEH B C B, ANDERSON L L. A survey of methods of coal hydrogenation for the production of liquids [J]. Fuel processing technology, 1979 (3): 235 - 246.
- [2] KHARE S. An overview of conversion of residues from coal liquefaction processes [J]. Journal of chemical engineering, 2013, 91 (10): 1660 - 1670.
- [3] 王寨霞. 煤直接液化残渣用于道路石油沥青改性的基础研究 [D]. 太原: 中国科学院山西煤炭化学研究所, 2006.
- [4] 何亮. 煤液化残渣复合改性沥青制备及其性能研究 [D]. 西安: 长安大学材料科学与工程学院, 2013.
- [5] 郑丽珍. 澄合 10 ~ #高硫煤直接液化性能及其残渣改性基质沥青研究 [D]. 西安: 西安科技大学化学与化工学院, 2012.
- [6] 张艳荣. 液化残渣改性道路石油沥青的探索研究 [D]. 西安: 西北大学化工学院, 2010.
- [7] Ji Jie, ZhaoYongshang, Xu Shifa. Study on properties of the blends with direct coal liquefaction residue and asphalt [C] // Materials science, civil engineering and architecture science, mechanical engineering and manufacturing technology. USA: Trans Tech publication Inc, 2014: 316 - 321.
- [8] ZHAO YONGSHANG, JI J. Study on the performance of direct coal liquefaction residue modified mixture [C] // Challenges and advances in sustainable transportation Systems. Beijing: ASCE, 2014: 352 - 357.
- [9] 交通部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [10] 交通部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [11] 傅珍, 延西利, 蔡婷, 等. 沥青组分与黏度的灰关联分析 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2014, 35 (3): 102 - 105.
- [12] 交通部公路科学研究院. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

Study on the Performances of the DCLR Modified Asphalt Mixtures

Ji Jie^{1,2,4}, WANG Di^{1,2}, SHI Yuefeng^{2,3}, XU Shifa^{2,3}, SUO Zhi^{2,3,4}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, China; 2. Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing 100044, China; 3. Beijing Collaborative Innovation Center for Metropolitan Transportation, Beijing 100044, China; 4. Beijing Cooperative Innovation Research Center on Energy Saving and Emission Reduction, Beijing 100044, China)

Abstract: To study the performance of the DCLR modified asphalt mixture, the 10% DCLR (by mass of SK-90 asphalt) modified asphalt mixture and the compound DCLR (2% SBS + 15% rubber powder + 10% DCLR) modified asphalt mixture are prepared. The performances of the SK-90 asphalt mixture, SBS modified asphalt mixture are compared to 10% DCLR modified asphalt mixture and compound DCLR modified asphalt mixture. The results show the DCLR can improve the high-temperature performance and water stability of asphalt mixture but the low-temperature performance is damaged. The low-temperature performance of the compound DCLR modified asphalt mixture is improved greatly. Meanwhile, the high-temperature performance, low-temperature performance and water stability of compound DCLR modified asphalt mixture are higher than those of SBS modified asphalt mixture obviously.

Key words: road engineering; DCLR; DCLR modified asphalt mixture; compound DCLR modified asphalt mixture; pavement performance.

文章编号: 1671-6833(2016)04-0072-05

高速铁路斜拉桥与 T 型刚构协作体系车桥耦合振动分析

罗 浩¹, 郭向荣², 唐俊峰², 岳 健¹, 刘 泽¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 建立了列车、斜拉桥与 T 型刚构协作体系空间振动的有限单元分析模型, 按照轮轨密贴接触假定建立了车-桥系统耦合运动方程组, 以德国低干扰谱生成轨道不平顺样本作为激励源, 对一座(100+2×210+100) m 的斜拉桥与 T 型刚构协作体系的自振特性以及 4 种列车车型分别以不同车速通过该桥梁的空间振动响应进行了计算分析, 结果表明: 在计算桥梁的自振频率时, 第一、第二自振频率均为主梁横向弯曲; 斜拉桥与 T 型刚构协作体系可以提高全桥的竖向刚度; 德国 ICE3 车型通过桥梁时, 车桥系统振动响应最大, 竖向挠跨比约为 1/5 440, 桥上车辆的各项指标均在我国规范规定的允许值以内; 车辆乘客乘坐横、竖向平稳性指标均达到“良好”标准以上, 表明该斜拉桥与 T 型刚构协作体系能较好地满足高速行车要求。

关键词: 斜拉; T 型刚构; 列车; 自振频率; 车桥耦合振动

中图分类号: U448 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.016

0 引言

斜拉桥与 T 型刚构协作体系是一种新颖独特的桥梁结构形式, 这种体系桥梁能利用中等跨度的斜拉桥和中等跨度的 T 型刚构组合而成更大跨度的桥梁。由于这种类型桥梁是由斜拉结构与 T 型刚构组成的一种独特的结构, 所以这种体系桥梁其受力既有斜拉桥的特性, 同时也兼具 T 型刚构的特性。前些年国内修建的金马大桥、炳草岗大桥等都为该体系的桥梁。这种体系的铁路桥梁除了承受风荷载、地震作用等动荷载作用外, 还会承受列车荷载的作用。列车荷载作用下该体系桥梁的车桥动力响应, 直接关系到列车能否正常运营, 因此对这种体系桥梁的车桥耦合振动进行研究具有重要的现实意义^[1-6]。笔者提出了列车、斜拉桥与 T 型刚构协作体系的车桥耦合振动有限元分析模型, 分别计算了高速列车以不同车速通过该斜拉桥与 T 型刚构协作体系的空间振动响应, 并检算该体系桥梁的运营平稳性及舒适性是否满足要求, 所得结果可供设计参考。

1 工程概况

某独塔斜拉桥与 T 型刚构协作体系, 主跨为

(100+2×210+100) m, 主梁采用单箱双室、三向预应力混凝土结构, 箱梁中支点处梁高 11.0 m, 端支点及中跨处的梁高为 4.5 m, 其中中支点处(梁高 11.0 m)平段长 10.0 m, 中跨中(梁高 4.5 m)平段长 44.0 m, 中间 78.0 m 长度变高段梁底曲线为二次抛物线, 箱梁两边腹板为直腹板, 腹板厚度分 30 cm、45 cm 和 60 cm 3 种, 并在梁墩(塔)结合块附近一定区域逐渐加厚至 75 cm。箱梁顶板厚 42 cm, 底板厚度由跨中处的 35 cm 渐变至中支点附近处 120 cm, 局部加厚至 140 cm。主桥设置 14 道横隔梁, 分别设置于梁端、中支点、跨中部位, 并在每对斜拉索锚固处设置半高横隔梁, 索塔采用曲线钻石形桥塔, 桥面以上塔高 70.0 m, 上塔柱高 28 m, 采用单箱单室截面; 中塔柱高 39.5 m, 为两分离的单箱单室截面; 下塔柱高 28 m, 采用单箱双室截面; 上塔柱与中塔柱由半径 $R=368.55$ m 的圆弧连接而成。斜拉索采用空间双索面体系布置, 斜拉索在桥面拉索间距按 6 m 布置, 塔上间距按 1.6 m 和 1.7 m 布置。斜拉索规格分 43- ϕ 5 mm, 37- ϕ 5 mm, 31- ϕ 5 mm, 27- ϕ 5 mm 和 22- ϕ 5 mm 5 种, 斜拉索最长约 139 m, 最短约 68 m。主塔处墩梁塔固结, 边主墩梁固结, 两边墩设纵向活动支座。结构简图见图 1 和 2。

收稿日期: 2015-12-27; 修订日期: 2016-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408217); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ3066)

作者简介: 罗浩(1983—), 男, 湖南益阳人, 湖南科技大学讲师, 博士, 主要从事桥梁振动与稳定方面的研究, E-mail: 44428246@qq.com.

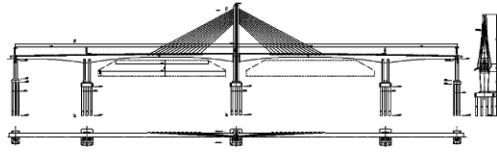


图1 桥梁结构总体布置图

Fig. 1 Overall arrangement of bridge structure

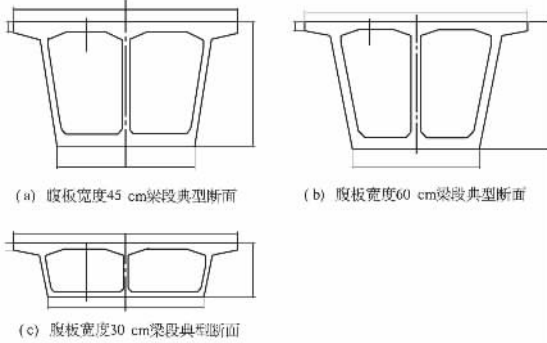


图2 主梁横截面布置图

Fig. 2 Cross section layout of main girder

2 车桥系统空间振动分析模型

2.1 桥梁模型

桥梁的动力计算采用有限单元法. 计算中对主梁采用梁段有限元法^[7]建模.

对混凝土桥墩、塔采用空间梁单元, 进行桥梁计算模型, 桥塔空间梁单元的自由度为:

$$\{\delta\}_p = \{U_i \ V_i \ W_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi} \ \theta_{zi} \ U_j \ V_j \ W_j \ \theta_{xj} \ \theta_{yj} \ \theta_{zj}\}^T.$$

每根斜拉索均采用空间桁架单元建立计算模型, 由于每根斜拉索会在自重荷载作用下发生一定程度的下垂, 因此斜拉索的抗拉刚度会有一定程度的降低, 故借鉴了 Ernst 总结的经验公式在

计算模型中考虑这种影响:

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{(W \cdot L)^2 A \cdot E}{12T^3}}. \quad (1)$$

式中: E_{eq} 表示斜拉索在考虑了自重产生下垂的影响后对应的等效弹性模量; E 表示斜拉索在没有考虑下垂时钢材的有效弹性模量; L 表示每根斜拉索在水平方向上的投影长度; W 表示每根斜拉索单位长度的自重; A 表示每根斜拉索的横截面积; T 表示每根斜拉索的拉力.

桥梁边界条件为: 对于斜拉桥与 T 型刚构协作体系, 主塔位置塔梁全部固结, 中间 3 个墩和主梁为刚性连接, 其余两个边墩位置主梁在横向、竖向和轴向扭转约束. 桥面二期恒载取 16 t/m.

2.2 机车车辆模型

4 轴机车模型示意图如图 3 所示

2.2.1 基本假定

①车体、转向架和轮对均假设为刚体; ②不考虑机车、车辆纵向振动及其对桥梁振动与行车速度的影响; ③轮对、转向架和车体均作微振动; ④所有弹簧均为线性, 所有阻尼按黏性阻尼计算, 蠕滑力按线性计算; ⑤假定沿铅垂方向, 轮对与钢轨密贴, 即轮对与钢轨的竖向位移相同; ⑥忽略构架点头运动^[7]及轮对侧滚和摇头运动.

2.2.2 空间振动位移

客车及机车均按二系弹簧计算, 每个轮对有 2 个自由度; 每个构架有 4 个自由度; 车体有侧摆、侧滚、摇头、点头、浮沉等 5 个自由度. 每辆车 (包括机车) 共有 21 个自由度.

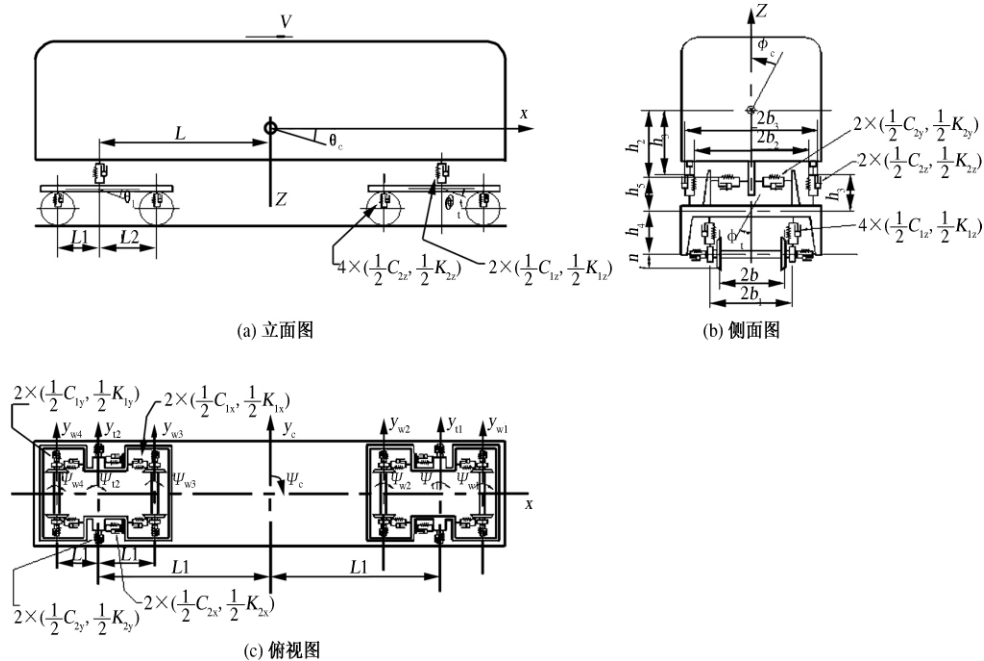


图3 4轴机车模型示意图

Fig. 3 Vehicle model for a four-axle locomotive

2.3 空间振动方程的建立及求解

将桥上列车与桥跨视为整体系统. 计算任一时刻 t 桥上列车及桥跨空间振动的弹性总势能. 由势能驻值原理及形成矩阵的“对号入座”法则^[8-9], 建立 t 时刻此系统的空间振动矩阵方程:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P\}. \quad (2)$$

式中: $\{\ddot{\delta}\}$ 、 $\{\dot{\delta}\}$ 、 $\{\delta\}$ 分别为车桥系统在 t 时刻的速度、位移和列阵. 详细演引过程, 参见文献[10].

3 列车安全正常运行的评定标准

根据《高速铁路设计规范》等铁路桥梁规范, 在本次列车-斜拉桥与 T 型钢构协作体系的车桥耦合振动研究中, 各项主要指标如表 1 所示.

表 1 列车运行安全性、平稳性与舒适性评定指标

Tab.1 Train safety, running stability and comfort index

评价指标	指标类型	评定标准
安全性指标	脱轨系数	≤ 0.8
	轮重减载率	≤ 0.6
机车平稳性指标	斯佩林指标	优秀: < 2.75
		良好: $2.75 \sim 3.10$
车辆舒适性指标	斯佩林指标	合格: $3.10 \sim 3.45$
		优秀: < 2.50
桥梁动力响应限值	横向加速度	良好: $2.50 \sim 2.75$
	纵向加速度	合格: $2.75 \sim 3.00$
	横向加速度	$\leq 1.5 \text{ m/s}^2$ (半幅)
	纵向加速度	$\leq 3.5 \text{ m/s}^2$ (半幅、有碴轨道)
	纵向加速度	$\leq 5.0 \text{ m/s}^2$ (半幅、无碴轨道)
	纵向加速度	(半幅、无碴轨道)

4 计算结果及初步分析

4.1 桥梁自振特性计算

正确计算斜拉桥与 T 型钢构协作体系中的自振特性是进行车桥耦合振动分析的重要基础, 计算自振特性主要是对该体系的自振频率和阵型进行分析, 计算中考虑桥面系的二期恒载. 限于篇幅, 表 2 只列出了前 5 阶自振频率与相应振型. 图 4 为前 5 阶自振频率及相应振型图.

表 2 计算结果表明, 斜拉桥与 T 型钢构协作体系第一阶和第二阶的振型都呈现为主梁在横向产生弯曲变形, 自振振型结果表明该斜拉桥与 T 型钢构协作体系在横向主梁刚度较弱, 这是由于斜拉桥与 T 型钢构协作体系使得全桥结构的竖

向刚度比横向刚度要强一些, 反应在自振特性上是以主梁横向弯曲和塔的变形为主作为第一振型出现, 而结构的竖向弯曲相应后移. 由表 2 可知, 斜拉桥与 T 型钢构协作体系可以提高全桥的竖向刚度, 计算结果表明模型正确可靠.

表 2 前 5 阶自振频率及相应振型

Tab.2 First five natural frequencies and mode shapes

阶数	频率/Hz	振型
1	0.516	主梁对称横向弯曲、塔侧弯
2	0.579	主梁反对称横向弯曲
3	0.601	主梁反对称竖向弯曲
4	0.790	主梁对称横向弯曲、塔侧弯
5	0.810	主梁反对称竖向弯曲

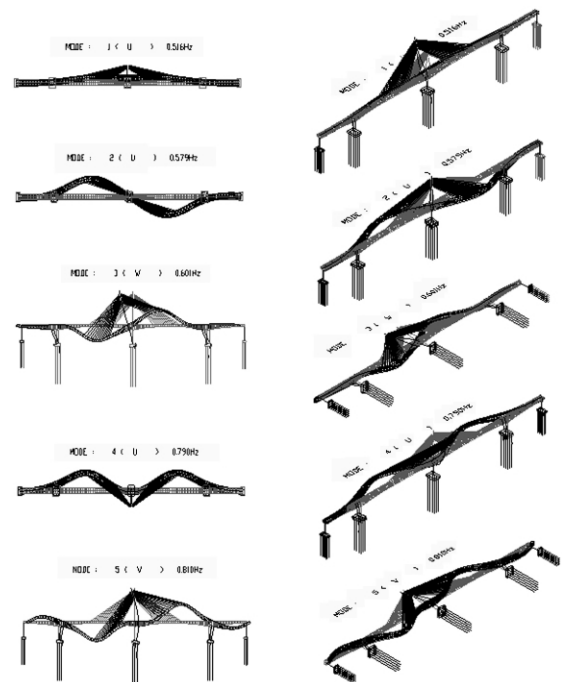


图 4 前 5 阶自振频率及相应振型图

Fig.4 First five natural frequencies and mode shapes

4.2 车桥耦合振动计算结果

根据上述计算模型, 分别计算了先锋号动力分散式电动车组、法国 TGV 动力分散铰接高速列车、德国 ICE3 动力分散独立式高速列车、国产动力分散独立式高速列车通过桥梁时的车桥系统空间动力响应, 列车编组及计算工况见表 3, 以上各类工况均分为单、双线行车, 均采用德国低干扰轨道谱进行计算. 桥上列车轮对脱轨系数、轮重减载率、司机旅客斯佩林舒适度指标等, 将主要计算结果摘要如表 4~6 所示.

表 3 列车编组及计算工况一览表

Tab.3 Train formation and calculation conditions

列车类型	编组	计算车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
先锋号	16 辆编组	160,180,200, 220,240,270
	$2 \times (\text{动} + \text{拖} + \text{动} + \text{动} + \text{拖} + \text{动} + \text{动} + \text{拖})$	
法国 TGV	20 辆编组 (20 拖)	225,250,275, 300,325,350
德国 ICE3	16 辆编组	225,250,275, 300,325,350
	$2 \times (\text{动} + \text{动} + \text{拖} + \text{动} + \text{动} + \text{拖} + \text{动} + \text{动})$	
国产高速	16 辆编组 $2 \times (\text{动} + \text{动} + \text{拖} + \text{动} + \text{动} + \text{拖} + \text{动} + \text{动})$	225,250,275, 300,325,350

表 4 机车振动响应最大值计算结果

Tab.4 Maximum value of vibration responses of the locomotive

列车类型	Q/P	$\Delta P/P$	$A_v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$A_L / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	W_{Z_v}	W_{Z_L}
先锋号	0.46	0.52	0.89	0.94	2.72	2.74
法国 TGV	—	—	—	—	—	—
德国 ICE3	0.37	0.39	0.76	0.82	2.60	2.70
国产高速	0.43	0.40	0.95	0.91	2.70	2.72

注: 法国 TGV 编组为 20 辆拖车,故无机车相关数据;
脱轨系数 Q/P ,轮重减载率 $\Delta P/P$,心盘竖向、横向振动加速度 A_v 、 A_L ,斯佩林舒适度竖向、横向指标 W_{Z_v} 、 W_{Z_L} .

表 5 车辆振动响应最大值计算结果

Tab.5 Maximum value of vibration responses of the trailer

列车类型	Q/P	$\Delta P/P$	$A_v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$A_L / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	W_{Z_v}	W_{Z_L}
先锋号	0.55	0.46	0.76	0.88	2.73	2.71
法国 TGV	0.37	0.31	0.84	0.74	2.71	2.65
德国 ICE3	0.37	0.29	0.77	0.81	2.71	2.75
国产高速	0.37	0.37	0.95	0.94	2.66	2.66

从计算结果可以看出:

(1) 当先锋号动力分散式电动车组 ($v = 160 \sim 270 \text{ km/h}$)、法国 TGV 动力分散铰接高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$)、德国 ICE3 动力分散独立式高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$)、国产动力分散独立式高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$) 分别通过桥梁时,脱轨系数均小于 0.8,轮重减载率均小于 0.6,故列车行车安全性有保障.

表 6 桥梁振动响应最大值计算结果

Tab.6 Maximum value of vibration

responses of the bridge					
列车类型	D_u / mm	$A_u / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	D_v / mm	$A_v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	P_u / mm
先锋号	1.31	0.09	31.90	0.13	0.42
法国 TGV	0.78	0.08	27.40	0.18	0.30
德国 ICE3	1.32	0.09	38.60	0.17	0.58
国产高速	1.03	0.06	33.40	0.18	0.46

注: 桥梁跨中横向位移 D_u ; 跨中横向加速度 A_u ; 跨中竖向位移 D_v ; 竖向加速度 A_v ; 墩顶横向位移 P_u .

(2) 当先锋号动力分散式电动车组 ($v = 160 \sim 270 \text{ km/h}$)、法国 TGV 动力分散铰接高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$)、德国 ICE3 动力分散独立式高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$)、国产动力分散独立式高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$) 分别通过桥梁时,该桥桥面最大横向动位移和加速度分别为 1.32 mm,0.09 m/s^2 ,对应的挠跨比约为 1/159 091; 最大竖向动位移和加速度分别为 38.6 mm,0.18 m/s^2 ,对应的挠跨比约为 1/5 440,均在我国规范规定的允许值或合理范围值以内.

(3) 当先锋号动力分散式电动车组 ($v = 160 \sim 270 \text{ km/h}$)、法国 TGV 动力分散铰接高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$)、德国 ICE3 动力分散独立式高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$)、国产动力分散独立式高速列车 ($v = 225 \sim 350 \text{ km/h}$) 分别通过桥梁时,机车司机台处横、竖向舒适度指标均达到“良好”标准以上; 车辆乘客乘坐横、竖向平稳性指标也均达到“良好”标准以上,表明该斜拉桥与 T 型钢构协作体系能较好地满足高速行车要求.

5 结论

(1) 斜拉桥与 T 型钢构协作体系第一、第二自振频率均为横向弯曲,表明该桥的横向刚度相对较小,斜拉桥与 T 型钢构协作体系可以提高全桥的竖向刚度,计算结果表明模型正确可靠.

(2) 当先锋号动力分散式电动车组、法国 TGV 动力分散铰接高速列车、德国 ICE3 动力分散独立式高速列车、国产动力分散独立式高速列车分别通过桥梁时,脱轨系数均小于 0.8,轮重减载率均小于 0.6,故列车行车安全性有保障.

(3) 当 4 种列车车型分别通过桥梁时,该桥桥面最大横向动位移和加速度分别为 1.32 mm, 0.09 m/s², 对应的挠跨比约为 1/159 091; 最大竖向动位移和加速度分别为 38.6 mm, 0.18 m/s², 对应的挠跨比约为 1/5 440, 均在我国规范规定的允许值或合理范围值以内, 结果表明桥梁在高速列车作用下的动力响应能够满足规范规定要求。

(4) 当 4 种列车车型分别通过桥梁时, 机车司机台处横、竖向平稳性指标均达到“良好”标准以上; 车辆乘客乘坐横、竖向舒适性指标也均达到“良好”标准以上, 表明该斜拉桥与 T 型刚构协作体系的舒适度能较好地满足高速行车要求。

参考文献:

- [1] 王永刚. 铁路斜拉桥车桥动力响应的 TLD 控制研究[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(3): 70-81.
- [2] 郭薇薇, 夏禾, GUIDO D R. 意大利高速铁路 Sesia 大桥的动力特性及车桥耦合振动分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(15): 82-88.
- [3] 李永乐, 李鑫, 向活跃, 等. 大跨度钢桁梁斜拉桥风-车-桥系统耦合振动[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(5): 22-27.
- [4] 李小珍, 喻璐, 强士中. 不同主梁竖曲线下大跨度斜拉桥的车桥耦合振动分析[J]. 振动与冲击, 2003, 22(2): 43-46.
- [5] 高芒芒. 高速铁路列车-线路-桥梁耦合振动及列车走行性研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 135-138.
- [6] CALCADA R, CUNHA A, DELGADO R. Analysis of traffic-induced vibrations in a cable-stayed bridge. Part I: Experimental assessment[J]. Journal of bridge engineering, 2005, 10: 370-385.
- [7] 曾庆元, 郭向荣. 列车桥梁时变系统振动分析理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [8] 郭文华, 郭向荣, 曾庆元. 京沪高速铁路南京长江大桥斜拉桥方案车桥系统振动分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 23-27.
- [9] 曾庆元, 杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁段有限元法[J]. 铁道学报, 1986, 2(18): 48-59.
- [10] 曾庆元, 杨毅, 骆宁安, 等. 列车-桥梁时变系统的横向振动分析[J]. 铁道学报, 1991, 13(2): 38-46.

Coupling Vehicle-Bridge Vibration Analysis of Collaborated System with Cable-Stayed Bridge and T-shape Rigid Structure on High Speed Railway

LUO Hao¹, GUO Xiangrong², TANG Junfeng², YUE Jian¹, LIU Ze¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: A finite element analysis model for space vibration of the train and the collaborated system with cable-stayed bridge and T-shape rigid structure was established. The coupled equations of motion were presented for the vehicle-bridge system on the basis of a corresponding assumption on the wheel-track interaction both in lateral and vertical directions. Taking the track irregularity samples based on German low disturb track spectra as excitation, the space vibration responses were analyzed when the train ran through the collaborated system with cable-stayed bridge and T-shape rigid structure at different speeds. Numerical results show that the models of the first two orders of the collaborated system with cable-stayed bridge and T-shape rigid structure are bending in lateral. It follows that the lateral rigidity is smaller than the vertical rigidity. The collaborated system with cable-stayed bridge and T-shape rigid structure has bigger vertical stiffness while calculating the natural frequency. The ratio of dynamic deflection to bridge span is 1/5440: as the German ICE3 train runs through the bridge, the space vibration responses are the highest. All the dynamic indices of the vehicle on the bridge are within the range of the allowable values. The ride comfort indices all achieve the good standard, thus can well satisfy the high speed train passage.

Key words: cable-stayed; T-shape rigid; train; natural frequency; coupling vehicle-bridge vibration

高性能灌浆料维修空心板桥铰缝的足尺试验研究

闫卫红^{1,2}, 付立军^{1,2}, 赵 军³

(1. 河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450015; 2. 公路桥梁安全检测与加固技术交通运输行业研发中心, 河南 郑州 450015; 3. 郑州大学 土木与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了研究高性能灌浆料在空心板桥铰缝中的维修加固效果, 以实桥拆除的3片30 m跨空心板梁为对象, 进行了高性能灌浆料维修空心板桥铰缝的足尺试验研究。通过对铰缝修复后3片空心板组成的装配式空心板桥进行中板跨中集中加载, 测量并分析了各板梁的荷载-挠度曲线, 给出了试验的破坏模式。试验结果表明, 加载初期各板梁挠度变化基本相同, 各板梁间整体工作性能良好; 极限状态下破坏形态为灌浆料与板梁结合面的纵向脆性开裂破坏; 采用高性能灌浆料维修后对应原桥设计荷载的超载储备为1.74。

关键词: 高性能; 灌浆料; 空心板; 铰缝; 足尺试验

中图分类号: U448.35

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.017

0 引言

装配式预应力混凝土空心板桥作为我国公路桥梁的主力桥型, 随着服役时间的增长及重载交通的影响, 其铰缝往往会出现不同程度的病害, 严重者会出现单板受力甚至于板梁断裂^[1-2]。

针对空心板横向联系不足问题, 工程界和学术界提出了一系列的加固维修方法, 包括增强桥面铺装^[3]、横向预应力加固^[4-5]、减梁增肋法^[6]、II形钢板法^[7]等等, 也对应开展了相应的试验研究^[8-11]。这些技术的应用对改善桥梁的整体受力性能具有重要的作用。然而, 这些方法在施工中也存在一些不便, 如植筋易损坏空心板内钢绞线、板梁底板不平导致横向粘贴钢板困难等问题。

为此, 笔者在实际桥梁加固设计中提出了采用高性能灌浆料进行铰缝维修的加固技术。该技术在工程应用中一般无需中断交通, 若桥面铺装损坏较轻, 不用整体翻新。若桥面铺装破损严重, 仅需部分短暂封闭交通进行面层修复。因维修施工工作在桥下进行, 该技术具有无交通安全隐患, 工期较短, 工程造价低等优点, 并且后续维护期间若有破损, 可较快速修复, 有利于降低长期全寿命周期养护成本。

笔者为研究高性能灌浆料在空心板桥铰缝中的维修加固效果, 以某高速公路拆除的3片30 m跨空心板梁为对象, 进行高性能灌浆料维修空心板桥铰缝的足尺破坏试验研究。

1 铰缝维修方法

高性能灌浆料由专用外加剂添加多种矿物改性成分、高分子聚合物材料和低碱普通硅酸盐水泥复合组成, 具有高流动性、低水胶比、微膨胀、零泌水、耐久性好等特点。该灌浆料主要技术指标如表1所示。

采用灌浆料进行破损铰缝灌浆修复时主要工艺如下。

(1) 清理: 针对破损铰缝, 清理铰缝内积存的泥土及铰缝底部的麻丝、破碎状态混凝土等, 再用特制钢丝刷将铰缝铰缝内壁上粘附的泥土浮浆刷除干净, 最后用高压水枪对铰缝内部进行冲洗。

(2) 封堵: 在铰缝左右端头, 分别用聚氨酯发泡剂进行封堵, 防止注浆过程中浆料从铰缝两头渗出。

(3) 设置注胶管: 铰缝每隔5 m设置一道注胶管, 并在铰缝高端的端头埋设一根测量管。

(4) 板底封缝: 用罐装聚氨酯发泡材料沿板

收稿日期: 2016-03-30; 修订日期: 2016-06-19

基金项目: 河南省交通运输科技计划项目(2014K37-4)

作者简介: 闫卫红(1977—), 男, 河南温县人, 高级工程师, 硕士, 主要从事公路及桥梁设计、检测、监测与加固技术等方面的研究, E-mail: 394240484@qq.com.

底纵向,由一端向另一端均匀封堵 3~5 cm 高度.

(5) 封闭检查: 可通过加压空气试验或闭水试验检验封缝质量. 如果没有达到要求,对渗漏处进行修补.

(6) 压力灌注: 使用灌浆机向铰缝内以 0.3~0.5 MPa 的压力连续、缓慢、匀速地向缝内压入灌浆料,以浆体与板顶部持平并无气泡为原则.

表 1 高性能灌浆料主要技术指标

Tab.1 Main technical indexes of high-performance grouting material

性能指标		数值范围
水胶比		0.26~0.28
流动度/s	初始流动度	10~17
	30 min 流动度	10~20
	60 min 流动度	10~25
泌水率/%	24 h 自由泌水率	0
	3 h 钢丝间泌水率	0
压力泌水率/%	0.22 MPa(孔道垂直高度 ≤ 1.8 m 时)	≤ 2.0
	0.36 MPa(孔道垂直高度 > 1.8 m 时)	
自由膨胀率/%	3 h	0~2
	24 h	0~3
充盈度		合格
抗压强度/MPa	3 d	≥ 20
	7 d	≥ 40
	28 d	≥ 50
抗折强度/MPa	3 d	≥ 5
	7 d	≥ 6
	28 d	≥ 10

2 试验研究

2.1 试验构件

试验构件采用某高速公路拆除的 3 片 30 m 跨空心板,见图 1,其断面尺寸如图 2 所示. 板梁混凝土设计强度 C50,实测强度为 54 MPa. 检测发现板梁主要病害为端部腹板斜裂缝和跨中底板横向裂缝. 因裂缝宽度不超过 0.05 mm,试验前首先对板梁裂缝采用灌缝胶进行封闭处理.

将板梁按照实际运营时板梁间距吊装就位后,采用高性能灌浆料进行灌缝处理,形成由 3 片板梁组成的装配式空心板桥.

2.2 试验加载及测试

现场试验加载照片如图 3 所示,由传感器、千斤顶、工字钢、支墩、反力梁和混凝土配重等组成. 加载方式为中板跨中的集中力加载,初始加载阶段按照 50 kN 的增量进行,后期根据试验情况逐步调整.

为研究各板梁的整体工作性能,加载过程中主要测试各空心板四分点及跨中竖向挠度,如图 4 所示,每片板梁共布置 6 个挠度计.



图 1 试验空心板

Fig.1 Test hollow slab

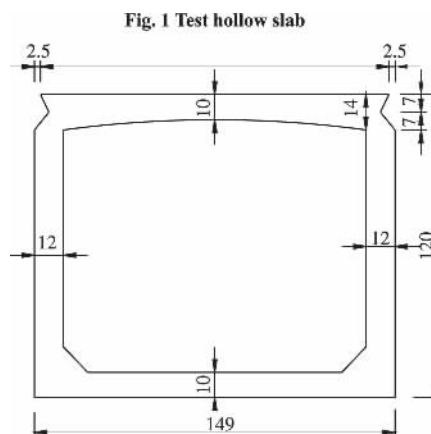


图 2 试验空心板横断面图(单位: cm)

Fig.2 Cross section of test hollow slab (unit: cm)



图 3 试验加载照片

Fig.3 Loading test picture

Fig.3 Loading test picture

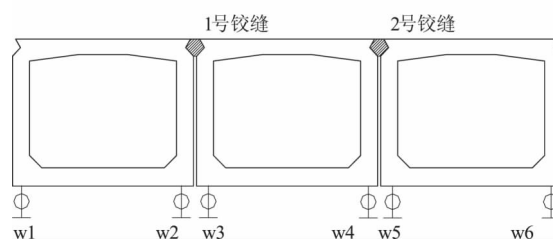


图 4 挠度计布置示意图

Fig.4 Schematic layout of deflection sensors

3 试验结果及分析

3.1 破坏过程和形态

加载初期板梁和铰缝无异常,试验加载至 806 kN 时板缝有响动,2 号铰缝顶面跨中至 3/4 跨有表观裂缝出现,最大缝宽 1 mm,局部发生错动,如图 5 所示。



图 5 加载值 806 kN 时铰缝开裂

Fig. 5 Crack of hinge joint under load of 806 kN

当荷载增大至 829 kN 时,裂缝持续增大,随即伴有“砰”的响声,铰缝沿结合面破坏。铰缝从表观开裂到破坏的过程极短,几乎是结合面处裂缝产生时即发生破坏,属于明显的脆性破坏。图 6 为 2 号铰缝破坏后板梁底部的破坏形态,可以看出相邻板梁间出现明显的位移错动。



图 6 加载值 829 kN 时板梁明显错动

Fig. 6 Relative moving of hollow slab under load of 829 kN

3.2 荷载-挠度曲线

试验过程中空心板各测试截面(沿空心板纵向设置 5 个截面,编号为 1~5,其中 1 号、5 号截面为支点截面,2 号截面为 $L/4$ 跨截面,3 号截面为跨中截面,4 号截面为 $3L/4$ 跨截面)荷载-挠度曲线如图 7 所示,由图 7 可知,加载初期,各空心板变形基本重合,整体受力性能良好。当荷载增大至 700 kN 时,跨中截面和 $3/4$ 截面 2 号铰缝处两板梁的位移变化开始不协调;随着荷载增大至 806 kN 时,1~3 号板变形分别是 30.3、29.2 和

28.7 mm;当荷载增大至 829 kN 时,依次增加为 31.5、29.5 和 29.1 mm;随后荷载稍增大,2 号铰缝发生破坏,千斤顶读数迅速降至 665 kN,3 号板挠度恢复至 0.96 mm,1 号板挠度增大至 35.1 mm,2 号板挠度增大至 31.1 mm,表明铰缝破坏后受力重分布效应明显。从荷载-挠度曲线变化的总体趋势看,整个加载过程中结构基本处于线弹性状态,弹塑性阶段较短,其破坏带有脆性特征。

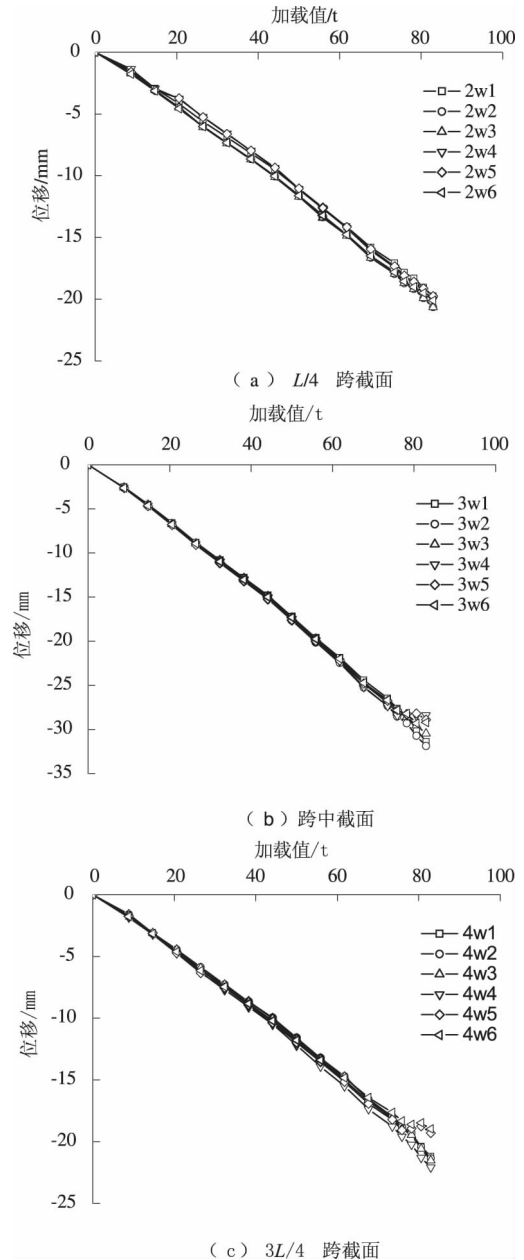


图 7 各测试截面荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves for the measured cross sections

3.3 铰缝两侧相对位移分析

图 8 为试验过程中铰缝两侧板梁相对位移随荷载的变化曲线。由图 8 可以看出,初始阶段各断

面板梁的相对位移均较小,随着荷载增大,相对位移呈增大趋势,但2号铰缝处的增大速度明显大于1号铰缝.当荷载达到758 kN后,2号铰缝处各测试断面板梁相对位移出现明显突变,表明铰缝的剪切刚度快速退化,失去竖向传力功能.

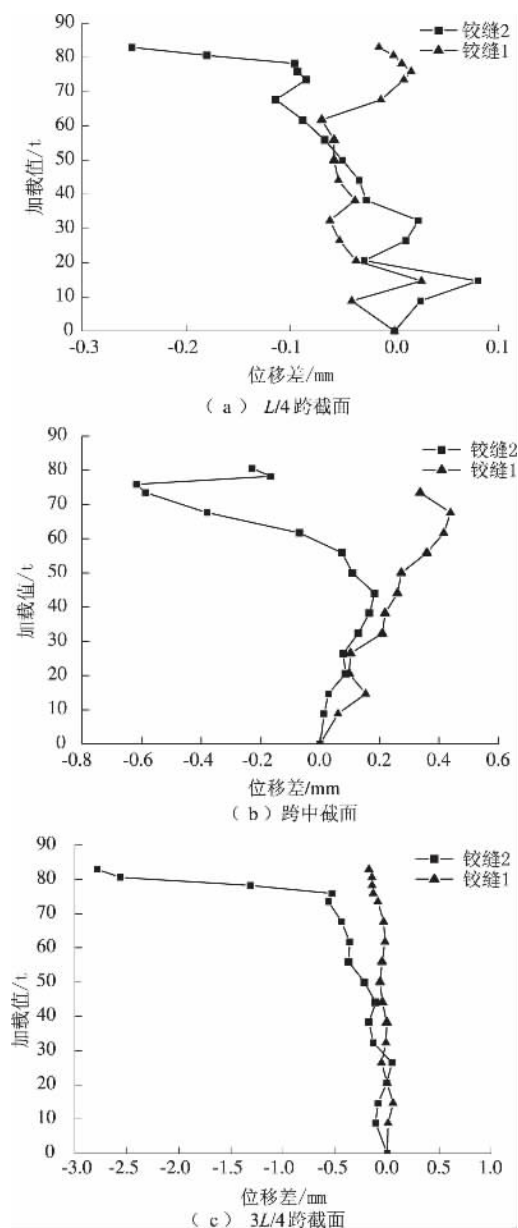


图8 各测试截面荷载-板梁相对位移曲线

Fig. 8 Load-relative deflection curves for the measured cross sections

3.4 与设计荷载的比较

试验板梁原桥横向由8片板梁组成,设计荷载为汽超-20,挂车-420,对应折算到单梁跨中集中荷载以及与试验结果的比较如表2所示.可以看出,以试验铰缝开裂荷载80.6 t作为对比依据,采用高性能灌浆料进行铰缝维修后对应原桥设计荷载的超载储备为1.74,表明了该维修技术能够

满足实际工程的需要.

表2 折算后单梁试验与设计荷载的比较

Tab. 2 Comparison of equivalent test and design loads for single hollow slab

加固方式	荷载值/kN		试验值/ 设计值
	试验值	设计值	
高性能灌浆料	269	155	1.74

4 结论

笔者以实桥拆除的3片30 m跨空心板梁为对象,进行了高性能灌浆料维修空心板桥铰缝的足尺试验研究,主要结论如下:

(1) 采用高性能灌浆料进行铰缝维修后,加载初期各板梁整体工作性能良好,极限状态下破坏形态为铰缝灌浆料与空心板结合面的纵向开裂破坏,且具有明显的脆性破坏特征.

(2) 试验加载初期阶段,各板梁竖向挠度基本相同,各板梁间相对位移较小,但在铰缝裂缝出现后,荷载-挠度曲线和荷载-相对位移曲线均发生突变,铰缝开裂导致各板梁内力重分布效应明显.

(3) 通过与实桥设计荷载相比,采用高性能灌浆料进行铰缝维修后对应原桥设计荷载的超载储备为1.74.

(4) 试验结果表明,在桥梁正常使用阶段,采用高性能灌浆料进行破损铰缝修复后各板梁整体工作性能良好.考虑到实际空心板桥梁存在铰缝钢筋以及铺装层的共同作用,采用高性能灌浆料进行空心板桥破损铰缝的维修能够满足工程应用的要求.

参考文献:

- [1] 黄民水,朱宏平.空心板梁桥“单板受力”病害机理及其加固处治研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(2):118-121.
- [2] 卫军,李沛,徐岳,等.空心板铰缝协同工作性能影响因素分析[J].中国公路学报,2011,24(2):29-33.
- [3] 唐国斌,项贻强,管品武.桥面铺装对中小跨径桥梁力学性能影响研究[J].公路交通科技,2010,27(12):94-98.
- [4] 陈淮,张云娜.施加横向预应力加固装配式空心板桥研究[J].公路交通科技,2008,25(10):58-62.
- [5] 李莎,戎贤,李鹏飞.简支空心板梁桥横向预应力加固方法及效果研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(5):73-77.

- [6] 蒲广宁. 减梁增肋法加固空心板桥力学原理与工程应用研究[D]. 长安大学公路学院, 2012.
- [7] 胡庆安,张同舟,邬晓光,等. II形钢板在桥梁加固工程中的应用[J]. 公路,2011(10):98-101.
- [8] 叶见曙,刘九生,俞博,等. 空心板混凝土铰缝抗剪性能试验研究[J]. 公路交通科技,2013,30(6):33-39.
- [9] 韩根生,张娟秀,叶见曙. 空心板自密实微膨胀混凝土铰缝抗剪性能研究[J]. 公路,2014(3):53-57.
- [10] 王渠,吴庆雄,陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式试验研究[J]. 工程力学,2014,31(S1):115-120.
- [11] 王银辉,罗征,周怀治,等. 型钢-混凝土组合加固装配式板梁桥铰缝试验[J]. 中国公路学报,2015,28(9):38-45.

Full-scale Experimental Study on Hinge Joint Repair of Hollow Slab Bridge with High-performance Grouting Material

YAN Weihong^{1,2}, FU Lijun^{1,2}, ZHAO Jun³

(1. Henan Transportation Research Institute CO., LTD, Zhengzhou 450015, China; 2. Research and Development Center on Bridge Safety Detection & Reinforcement Technology, Ministry of Transport, Zhengzhou 450015, China; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: For the purpose of assessing the repair effect of hinge joint of hollow slab bridge with high-performance grouting material, a full-scale failure test of three hollow slabs with a span of 30m removed from highway bridges is conducted. The middle slab is concentrated loading after assembling these three hollow slabs and repairing the hinge joints using high-performance grouting material. Load-deflection curves for all the slabs are measured and analyzed, and the failure pattern is also presented. The test results show that the deflection of each slab is basically the same in the initial loading stage, which means the three slabs have a good overall working performance. At the ultimate loading stage, a longitudinal brittle fracture failure occurs in the interface between slab and grouting material. Compared with the design vehicle load, the overload safety factor is 1.74 when we adopt the repair technology of high-performance grouting material.

Key words: high-performance; grouting material; hollow slab; hinge joints; full-scale experiment

基于压电阻抗技术的铝梁损伤定位试验研究

李成, 陈功轩, 铁瑛, 牛冬冬

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了识别铝梁结构损伤位置, 运用压电阻抗技术对铝梁进行了损伤定位试验研究. 用精密阻抗分析仪在不同频率段下对无损及自制损伤孔两种情况下的阻抗实部信号进行测量, 并用 pearson 相关系数处理试验数据, 通过多次试验找到了阻抗实部相关系数值与压电陶瓷传感器 (piezoceramic transducer, PZT) 和损伤之间距离近似成线性关系的适测频率段. 并在适测频率段内进行铝梁损伤定位试验, 损伤孔及裂纹位置的探测值与实际值基本吻合, 从而证实了该方法应用于铝梁损伤定位的有效性, 可为无损检测的损伤定位提供参考.

关键词: 压电阻抗技术; 无损检测; 损伤定位; 相关系数; 阻抗

中图分类号: TU317.2 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.018

0 引言

目前, 对于结构损伤的检测技术主要有传统的结构损伤检测方法诸如目测法、非破损检测法、基于静力的损伤诊断^[1]、基于结构振动的损伤诊断^[2-3]和智能诊断等^[4]. 对于智能诊断, 智能材料的发展为其提供了新途径, 其中以压电阻抗技术为代表的是压电陶瓷^[5] (PZT) 智能材料, 其集驱动器 and 传感器于一体, 且具有成本低廉、响应速度快、频响范围宽以及线性关系好等优点, 表现出在结构损伤诊断方面巨大的应用潜力^[6]. Castanien 等^[7] 提出在飞机机身采用压电元件进行阵列排布来识别损伤, 结果表明其能够对复杂结构进行健康监测. 李以农等^[8] 从试验的角度定性评价了几种结构缺陷, 证实压电阻抗技术在结构损伤检测方面是可行的. Giurgiutiu 等^[9-10] 在飞机发动机的涡轮叶片上粘贴压电传感器获取机电阻抗信号, 利用阻抗谱实现了结构裂纹损伤的检测. 沈星等^[11] 对使用多个螺栓和多个压电片的铝梁进行了试验, 构建 BP 神经网络进行训练, 结果表明能够快速精确地判断螺栓松动的位置. 董昕^[12] 运用压电阻抗技术对焊接结构进行探测, 通过损伤前后阻抗实部信息进行了焊缝损伤的定位, 结果能够对焊缝损伤实现基本的定位.

对于铝梁损伤定位问题, 笔者通过多次试验搜寻适合待测结构的激励频率段, 使其在该频率段内所得阻抗实部相关系数与 PZT 和损伤位置之间距离近似成线性关系, 据此在适测频率段内进行铝梁损伤孔及裂纹的损伤探测试验研究, 结果表明, 该方法能实现铝梁损伤的一维定位, 可为无损检测的损伤定位提供参考.

1 压电阻抗技术原理

将压电材料粘贴在待测结构表面, 给压电材料施加高频激励信号使之产生微小振动, 压电材料的振动信号作用在待测结构表面使其产生相应的振动; 待测结构出现损伤会使其振动发生变化, 进而使其作用于压电材料的振动发生改变, 从而使得压电材料反馈的电信号不同. 因此, 可以通过比较压电材料反馈的电信号来分析待测结构阻抗的变化, 进而得知待测结构是否存在损伤或缺陷.

采用 Liang 等^[13] 推导出的 PZT 的压电导纳公式:

$$Y = i\omega a(\bar{\varepsilon}_{33}^{\sigma} - \frac{Z_s}{Z_s + Z_R} d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E). \quad (1)$$

经过变换得到

$$Z = [i\omega a(\bar{\varepsilon}_{33}^{\sigma} - \frac{Z_s}{Z_s + Z_R} d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E)]^{-1}. \quad (2)$$

收稿日期: 2015-09-26; 修订日期: 2015-11-19

基金项目: 国家自然科学基金民航联合研究重点支持项目(U1333201); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51205370)

作者简介: 李成(1962—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事复合材料结构强度方面的研究, E-mail: chengli@zzu.edu.cn.

式中: Z 为测量所得电阻抗, 此时 PZT 与待测结构的阻抗进行了耦合; i 为虚数单位; ω 为激励信号的角频率; a 为 PZT 的几何参数; Z_s 、 Z_R 分别为待测结构和 PZT 的机械阻抗; d_{31} 为 PZT 压电应变常数; \bar{Y}_{11}^E 为 PZT 在电场强度为 0 或常数时的复杨氏模量; $\bar{\epsilon}_{33}^\sigma$ 为应力为 0 或常数时 PZT 的复介电常数。

根据式(1)和(2)可知, 在 PZT 的性能参数不变和周围条件基本维持在较理想的状态下, PZT 电阻抗 Z 值随待测结构阻抗 Z_s 的变化而变化。所以笔者采用 WK-6500B 精密阻抗分析仪测量 PZT 上耦合阻抗的变化来间接获得铝梁机械阻抗的变化, 继而通过对比铝梁健康状态和损伤状态下阻抗信号的差别, 以此来探讨铝梁结构损伤的位置信息。

2 试验装置及过程

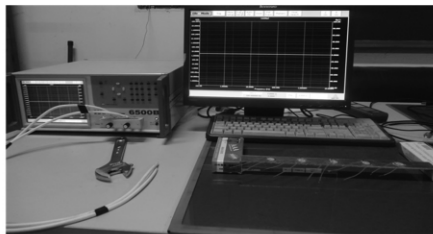
2.1 试验装置

试验用铝梁两端简支, 其尺寸参数: 长 360 mm, 宽 30 mm, 厚 3 mm, 通过手枪钻在其中线上钻孔来模拟损伤。将铝梁均分为 6 段, 在均分点处粘贴压电片, 胶黏剂采用 502 瞬时强力胶, 压电片采用 PZT-5 传感器, 其尺寸参数: 直径 Φ 为 20 mm, 厚度为 0.5 mm, 其编号从左至右依次为 $\Phi 1 \sim \Phi 5$, 主要材料参数如表 1 所示。利用阻抗分析仪对该铝梁进行阻抗信号测量, 图 1 为试验装置及试件示意图, 图 2 为试验用铝梁及 PZT 粘贴位置示意图。

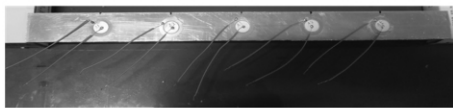
表 1 PZT-5 主要材料参数

Tab. 1 Main material parameters of PZT-5

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\bar{\epsilon}_{33}^\sigma / (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	$d_{31} / (\text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$\bar{Y}_{11}^E / \text{Pa}$
7.8	$1.3\text{E}-8$	$4.5\text{E}-10$	$6.2\text{E}-10$



(a) 试验装置



(b) 健康试件

图 1 试验装置及健康试件

Fig. 1 Experimental setup and healthy specimen

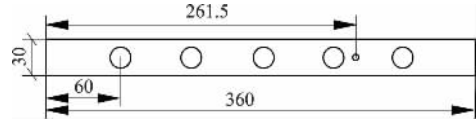


图 2 试验用铝梁及 PZT 粘贴位置示意图

Fig. 2 The aluminum beam and positions of PZTs

2.2 试验过程:

用阻抗分析仪先对 5 个压电片进行 LCR 测量, 多次测量取平均值, 找出 6 段 (46.5 ~ 69.5 kHz, 72.5 ~ 100 kHz, 102 ~ 121.5 kHz, 201.5 ~ 209.5 kHz, 343.5 ~ 370.5 kHz, 386.5 ~ 428.5 kHz) 相对平顺的频率段进行探测。

在上述找到的 6 个频率段对粘贴在无损铝梁上的 5 个压电片进行阻抗及阻抗实部信号测量, 然后在铝梁距左端 $x_0 = 261.5$ mm 处开一个直径 Φ 为 3 mm 通孔来模拟损伤, 同样在 6 个频率段内测量 5 个压电片在铝梁开孔之后的阻抗及阻抗实部信号。

3 试验结果分析

3.1 孔损伤位置识别

参考文献 [12], 选择 pearson 相关系数进行试验结果分析. pearson 相关系数说明了两组变量间相关关系密切程度的统计指标, 其公式如下:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中: X_i 和 Y_i 和分别表示在某一频率激励下, 损伤出现前后的阻抗实部值. 将上面 6 个频率段内测量的损伤出现前后的 PZT 阻抗实部值进行相关系数计算, 结果如表 2 所示。

对表 2 中数据进行分析, 发现频率段 1, 2, 5 符合线性规律, 并对其进行线性拟合, 拟合结果如图 3 所示。

由测量值计算出的阻抗实部相关系数值与 PZT 和损伤位置之间距离在一定范围内近似成线性关系, 与文献 [12] 基本吻合, 所以假设

$$\rho_i = aL_i + b = a \sqrt{(x - x_p^i)^2} + b, i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (4)$$

式中: $x_p^i = 60i, i = 1, 2, 3, 4, 5$; ρ_i 为位置 i 处压电片在损伤前后阻抗实部相关系数; L_i 为损伤与位置 i 处 PZT 之间距离; a, b 为待定系数. 由于压电

传感器有一定的响应半径^[14],通过比较处理数值,可以发现,在所测铝梁范围内测量出来的相关系数值按位置 4、5、3、2、1 依次递减,近似成线性关系,拟合图如图 3 所示。

表 2 6 频率段内健康状态和 $\Phi 3$ 损伤孔状态

阻抗实部相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient of healthy case- $\Phi 3$ damage hole within 6 frequency bands

频率段	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5
1	0.161 9	0.281 7	0.420 3	0.777 2	0.654 5
2	0.270 5	0.376 8	0.445 6	0.591 8	0.514 4
3	0.363 5	0.106 0	0.094 7	0.175 6	0.251 5
4	0.030 8	0.729 3	0.117 2	0.734 9	0.325 4
5	0.442 7	0.520 3	0.683 7	0.984 9	0.953 7
6	0.024 0	0.270 6	0.012 4	0.784 8	0.931 8

注: ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 、 ρ_5 分别为位置 1、位置 2、位置 3、位置 4、位置 5 的阻抗实部相关系数。

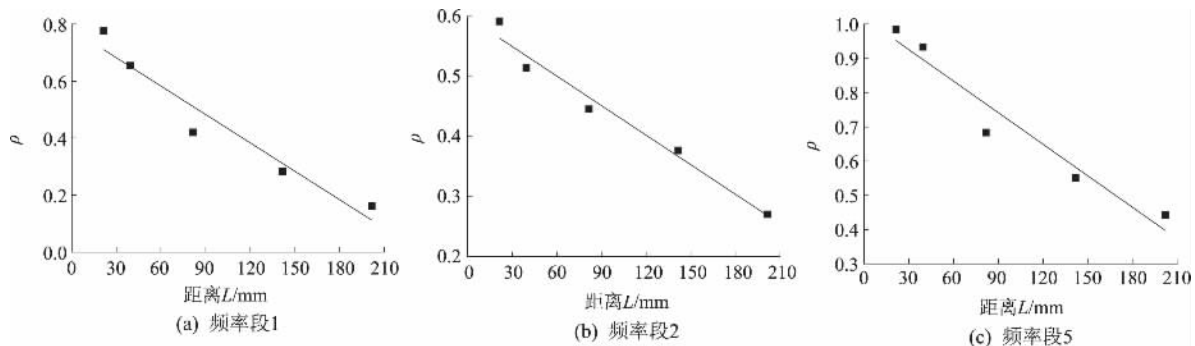


图 3 ρ - L 线性拟合图

Fig. 3 Figures of ρ - L linear fitting

计算出损伤位置 x 及相对误差如表 3 所示,结果表明,找到的适测频率段能够基本满足探测要求。

表 3 健康状态和 $\Phi 3$ 损伤孔状态探测结果

Tab. 3 Detection results of healthy case and $\Phi 3$ damage hole

频率段	计算值 x /mm	原始值 x_0 /mm	相对误差/%
1	259.69	261.5	0.69
2	254.12	261.5	2.82
5	266.89	261.5	2.06

进一步探测,将原预制损伤孔 $\Phi 3$ 扩大至 $\Phi 5$,同样在上述 3 个适测频率段内测量阻抗实部信号,将阻抗实部相关系数计算结果作曲线图如图 4 所示。图 4 中显示,距离损伤越近的阻抗实部相关系数值越大,并计算损伤位置及相对误差如表 4 所示。

选取离损伤最近的 3 个压电片进行损伤位置的计算,根据计算出来的阻抗实部相关系数值,发现 ρ_4 最大,表明损伤孔距离第 4 个压电片最近,并且 $\rho_5 > \rho_3$,这说明损伤在 4 号和 5 号 PZT 之间($240 < x < 300$),与试验实际一致。所以分别选取 3、4、5 号压电片,简化后方程组为:

$$\begin{cases} \rho_3 = a(x - 60 \times 3) + b; \\ \rho_4 = a(x - 60 \times 4) + b; \\ \rho_5 = a(60 \times 5 - x) + b. \end{cases} \quad (5)$$

解方程组得:

$$x = \frac{30(9\rho_3 - 8\rho_4 - \rho_5)}{\rho_3 - \rho_4}.$$

在无损伤铝梁上开 $\Phi 3$ 圆孔损伤,在频率段 1、2、5 段内通过测量计算的阻抗实部相关系数值,

由表 3 和表 4 可知,探测出来的损伤孔位置距实际开孔位置误差很小,从而说明该法能够基本实现铝梁损伤的定位。

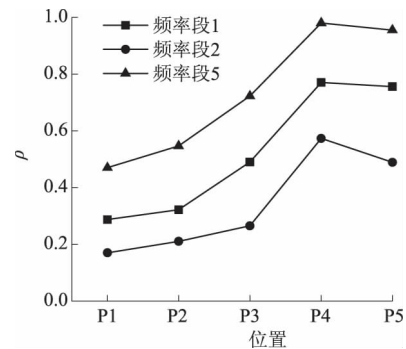


图 4 健康状态和 $\Phi 5$ 损伤孔状态各位置的阻抗实部相关系数

Fig. 4 Every correlation coefficient of healthy case and $\Phi 5$ damage hole

表4 健康状态和 $\phi 5$ 损伤孔状态探测结果Tab. 4 Detection results of healthy case and $\phi 5$ damage hole

频率段	计算值 x/mm	原始值 x_0/mm	相对误差/%
1	268.43	261.5	2.65
2	261.77	261.5	0.10
5	267.08	261.5	2.13

3.2 裂纹损伤位置识别

由上述试验及结果分析,为了能够进一步说明该法的有效性,改用宽 35 mm 铝梁,使用钢锯自制裂纹损伤位置 $x_0 = 260$ mm,裂纹深度为 0.6 mm,含裂纹试件如图 5 所示. 同样的试验方法,仅在适测频率段 1、2、5 内进行实测,测量后裂纹加深至 1 mm 重复上述步骤,探测结果如表 5 和表 6 所示.

由表 5 和表 6 可知,探测出来的裂纹损伤位置距自制裂纹损伤位置误差很小,这说明该法能够基本实现铝梁损伤的定位.

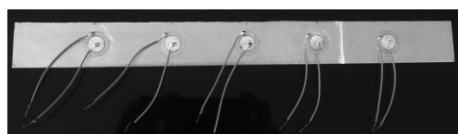


图5 含裂纹试件

Fig. 5 The specimen with crack

表5 健康状态和裂纹深度 0.6mm 损伤状态探测结果

Tab. 5 Detection results of healthy case and 0.6 mm deep crack

频率段	计算值 x/mm	原始值 x_0/mm	相对误差/%
1	263.25	260	1.25
2	269.63	260	3.70
5	254.53	260	2.10

表6 健康状态和裂纹深度为 1 mm 损伤状态探测结果

Tab. 6 Detection results of healthy case and 1 mm deep crack

频率段	计算值 x/mm	原始值 x_0/mm	相对误差/%
1	253.34	260	2.56
2	266.02	260	2.32
5	260.27	260	0.10

综上所述,在实际工程结构中,该法可对结构易损梁实现裂纹等损伤的在线监测及定位.

4 结论

基于压电阻抗技术,对铝梁进行了损伤定位试验研究,结果表明:

(1) 通过多次重复试验,找到了频率段 1、2、5,可用于铝梁损伤的定位,在所找到的适测频率段内,损伤前后阻抗实部相关系数与 PZT 和损伤

位置之间距离在一定范围内存在近似线性关系. 并发现 PZT 距离损伤位置越近,其阻抗实部相关系数值越大.

(2) 在适测频率段内对铝梁孔及裂纹损伤定位的探测值与实际值基本吻合,能基本满足铝梁损伤定位要求,可为其他材料结构的损伤定位提供参考. 在实际工程结构中,可对结构易损梁实现裂纹等损伤的在线监测及定位.

参考文献:

- [1] 宗周红,任伟新,阮毅. 土木工程结构损伤诊断研究进展[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 105 - 110.
- [2] YAN Y J, CHENG L, WU Z Y, et al. Development in vibration-based structural damage detection technique [J]. Mechanical systems and signal processing, 2007, 21(5): 2198 - 2211.
- [3] 张猛,赵桂峰,秦志伟,等. 基于单元模态应变能变化率的电力构架损伤识别[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(6): 99 - 103.
- [4] 严蔚. EMI 结构健康监测技术与量化分析[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2007: 2 - 6.
- [5] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [6] WINSTON H A, SUN F, ANNIGERI B S. Structural health monitoring with piezoelectric active sensors [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2001, 123(2): 353 - 358.
- [7] CASTANIEN K E, LIANG C. Application of active structural health monitoring technique to aircraft fuselage structures [C] // Smart structures and materials, 1996: Industrial and commercial applications of smart structures technologies. San Diego: SPIE, 1996: 38 - 49.
- [8] 李以农,郑玲,闻邦椿. 基于压电阻抗的结构缺陷评价方法的实验研究[J]. 力学与实践, 2002, 24(3): 44 - 47.
- [9] GIURGIUTIU V, ZAGRAI A N. Electro-mechanical impedance method for crack detection in metallic plates [J]. Proceedings of SPIE the international society for optical engineering, 2001, 4335: 131 - 142.
- [10] GIURGIUTIU V, ZAGRAI A N. Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification [J]. Journal of vibration and acoustics, transaction of the ASME, 2002, 124(1): 116 - 125.
- [11] 沈星,吕娟,章建文,等. 基于压电阻抗技术和 BP 网络的结构健康监测[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(4): 418 - 422.

(下转第 96 页)

电镀电源双环控制系统设计

刘平, 徐瀚, 臧甲杰, 陈睿科

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 电镀电源具有低压、大电流工作特性, 传统的电压控制模式因动态响应慢和不能动态限流等缺陷而难以满足控制要求. 经比较分析, 提出了使用电压外环、电流内环的双环控制器控制方案. 对电镀电源系统进行建模分析, 按照先电流内环后电压外环的顺序设计双环控制器. 对系统模型使用伯德图进行环路稳定性分析, 设计环路参数, 并根据双环系统工作时电路出现的条件稳定现象对电流环路参数进行修正, 并对设计的环路进行了试验. 试验结果表明, 双环控制系统正常工作, 具有实用价值.

关键词: 电镀电源; 双环控制; 环路稳定性

中图分类号: TM919

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.019

0 引言

目前, 直流电镀因具有低压、大电流等特点得到广泛应用, 具有良好的发展前景^[1-2]. 设计需要保证电镀电压的稳定, 输出电流的可控, 同时控制系统具有较高的调节灵敏度和控制精度. 通过试验可知, 直流电镀电源输出电压的变化速度滞后于电流. 传统电压控制方式不能直接实现对输出电流的控制, 并且响应慢, 无法实现精确限流, 且传统电流控制模式难以保持槽压稳定. 笔者将双环控制器理论应用于电镀电源中, 提出控制策略, 且针对传统双环控制研究和数字PID控制研究中较少涉及的双环参数匹配和条件稳定现象^[3-5], 笔者着重进行分析, 综合单环和双环环路的要求, 对相关参数进行取舍调整, 消除条件稳定现象, 设计出电流内环可单独工作的电镀电源双环控制器.

1 原理与设计

电压外环作为决策环保持输出电压稳定; 电流内环作为功率环按照电压外环的误差电压输出电流, 从而稳定输出电压; 电源具有自动切换的恒流、恒压模式, 实现快速调整和精确限流. 结构如图1所示, 电压环采样值和电压设定值比较输出误差信号 U_e ; 采用电压跟随器结构的比较环, 输出固定的输出电压 U_s , 用于限制输出的最大电

流; U_s 和 U_e 作比较取较低者作为输出 U_i ; 电流环采样输出电路中的电感电流与 U_i 做比较得到误差电压 U_p ; U_p 信号送给 PWM(脉冲宽度) 控制器, 在控制器内部 U_p 电平与震荡频率信号作比较后得出对应的脉宽信号进而驱动半桥开关管. 当电压环饱和即 $U_e > U_s$ 时, 电路工作在电流单环控制模式下, 系统以恒流模式工作, 此工作模式多见于系统启动或者电压设定变化时. 当电源正常工作时电压环退出饱和, 即 $U_e < U_s$ 时, 电路工作在电压电流环串联即双环控制模式下. 这种模式通常工作在系统负载缓慢变化的情况下.

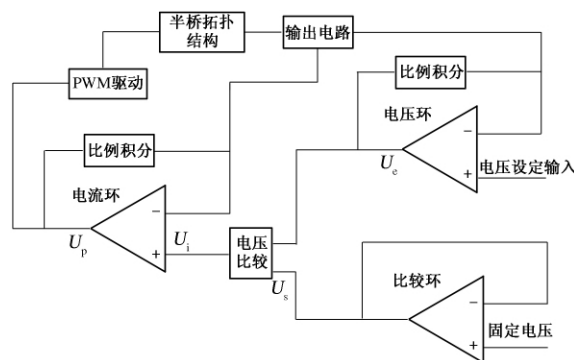


图1 双环控制结构框图

Fig. 1 The structure diagram of double loop control

1.1 系统模型的建立

开关电源是一个非线性系统, 但可用小信号分析法近似转为线性时不变系统分析, 时域模型

收稿日期: 2015-01-20; 修订日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10275021)

作者简介: 刘平(1957—), 男, 河北邯郸人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事开关电源、电路原理、射频电路和等离子体等方面的研究, E-mail: iep Liu@zhu.edu.cn.

转化为频域模型^[6-7]. 电路有单环和双环工作模式,需分别对两种情况建模,用伯德图法分析,使之满足稳定性准则^[8].

1.1.1 双环控制模型的建立

当图1所示系统工作在电压双环控制模式时,电路频域模型^[9]原理框图见图2.

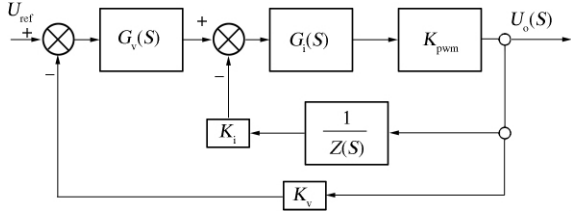


图2 双环控制原理框图

Fig.2 The schematic diagram of double loop control

其中 U_{ref} 为设定输入的电压基准值; $G_v(S)$ 为电压外环误差放大器的传递函数; $G_i(S)$ 为电流内环的误差放大器传递函数; K_{pwm} 为主电路的近似传递函数; K_v 为电压采样系数,取 0.5; K_i 为电流采样系数,取 0.01; $Z(S)$ 为滤波回路和的负载的总阻抗.

DC-DC 变换器的传递函数较复杂^[10],这里采用实验的方法得出近似值. 工作在电流连续模式的开关电源输出电压正比于开关管占空比,PWM 控制器输出占空比正比于信号电压输入,因而主电路的电压输出 y 和 PWM 驱动器电压输入 x (图1中 U_p) 可近似等效函数: $y = K_{pwm} \cdot x + b$,其中 b 为系统的损耗. 测量逆变器主电路在频率恒定条件下,不同 x 对应输出 y ,经曲线拟合得出 $K_{pwm} = 5.2146$. 输出电路为 LC 滤波电路和等效负载, $L = 20 \mu H$, $C = 13200 \mu F$. 负载电阻取轻载时的极端情况 $R = 0.1 \Omega$. 输出电路的传递函数为 $\frac{1}{Z(S)}$,其中 $Z(S) = \frac{RCLs^2 + LS + R}{RCS + 1}$. 化简电流环^[11],得等效传输函数 $T_{ic}(S)$:

$$T_{ic}(S) = \frac{G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot Z(S)}{Z(S) + G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i} \quad (1)$$

双环开环传输函数:

$$T_v(S) = G_v(S) \cdot K_v \cdot T_{ic}(S) = \frac{K_v \cdot G_v(S) \cdot G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot Z(S)}{Z(S) + G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i} \quad (2)$$

1.1.2 电流环模型的建立

同理对单独工作时的电流环进行分析,系统模型如图3所示,写出其开环传递函数:

$$T_i(S) = \frac{G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i}{Z(S)} \quad (3)$$

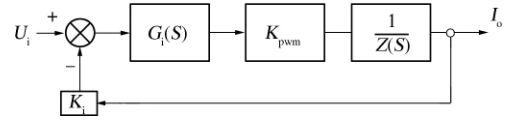


图3 电流环模型

Fig.3 The current loop model

1.2 电流环参数设计

由于电流环需要独立工作,设计需从电流环着手,需要协调电流环和电压环的相关参数,避免条件稳定现象,保证系统稳定. 由公式(3)写出电流环开环传递函数:

$$P_{ii}(S) = \frac{K_{pwm} \cdot K_i}{Z(S)} \quad (4)$$

其开环伯德图见图4. 分析可得环路穿越频率较低且接近 LC 滤波器的谐振尖峰,系统增益过小,需要进行补偿.

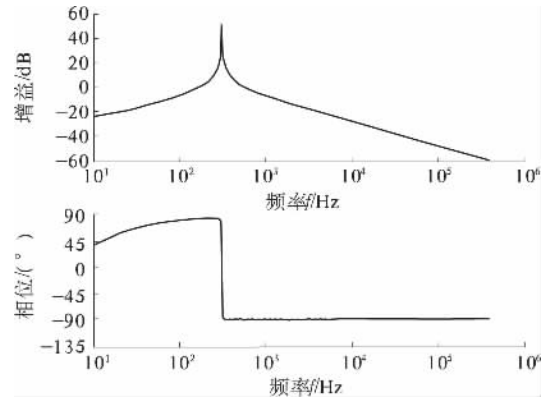


图4 补偿前电流环伯德图

Fig.4 The current loop Bode diagram before compensation

1.2.1 条件稳定现象与电流环设计

对电流环补偿,理想的方法是采用二型误差放大器引入两个极点和一个零点,硬件电路见图5,误差放大器传递函数:

$$G_i(S) = \frac{(\frac{1}{C_1 S} + R_2) \frac{1}{C_2 S}}{(\frac{1}{C_1 S} + R_2 + \frac{1}{C_2 S}) R_1} = \frac{1 + SC_1 R_2}{SR_1(C_2 + SR_2 C_1 C_2 + C_1)} \quad (5)$$

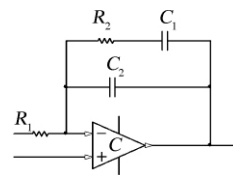


图5 误差放大器

Fig.5 The error amplifier

选取合适的参数,使穿越频率为 1 kHz,穿越频率处斜率为 -1,相位裕度大于 60°,电流环得到较好的补偿.使用二阶误差放大器的电压外环时,双环开环传递函数伯德图见图 6(直接使用 1.3 节中电压环参数).

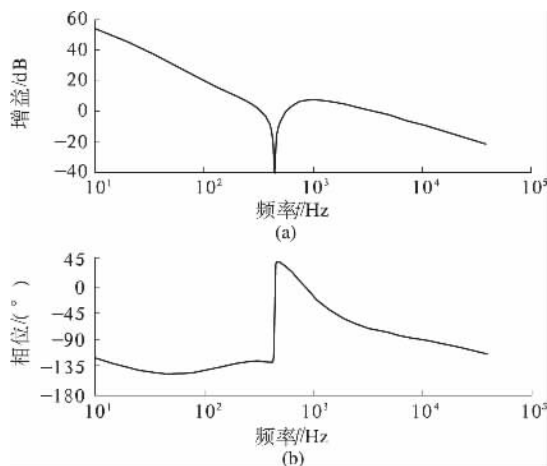


图 6 补偿后系统双环伯德图

Fig. 6 The double loop Bode diagram after compensation

当机器冷启动尤其是启动时设定电压从零开始调节时,在低电压输出时出现输出震荡,示波器量图见图 7,图中 1 通道测量量为电流环参考电压输入 U_i , 2 通道测量量为开关管单路驱动脉冲簇,在 25 ms 时间尺度上明显观察到电源输出呈现周期性震荡断续现象.

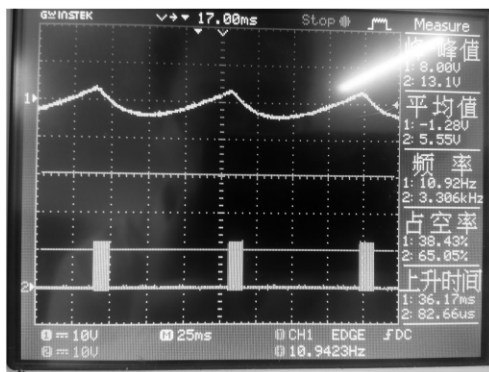


图 7 条件稳定现象波形图

Fig. 7 Waveform diagram for the phenomenon of conditional stabilization

当电路工作在双环模式时,电流环引入的低频极点在电流环等效传递函数 $T_{ic}(S)$ 中会产生较低的低频相位裕度,如果电压环采用二阶误差放大器,那么此时系统的开环传递函数相位裕度虽然在穿越频率处满足要求,然而在低频段相位裕

度较低,例如在图 6 中,最低仅为 30°,由于电路离散参数的影响出现条件稳定的现象^[12].因而需要对电流环的补偿参数进行修正或对电压环增加一个补偿环节.但由于电镀电源对于电流的控制精度要求不高,因而采用修改电流环参数的方法,仅引入单极点,用来衰减电流环高频增益,提高系统双环时的低频稳定裕度.修改图 5 所示误差放大器,用导线代替 C_1 ,选取合适的增益使电流环穿越频率提升为 1 kHz,取 $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, C_2 取 1 nF,其电流环误差放大器对应的开环传递函数:

$$G_i(S) = \frac{R_2}{R_1 R_2 C_2 S + R_1} \quad (6)$$

1.3 电压外环的设计

由公式 (1)、(2) 得出电压环误差放大器无比例积分补偿时环路开环传递函数 $P_{iv}(S)$ (公式 7), 对应的伯德图见图 8.

$$P_{iv}(S) = K_v \cdot T_{ic}(S) = \frac{K_v \cdot G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot Z(S)}{Z(S) + G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i} \quad (7)$$

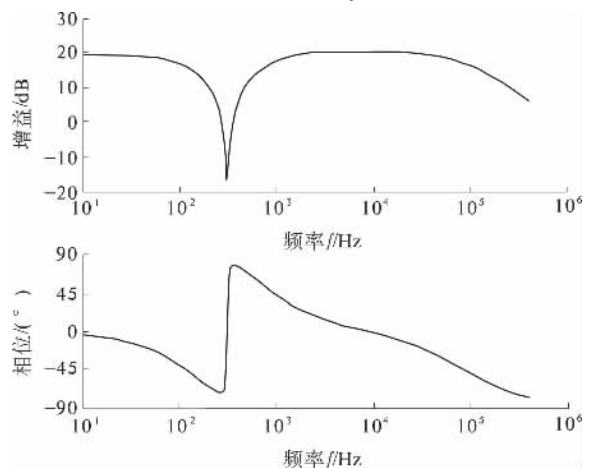


图 8 电压环补偿前伯德图

Fig. 8 The voltage loop Bode diagram before compensation

此时其低频增益低,高频增益高,穿越频率远大于 20 kHz(开关频率),因而需要进行补偿.使用图 5 的二型误差放大器进行补偿,引入 40 dB 的增益,一个初始 0 dB 极点,一个 170 Hz 零点,一个 800 Hz 极点.补偿后电压环误差放大器的传递函数 $G_v(S)$:

$$G_v(S) = \frac{(1/C_1 S + R_2) \cdot 1/C_2 S}{(1/C_1 S + R_2 + 1/C_2 S) R_1} = \frac{1 + S C_1 R_2}{S R_1 (C_2 + S R_2 C_1 C_2 + C_1)} \quad (8)$$

零点频率 $F_z = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$, 极点频率 $F_p = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$, 计算可得 $R_1 = 2.4 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 470 \text{ nF}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$. 式(8)带入式(2)中求得双环工作时的开环传递环数伯德图, 见图9.

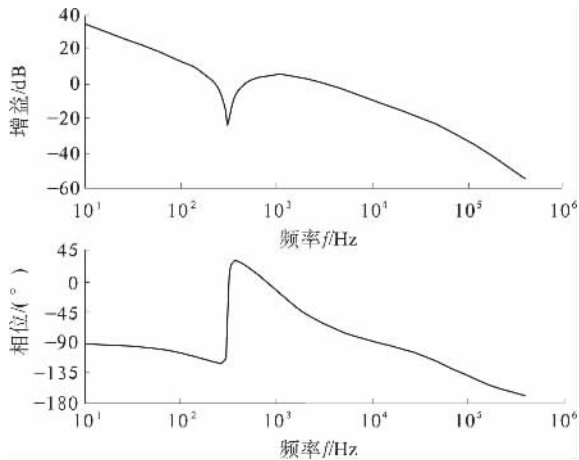


图9 双环控制器开环伯德图

Fig. 9 The open loop Bode diagram of double loop controller

分析图9可知, 系统穿越频率为3.3 kHz, 满足采样定理要求, 穿越频率处斜率为-1, 谐振尖峰处相位裕度大于60°, 由于噪声叠加点不同, 低频段有较高的增益用于消除低频干扰, 高频段增益较低用于消除高频干扰^[13]. 当系统负载变化时, $Z(s)$ 也会相应的变化, 当负载增大, 谐振尖峰变得平滑, 下冲减小, 在谐振频率附近相位裕度增大, 其余特性与图9中相比不变, 因而在重载情况下的系统稳定性仍然满足要求.

2 控制环路线验证试验

把设计好的双环控制电路进行闭环硬件验证, 测试主电路参数如表1所示.

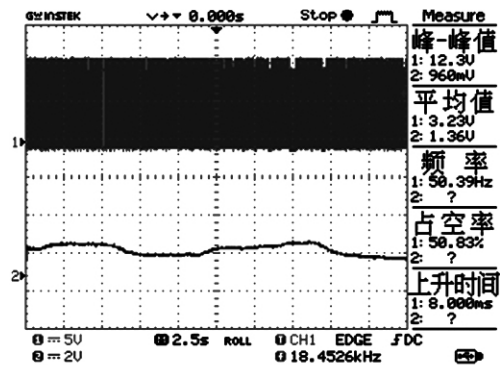
表1 试验测试主电路参数

Tab. 1 The experimental parameters of main circuit

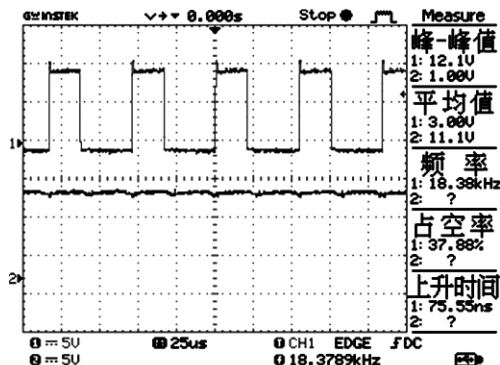
逆变器指标	参数
逆变器结构	半桥拓扑结构
整流输出结构	全波整流, LC 滤波输出
电压输入	三相交流 380 V
开关频率/kHz	18.6
试验输出电压/V	11
试验输出电流/A	110
开关控制芯片	SG3525

试验主要探究双环控制系统在恒流模式和恒压模式下的稳定性及输出特性. 通过示波器观察 PWM 控制器 SG3525 的两路驱动脉冲输出情况和在图1中电压比较器的输出电压 U_i . 快速调高输出电压设定值, 迫使系统进入恒流模式, 观察此时 SG3525 的驱动脉冲变化情况, 保持输出电压设定值不变, 观察 SG3525 的驱动脉冲变化, 此时为双环恒压模式, 实验波形图如图10所示. (a) 图为示波器周期为2.5 s的图像, 1通道(上部)为 SG3525 的单路驱动波形, 2通道(下部)为 U_i . 快速多次调节电压输出设定值, 可见 U_i 值明显变化但没有超过3.6 V 的 U_s 限定电压, 在3.6 V 附近电压环饱和, 系统工作于单环恒流模式, 其余工作在双环恒压模式. 由1通道波形可看出, 整个过程中驱动输出波形连续稳定. (b) 图是示波器周期为25 μs 时的双环恒压模式下 SG3525 驱动输出和系统电压输出波形图. 1通道(上部)为 SG3525 单路驱动, 驱动占空比稳定于37.9%, 2通道(下部)测量电压输出, 电压平均值11.1 V, 输出稳定.

由试验可得出此时双环控制系统响应速度良好, 电流电压模式系统稳定, 环路参数满足电镀电源设计要求.



(a) 示波器周期为2.5 s



(b) 示波器周期为25 μs

图10 实验波形图

Fig. 10 The experiment waveform diagram

3 结论

笔者提出在电镀电源中使用双环控制器解决传统控制方法的弊端. 对电镀电源系统建模分析, 得出电流电压环的设计参数, 分析条件稳定现象, 重新匹配两环路参数, 通过试验验证环路设计满足要求. 在本设计中, 电流内环虽然满足使用需求但其本身增益较低, 使得系统控制精度仍有改进的空间, 所以下一步的工作是进一步协调内外环参数, 提高系统调节精度.

参考文献:

- [1] 杜桂平, 姜立新. 电镀电源现状及展望[J]. 新技术新工艺, 2005(6): 69-70.
- [2] 林金堵, 吴梅珠. PCB 电镀铜技术与发展[J]. 通信电源技术, 2009(12): 27-31.
- [3] 刘顺新, 张建兴, 米高祥, 等. 基于 DSP 的智能型能馈电式蓄电池放电装置研制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(1): 85-87.
- [4] 陈瑞, 周梁. 基于双环控制的 PWM 逆变器的研究[J]. 通信电源技术, 2006, 23(1): 19-21.
- [5] 闫永兴, 张志, 朱维龙, 等. 一种高精度大功率电镀电源设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(18): 54-56.
- [6] 蔡宣三. 开关电源的瞬态建模和分析(I)[J]. 电源世界, 2002(9): 59-65.
- [7] 徐志宇, 许维胜, 吴启迪, 等. DC-DC 变换器 LTI 模型的实验验证研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3): 33-38.
- [8] SANJAYA M. 精通开关电源设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 200-201.
- [9] 裴文. DC-DC 开关变换器建模、仿真与补偿网络设计研究[D]. 合肥: 安徽大学控制工程学院, 2014.
- [10] 蔡宣三. 开关电源的频域分析与综合(I)[J]. 电源世界, 2002(9): 60-65.
- [11] 王建辉, 顾树生. 自动控制原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 36-37.
- [12] ABRAHAM I, KEITH B, TAYLAR M. Switching Power Supply Design[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 376-377.
- [13] 王建辉, 顾树生. 自动控制原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 42-43.

The Design of Double Loop Control System for Electroplating Power Supply

LIU Ping, XU Han, ZANG Jiajie, CHEN Ruike

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

Abstract: Electroplating power supply has the working characteristics of low voltage and high current. It is difficult for the traditional voltage mode to meet the control requirement due to low dynamic response and defects of dynamic current limiting. This paper proposes to use double loop controller through the comparative analysis, which is made up of an current inner loop and a voltage outer loop. The double loop controller is designed in the sequence of current inner loop firstly, the voltage outer loop secondly via the modeling analysis of electroplating power supply system. This paper analyses the stability of the circuit by using the Bode diagram. The design of the parameters of the circuit is also illustrated. According to the phenomenon of conditional stabilization when the circuit of double loop system works, parameters of the current are corrected. And the parameters are tested by experiments. The hardware verification proves that the controller can work normally. This system has practical value.

Key words: electroplating power supply; double loop control; loop stability

雾霾污染下基于混沌性的图像去雾算法改进

睢丹^{1,2}, 张亚利³, 杨杰²

(1. 安阳师范学院 软件学院, 河南 安阳 455000; 2. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070;

3. 安阳学院 计算机系, 河南 安阳 455000)

摘 要: 传统基于边缘保持滤波的单幅图像快速去雾算法, 在雾霾污染大气粒子散射作用下, 图像会受到雾化背景的干扰, 出现浓雾噪点, 图像结构信息复原效果较差. 提出一种基于混沌性的加权滤波图像快速去雾算法, 通过分析雾天雾化背景干扰下的图像信息, 获取图像数据的混沌特性, 并对雾化图像进行最小颜色分量估计. 在此基础上, 结合带雾图像暗原色模型、时域和频域特征分量模型, 构建出自适应加权滤波模型, 完成基于混沌性的加权滤波图像快速去雾算法的改进设计. 实验结果表明, 采用该算法能避免雾化图像中间区域的颜色失真, 降低雾化背景干扰, 减少浓雾噪点, 使远景的混沌特征得到合理的保留, 在图像质量和运算性能方面都具有优越性.

关键词: 雾霾天气; 混沌性; 去雾算法; 改进研究

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.020

0 引言

近年来, 随着计算机数字图像处理技术的快速发展, 在图像处理过程中, 对模糊图像进行滤波降噪, 提高图像成像的清晰度, 挖掘和提取出图像的有用特征, 进而改善图像成像质量, 提高目标图像的识别能力^[1-2]是一个重要的研究课题. 特别是对特殊环境下图像的处理, 例如在雾霾环境下对拍摄图像的去雾处理是基于对大气粒子散射的作用了解下进行的. 由于图像成像受到雾化背景的干扰, 而出现浓雾噪点, 就需要对雾化背景干扰下的浓雾图像进行去雾处理, 来提高图像的清晰度, 最终便于对图像目标场景信息的分析和识别^[3-5].

文献[6]提出基于雾化图像的约束进化时频加权滤波去雾算法, 该算法以图像暗原色为新的图像特征, 实现去雾处理, 但是, 该方法只对雾化图像的边缘雾点去雾效果好, 对局部去雾效果不明显. 文献[7]提出基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法, 通过对边界邻域进行最大值滤波, 消除高亮度物体对图像的影响, 获得准确的大气光值, 使去雾结果的颜色保真度较高, 但是该方法在应用中比较繁琐. 文献[8]提出基于二次

滤波的单幅图像快速去雾算法, 通过提高透射率的估算精度, 来恢复图像的亮度, 该算法过于简单, 去雾效果不好. 文献[9]提出基于暗原色和加权形态滤波增强算法, 利用形态学滤波方法, 估计雾浓度图像并实现图像的去雾处理. 该方法既能平滑雾浓度图, 又能很好地保留场景的边缘, 估计出的雾浓度图更加精确, 但是应用范围比较窄. 针对上述问题, 笔者提出基于雾天混沌性传统图像去雾算法的改进.

1 雾霾天雾化背景干扰下的图像分析

1.1 雾霾天环境下图像数据的混沌性证明

针对文献[7]中提出的基于边缘保持滤波单幅图像快速去雾算法, 在大气散射环境下, 图像采集过程中会受到雾化环境的干扰, 排除这种干扰需要证明图像像素的混沌性, 雾霾天环境下采集的图像最直接的表现就是模糊, 即所谓的图像失真, 这种失真带有混沌性, 表1给出了产生图像失真的原因而导致的结果.

由表1可知, 由于雾霾天气产生雾化程度不同, 导致失真的原因也不同, 同时失真处理结果也不同. 当无雾霾时, 产生失真的主要原因是动作的变化产生一定的混沌性, 可通过调整拍摄模式来

收稿日期: 2015-10-25; 修订日期: 2015-12-18

基金项目: 河南省科技攻关项目(132102210212)

通信作者: 睢丹(1976—), 女, 河南安阳人, 安阳师范学院副教授, 博士研究生, 主要从事计算机图像处理与模式识别等方面的研究, E-mail: aynusd@163.com.

进行处理;当存在低到中度雾霾时,主要是由于环境及传输延迟产生混沌性,可通过对环境外景进行处理或重新进行传输;当存在重度雾霾时,主要是由于图像延迟产生混沌性,导致无法进行处理,这种混沌性的存在是通过雾霾天环境下拍摄的图像失真程度来体现。

表1 雾霾天雾化环境下图像失真的原因结果分析图
Tab.1 Haze days atomization environment reasons of the distortion of image analysis results

图像种类	失真原因	失真结果处理
雾霾	图像延迟	无法进行处理
中度雾霾	传输延迟	重新进行传输
低度雾霾	环境干扰	环境外景进行处理
无雾霾	动作扑捉	拍摄模式进行调整

基于对雾霾环境下混沌性的了解可知,这种混沌性的产生主要是基于其所处的环境,比如在雾霾天和雨天等非正常环境.在雾霾环境下对图像像素的混沌性,可以通过图像像素失真的早期数据来进行分析,只是这种混沌性表现的不是很明显,只有在遇到雾霾天这样的环境下才会释放出来.通过这些图像采集像素数据的最大 Lyapunov 指数是否大于 0 来验证图像像素的混沌性.图像像素发生失真的数据时域波形,如图 1 所示.运用 Matlab 对得到的图像失真失效数据进行 Lyapunov 指数图的分析,形成图像失真时 Lyapunov 指数,如图 2 所示。

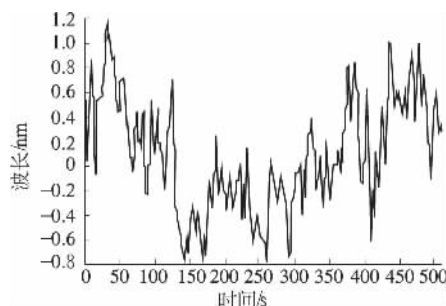


图1 图像像素发生失真的时域波形

Fig.1 Time domain waveform for image pixels distortion

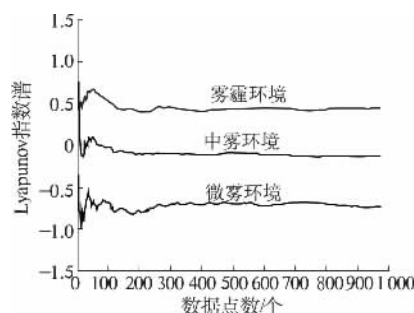


图2 图像像素失真时的 Lyapunov 指数

Fig.2 Lyapunov index for image pixel distortion

通过图 1 图 2 可以看出,根据图像像素失真的时域波形和图像像素失真时 Lyapunov 指数 > 1,可以很明显地证明图像像素在这种情况下具有混沌性。

1.2 雾霾天雾化背景干扰下的图像采集模型构建

雾霾天雾化背景下,在大气散射的作用下,图像采集会受到雾化背景的干扰,雾化背景干扰图像采集是用 McCarney 大气散射模型来实现的,对雾化图像数据的设定由 M 个近邻相位点组成了一个帧,用矩阵 X 表达图像的色差像素级,在雾化背景干扰下的浓雾图像色差像素级满足单个尺度的差分函数,那么,就构建了一个关于雾化背景场景色差特征的大气耗散模型:

$$U(x) = 1 - t(x) = \omega U(x) = \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A} \right) \right). \quad (1)$$

式中: A 为天空的亮度; $I^c(y)$ 为大气粒子 y 轴向模型。

根据大气耗散模型,由于大气耗散对图像像素产生噪声干扰,设 x_0 点为视差传播的可靠性驱动因子,设 $G(x, y, \sigma_i)$ 表示单个尺度的瑞利分布函数,设 σ_i 是像素 (x, y) 在目标整体特征上的尺度,设 w_i 是去雾滤波器的窗口大小,那么,在雾化背景干扰下,大气粒子的散射过程模型:

$$I(x) = J(x) t(x) + A(1 - t(x)). \quad (2)$$

式中: $I(x)$ 是指雾化图像的强度; $J(x)$ 为景物光线的强度; A 为背景干扰强度; $t(x)$ 为混沌干扰下的大气透射率. 结合 $J(x) t(x)$ 为雾化图像的衰减项,得到雾点散射损失模型:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A. \quad (3)$$

根据雾点散射损失模型,来构建雾霾天雾化背景干扰下的图像采集模型:

$$I(x) = A\rho(x) e^{-\beta d(x)} + A(1 - e^{-\beta d(x)}). \quad (4)$$

式中: $A\rho(x) e^{-\beta d(x)}$ 表示直接传播的模型; $A(1 - e^{-\beta d(x)})$ 表示环境光模型, $1 - e^{-\beta d(x)}$ 为中值滤波大气散射率. 根据模型可知,雾化图像处理和去雾目标就是从 $I(x)$ 中恢复 $J(x)$ 、 A 和 $t(x)$ 等相关系数. 在雾化背景干扰下的浓雾图像采集,主要是根据场景反照率,来实现对图像的去雾处理。

1.3 图像最小颜色分量的处理方法

在雾霾环境下,为了实现对图像的快速去雾处理,进行图像暗原色特征提取的预处理. 先对图像的最小颜色分量预处理,具体过程如下: 对于一幅在雾化背景干扰下的浓雾背景彩色图像 J , 定义 J^c 代表 J 的某一个颜色分量,定义大气耗散函

数 $U(x) = 1 - e^{-\beta d(x)}$, $t(x) = e^{-\beta d(x)}$, 其中 $0 < t(x) < 1$, 对图像进行 Hough 变换, 采用加权滤波方法将边缘检测和 Hough 直线检测相结合, 形成图像生成序列模型:

$$\text{Dif}(C_1, C_2) = \min_{v_i \in C_1, v_j \in C_2, (v_i, v_j) \in E} w((v_i, v_j)). \quad (5)$$

在图像的生成序列模型中, $n = 1, 2, \dots, T$, 它表示图像分频迭代步数. 把检测得出的图像像素集划分成几个子集, 采用最小颜色分量估计区分不同大小的图像轮廓点, 得到单个像素值 $I(i, j)$ 的模型:

$$I(i, j) = \sum_{k=1}^p I_{(k)}(i, j) \cdot 2^{k-1}. \quad (6)$$

根据计算图像位置 x 处的传播模型, 采用 3×3 的中值滤波器进行图像特征采集, 得到图像特征采集结果模型:

$$G_{m,n} = \begin{pmatrix} g_{(m,n)}(1,1) & g_{(m,n)}(1,2) \\ g_{(m,n)}(2,1) & g_{(m,n)}(2,2) \end{pmatrix},$$

$$m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N; \quad (7)$$

$$g_{(m,n)}(u, v) = I_{(k)g}[2(m-1) + u, 2(n-1) + v] \quad u \in \{1, 2\}; v \in \{1, 2\}. \quad (8)$$

在图像特征采集结果模型 (7) (8) 中, u 为图像 $p(i, j)$ 最小颜色分量, (i, j) 为相应像素的坐标值. 以 x 为中心划定一块方形区域, 采集多幅图像的雾化背景先验噪声, 在方形区域内进行图像特征提取, 构建大气耗散函数, 并采用图像去雾方法求得背景暗原色模型:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))). \quad (9)$$

为了提高图像去雾的速度, 这里假定 $J^{\text{dark}}(x)$ 等于 0, 即得到关于图像去雾速度的模型:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) = 0. \quad (10)$$

在以上构建的模型基础上, 选取合适的活动窗口进行图像的噪声复原, 得到复原以后的图像模型:

$$J(x) = [I(x) - AU(x)] / (1 - U(x)) = [I(x) - A\omega U(x)] / (1 - \omega U(x)). \quad (11)$$

根据复原以后的图像模型, 来计算图像内的每一点自相关函数, 通过阵列元分析方法求出尺度图像在 (x, y, σ) 处的极值后, 得到图像的最小颜色分量自相关模型:

$$c(x, y) = \sum_w [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2. \quad (12)$$

根据图像的最小颜色分量自相关模型, 进而估计的大气耗散函数 $U(x)$ 和天空亮度 A , 由此, 得到雾化背景干扰下的雾化图像最小颜色分量估计, 为接下来的基于混沌性的加权滤波的图像快速去雾算法奠定了基础.

2 基于混沌性的加权滤波图像快速去雾算法

通过对雾霾背景干扰下的图像分析, 提出一种基于混沌性的加权滤波的图像快速去雾算法, 实现对传统基于边缘保持滤波单幅图像快速去雾算法的改进.

基于上述图像特征和对最小颜色分量估计的预处理, 采用自适应加权滤波设计, 在雾化背景干扰下以混沌性特征映射滤波的第一层为网络的输入节点层. 设 A 为天空的亮度, $\rho(x)$ 为空间坐标 x 处的场景反照率, $d(x)$ 为空间坐标, 获得特征点相关信息(位置、尺度、主方向及特征向量)后, 确定初始特征点集的主方向, 在雾化背景干扰下, 浓雾图像中存在雾化和未雾化两部分区域, 其差异值模型为 $\tau_d u = u(x - m(x, y) - d(x, y), y)$, 根据颜色通道分量的先验知识, 对原图像进行中值滤波, 在雾化背景干扰下, 假设局部区域都存在至少一个颜色分量, 计算颜色分量干扰模型的极小值, 来实现对源图像值中的滤波.

假设在大气光 A 作用下的无雾清晰图像的透射率 $\Omega(x)$, 随着雾化背景作用增强, 图像分辨强度趋于 0, 输入图像 I 的像素值, 构建出带雾图像的暗原色模型:

$$\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I^c(y)}{A^c})) = \tilde{t}(x) \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{J^c(y)}{A^c})) + (1 - \tilde{t}(x)). \quad (13)$$

当 $A > 0$ 时:

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{J^c(y)}{A})) = 0 \quad (14)$$

由于在良好的自然环境采集条件下大气粒子的存在, 空气中总会不可避免地包含一些杂质分子, 这些成分即为混沌性, 采用加权滤波, 计算干扰时频特征, 得到时域和频域的特征分量模型:

$$t(x) = 1 - \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I^c(y)}{A})). \quad (15)$$

$$\tilde{U}(x) = 1 - t(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I^c(y)}{A})). \quad (16)$$

根据时域和频域的特征分量模型, 其中,

$\tilde{U}(x)$ 表示色彩矩阵中大气耗散函数的估计值. 在混沌性干扰下, 雾霾环境中的图像深度感会丢失, 即 $\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I^c(y)}{A})) \rightarrow 1$, 则此时 $\tilde{t}(x) \rightarrow 0$.

而在有雾图像的天空区域中, 其最小通道的强度值趋向于天空亮度 A , 为了让图像恢复具有深度感, 使得图像的混沌噪点得到有效抑制, 这里

引入一个常数 ω 来改善对透射率的估计,其中自适应权重 $0 < \omega \leq 1$,并且构建自适应加权滤波模型:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A} \right) \right) = 1 - \omega \tilde{U}(x) \quad (17)$$

式中: $U(x)$ 为改善后的透射率估计值. 利用自适应加权滤波算法,针对性地去除一部分覆盖遥远景物的雾化特征向量,同时保留图像的所有细节,实现了基于加权滤波图像快速去雾算法改进设计.

根据综上设计,完成了基于混沌性的加权滤波图像快速去雾算法的改进设计,具体的改进算法的实现流程如图 3 所示.

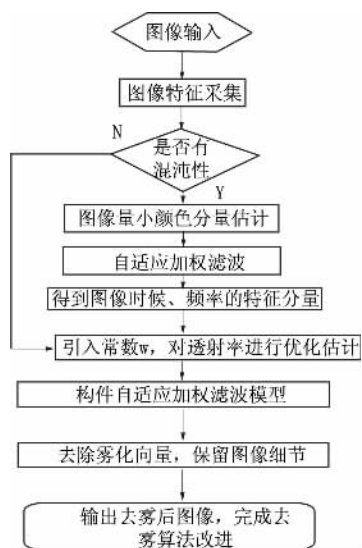


图 3 改进去雾算法实现流程

Fig. 3 Fog algorithm implementation process

3 仿真实验与结果分析

为了验证加权滤波图像快速去雾算法在实现雾化背景干扰下的图像去雾性能,进行仿真实验. 仿真实验是用系统内存为 3 GB 的 PC 计算机,通过采用 Matlab 2012 和 VC++ 软件编程实现的算法仿真. 其中,图像采集系统中使用的是 CCD 摄像头,参数为:感光元件为 CMOS;动态分辨率为 1280×960 .

首先,进行原始图像的采集,得到雾化背景干扰下的雾霾环境图像的大小是 600×400 的 JPEG 图和 400×300 的 BMP 图像. 大气散射环境下图像采集将会受到雾化背景干扰,因此构建背景干扰模型进行原始图像采集,得到两幅待处理的雾霾天气雾化背景干扰下的雾噪图像如图 4 所示,图 4(a) 是 600×400 的 JPEG 图像,图 4(b) 是 400×300 的 BMP 图像.



(a) 第一幅图像



(b) 第二幅图像

图 4 原始待处理图像

Fig. 4 Original image to be processed

根据图 4 可知,原始的图像受到雾化背景的干扰,雾噪污染较为严重,图像成像效果不好,需要进行图像去雾处理,进行对图像暗原色特征提取预处理. 在此基础上进行暗原色加权滤波处理,实现雾化背景干扰下的图像快速去雾,为了对比算法性能,采用改进算法和传统算法进行对比,得到去雾后的图像成像效果如图 5 和图 6 所示.



(a) 第一幅图像

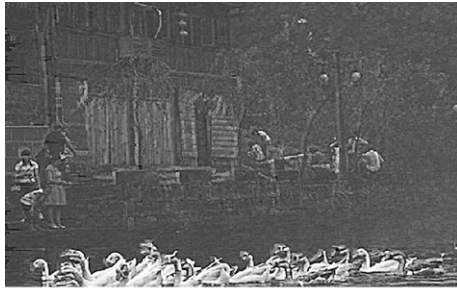


(b) 第二幅图像

图 5 文献 [3] 去雾效果

Fig. 5 Literature [3] to the fog effect

分析图5,采用传统算法进行图像去雾图像中间区域出现了颜色失真现象,树枝和地面去雾不彻底,遥远景物的混细节特征不能得到合理的保留,图像的去雾效果差.但采用改进算法进行图像去雾,能有效克服传统方法的上述缺陷,在除雾的同时保留了图像的真实色彩,图像成像质量效果较好,有效地提高了图像的目标特征点的分辨率.



(a) 第一幅图像



(b) 第二幅图像

图6 本文算法去雾效果

Fig. 6 This algorithm to the fog effect

为了测试算法的运算性能,以运算时间为对比指标,采用不同算法,得到运算时间对比结果如图7所示,从7图可见,采用本文引进算法,运算性能较好,实时性较高,降低运算时间,提高了算法的速度.

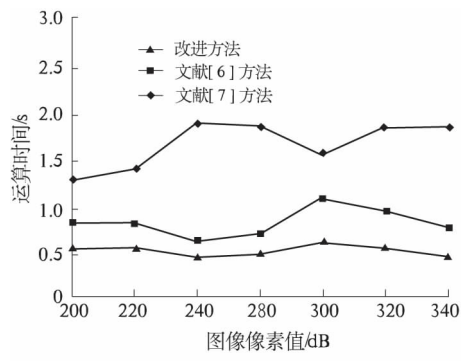


图7 运算性能对比

Fig. 7 Operational performance comparison

4 结论

笔者分别对雾霾环境下的传统图像去雾算法进行改进研究,对浓雾环境下的图像进行去雾算法研究.基于仿真实验的对比分析,可知,笔者提出的基于加权滤波的雾化背景干扰下图像快速去雾算法,实现了雾化背景干扰下的图像快速去雾算法改进,改进算法具有较好的图像去雾性能,图像质量的改善和运算性能方面都具有优越性.

参考文献:

- [1] 赵进超,朱颢东,申圳,等.基于Hadoop的图像纹理特征提取[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(4):109-113.
- [2] 南栋,毕笃彦,马时平,等.基于景深约束的单幅雾天图像去雾算法[J].电子学报,2015,43(3):500-504.
- [3] 刘建磊,刘晓亮.基于拐点线的大雾能见度检测算法[J].计算机应用,2015,35(2):528-530.
- [4] 宋大伟.一种改进的远距离视频图像性别辨识方法[J].科技通报,2013,29(8):100-136.
- [5] 毛晓艳,张博,叶中付.基于加权滤波的低信噪比LAMOST光纤光谱信号降噪[J].天文研究与技术,2015(4):447-454.
- [6] 刘伟,崔永峰,吴相林.雾化图像的约束进化时频加权滤波去雾算法[J].计算机科学,2014,41(9):311-314.
- [7] 陈露,和红杰,陈帆.基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法[J].光子学报,2014,43(11):235-269.
- [8] 刘红平,陈明义.基于二次滤波的单幅图像快速去雾算法研究[J].计算机工程与应用,2015,51(8):156-159.
- [9] 郭艳颖,杨国庆.基于暗原色和加权形态学滤波的图像去雾算法[J].现代电子技术,2012,35(20):71-73.
- [10] 田丰,刘娜.基于二次加权滤波的热设备故障区域定位研究[J].计算机工程与应用,2014,50(14):242-244.

Image Remove the Fogfog Algorithm Based on Improvement Chaotic under Haze Pollution

SUI Dan^{1,2}, ZHANG Yali³, Yang Jie²

(1. School of Software Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455000, China; 2. School of Information Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China; 3. Computer Science Department Anyang University, Anyang 455000, China)

Abstract: This paper suggests a quick image defogging algorithm based on the chaotic weighted filtering to improve the traditional algorithm, the single image defogging algorithm with edge protection, with which there are the disturbance of foggy background, intense foggy hot pixel and the bad restore of image structure. The chaos of the image data will be acquired and the minimum color components will be estimated with the analysis of those disturbed images by the foggy background in haze. Then on this basis, with the combination of the dark channel model of foggy images and the component model of time domain and frequency domain features, the self-adapted weight filtering model is constructed, and the improved design of the quick image defogging algorithm based on chaotic weight filtering is completed. The results of experiment indicate that the adoption of this algorithm can avoid color distortion in the middle area of foggy images, lower the disturbance of foggy background, reduce the foggy hot pixel, and retain the chaotic characteristics of the distant view, and therefore, the advantages in image quality and calculation are displayed.

Key words: haze; chaos; defogging algorithm; improvement

(上接第 85 页)

- [12] 董昕. 结构损伤阻抗识别方法试验与应用研究[D]. 北京: 北京化工大学机电工程学院, 2012: 49-53.
- [13] LIANG C, SUN F P, ROGERS C A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material system-Determination of the actuator power consumption and system

energy transfer[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 1994, 5(1): 12-20.

- [14] TSENG K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material[J]. smart materials and structures, 2002, 11(3): 317-329.

Experimental Research of Damage Localization in Aluminum Beam Based on EMI Technique

LI Cheng, CHEN Gongxuan, TIE Ying, NIU Dongdong

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

Abstract: Aiming at identifying damage location, this paper experimentally investigated the damage location in aluminum beam based on the electro-mechanical impedance (EMI) technique. [The real signals of impedance of nondestructive and handmade damage hole under different frequencies were measured with precision impedance analyzer, then were processed with Pearson correlation coefficient, many times of experiment found the feasible frequency bands and the approximate linear relationship between the correlation coefficient and the distance from PZT to damage was verified in these feasible frequency bands finally.] Aluminum beam damage location experiments were carried out accordingly and the detection value of damage hole and crack position coincided well with the actual value. The method applied in aluminum beam damage location was verified to be effective and it can provide reference for nondestructive testing of damage location.

Key words: electro-mechanical impedance (EMI) technique; nondestructive testing; damage localization; correlation coefficient; impedance