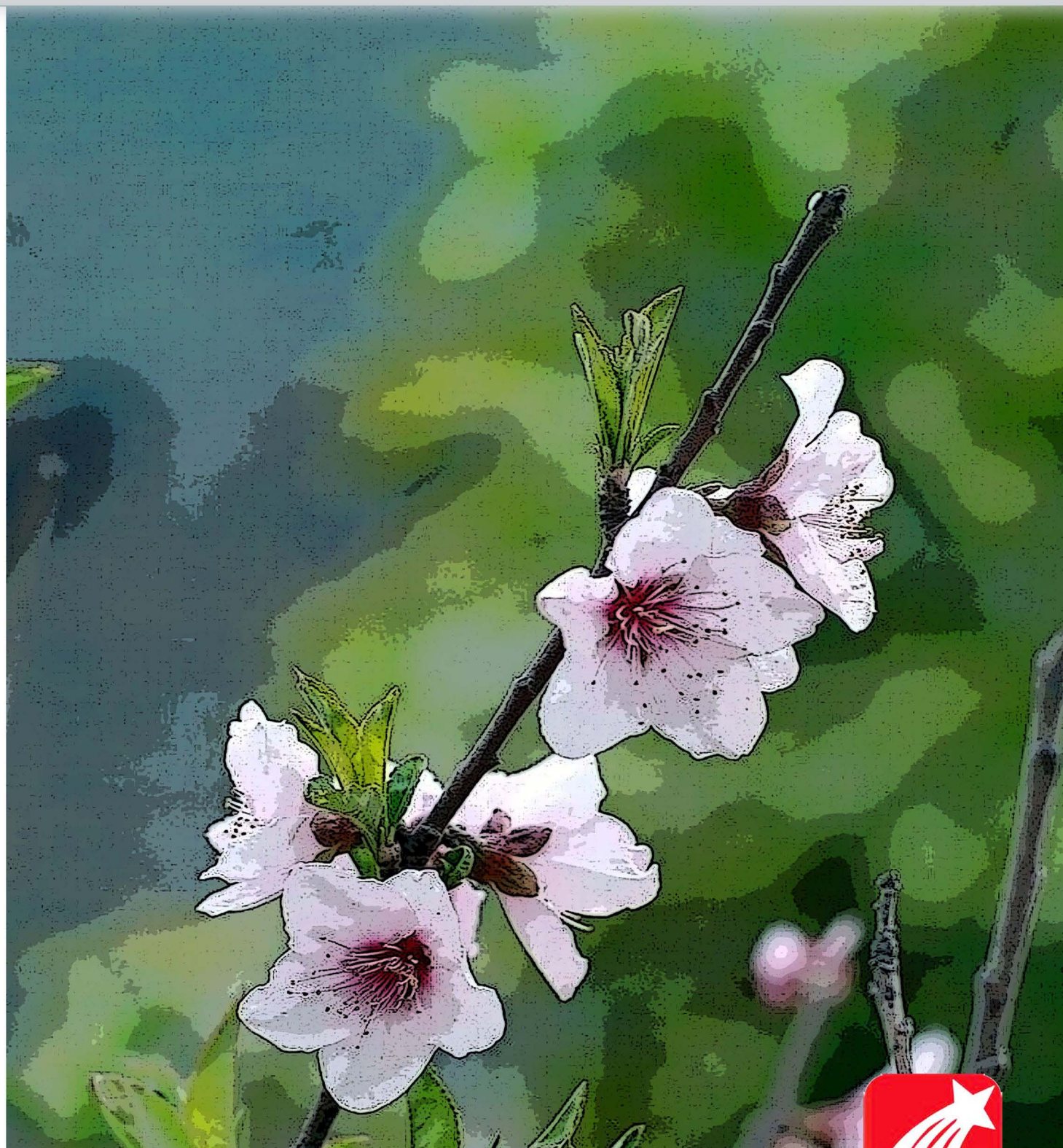


郑州大学学报

(工学版)

2016年05期



目 次

材料科学与工程

- 沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究…………… 栗培龙, 饶文字, 冯振刚, 李建阁(1)
- 干湿循环作用下盐分对桥墩混凝土耐久性影响实验研究 …………… 孙增智, 田俊壮, 杨 凯, 张 雷, 陈华鑫(6)
- 镧掺杂 AlPO_4 -5 沸石的合成及湿敏性能研究 …………… 王炉煜, 祝 烨, 高利苹, 徐甲强(12)
- 用于 UV 树脂改性的可溶性聚酰亚胺的制备工艺 …………… 石晓华, 颜少鸽, 张炜婕(17)
- 盆景状 ZnO 的制备及气敏性能研究 …………… 张永辉, 刘春彦, 刘焕桢, 巩飞龙, 李 峰(23)
- 冻融环境下混凝土结构耐久性研究综述…………… 郑元勋, 杨培冰, 康海贵(27)
- 考虑含筋率影响的弯矩增大系数计算方法…………… 林上顺, 陈宝春(33)
- 端部质量对有无损伤悬臂梁的模态影响分析…………… 闫安志, 陶天增, 张振华(39)
- 高速逆流色谱法分离红色西瓜瓤粗提物中番茄红素…………… 阮宝玉, 赵文恩(43)

计算机与控制

- 基于 Spark 的并行极速神经网络 …………… 邓万字, 李 力, 牛慧娟(47)
- OFDMA 系统多业务频谱切换策略的 CPN 建模及性能评价 …………… 陆彦辉, 李兆平, 韩书君, 杨守义(57)
- 混沌调制技术降低无线充电系统 EMI 水平研究 …………… 高金峰, 余 亚, 张旭辉, 司丞坤(62)
- 低碳型 35 kV GIS 的气室电场强度计算及结构优化 …………… 程 显, 王海燕, 闫广超, 焦连曜(67)

机械与其它

- 基于 MATLAB 的汽车线性最优控制主动悬架仿真研究 …………… 刘本学, 蔺超云, 郭沛东, 栗良玉(72)
- 纯电动汽车白车身耐撞性拓扑优化设计方法…………… 雷正保, 刘助春, 廖 卓(77)
- 特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构有限元分析 …………… 朱 强, 杜 鹏, 王建军, 秦东晨(82)
- 凹坑型非光滑单元体排列方式对汽车气动阻力影响分析…………… 谢金法, 张靖龙(86)
- 变焦相机自标定方法研究…………… 赵书俊, 段绍丽, 张晓芳, 李 磊, 刘晓旻(91)

CONTENTS

【Materials Science and Engineering】

- Influence of Test Conditions on Dynamic Response of Asphalt Mixture and Its Master Curve
..... **LI Peilong, RAO Wenyu, FENG Zhengang, LI Jiange** (1)
- Experimental Study of Effect of Salt on Durability of Bridge Pier Concrete Under Dry-wet Cycle
..... **SUN Zengzhi, TIAN Junzhuang, YANG Kai, ZHANG Lei, CHEN Huaxin** (6)
- Studies on the Synthesis of $AlPO_4-5$ Zeolite and Its Doping La and Their Application as Quartz Crystal Microbalance Humidity Sensor
..... **WANG Luyu, ZHU Ye, GAO Liping, XU Jiaqiang** (12)
- Preparation Technology of a Soluble Polyimide Used for UV Resin Modification
..... **SHI Xiaohua, YAN Shaoge, ZHANG Weijie** (17)
- Synthesis of Bonsai-like ZnO and Its Gas Sensing Properties
..... **ZHANG Yonghui, LIU Chunyan, LIU Huanzhen, GONG Feilong, LI Feng** (23)
- The Overview of Concrete Structure Durability under the Freeze-thaw Condition
..... **ZHENG Yuanxun, YANG Peibing, KANG Haigui** (27)
- Calculation Method of Moment Enlargement Coefficient Considering Effect of Reinforcement Ratio
..... **LIN Shangshun, CHEN Baochun** (33)
- The Mode Analysis of the Cantilever Beam with Concentrated Mass on Its Free End in the Case of Damage and No Damage ...
..... **YAN Anzhi, TAO Tianzeng, ZHANG Zhenhua** (39)
- Isolation of Iycopene from the Crude Extract of Red Watermelon Flesh by Iigh-speed Counter-current Chromatography
..... **RUAN Baoyu, ZHAO Wenen** (43)

【Computer and Control Engineering】

- Sparked-based Parallel Extreme Learning Machine **DENG Wanyu, LI Li, NIU Huijuan** (47)
- The CPN Modeling and Performance Evaluation about Spectrum Handoff Strategies in OFDMA Multi-service Communication System
..... **LU Yanhui, LI Zhaoping, HAN Shujun, YANG Shouyi** (57)
- Research on Suppressing Electromagnetic Interference Level of Wireless Charging System by Using Chaotic Modulation Technology
..... **GAO Jinfeng, YU Ya, ZHANG Xuhui, SI Chengkun** (62)
- The Electric Field Strength Calculation and Structure Optimization for Low-carbon 35kV GIS Chamber
..... **CHENG Xian, WANG Haiyan, YAN Guangchao, JIAO Lianyao** (67)

【Mechanical Engineering and Other】

- Research of Simulation in the Linear Optimal Control Active Suspension of Vehicle Based on Matlab
..... **LIU Benxue, LIN Chaoyun, GUO Peidong, LI Liangyu** (72)
- Crashworthiness Topology Optimization Method of Pure Electric Car BIW
..... **LEI Zhengbao, LIU Zhuchun, LIAO Zhuo** (77)
- Sealability Analysis of Premium Connection with Cylinder/Sphere Sealing Structure Based on FEM
..... **ZHU Qiang, DU Peng, WANG Jianjun, QIN Dongchen** (82)
- Influence Analysis of Pit-type Non-smooth Elements Arrangement on Aerodynamic Drag of Vehicle
..... **XIE Jinfa, Zhang Jinglong** (86)
- Research on Self Calibration Method of Zoom Camera
..... **ZHAO Shujun, DUAN Shaoli, ZHANG Xiaofang, LI Lei, LIU Xiaomin** (91)

文章编号: 1671-6833(2016)05-0001-05

沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究

栗培龙, 饶文字, 冯振刚, 李建阁

(长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 动态模量是沥青混合料黏弹性动态响应的重要表征参数之一. 选择3种级配的沥青混合料进行不同试验条件的沥青混合料性能试验, 分析了沥青混合料动态模量随加载频率及试验温度的变化规律, 得到了不同加载频率下动态模量随试验温度的衰减模型; 分析了加载频率对动态模量衰减率的影响, 并讨论了动态模量移位因子, 绘制了沥青混合料动态模量主曲线. 结果表明, 随着加载频率的升高, 沥青混合料的动态模量逐渐增大, 但温度越高, 增加幅度越小; 动态模量随着温度的升高呈指数关系衰减, 加载频率越高, 衰减速率越大, 其中改性沥青混合料 AC-13 的动态模量随温度衰减速率最小; 在较高的温度下(如 55 ℃), 不同加载频率的动态模量差异很小. 动态模量主曲线和移位因子可以较好的描述加载频率和试验温度对沥青混合料黏弹性响应的影响.

关键词: 沥青混合料; 沥青混合料性能试验; 黏弹性动态响应; 动态模量; 主曲线

中图分类号: U414.75

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.001

0 引言

沥青混合料是一种典型的黏弹性材料, 其力学响应与沥青路面的车辙、开裂、疲劳等病害密切相关, 因此沥青混合料的力学响应越来越受到国内外道路领域研究者的关注^[1-2]. Little^[3]、Schwartz^[4]进行了沥青混合料的黏弹性响应分析; 栗培龙^[5]分析了试验温度、应力水平等因素对沥青混合料黏弹性响应的影响; 锁利军^[6]进行了基于第二主应力的沥青混合料力学性能试验研究, 但以上参数不能很好地反应沥青混合料的动态响应. NCHRP-29^[7]项目开发了能够反映黏弹性响应的沥青混合料性能试验(asphalt mixture performance test, AMPT) 设备, 并提出了相应的评价参数, 其中动态模量是沥青路面设计中最重要参数之一, 也是沥青路面结构设计体系由静态向动态转变的关键. 万成^[8]进行了沥青混合料动态模量数值预测方法研究; 李强^[9]分析了受力模式对沥青混合料动态模量的影响; 赵薇^[10]进行了动态模量试验分析及 Witczak 预估模型的验证, 但沥青混合料

动态响应的影响因素及变化规律仍需进一步研究. 笔者采用 AMPT 设备测试沥青混合料在不同试验条件下的动态模量, 讨论试验温度和加载频率对沥青混合料黏弹性动态响应的影响, 并根据时间-温度等效原理, 得到了沥青混合料动态模量主曲线, 用以描述沥青混合料的动态响应.

1 试验材料

为了分析试验温度和加载频率对不同沥青混合料动态模量影响规律, 选择常用的3种沥青、3种级配分别拌制组成差异显著的沥青混合料, 即采用 SK-SBS 改性沥青(SK-SBS) 拌制 AC-13 混合料, 茂名 70#(MM) 沥青拌制 AC-16 混合料, 中海 90#(ZH) 沥青拌制 AC-20 混合料, 进行 AMPT 试验. 沥青性能指标和集料级配如表1和表2所示. 粗细集料选用角闪岩, 石灰岩矿粉用作填料, 采用马歇尔设计方法确定最佳沥青用量, 3种沥青混合料的最佳油石比分别为 5.2%、4.9% 和 4.3%, 设计孔隙率 4.0%.

收稿日期: 2016-04-22; 修订日期: 2016-08-02

基金项目: 交通运输部基础研究计划项目(2014319812151); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JQ7242); 国家自然科学基金资助项目(51008031)

作者简介: 栗培龙(1980—), 男, 江苏邳州人, 长安大学副教授, 工学博士, 从事路面材料与结构研究.

表 1 沥青基本指标

Tab. 1 Properties of asphalt binders

试验项目		SK-SBS	MM	ZH
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)		1.031	0.986	1.005
针入度(25℃,5s,100g)/(1/10mm)		69	74	86
软化点(R&B)/℃		75.0	49	45.5
延度(5cm·min ⁻¹)/cm		42(@5℃)	154(@15℃)	>150(@15℃)
闪点/℃		298	283	272
针入度指数		-0.032	-0.495	-0.991
薄膜加热试验 (163℃,5h)	质量损失/%	0.08	-0.35	0.04
	针入度比/%	65.0	68	76.3
	残留延度(5cm·min ⁻¹)/cm	23(@5℃)	44.3(@15℃)	>150(@15℃)

表 2 矿料级配

Tab. 2 Aggregate gradation

级配/mm	通过下列筛孔的通过率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	—	—	100	95.6	72.7	40.4	30	19.4	14.5	10.3	8.1	5.1
AC-16	—	100	96.5	89	75	48	30	22	16	11	8	5
AC-20	100	99.2	90.2	76	62.2	37	26.7	18.3	12.6	8.1	5.9	5

2 试验方法

为了减小试模边界效应的影响并加速试验进程,首先采用 Troxler 4140 型旋转压实仪成型 $\phi 150\text{ mm} \times H 150\text{ mm}$ 的大型试件,再钻芯并切割得到尺寸为 $\phi 100\text{ mm} \times H 110\text{ mm}$ 的试件. 采用 AMPT 试验设备,进行正弦波加载,应力水平为 50~150 微应变下对应的应力;试验温度分别为 5、15、25、45、55℃;荷载频率分别为 0.01、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、25 Hz.

3 结果分析与讨论

3.1 试验条件对沥青混合料动态模量的影响

沥青混合料是典型的黏弹性材料,其黏弹性响应依赖于试验温度和加载频率. 一般而言,温度

越低,沥青混合料越接近弹性材料;温度越高,越接近黏性材料^[11]. 不同温度和加载频率下,3 种沥青混合料的动态模量(E^*)随加载频率及温度变化如图 1、图 2 所示.

由图 1 可知,3 种沥青混合料在不同温度下动态模量随加载频率的增加而不断增大,但在不同频率范围内增大的幅度不同,在低频范围内动态模量急剧增大,即变化敏感度较大;而在 5~25 Hz 的高频范围内,动态模量增加缓慢. 温度越高,沥青混合料的动态模量随加载频率的增加幅度越小,3 种沥青混合料的 45℃ 和 55℃ 动态模量随频率的变化不显著. 可见,不管是基质沥青混合料还是改性沥青混合料,随着温度升高,沥青混合料的黏性表现充分,加载频率对动态模量影响越来越小.

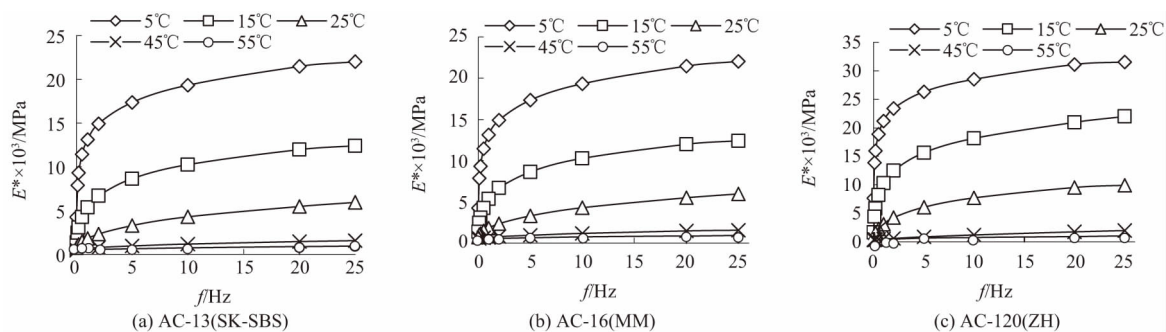


图 1 沥青混合料的动态模量随加载频率变化

Fig. 1 Changes of dynamic modulus with loading frequency

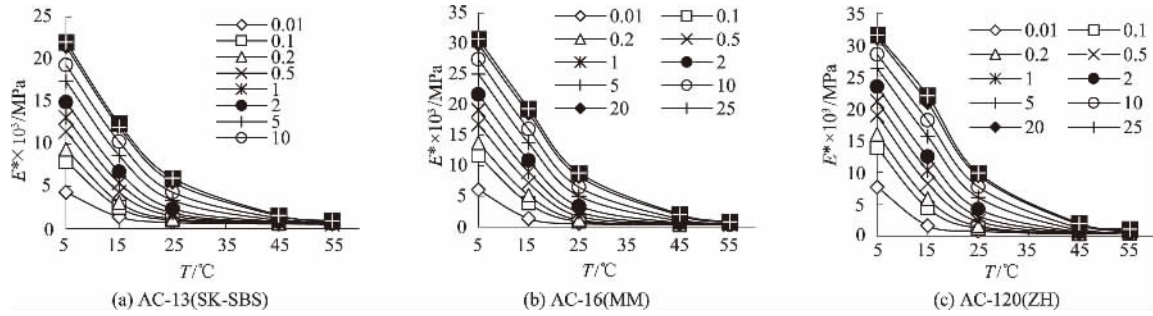


图 2 沥青混合料的动态模量随温度变化

Fig. 2 Changes of dynamic modulus with temperature

由图 2 可知,3 种沥青混合料的动态模量变化趋势相同,随着温度升高逐渐衰减.但在相同试验条件下,不同混合料的动态模量存在较大差异,随着温度升高,不同加载频率的动态模量差异越来越小,当达到 55 °C 时动态模量趋于相同.不同加载频率下的动态模量随温度都呈指数模型衰

减,将试验测定的动态模量按照式(1)进行回归,相关系数 R^2 均达到 0.99 以上,回归模型列于表 3 中.

$$E^* = ae^{-T/k} + b. \quad (1)$$

式中: E^* 为动态模量,MPa; T 为试验温度,°C; a 、 k 、 b 均为回归参数.

表 3 动态模量与温度的关系回归模型

Tab. 3 Regression model of dynamic moduli with temperature

频率/Hz	E^*		
	AC-13(SK-SBS)	AC-16(MM)	AC-20(ZH)
0.01	$7\,775.0e^{-T/6.9} + 500.9$	$13\,462.1e^{-T/5.9} + 329.3$	$17\,353.7e^{-T/5.7} + 420.0$
0.1	$14\,369.3e^{-T/7.5} + 503.9$	$20\,982.7e^{-T/8.4} + 194.1$	$25\,132.1e^{-T/8.1} + 279.9$
0.2	$16\,444.0e^{-T/8.1} + 486.3$	$23\,393.0e^{-T/9.4} + 100.4$	$27\,156.2e^{-T/9.3} + 169.1$
0.5	$19\,050.8e^{-T/9.1} + 440.6$	$26\,927.6e^{-T/10.8} - 67.1$	$30\,030.8e^{-T/11.0} - 55.7$
1	$20\,972.9e^{-T/10.1} + 373.6$	$29\,708.6e^{-T/11.9} - 235.6$	$32\,270.8e^{-T/12.6} - 327.0$
2	$22\,883.3e^{-T/11.3} + 286.6$	$32\,666.9e^{-T/13.2} - 449.9$	$34\,540.3e^{-T/14.4} - 730.3$
5	$25\,450.9e^{-T/13.0} + 131.8$	$36\,363.5e^{-T/15.2} - 883.7$	$37\,698.4e^{-T/17.3} - 1\,561.4$
10	$27\,529.7e^{-T/14.5} - 55.8$	$39\,007.9e^{-T/17.1} - 1\,385.1$	$40\,496.4e^{-T/20.0} - 2\,537.9$
20	$29\,886.3e^{-T/16.1} - 282.4$	$41\,953.2e^{-T/19.5} - 2\,174.9$	$44\,137.5e^{-T/22.8} - 3\,791.5$
25	$30\,396.7e^{-T/16.7} - 380.6$	$42\,890.9e^{-T/20.3} - 2\,429.9$	$45\,070.3e^{-T/24.2} - 4\,420.1$

将模型参数 k 定义为动态模量衰减指数,反应了动态模量随温度的衰减率, k 值越大,混合料动态模量随温度的衰减速率越快.由 3 种沥青混合料的动态模量衰减指数与加载频率的关系如图 3 所示.由图 3 可知,加载频率越高,动态模量随温度衰减速率越大,但其增加率越来越缓慢;对于同一加载频率而言,3 种沥青混合料的动态模量随温度衰减速率存在显著差异,其中 AC-20(ZH) 混合料的衰减速率最大,AC-13(SK-SBS) 混合料的衰减速率最小.

3.2 沥青混合料动态模量主曲线分析

沥青混合料等黏弹性材料的力学响应依赖于材料试验时的温度和加载频率,试验温度和加载

频率在某种程度上具有一定的等效性.由于试验设备规格的限制,很难在非常宽的温度和频率范

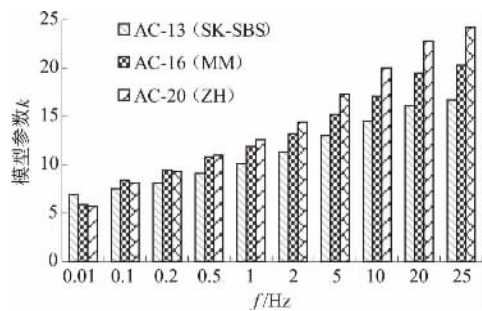


图 3 动态模量衰减指数与加载频率的关系

Fig. 3 Relationship between the attenuation index of dynamic modulus and loading frequency

围内测试沥青混合料的动态特性,可以将这些试验结果在某一参照温度下进行转换,用这种方法绘制的曲线被称之为主曲线,用于预估某一给定混合料在任意温度下的动态模量. 处理方法是 AMPT 试验结果以不同温度动态模量与加载频率的关系绘制在双对数坐标系中,典型曲线如图 4 所示.

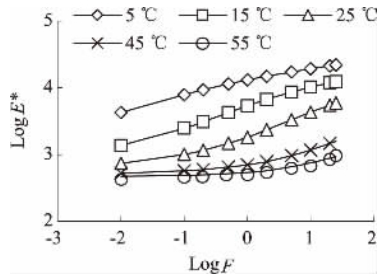


图 4 混合料动态模量的对数曲线

Fig. 4 Typical curves of dynamic modulus in log-log space

如图 4,每一温度下的动态模量曲线(或部分)是平行的并且可以水平移动. 曲线可以转换为某一特定温度下的动态模量值,即改变曲线的位置可以实现向标准温度的转换,如图 5. 每一个曲线和标准温度之间的差异称为移位因子 α , α 可以表示如下,

$$\alpha = \log(E_T^*/E_0^*). \quad (2)$$

式中: α 为移位因子; E_T^* 为在温度 T 时的动态模量; E_0^* 为参照温度 T_0 时的动态模量.

可见,移位因子反映了材料特性对温度的依赖性. α 在高于参照温度时大于 0; 在低于参照温度时小于 0; 在等于参照温度时等于 0. 动态模量主曲线可以通过将数据沿着对数频率坐标轴水平移动而得到. 作为加载频率和温度函数的动态模量,可以简化为换算频率的函数. 3 种沥青混合料的动态模量在不同温度下的移位因子列于表 4 中.

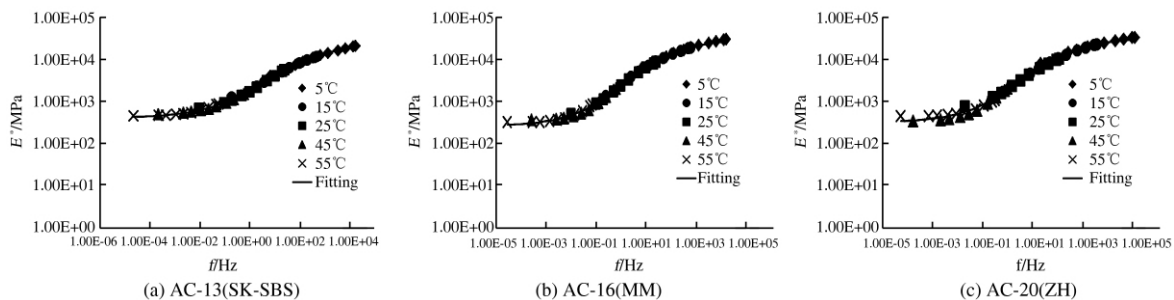


图 6 动态模量主曲线

Fig. 6 Dynamic modulus master curves

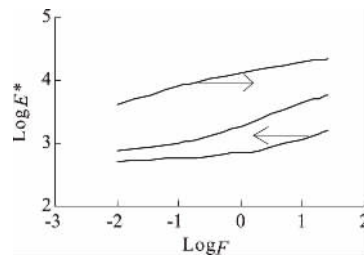


图 5 根据参考温度的转换方法

Fig. 5 Conversion according to a reference temperature

表 4 动态模量移位因子

Tab. 4 Shift factors of dynamic modulus

沥青混合料	试验温度/°C				
	5	15	25	45	55
AC-13 (SK-SBS)	2.9	1.3	0	-1.55	-3.0
AC-16(MM)	3.0	1.4	0	-2.0	-2.4
AC-20(ZH)	3.0	1.3	0	-2.0	-3.0

以 25 °C 作为参考温度,可以得到 3 种沥青混合料的动态模量主曲线,如图 6 所示.

由图 6 可知,除 AC-20(ZH) 的动态模量在高温范围内有些分散外,3 种混合料的主曲线拟合度均较好,3 种混合料的动态模量主曲线基本都呈扁平状“S”型曲线. 主曲线反映了材料模量对加载频率的相关性,沥青混合料的动态模量主曲线随加载频率增加而增大,依据动态模量主曲线可以确定材料在很高或很低加载频率下的力学特性. 此外,随着温度的升高,动态模量值都呈现逐渐减小的趋势,即在低温状态下,混合料主要表现为弹性,而在高温条件下混合料的黏性更为显著. 由此可见,动态模量主曲线描述了加载频率对材料性质的影响,而移位因子描述了温度对材料性质的影响,二者结合起来就能反应沥青混合料对温度和频率的敏感性,从而全面地描述沥青混合料的黏弹性力学响应.

图7为3种沥青混合料动态模量主曲线. 由图7可以看出,在低温(低于参考温度25℃)高频范围内,3种沥青混合料中AC-20(ZH)的动态模量值最大,AC-13(SK-SBS)的动态模量最小;而在高温(高于参考温度25℃)低频范围内,AC-13(SK-SBS)的动态模量值最大,AC-16(MM)的动态模量值最小. 由此可见,在低温高频状态下,矿料级配对沥青混合料动态模量的贡献较大,粗级配混合料的弹性显著,强度较高;在高温低频状态下,沥青逐渐软化,混合料的黏性表现显著,结合料对混合料动态模量的贡献更为显著,因此使用改性沥青的AC-13(SK-SBS)混合料动态模量最大.

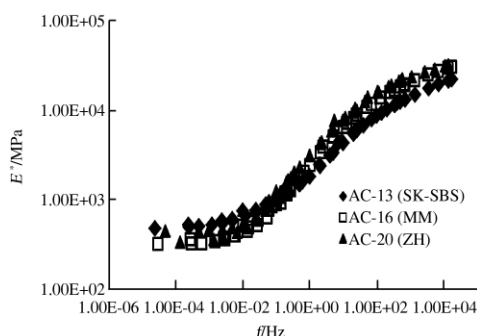


图7 3种沥青混合料动态模量主曲线对比

Fig.7 Dynamic modulus master curves of the three asphalt mixtures in comparison

4 结论

(1) 随着加载频率升高,动态模量逐渐增大,温度越高,增加幅度越小. 在低频范围内动态模量急剧增大,即变化敏感度较大;在5~25 Hz的高频范围内,动态模量增加率越来越缓慢.

(2) 沥青混合料的动态模量随着温度的升高呈指数关系衰减,达到较高的温度时(如55℃),不同加载频率的动态模量差异很小. 加载频率越高,动态模量随着温度的衰减速率越大,但其增加率越来越缓慢;使用改性沥青AC-13混合料的动态模量随温度衰减速率最小.

(3) 在低温高频状态下,矿料级配对沥青混合料动态模量的贡献较大,粗级配混合料的弹性显著;在高温低频状态下,沥青逐渐软化,混合料的黏性表现显著,结合料对混合料动态模量的贡献更为显著.

参考文献:

- [1] SAADEH S, MASAD E, LITTLE D. Characterization of asphalt mix response under repeated loading using anisotropic nonlinear visco-elastic-viscoplastic model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19 (10): 912-924.
- [2] TASHMAN L, MASAD E, ZBIB H, et al. Microstructural viscoplastic continuum model for permanent deformation in asphalt pavements [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(1): 48-57.
- [3] LITTLE D N, BUTTON J W, YOUSSEF H. Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential [J]. Transportation Research Record, 1993, 1471: 49-57.
- [4] SCHWARTZ C W, GIBSON N H, SCHAPERLY R A, et al. Viscoplasticity modeling of asphalt concrete behavior [C] // The 15th ASCE engineering mechanics conference. New York, ASCE, 2002: 144-159.
- [5] 栗培龙, 张争奇, 王秉纲. 沥青混合料黏弹性响应影响因素分析 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31 (3): 96-100.
- [6] 锁利军, 王秉纲, 郑传超. 基于第二主应力的沥青混合料强度试验研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 79-82.
- [7] WITCZAK M W, KALOUSH K, PELLINEN T. Simple performance test for Superpave mix design [R]. NCHRP Report 465, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D. C., 2002.
- [8] 万成, 张肖宁, 贺玲凤, 等. 沥青混合料动态模量数值预测方法 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 16-21.
- [9] 李强, 李国芬, 王宏畅. 受力模式对沥青混合料动态模量的影响 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 816-822.
- [10] 赵薇, 周刚, 肖丽. 沥青混凝土动态模量试验及 Witczak 预估模型验证 [J]. 公路, 2012 (7): 39-45.
- [11] LI P L, YANG B, ZHANG Z Q, et al. Analysis of Factors Influencing Visco-elastic response of asphalt mixture [C] // Proceedings of international workshop on energy and environment in the development of sustainable asphalt pavements. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2010: 147-151.

(下转第11页)

文章编号: 1671-6833(2016)05-0006-06

干湿循环作用下盐分对桥墩混凝土耐久性影响实验研究

孙增智, 田俊壮, 杨 凯, 张 雷, 陈华鑫

(长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 以青海德香高速公路大桥桥墩混凝土为依托, 对其沿线主要易溶盐含量进行分析, 通过室内模拟实验, 配制了7种腐蚀溶液, 并设计4种配合比混凝土, 通过外观形貌、质量损失率和相对动弹模量3方面研究干湿循环作用下, 盐分对混凝土耐久性的影响. 结果表明: 干湿循环作用下, 单一盐类如 Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 NaCl 溶液对混凝土破坏形式和程度均不相同; 在复合盐溶液中, 复盐对混凝土的腐蚀损伤效应会发生叠加, 而且溶液浓度越大, 混凝土腐蚀破坏越严重; 掺加水泥基自愈合材料、粉煤灰能够提高混凝土抗盐蚀破坏能力.

关键词: 道路工程; 混凝土; 干湿循环; 盐蚀; 耐久性

中图分类号: TU528.33

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.002

0 引言

在实际工程中, 混凝土结构物所处环境复杂多变, 温湿变化剧烈, 同时遭受周围腐蚀物质侵蚀, 如桥梁下部结构的浪溅区和水流冲刷区等. 经常处于盐蚀与干湿循环双重作用下的混凝土要比处于稳定潮湿环境中的混凝土破坏严重得多^[1-5]. 因此, 对混凝土结构物在盐蚀与干湿循环耦合作用下的抗损伤能力研究很有必要.

国内外学者对水泥混凝土在干湿循环作用下抗盐腐蚀性进行了大量研究, 取得了一些研究成果. 宿晓萍等^[4]对混凝土进行了干湿循环与复合盐蚀耦合下混凝土耐久性进行研究, 得出加入引气剂和粉煤灰, 能提高混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏能力. KIM^[6]、延永东^[7]和唐先习等^[8]对混凝土内部结构中氯离子扩散、运输机理及氯离子对混凝土的损伤进行了研究, 得出了在干湿循环作用下氯离子在混凝土内部的扩散和在开裂混凝土中的运输模型. 金祖权等^[9]研究了干湿循环作用下不同类型的混凝土在单盐、复合盐中的损伤规律, 提出了不同腐蚀因素下混凝土损伤方程, 并对严酷盐湖环境下混凝土的选择提出了建议. 李立辉等^[10]研究了多因素耦合作用下混凝土的损伤过程, 得出混凝土损伤与硫酸盐和氯盐的相对浓度有关. 但是, 国内对混凝土在干湿循环作用下损伤破

坏研究大都是单一因素研究, 盐类型、复合盐溶液浓度等因素对混凝土的破坏形式、破坏过程及破坏机理进行系统研究较少. 同时, 对掺加水泥基自愈合材料的混凝土耐久性研究也较少.

笔者模拟青海德香公路大桥所处地区的土质和气候环境, 采用 Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 NaCl 和上述3种盐的复合盐溶液, 分别从外观形貌、质量损失和相对动弹模量3方面研究干湿循环作用下, 盐类型和复合盐溶液浓度对基准混凝土、粉煤灰混凝土、掺加水泥基自愈合材料水泥混凝土的耐久性影响.

1 试验方案

1.1 原材料

水泥: 采用抗硫酸盐水泥. 粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰, 表观密度 $2\,150\text{ kg/m}^3$, 0.08 mm 方孔筛筛余量为 2.14% , 主要化学成分见表1. 水泥基自愈合材料采用化学转化型材料(CCSM)^[11]. 细集料选用中砂, 粗集料为 $5\sim 20\text{ mm}$ 连续级配碎石, 技术指标均满足规范要求. 聚羧酸高效减水剂购自江苏苏博特新材料股份有限公司, Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 NaCl 均购自天津市天力化学试剂有限公司.

1.2 盐侵蚀溶液配制

由青海省交通科学研究院试验室对德香高速公路沿线大桥基坑 0.5 m 深度的土质进行化学检

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51202016)

通讯作者: 孙增智(1967-), 男, 陕西商洛人, 长安大学高级工程师, 工学博士, 主要从事道路材料研究, E-mail: zzsun@chd.edu.cn.

测分析,得知土质中含有 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- ,根据检测报告中盐渍土种类以及各离子浓度配制了盐浓度为 5.60% (盐质量计) 的复合盐溶液(B组),以此为基准盐溶液,根据沿线易溶盐含量多变的情况,配制了盐浓度分别为10.60% (C组) 和 15.09% (D组) 的复合盐溶液.为了对比复盐中每种单盐对混凝土的影响和破坏形式并与复盐溶液作对比,又分别配制了 NaCl 、 MgSO_4 和 Na_2SO_4 3种单盐溶液,浓度分别为 4.08% (E组)、4.58% (F组) 和 4.58% (G组).此外,设置了水溶液(A组) 用作对比试验.具体配比如表 2.

表 1 粉煤灰的化学成分

Tab.1 Chemical compositionn of fly ash						
种类	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	f-CaO
比例/%	51.8	3.64	1.08	4.51	28.78	6.09

表 3 混凝土配合比及力学性能

Tab.3 Mix proportion and properties of concretes									
编号	混凝土类型	水泥/ (kg · m ⁻³)	水/ (kg · m ⁻³)	砂/ (kg · m ⁻³)	石/ (kg · m ⁻³)	减水剂/ (kg · m ⁻³)	粉煤灰/ (kg · m ⁻³)	自愈合材料/ (kg · m ⁻³)	28 d 抗压 强度/MPa
K	基准	436	170	767	1 103	4.36	0	0	49.15
F1	掺加 10% FA	392.4	170	767	1 103	4.36	43.6	0	47.85
F2	掺加 20% FA	348.8	170	767	1 103	4.36	87.2	0	45.68
Z	掺加 1.5% 自愈	436	170	767	1 103	0	0	6.54	50.02

1.4 混凝土盐蚀-干湿循环方法的确定

考虑到德香公路沿线地面的最高温度,将干湿循环最高温度定为 60℃,为消除骤冷骤热导致的温度应力,先在室温下冷却 1 h,再放入溶液中,考虑到试验周期以 24 h 为 1 个循环,最终确定的干湿循环方法为 60℃烘箱烘 12 h,室温冷却 1 h,再放入溶液中 11 h,共 24 h 为 1 个循环^[12].采取全浸泡方式模拟现场埋设混凝土的腐蚀状况.

2 分析与讨论

2.1 盐蚀-干湿循环作用下混凝土外观损伤分析

图 1 为基准混凝土在 B 组、C 组和 D 组溶液中后期的外观,图 2 为 K 组、F1 组、F2 组和 Z 组混凝土在 C 组溶液中的后期外观.从图 1 可知,随着溶液浓度增加,混凝土试件腐蚀破坏越严重.当腐蚀循环次数增加,混凝土表面先产生许多微小裂缝,随后裂缝慢慢扩展连接,并且混凝土试件棱边及角最先开始破坏剥落.从图 2 可以看出,掺加粉煤灰与自愈合材料的混凝土较基准混凝土表现出了良好的耐久性能,并且粉煤灰掺量越多,混凝土损伤越小.

粉煤灰具有“活性效应、形态效应和微骨料效

表 2 盐溶液中盐用量及溶液浓度
Tab.2 The amounts and concentrations
of salt in the solutions

侵蚀溶液	盐类型及用量/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)			溶液浓度/%
	MgSO_4	NaCl	Na_2SO_4	
A 组溶液	0	0	0	0
B 组溶液	24	21.06	14.2	5.60
C 组溶液	48	42.12	28.4	10.60
D 组溶液	72	63.18	42.6	15.09
E 组溶液	0	42.12	0	4.04
F 组溶液	48	0	0	4.58
G 组溶液	0	0	48	4.58

1.3 混凝土配合比

水泥混凝土配合比设计如表 3 所示,试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的长方体试件.

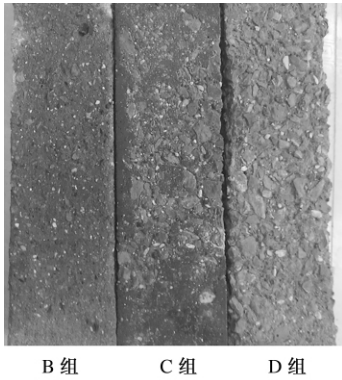


图 1 K 组混凝土在不同浓度复合盐溶液中后期外观状况
Fig.1 Late appearance of Group K concrete in
salt-mixing solution with different concentrations

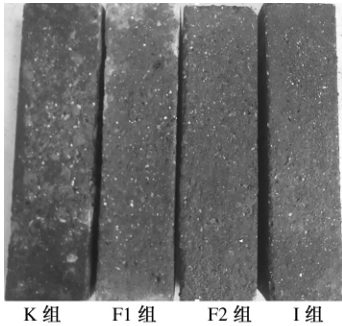


图 2 不同混凝土在 C 组溶液中的后期外观
Fig.2 Late appearance of different concrete
in Group C solution

应”,混凝土矿物掺和料时能极大地改善混凝土的性能,同时粉煤灰可以使骨料与胶浆之间的过渡区得到改善,使混凝土的孔结构得以优化,进而能够提高混凝土抗腐蚀离子渗透能力.水泥基自愈合材料中的活性物质通过扩散进入混凝土中,与尚未水化的水泥反应生成晶体,能够堵塞混凝土中的微小裂缝和毛细孔通道,使得混凝土的抗渗性提高,防止盐渍土中的腐蚀离子向混凝土内部渗透,提高混凝土的耐久性^[13].由此可见,混凝土的破坏程度与盐溶液浓度和混凝土配合比有关.

2.2 盐蚀-干湿循环作用下混凝土质量损失规律

2.2.1 外掺料的影响

图3为混凝土质量损失率.如图3所示,在A组溶液中,混凝土试件的质量前期略有增加,在30~40个循环后逐渐减小.同一溶液中不同配比混凝土质量损失率曲线斜率各不相同,掺加自愈合材料的混凝土质量变化最为平缓,其次为粉煤灰混凝土,且粉煤灰掺量越大,质量损失率曲线的斜率越小,而基准混凝土的质量损失变化曲线斜率最大,可见掺加粉煤灰和水泥基自愈合材料都可以提高混凝土的抗盐蚀-干湿循环的能力.

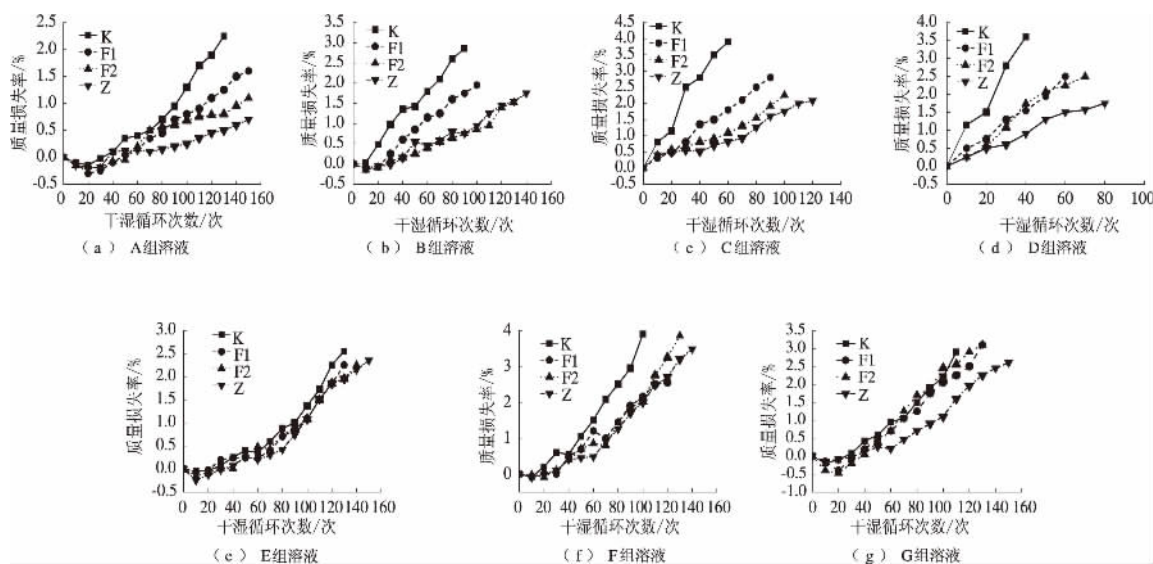


图3 盐蚀-干湿循环后混凝土质量损失率变化规律

Fig.3 Weight losses of concrete after salt corrosion-dry-wet cycle

2.2.2 复合盐溶液浓度的影响

图4为混凝土不同浓度复合盐中的质量损失率.如图4所示,在A组溶液中,随着干湿循环次数增加,混凝土质量损失率缓慢增加;在B组溶液中,混凝土质量损失率前期出现负增长,随着干湿循环次数增加,质量损失率逐渐增大;在C组和D组溶液中,混凝土质量增加段基本没有,在10次循环后,质量损失率快速增加.在不同浓度的3种复合盐溶液中,溶液浓度越大,质量损失率越大,说明在干湿循环作用下,随着复盐溶液浓度的提高,混凝土破坏越严重.

2.2.3 盐类型的影响

图5为基准混凝土的质量损失.如图5所示,基准混凝土在单盐溶液中的质量损失率曲线呈现先增加后下降的趋势.对3组单盐溶液中混凝土的质量损失率曲线增长速度和最大质量损失率进行

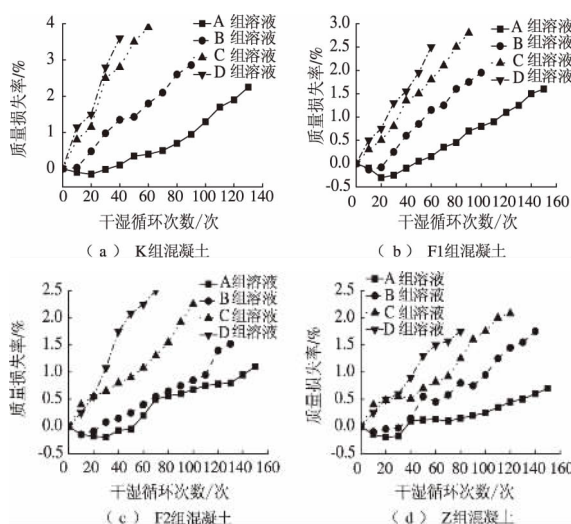


图4 混凝土在不同浓度复合盐溶液质量损失率变化规律

Fig.4 Weight losses of concretes in salt-mixing solution with different concentrations

对比分析,可知单盐溶液对基准混凝土质量损失的影响程度由小到大依次为:水 < NaCl < NaSO₄ < MgSO₄. 这是由于不同盐类结晶膨胀率和结晶温度不同,硫酸盐结晶体膨胀率明显高于氯化钠,同时硫酸盐能够与水化产物反应生成石膏和钙矾石,进一步促进混凝土膨胀. 由于 MgSO₄ 中 Mg²⁺ 的置换反应,生成无胶结物,使得 MgSO₄ 的质量损失大于 Na₂SO₄ [14-16].

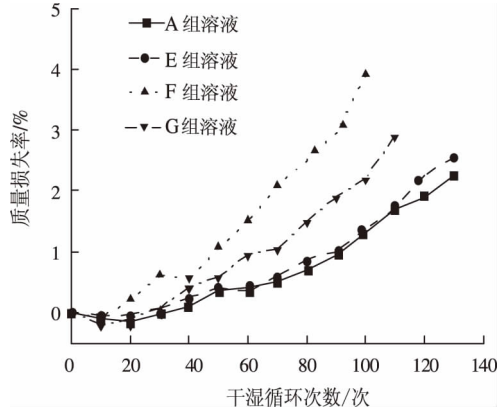


图5 基准混凝土在水中及单盐溶液干湿循环后质量损失变化

Fig.5 Weight losses of reference concrete in water and different single salt solution after dry-wet cycle

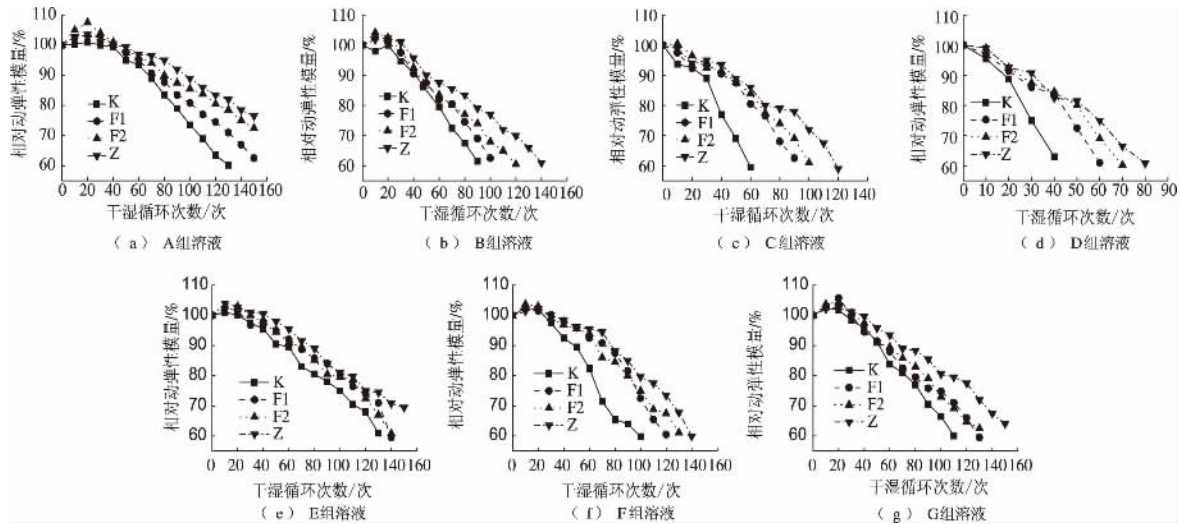


图6 盐蚀-干湿循环后混凝土相对动弹性模量变化规律

Fig.6 Relative dynamic elasticity modulus of concretes after salt corrosion-dry-wet cycle

合材料,并且复合盐溶液浓度越高,粉煤灰和水泥基自愈合材料对混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏的提升越大.

2.3.2 复合盐溶液浓度的影响

图7为相对动弹性模量与盐溶液浓度的关系. 如图7所示,在A、B、C和D组不同浓度复合盐溶液中,盐溶液浓度对混凝土相对动弹性模量影响很大. 在溶液A和B中,混凝土在腐蚀前期动弹性模量呈增长趋势. 在C和D组溶液中,混凝土没有增长而是直接下降. K组混凝土在B、C

2.3 盐蚀-干湿循环作用下混凝土动弹性模量变化规律

2.3.1 外掺料的影响

图6为混凝土相对动弹性模量. 如图6所示,在相同溶液中,不同配比混凝土的最大干湿循环次数存在显著差异,在A溶液中,基准混凝土的最大循环次数为130次,而F1、F2和Z组在150次循环后相对动弹性模量分别为61.7%、71%和75%,即最终混凝土都未破坏. 从图6中还可以看出,在20次循环后,K、F1、F2和Z的相对动弹性模量都大于100%,分别为101.4%、103.7%、107.7%和104.5%,这说明在水中干湿循环前期促进了混凝土进一步水化,粉煤灰的二次水化对F1和F2组混凝土动弹性模量有很大提升[17],水泥基自愈合材料也促进了混凝土的进一步密实. 在B、C、D3种盐溶液中,F1、F2和Z组混凝土的最大干湿循环次数都明显高于K组的最大干湿循环次数,并且Z组混凝土的干湿循环次数明显高于F1和F2组混凝土,具体表现为:Z组 > F2组 > F1组 > K组. 由此可知,相比基准混凝土而言,掺加粉煤灰对提升混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏有很大提升,但提升幅度不如掺加水泥基自愈

和D溶液中最大循环次数分别比在A组溶液中减少30.8%、53.8%和69.2%. F1组混凝土在C和D溶液中的最大循环次数分别比在B组溶液中减少了10%和40%,F2组混凝土在C和D溶液中的最大循环次数分别比在B组溶液减少了16.7%和41.7%,Z组混凝土在C和D溶液中的最大循环次数分别比在B组溶液减少了14.3%和42.9%. 由此可知,盐溶液浓度越大,相对动弹性模量曲线下降越陡,试件所能承受的干湿循环作用次数就越少,试件破坏越严重.

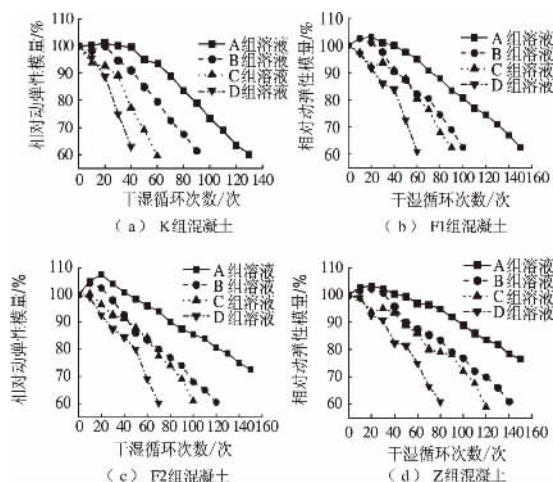


图7 混凝土相对动弹弹性模量与盐溶液浓度关系

Fig. 7 Relationship chart of relative dynamic elasticity modulus of concretes and salt solution concentrations

2.3.3 盐类型的影响

图8为基准混凝土动弹模量变化。如图8所示, K组混凝土在A组、E组、F组和G组溶液中的相对动弹模量曲线呈先增加后下降的趋势, 基本都在前20次相对动弹模量处于上升阶段, 30次以后相对动弹模量逐渐下降。3种单盐对混凝土相对动弹模量的影响大小分别为 $\text{MgSO}_4 > \text{NaSO}_4 > \text{NaCl} > \text{水}$ 。结合外观变化可以看出, NaCl 溶液中混凝土剥落比水中严重, MgSO_4 溶液中的混凝土后期表面层软化, 无粘结性脱落, 并有微小的连贯性裂缝。 NaSO_4 溶液中混凝土质量前期增大, 外观无明显变化, 中期表面逐渐出现微裂缝, 伴随边角脱落, 后期严重时微裂缝相互连通、扩展和增多, 个别试件甚至出现断裂现象, 剥落现象, 但是没有在 MgSO_4 溶液中严重。

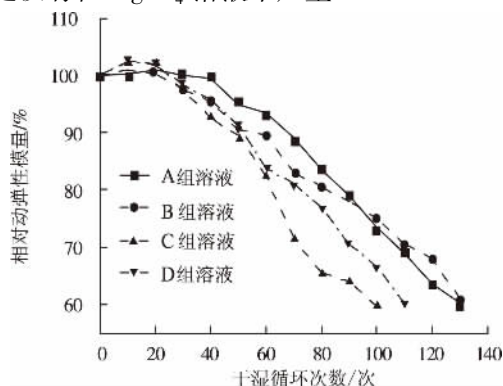


图8 基准混凝土在水中及单盐溶液中相对动弹模量变化

Fig. 8 Relative dynamic elasticity modulus of reference concrete in water and three single salt solutions

3 结论

(1) 经盐蚀-干湿循环作用后, 混凝土质量先增加后减小, 溶液浓度越高, 后期质量损失越快, 结构破坏越严重。

(2) 经盐蚀-干湿循环作用后, 混凝土相对动弹弹性模量呈先增长后减小, 在高浓度复合盐溶液中, 混凝土损伤较严重。

(3) 在干湿循环条件下, 盐沼泽地区复盐对混凝土有很强的腐蚀作用, 不同盐类的腐蚀作用相互叠加, 造成更剧烈的盐类腐蚀; 化学腐蚀和盐类结晶叠加共同损伤混凝土, 而析晶膨胀产生的结晶压力对混凝土损伤更大。

(4) 在干湿循环条件下, 单盐对混凝土的腐蚀程度: $\text{NaCl} < \text{NaSO}_4 < \text{MgSO}_4$ 。

(5) 水泥基自愈合材料和粉煤灰能够提高混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏能力, 在实际施工中应考虑掺加一定量的水泥基自愈合材料和适量粉煤灰。

参考文献:

- [1] KOSMATK A S H, PANARESE W, KERKHOFF B, et al. 混凝土设计与控制 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005.
- [2] JANG S Y, KIM B S, OH B H. Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(1): 9-19.
- [3] 范宏. 混凝土结构中的氯离子侵入与寿命预测 [D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2009.
- [4] 宿晓萍, 王清. 复合盐与干湿循环双重因素作用下混凝土耐久性试验 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 43(3): 851-857.
- [5] SAVIJA B, PACHECO J, SCHLANGEN E. Lattice modeling of chloride diffusion in sound and cracked concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 42: 30-40.
- [6] KIM Y Y, KIM J M, BANG J W, et al. Effect of cover depth, w/c ratio, and crack width on half cell potential in cracked concrete exposed to salt sprayed condition [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 636-645.
- [7] 延永东. 氯离子在损伤及开裂混凝土内的运输机理及作用效应 [D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2011.
- [8] 唐先习, 尹月西, 国伟. 混凝土开裂部位氯离子渗透试验研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 66-69.
- [9] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测 [D]. 南京: 东南大学材料科学与工程学院, 2006.
- [10] 李立辉. 盐碱环境下混凝土冻融-干湿循环复合作用的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2011.
- [11] 王桂明. 化学转换型裂缝自修复材料及其对混凝土耐久性的影响研究 [J]. 材料导报, 2006, 20(3): 155-155.
- [12] 庞超明, 徐剑, 王进, 等. 混凝土干湿过程及循环制度的研究 [J]. 建筑材料学报, 2013(2): 315-320.
- [13] WANG G M, YU J Y. Self healing action of permea-

- ble crystalline coating on pores and cracks in cement based materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 20(1): 89-97.
- [14] 王海龙,董宜森,孙晓燕,等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1255-1261.
- [15] 孙迎召,牛荻涛,姜磊,等. 干湿循环条件下混凝土硫酸盐侵蚀损伤分析[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(7): 1405-1409.
- [16] 高润东,赵顺波,李庆斌,等. 干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 48-54.
- [17] 刘道维,刘本义,李向东,等. 硫酸盐和干湿循环耦合作用下混凝土性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2015, 36(4): 69-74.

Experimental Study of Effect of Salt on Durability of Bridge Pier Concrete Under Dry-wet Cycle

SUN Zengzhi, TIAN Junzhuang, YANG Kai, ZHANG Lei, CHEN Huaxin

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In this paper, based on bridge pier concrete of Dexiang highway bridge in Qinghai province, the concentration and the main types of the dissolved salts along Dexiang highway were analyzed, and seven solutions of different concentration of salt were prepared and four kinds of concrete were designed by laboratory experiments. Surface morphologies, weight loss rate and relative dynamic elasticity modulus were used to study the effects of salt on concrete durability under dry-wet cycles. The results show that the corrosion damage forms and extents of concrete are different when different single salt solution is adopted such as Na_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl under dry-wet cycles. The superposition effects of multiple salt corrosion of concrete damage can happen in the multi-salt solution, and the higher the concentration of solution, the more severe the concrete is damage under wet-dry cycles. CCSM concrete and fly ash concrete can improve the resistance to salt corrosion under wet-dry cycles.

Keywords: road engineering; concrete; dry-wet cycle; salt corrosion; durability

(上接第5页)

Influence of Test Conditions on Dynamic Response of Asphalt Mixture and Its Master Curve

LI Peilong, RAO Wenyu, FENG Zhengang, LI Jiange

(Key Laboratory of Road Structure & Material Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The dynamic modulus is one of the important characterization parameters of viscoelastic dynamic response of asphalt mixture. The Asphalt Mixture Performance Test (AMPT) was conducted on three gradation asphalt mixtures under the different test conditions. The change law of dynamic modulus of asphalt mixtures with the loading frequency and test temperature was analyzed. The attenuation models of dynamic modulus with temperature under different loading frequencies were gained. And the influence of loading frequency on the attenuation rate of dynamic modulus was analyzed. The master curves of visco-elastic dynamic response of asphalt mixture are obtained by discussing the shift factors of dynamic modulus. The results indicate that the dynamic modulus of asphalt mixtures goes up with an increase in loading frequency, while the increasing amplitude is smaller at a higher temperature. The dynamic modulus decreases with an increase in temperature in accordance with the attenuation index relationship, and the attenuation rate of dynamic modulus is bigger at a higher loading frequency. The attenuation rate of dynamic modulus with the temperature for AC-13 modified asphalt mixture is the smallest. The dynamic moduli of asphalt mixtures at different frequencies are close at a higher temperature (e.g. 55 °C). The dynamic modulus master curve and shift factor can reflect the effect of loading frequency and temperature on the visco-elastic properties of asphalt mixture.

Key words: asphalt mixture; Asphalt Mixture Performance Test (AMPT); visco-elastic dynamic response; dynamic modulus; master curve

文章编号: 1671-6833(2016)05-0012-05

镧掺杂 AlPO_4 -5沸石的合成及湿敏性能研究

王炉煜¹, 祝 烨², 高利苹², 徐甲强²

(1. 上海大学 理学院化学系, 上海 200444; 2. 上海大学 理学院物理系, 上海 200444)

摘 要: 以异丙醇铝、正磷酸、四甲基胍和硝酸镧为反应原料, 通过一步水热法成功制备了 AlPO_4 -5 沸石分子筛, 并用稀土元素镧对其掺杂改性 (LaAlPO_4 -5) 以获得良好的气敏性能. 通过扫描电镜可以看出, 获得的 La 掺杂沸石分子筛为小球颗粒, 并且堆积为酥松的棉絮状. 将所合成的材料作为石英晶体微天平湿度传感器的敏感材料构建谐振式湿度传感器, 与未掺杂 La 的 AlPO_4 -5 相比, 掺杂后的 LaAlPO_4 -5 在全湿度范围内的检测都具有较高的灵敏度, 并且具有较好的线性关系和较短的响应/恢复时间, 其中恢复时间可以快至 3 s.

关键词: AlPO_4 -5; 掺杂镧; 石英晶体微天平; 湿度传感器

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.003

0 引言

随着世界科技的快速发展, 人们对生活质量的关注日益提高, 除了关注温度以外, 也非常关心湿度的大小^[1], 因此近年来湿度传感器得到快速发展和大量应用^[2]. 湿度传感器在应用时需要满足以下要求: 1% ~ 100% RH 范围内的相对湿度测量, 灵敏度高, 重现性好, 响应时间和恢复时间短, 成本低. 市面上使用的电阻式或电容式湿度传感器都存在一些问题, 尤其是在稳定性和可靠性方面制约了它们的应用. 电解质湿度传感器量程较窄, 重复性不佳, 稳定性差; 高分子化合物湿度传感器重复性差, 易被污染; 陶瓷材料湿度传感器的准确度低且难以集成化. 为了研发好的湿度传感器, 越来越多的材料被研究者作为湿敏材料, 比如沸石和介孔材料, 因为它们空隙连续, 孔道连接相通, 从而有利于水分子的吸附和脱附. 高稳定性的微孔沸石 AlPO_4 -5, 已在催化界引起了广泛的关注^[3], 与传统的分子筛相比, 它具有一个令人兴奋的特性: 可以掺杂其他金属而形成 MeAlPO_4 -5 材料^[4]. 2015 年, CHEN 等^[5]发现 AlPO_4 -5 可以作为很好的湿敏材料.

石英晶体微天平 (QCM) 传感器利用石英晶体表面的压电效应作为基本原理^[6], 德国科学家

把它成功应用到传感器领域. 他系统研究了 AT 切向的石英晶体在气相中的振荡规律, 并在 20 世纪 50 年代末推导出了石英晶体的谐振频率和晶体电极表面质量负载变化之间的关系^[7-8]:

$$\Delta f = \left(-2.3 \times 10^6 \frac{f_0^2}{A} \right) \Delta m, \quad (1)$$

式中: Δf 为频移; f_0 为晶体基频; A 为电极面积, cm^2 ; Δm 为质量改变量. 此关系式称为 Sauerbrey 方程, 它联系起了质量吸附和频率变化, 是质量效应型压电谐振测量技术的理论基础. QCM 传感器就是通过测量石英晶体振荡频率的变化来检测石英晶体表面质量负载的微小变化的.

笔者采用水热法成功制备了纯的 AlPO_4 -5 沸石分子筛, 以及对其进行金属镧的掺杂 (LaAlPO_4 -5), SEM 表明 LaAlPO_4 -5 颗粒均匀堆积成棉絮状. 将它们制成 QCM 湿度传感器, 测试了它们的敏感性能. 结果表明掺杂比例为 La: Al = 0.02 的 LaAlPO_4 -5 作为敏感膜的湿度传感器具有非常优越的性能.

1 实验部分

1.1 材料合成

1.1.1 合成 AlPO_4 -5

以 1,1,3,3-Tetramethylguanidine (四甲基胍,

收稿日期: 2016-01-19; 修订日期: 2016-05-11

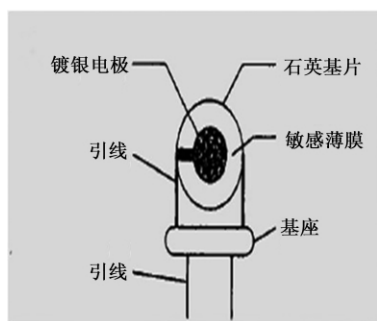
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61371021; 51301101)

通讯作者: 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.

简称 TMG) 为模板剂,使最终的混合溶液保持 $1\text{P}_2\text{O}_5:0.8\text{Al}_2\text{O}_3:0.6\text{TMG}:33\text{H}_2\text{O}$ 的比例,通过水热法合成 $\text{AlPO}_4\text{-5}$. 作为一个典型的过程,在 2.289 g 的异丙醇铝中加入 3.95 mL 去离子水,直至异丙醇铝完全溶解于水并水解形成均匀的溶胶,然后边搅拌边缓慢地添加 0.9 mL 的磷酸,待混合均匀后边搅拌边加入 0.55 mL 四甲基胍 (TMG). 以上所有的反应步骤均在室温下进行,并且不需要过多的保护处理. 将所得的均匀的溶胶装进聚四氟乙烯衬底的反应釜,在 150 °C 的烘箱内放置 6 h 后取出,冷却至室温后,抽滤水洗,得到结晶,将结晶放置于 100 °C 的烘箱中隔夜干燥,然后在 550 °C 下煅烧 5 h 后,即可得到 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 分子筛.

1.1.2 合成 $\text{LaAlPO}_4\text{-5}$

在 2.289 g 的异丙醇铝中加入 3.95 mL 的去离子水,然后边搅拌边逐滴添加 0.9 mL 的磷酸,持续搅拌至均匀的溶胶形成后,导入 La 离子,使其与 Al 的比例分别为 0.02:1 和 0.04:1,然后边搅拌边加入 0.55 mL 四甲基胍. 以上所有的反应步骤均在室温下进行,然后把溶胶装进聚四氟乙烯衬底的反应釜,在 150 °C 的烘箱内放置 6 h 后取出,冷却至室温后,抽滤水洗,得到结晶,放置于 100 °C 的烘箱中隔夜干燥,然后在 550 °C 下煅烧 5 h,即可得到不同量的 La 掺杂的 $\text{LaAlPO}_4\text{-5}$ 材料.



(a) 结构图

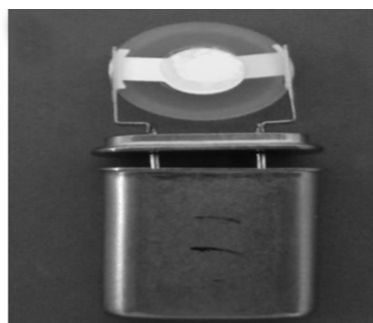
1.2 材料表征

采用 X-射线衍射仪 (XRD) 对粉体样品进行物相分析,测试条件为 $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.540\ 56\text{\AA}$), 扫描步长为 $0.03^\circ/\text{s}$. 采用场发射环境扫描电子显微镜 (Quanta 200FEG) 对样品的形貌来进行表征.

1.3 湿敏传感器的制备

按照本课题组以前报道过的湿度传感器的实验装置和实验步骤进行该实验^[9]. 所选用的石英晶体微天平 (QCM) 基频为 10 MHz, 结构如图 1 (a) 所示,图 1 (b) 为我们所用 QCM 的实物照. 根据 Sauerbrey 方程,它的频率会随着质量的增加而成比例减少.

下面举例说明 QCM 湿度传感器的制备过程: 先把 1 mg 合成材料分散在 1 mL 去离子水中,搅拌 30 min 后可以得到均匀的分散液. 取 1 μL 该溶液滴在 QCM 电极上后,在 353 K 的烘箱里放置 30 min,溶剂蒸发后,就制得了 QCM 传感器. 在封闭体系中,无机盐饱和溶液的上方,水蒸气具有不同蒸气压,换句话说,具有不同相对湿度值. 这一特性被应用到本文的传感器测试中,用以产生所需的相对湿度测试标准^[10]. 常温下,通过在密闭的玻璃容器中制备 LiCl 、 MgCl_2 、 NaCl 、 KCl 和 CuSO_4 的饱和溶液来获得达到 11.3%、33.1%、75.5%、85.1% 和 97.6% 的相对湿度.



(b) 实物图

图 1 QCM 图

Fig.1 Sketch of QCM

2 结果讨论

2.1 结构分析

图 2 为 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 粉体和掺杂不同比例金属 La (比例分别为 $\text{La}:\text{Al}=0.02$ 和 $\text{La}:\text{Al}=0.04$) 的两种 $\text{LaAlPO}_4\text{-5}$ 的 XRD 图谱. 从图 2 (a) 可以看出,获得的 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 粉体与 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 图谱 [JCPDS Card, No. 41 - 0044] 完全相符,都为 AFI 结构^[3];当掺杂金属 La 时,图 2 (b) 和 2 (c) 中物相

与图 2 (a) 基本相符,由于掺杂了比 Al 原子半径更大的 La,使得晶格常数增大,出现了峰略微左移的现象,这说明了 La 的确很好地掺杂进了 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 的框架之中.

2.2 形貌分析

掺杂比例为 ($\text{La}:\text{Al}=0.02$) 的 $\text{LaAlPO}_4\text{-5}$ 的形貌如图 3 所示. 从其 SEM 图可以看出,合成的 $\text{LaAlPO}_4\text{-5}$ 形貌比较均匀,为大小均匀的小球形颗粒,这些球形小颗粒会堆积起来,产生类似棉絮的

比较酥松的形貌,这有利于水分子进入孔道,并且快速的吸附和脱附。

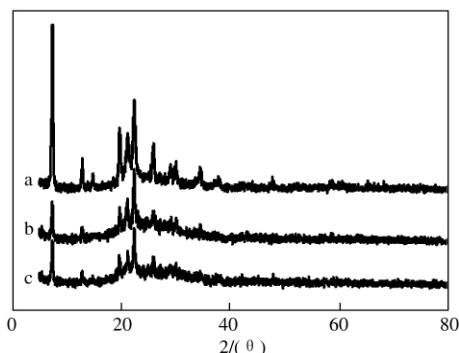


图2 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 以及不同比例掺杂 La 的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of (a) pure, (b) $\text{La:Al}=0.02$, and (c) $\text{La:Al}=0.04$ La-doped $\text{AlPO}_4\text{-5}$ samples

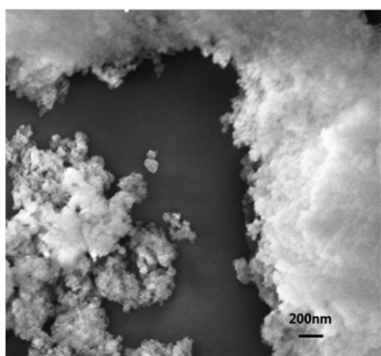


图3 掺杂比例为 ($\text{La:Al}=0.02$) 的 $\text{LaAlPO}_4\text{-5}$ 扫描电镜图
Fig. 3 SEM of La-doped ($\text{La:Al}=0.02$) $\text{LaAlPO}_4\text{-5}$

2.3 湿敏性能分析

图4展示了3种湿度传感器的湿度变化和频率变化的关系.3种湿度传感器都可以在常温下检测出几乎全范围的相对湿度(0%~100%).随着相对湿度增加,所有传感器的频率都不断减小.掺杂量为 $\text{La:Al}=0.04$ 的传感器在湿度测试中,响应最高,但是线性关系较差.纯 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 制得的传感器线性关系比前者稍好,但是响应相对较低.综合灵敏度和线性关系来看,掺杂量为 $\text{La:Al}=0.02$ 的传感器的湿度性能相比其他两种传感器

更为优越.

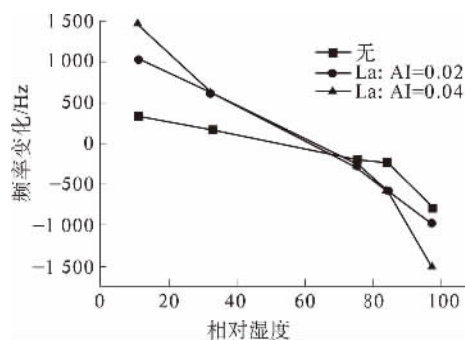


图4 不同材料的频移和湿度之间的关系

Fig. 4 The relationships between the frequency shift of different materials under and changed the corresponding relative humidity

图5(a)所示的是掺杂量为 $\text{La:Al}=0.02$ 的 QCM 传感器从低湿度环境—高湿度环境,又从高湿度环境逐渐变化到低湿度环境的响应.可以看到,随着相对湿度的升高,在每一个固定的湿度环境下都能产生一个稳定的台阶,说明掺杂量为 $\text{La:Al}=0.02$ 的传感器在各个湿度环境下都有不错的稳定性.同样,在相对湿度逐渐降低的过程中,每一个固定的湿度环境也能产生一个稳定的台阶,而且此台阶与湿度上升过程中同样湿度的台阶基本一致,进一步看出该湿敏传感器有非常好的稳定性和重复性.根据其数据绘制湿滞曲线,如图5(b)所示,湿度60%以下时湿度从低到高和从高到低的响应曲线基本重合,几乎没有湿滞.图5(c)是在相对湿度为97.6%的环境下,掺杂量 $\text{La:Al}=0.02$ 的 QCM 传感器的连续响应,频率改变的数值很稳定,因此,在高湿环境中,该传感器也比较稳定.

传感器的性能和响应时间及恢复时间有很大的关系.响应时间和恢复时间各自定义为 QCM 的频率变化达到平衡值90%所需要的时间.图6

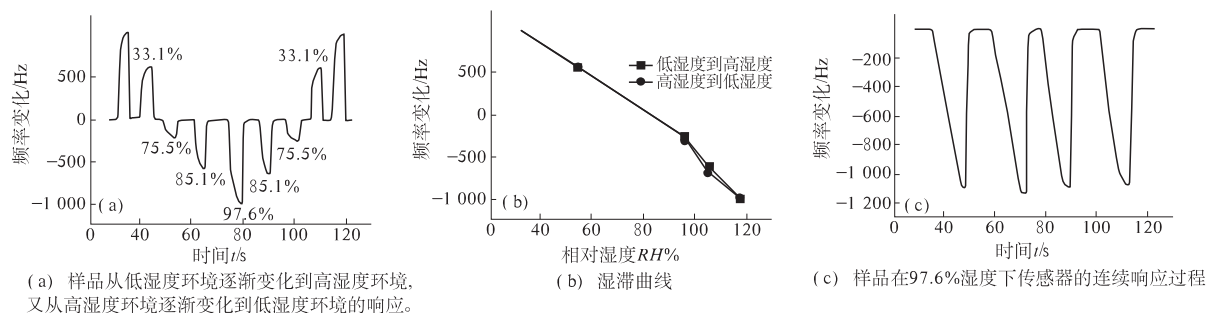


图5 湿敏性能测试

Fig. 5 Mass sensitive humidity sensor performance

是 $\text{La: Al} = 0.02$ 的 QCM 传感器的响应恢复图. 相对湿度在 97.6% 时, 传感器的响应时间约为 20 s, 恢复时间约为 3 s, 这远远低于以往 QCM 湿敏传感器的恢复时间. 所以, $\text{La: Al} = 0.02$ 的 QCM 传感器具有比较快的响应时间和非常快的恢复时间.

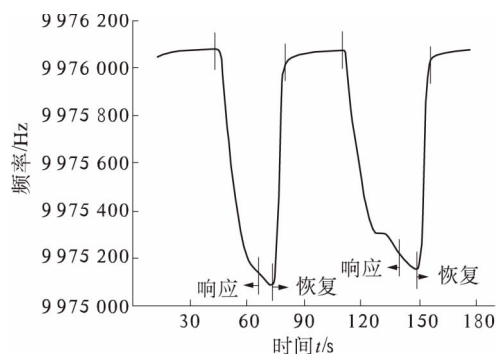


图6 $\text{La: Al} = 0.02$ 的 LaAPO-5 制备的传感器的响应恢复图

Fig. 6 Response and recovery characteristic curve of La-doped ($\text{La: Al} = 0.02$) LaAPO-5

2.4 机理分析

2.4.1 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 湿敏机理

$\text{AlPO}_4\text{-5}$ 的截面框架结构如图7所示, 它的吸水机理可描述如下: 湿度较小时, 水先进入包含6个氧原子的六环孔道与铝骨架反应; 随着湿度增加, 水会通过凝结机理进入十二环孔道^[11], 然后水分子会在 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 的主孔道形成链状结构, 随着湿度进一步增加, 水分子会和 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 孔道的内表面氧产生氢键, 从而形成两条水的交叉螺旋链^[12].

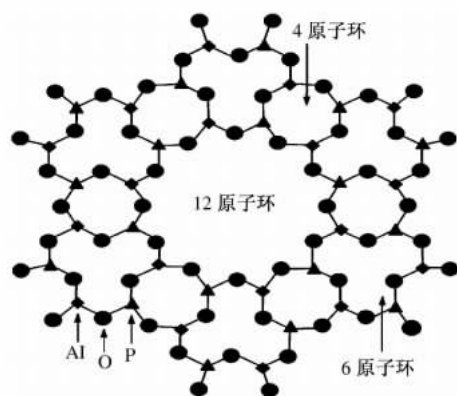


图7 (100) 晶面取向的 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 的框架结构

Fig. 7 Framework structure of $\text{AlPO}_4\text{-5}$ viewed along the 100 direction

2.4.2 掺杂 La 对于 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 湿敏性能提升的机理推断

(1) $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 框架中的 O-Al-O 的键角对于

吸水性能的影响较大^[13], 由于 O-Al-O 的2个氧原子会对水分子中的氧原子产生斥力, 所以可以推断, O-Al-O 的键角越大, 其对水分子的斥力越小. La 的原子半径为 195 pm, 而 Al 的原子半径为 125 pm, 因此 O-La 键的键长比 O-Al 的键长更长, 从而 O-La-O 的两个氧原子的距离会比 O-Al-O 的两个氧原子更大, 对水分子中的氧原子的斥力就会减小.

(2) La 掺杂进骨架后, 会产生结构缺陷^[14], 同时掺杂进去的 La 能在表面提供羟基, 一定程度上会增加亲水性.

(3) $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 的吸水性与 Al 和 P 的电负性差异有关^[15] (分别为 1.6 和 2.2), 而掺杂进金属 La (电负性为 1.1) 使得其与 P 的电负性的差值变大, 也有利于吸附水.

(4) 当铝和磷的比例恒定时, 沸石骨架为电中性, 但是当铝和磷的比例发生改变, 为了保持电中性, 就会产生 P-OH 或者 Al-OH , 从而增加该材料的亲水性^[16].

综上可得: 在 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 沸石分子筛中掺杂一定的 La, 可以使材料的吸水性能提高.

3 结论

采用水热方法成功制备了纯的 $\text{AlPO}_4\text{-5}$ 沸石分子筛, 以及掺杂金属 La 的 LaAPO-5 . XRD、SEM 被用来对材料的物相和形貌进行表征和分析. 通过 SEM 可以看出, LaAPO-5 为尺寸均匀的球形颗粒, 这些球形小颗粒会堆积起来, 形成类似棉絮的形貌. 当掺杂量为 $\text{La: Al} = 0.02$ 时, 制得的石英晶体微天平湿度传感器具有最好的湿敏性能, 且具有重复性好, 响应时间较短, 只需要极短的恢复时间等优点.

参考文献:

- [1] 李晓媛, 苏星, 牛云玲, 等. 基于 HKG-07A 红外脉搏传感器的智能睡眠唤醒仪 [J]. 福州大学学报 (工学版), 2015, 36(3): 30-33.
- [2] TOMYH H. IUPAC manual of symbols and terminology, pure appl [J]. Chem. 1972(31): 578.
- [3] 袁忠勇, 周午纵, 李赫. 沸石类分子筛合成研究新进展 [J]. 化学进展, 2001, 13(2): 113-117.
- [4] WANG J Y, SONG J W, XIAO F S, et al. Tetramethylguanidine-templated synthesis of aluminophosphate-based microporous crystals with AFI-type structure [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2009: 561-569.

- [5] CHEN Y, LI D M, RUAN S P. Humidity sensor based on $\text{AlPO}_4\text{-5}$ zeolite with high responsivity and its sensing mechanism [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, (212): 242–247.
- [6] GUAN S, INAGAKI S, OHSUNA T, et al. Cubic hybrid organic-inorganic mesoporous crystal with a decaoctahedral shape [J]. *J. Am. Chem. Soc.* 2000(122): 5660–5661.
- [7] JAYARAM, S, CONNACHER, H I, LYONS K W, Virtual assembly using virtual reality techniques [J]. *Computer Aided Design*, 1997, 29(18): 575–584.
- [8] JUNG, B, HOFFHENKE, M, WACHSMUTH I. Virtual assembly with construction kits [M]. *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conference*, September 14–17, 1997, Sacramento, DE-TC97/DFM–4363.
- [9] ZHU Y, CHEN J C, XU J Q, et al. Synthesis of mesoporous $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ composites and their application as quartz crystal microbalance humidity sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014(193): 320–325.
- [10] ZHU Y H, YUAN H, XU J Q, et al. Highly stable and sensitive humidity sensors based on quartz crystal microbalance coated with hexagonal lamelliform monodisperse mesoporous silica SBA-15 thin film [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010(144): 164–169.
- [11] RENJITH S. PILLAI, RAKSH V. Jasra. Computational study for water sorption in $\text{AlPO}_4\text{-5}$ and $\text{AlPO}_4\text{-11}$ molecular sieves [J]. *Langmuir*, 2010, 4(29): 1755–1764.
- [12] FLOQUET N, COULOMB J P, ANDRE G, et al. Structure and dynamics of confined water in $\text{AlPO}_4\text{-5}$ zeolite [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, 108: 13107–13115.
- [13] ENGPOH N, SVETLANA M. Nanoporous materials with enhanced hydrophilicity and high water sorption capacity [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008(114): 1–26.
- [14] JAN K. Adsorption isotherms of water as a tool for characterization of metal substituted aluminophosphate molecular sieves [J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2005(8): 561–568.
- [15] PRASAD S, VETRIVEL R. Interaction of water molecules with the VPI-5 lattice [J]. *J. Phys. Chem*, 1994(98): 1579–1583.
- [16] TSUTSUMI K, MIZOE K, CHUBACHI K. Adsorption characteristics and surface free energy of $\text{AlPO}_4\text{-5}$ [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1999(277): 83–88.

Studies on the Synthesis of $\text{AlPO}_4\text{-5}$ Zeolite and Its Doping La and Their Application as Quartz Crystal Microbalance Humidity Sensor

WANG Luyu¹, ZHU Ye², GAO Liping², XU Jiaqiang²

(1. NEST Lab, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Department of physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China.)

Abstract: Undoped $\text{AlPO}_4\text{-5}$ and La doped LaAPO-5 zeolites under different ratios were synthesized by one-pot hydrothermal treatment of aluminum isopropoxide, phosphoric acid, 1,1,3,3-Tetramethylguanidine, and $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ mixture followed by crystallization and calcination. The morphology of synthesized LaAPO-5 was small particles, and these small particles were stacked as cottonlike. The above materials were used as sensitive layer of quartz crystal micro balance (QCM design) to build mass sensitive humidity sensor performance. Compared with undoped $\text{AlPO}_4\text{-5}$ zeolite, the LaAPO-5 sensor possessed higher sensitivity, better linearity and more quickly response/recovery, and the recovery time can reach to 3s. The humidity sensor based on LaAPO-5 exhibited excellent performance for humidity sensor.

Key words: $\text{AlPO}_4\text{-5}$; La-doped; QCM; humidity sensor

文章编号: 1671-6833(2016)05-0017-06

用于UV树脂改性的可溶性聚酰亚胺的制备工艺

石晓华, 颜少鸽, 张炜婕

(郑州大学 化学工程与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对环氧丙烯酸树脂在应用于柔性电路板UV光固化阻焊油墨时所表现出的柔韧性、耐热性等方面的不足, 通过不同单体组合和亚胺化法制备出一种具有合适分子量和耐热性良好的可溶性聚酰亚胺, 并用其对环氧丙烯酸树脂改性。结果表明: 制备该聚酰亚胺(PI)的较佳工艺过程为在0℃的温度下将摩尔比为1:0.505:0.505的3,4'-ODA、BPDA、ODPA反应2h合成聚酰胺酸(PAA), 再通过加入催化剂三乙胺和脱水剂乙酸酐的化学亚胺法在90℃将聚酰胺酸脱水4h合成聚酰亚胺。该条件下合成的聚酰亚胺分子量为 2.64×10^4 , 分解温度为508℃, 用于环氧丙烯酸树脂改性使产物分解温度由原来的291℃提升至374℃, 耐热性有所提高。

关键词: 聚酰亚胺; 可溶性; 环氧丙烯酸树脂; 改性; 制备

中图分类号: TQ322.4

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.004

0 引言

环氧丙烯酸树脂具有良好的耐化学腐蚀性、很强的附着力、价格低廉等优点, 是目前用量最大、应用最广的紫外光固化树脂^[1]。根据工厂实际需求, 针对环氧丙烯酸树脂应用于柔性电路板UV光固化阻焊油墨时所表现出的耐热性、柔韧性等方面的不足, 提出制备一种可溶性聚酰亚胺对其进行改性^[2], 使其性能有所提高。

聚酰亚胺PI是一类主链上含有酰亚胺环的聚合物, 具有优良的绝缘、耐辐射、耐腐蚀、耐高温等性能^[3], 在航空航天、电子电气、精密机械、石油化工、汽车、医疗器械等领域得到广泛应用^[4-7], 但普通的聚酰亚胺存在诸如熔点太高、不溶于大多数有机溶剂的缺点, 使其应用受到了限制。目前制备可溶性聚酰亚胺主要通过合成一些新型的含有柔性基团、大侧基、非共平面扭曲结构、不对称结构等的二胺或二酐单体来实现破坏聚酰亚胺分子链的规整性和对称性, 增加分子链的柔顺性, 减小结晶倾向, 进而提高PI的溶解性和可加工性, 如: Shaharm等^[8]用4-羟基苯甲酸与对苯二甲酰氯进行亲核反应生成对苯二甲酰双(4-羟基苯)酸, 然后与1,8-二氨基-3,6-二氧杂辛

烷通过Yamazaki法反应得到含有酯基、醚基和酰胺基的二胺——对苯二甲酸(4-[2-[2-(2-氨基乙氧基)乙氧基]乙基氨基甲酰]苯基)酯(TABE), 将该二胺与芳香族二酐在三甲基氯硅烷的存在下缩聚制得可溶性聚酰亚胺。Wang等^[9]合成了带有四甲基大侧基的二胺单体——3,3',5,5'-四甲基侧基-4,4'-联苯胺-4"-叔丁基甲苯, 将该二胺与芳香族二酐经一步高温聚合反应, 制得可溶性聚酰亚胺等。上述的方法虽均可制得可溶性PI, 但费时费力, 且合成的聚酰亚胺的分子量大, 不适用于对环氧丙烯酸树脂改性。笔者通过对已商品化的二胺(4,4'-ODA、3,4'-ODA)和二酐(BPDA、ODPA、PMDA)进行不同的组合以期获得具有合适分子量、溶解性及其他性能良好的共聚酰亚胺, 为后期用可溶性聚酰亚胺改性环氧丙烯酸树脂做准备。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验选用的实验原料主要有: 4,4'-二氨基二苯醚(4,4'-ODA)、3,4'-二氨基二苯醚(3,4'-ODA), 化学纯, 武汉鼎立信化工有限公司; 3,3',4,4'-联苯四羧酸二酐(BPDA), 化学纯, 武汉市铭

收稿日期: 2016-03-30; 修订日期: 2016-06-28

基金项目: 河南省重点科技攻关资助项目(132102210050)

作者简介: 石晓华(1978—), 女, 河南平顶山人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事有机合成与分离研究, E-mail: shixi-aohua@zzu.edu.cn.

业科技发展有限公司; 3,3',4,4'-二苯基四羧酸二酐(ODPA), 化学纯, 武汉市铭业科技发展有限公司; 均苯四甲酸二酐(PMDA), 化学纯, 天津展天化工有限公司; 三乙胺, 分析纯, 济南凯华化工有限公司; 乙酸酐, 分析纯, 上海昊化化工有限公司; 甲苯、甲醇、N-甲基吡咯烷酮(NMP)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)、吡啶、环己酮、氯仿、乙酸乙酯, 化学纯, 广东光华科技股份有限公司; 氮气; 浓硫酸。

1.2 实验方法

合成路线包括聚酰胺酸的合成和聚酰胺酸的亚胺化两个步骤。

(1) 聚酰胺酸的合成. 将配置有机械搅拌、温度计、氮气保护的三口烧瓶放置在一定温度的水浴中, 向烧瓶加入 N-甲基吡咯烷酮(NMP), 待温度恒定后, 将一定摩尔比的二胺、二酐先用 NMP 溶解后再分批交替加入三口烧瓶中, 加入的每一批原料完全溶解且温度达到恒定后再加入下一批, 待原料加完后, 在给定温度下继续反应 2 h。

(2) 聚酰胺酸的亚胺化. 亚胺化方法主要有热亚胺化和化学亚胺化. 热亚胺化是指在合成的聚酰胺酸溶液中加入甲苯作为带水剂, 回流温度下反应至无水生成. 而化学亚胺化是指将三乙胺(反应物总质量的 1%)、乙酸酐(反应物总质量的 1%) 分别加入聚酰胺酸溶液中, 在一定温度下反应一定时间。

现以某一单体组合为例说明聚酰亚胺的制备过程. 合成路线如图 1 所示。

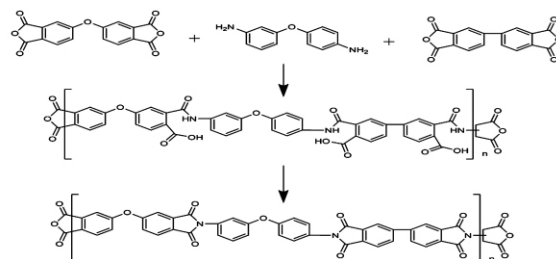


图 1 合成聚酰亚胺示意图

Fig. 1 The synthesis of polyimide

2 结果与讨论

2.1 单体的选择

考察不同的二酐\二胺单体组合对产品聚酰亚胺溶解性的影响, 先将不同的单体组合分批加入 80 mL NMP 中, 在 0 °C 下反应 2 h 合成聚酰胺酸, 再向聚酰胺酸溶液中加入 30 mL 甲苯并在回流温度下反应 3 h 合成聚酰亚胺, 其在 NMP 中的溶解性如表 1 所示。

如表 1 所示, 合成的几种聚酰亚胺只有 PI 10 微溶, 其他的均不溶, 其原因主要有以下几方面: ①在二元体系中, 由于聚合单体结构比较单一, 对称性强, 导致其溶解性差; ②在三元体系中, 以 3,4'-ODA、BPDA、ODPA 为聚合单体的溶解性最好, 3,4'-ODA 作为二胺不仅引入了柔性基团, 且具有较低的对称性, 使其合成的聚酰亚胺大分子易形成不对称空间结构, 增大不同分子之间的距离, 使溶剂分子易进入分子之间^[7], 且其与 BPDA、ODPA 两种芳香二酐制得共聚聚酰亚胺, 主链规整性差^[10], 均提高了聚酰亚胺的溶解性。

表 1 不同单体组合的溶解性

Tab. 1 The solubility of polyimide using different monomer

样品序号	单体组合	溶解情况	二胺/二酐比例(摩尔比)
PI 1	3,4'-ODA, BPDA	不溶	1:1.02
PI 2	3,4'-ODA, ODPA	不溶	1:1.02
PI 3	3,4'-ODA, PMDA	不溶	1:1.02
PI 4	4,4'-ODA, BPDA	不溶	1:1.02
PI 5	4,4'-ODA, ODPA	不溶	1:1.02
PI 6	4,4'-ODA, PMDA	不溶	1:1.02
PI 7	4,4'-ODA, BPDA, ODPA	不溶	1:0.51:0.51
PI 8	4,4'-ODA, BPDA, PMDA	不溶	1:0.51:0.51
PI 9	3,4'-ODA, ODPA, PMDA	不溶	1:0.51:0.51
PI 10	3,4'-ODA, BPDA, ODPA	微溶	1:0.51:0.51
PI 11	4,4'-ODA, BPDA, PMDA	不溶	1:0.51:0.51
PI 12	4,4'-ODA, ODPA, PMDA	不溶	1:0.51:0.51

由表 1 可发现用热亚胺法制备的聚酰亚胺均

未得到良好的溶解性, 其原因可能是热亚胺法除

了由于热引起分子链具有较高的取向,甚至结晶外,过高的温度还可能会导致聚合物的交联^[11]. 为避免高温对亚胺化的影响,在后续试验中将采用化学亚胺化法来制备聚酰亚胺,探究化学亚胺化对溶解性的影响,并对其工艺条件进行优化.

2.2 不同酐单体配比的选择

在单体选择中确定了以 3,4'-ODA、BPDA、ODPA 为聚合单体来合成聚酰亚胺. 在 N-甲基吡

咯烷酮用量为 80 mL,以 3,4'-ODA、BPDA、ODPA 为聚合单体在常温下反应 2 h 下合成 PAA,再向该 PAA 溶液中分别加入反应物总质量的 1% 的脱水剂三乙胺和催化剂乙酸酐,在 80 °C 下反应 3 h 的化学亚胺化合成可溶性 PI,探究在总二胺:二酐摩尔比为 1:1.02 下不同的二酐比对溶解性的影响. 不同二酐配比合成的 PI 在 NMP 中的溶解性如表 2 所示.

表 2 不同二酐配比下 PI 在 NMP 中的溶解性

Tab 2 The solubility of the PI with the different dianhydride ratios in NMP

不同酐单体摩尔比	0.21:0.81	0.36:0.66	0.51:0.51	0.66:0.36	0.81:0.21
溶解性	-	+	++	+	-

注: + 为溶; - 为不溶.

由表 2 可知,当两种不同的二酐摩尔比越接近 1:1 时合成的聚酰亚胺的溶解性越好. 在 BPDA、ODPA 的配比为 0.51:0.51 时合成的聚酰亚胺溶解性相对较好.

2.3 合成聚酰胺酸的原料配比考察

PAA 的分子量很难测定,但高分子聚合物的分子量与高分子溶液的黏度有一定的关系. 当聚合物溶剂体系选定后,溶液黏度仅与浓度和聚合物分子的大小有关,溶液黏度越大,其所溶解的高分子聚合物分子量相对越高^[11-12],故笔者采用相同的聚合物溶剂体系和测量条件下通过溶液的特性黏度来对 PAA 分子量进行表征. 所得聚酰胺酸的特性黏度通过以 NMP 为溶剂,在室温下用乌氏黏度计测定不同浓度下的溶剂和溶液的流出时间 t_0 、 t_1 ,计算出相应的增比黏度 η_{sp} ,并以 η_{sp}/c 对 c 做图外推至 c 为零处得到.

N-甲基吡咯烷酮用量为 80 mL,3,4'-ODA 为二胺单体,BPDA、ODPA 为二酐单体,其中二酐单体的摩尔比相同,反应温度 0 °C,反应时间 2 h 下探索二胺与二酐的比对聚酰胺酸特性黏度的影响,结果如图 2.

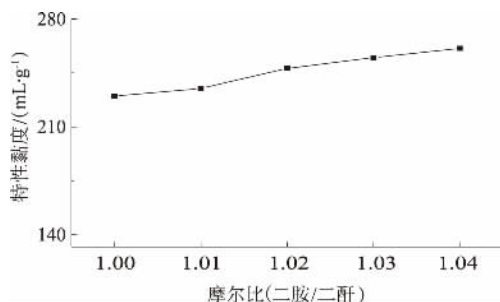


图 2 不同二胺和二酐配比下聚酰胺酸特性黏度

Fig. 2 Viscosity of polyamide acid under different proportion of diamine and dianhydride

由图 2 可知二胺与二酐的摩尔比为 1:1 时的黏度最小,而当其配比逐渐增大时,其特性黏度逐渐增大,但整体黏度变化不大,介于 230 ~ 270 mL/g 之间. 由此可知二胺和二酐的比对聚酰胺酸分子量的影响不大,但本实验所需要的是以酐封端的 PI,用于环氧树脂树脂进行改性,且反应体系中存在微量水分,从而使二酐水解失去活性,所以常常使二酐稍微过量,故选择二胺与二酐总摩尔为 1:1.01,且不同酐单体的摩尔比相同,由此确定 3,4'-ODA 与 BPDA、ODPA 摩尔比为 1:0.505:0.505.

2.4 合成聚酰胺酸的反应温度考察

N-甲基吡咯烷酮用量为 80 mL,反应 2 h,3,4'-ODA 与 BPDA、ODPA 摩尔比为 1:0.505:0.505 下研究反应温度对聚酰胺酸黏度的影响如图 3.

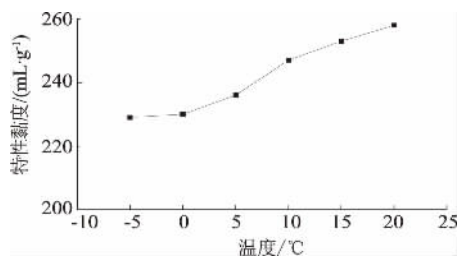


图 3 不同反应温度下聚酰胺酸的特性黏度

Fig. 3 Viscosity of polyamide acid at different reaction temperatures

如图 3 所示,在 -5 ~ 20 °C 内研究温度对合成 PAA 的影响时,发现从 -5 ~ 0 °C 其特性黏度稍有增大,但基本变化不大;而当温度大于 0 °C 时,其黏度逐渐增大,且增长较快,选择反应温度为 0 °C 可以得到所需要分子量的聚酰胺酸.

2.5 化学亚胺化温度与时间的确定

向 80 mL NMP 加入 1:0.505:0.505 摩尔比的 3,4'-ODA、BPDA、ODPA,在 0 °C 下反应 2 h 得到 PAA,再向该 PAA 溶液中分别加入反应物总质量的 1% 的脱水剂三乙胺和催化剂乙酸酐,通过将不同的化学亚胺化反应时间和温度下合成的 PAA 和 PI 的红外谱图对比,观察 PAA 特征峰是否消失来确定亚胺化是否完全,进而确定最佳的亚胺化温度和时间。

样品处理:分别将一定量的 PAA 溶液、亚胺化后的反应液加入到大量的热水中并搅拌得到沉淀,再将沉淀加入到大量的甲醇中并不断搅拌得到沉淀。最后抽滤,并用甲醇洗涤、干燥,分别得到乳白色的聚酰胺酸(PAA)粉末和浅黄色的聚酰亚胺(PI)粉末。

通过 PAA 红外特征峰消失的程度确定亚胺化的程度,红外测试采用 FT-IR200 傅立叶红外光谱仪(FT-IR200,美国 Nicolet 公司;光谱范围:4 500 ~ 400 cm^{-1} ;分辨率:4 cm^{-1})用溴化钾混合压片。合成聚酰胺酸和聚酰亚胺的红外谱图如图 4。

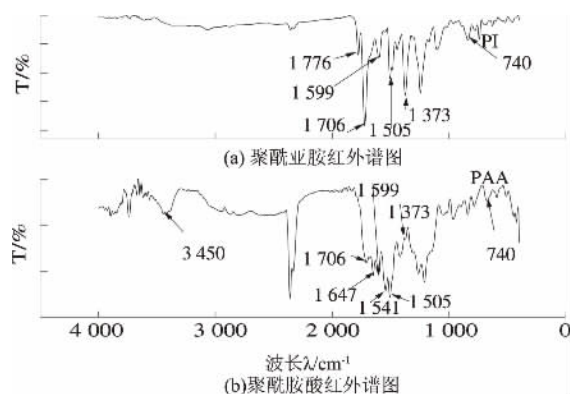


图 4 化学亚胺前后样品的红外图谱对比

Fig. 4 Comparison of IR spectra for samples before and after chemical imidization

如图 4 所示,聚酰亚胺的亚胺环的特征峰为 1 776 cm^{-1} 、1 706 cm^{-1} (羰基 C=O 的不对称对称伸缩振动峰)和 1 373 cm^{-1} (亚胺环中 C—N 键伸缩振动峰),聚酰胺酸的特征吸收峰 3 450 cm^{-1} (O=CNH)、1 647 cm^{-1} (C—O)、1 541 cm^{-1} (C—NH),在 PI 的红外谱图中 PAA 的特征吸收峰基本消失,而 740 cm^{-1} 为酐中的 C=O 的弯曲振动吸收峰,说明聚合物中含有酐基,本实验设计

时就是要求聚合物末端以酐封端。

经研究确定化学亚胺化的较佳反应时间为 4 h,反应温度为 90 °C。

3 性能测试

将摩尔比为 1:0.505:0.505 的 3,4'-ODA、BPDA、ODPA,在 0 °C 下反应 2 h 得到 PAA,再向该 PAA 溶液中分别加入反应物总质量的 1% 的脱水剂三乙胺和乙酸酐,在 90 °C 的反应温度下反应 4 h 得到 PI 溶液,析出于干燥后得到 PI 粉末进行性能测试。

3.1 分子量分布测定

将可溶性的聚酰亚胺用于对环氧丙烯酸树脂改性要求该 PI 的分子量不能太大,一般在 2×10^4 左右,且当分子量分布在 $2.5 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$ 之间时其显影性、感光性、柔软性及耐热性,碱水可溶性能较好,过高过低均影响其性能^[10],PI 的分子量采用 Agilent 1100 型凝胶渗透色谱仪,采用 RI-G1362A 示差监测器,色谱级 DMF 作为流动相,流速 1 mL/min,测试温度 25 °C,以窄分布聚苯乙烯为标准样。PI 的凝胶色谱测试结果如图 5 所示,聚酰亚胺的重均分子量为 2.64×10^4 ,可以将其用于对环氧丙烯酸树脂进行改性。

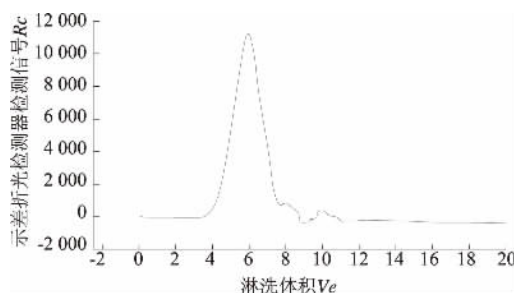


图 5 可溶性聚酰亚胺的凝胶色谱表征结果

Fig. 5 Gel chromatographic characterization of soluble polyimide

3.2 溶解性能

在 25 °C 温度下,分别将 1 g 的 PI 加入到 10 mL 溶剂中静置 24 h,结果如表 3 所示。由表 3 可知,所得 PI 易溶于诸如 N,N-二甲基甲酰胺、N-甲基吡咯烷酮、 γ -丁内酯、浓硫酸等高沸点极性溶剂,不溶于氯仿、乙酸乙酯等低沸点弱极性的溶剂。微溶于环己酮。

表 3 PI 在不同溶剂中的溶解性

Tab. 3 The solubility of PI in different solvents

溶剂	NMP	DMF	THF	吡啶	γ -丁内酯	浓硫酸	环己酮	氯仿	乙酸乙酯
结果	++	++	++	++	++	++	+-	--	--

注: + 为溶; - 为不溶。

3.3 耐热性能

PI的耐热性采用德国耐驰生产的NETXSCH STA409PC同步热分析仪进行热重表征,操作条件为在 N_2 气氛下以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率加热到 $800\text{ }^\circ\text{C}$.得到PI的TG曲线如图6.

如图6所示,从曲线可以看出失重5%和10%

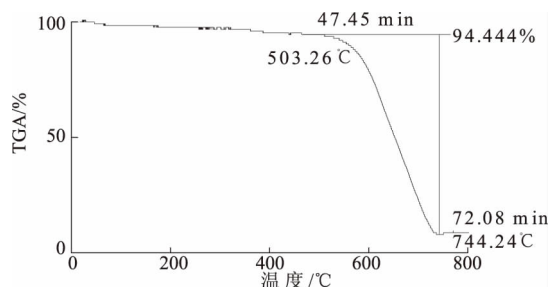


图6 可溶性聚酰亚胺的热重曲线

Fig. 6 Thermal gravimetric analysis of soluble polyimide

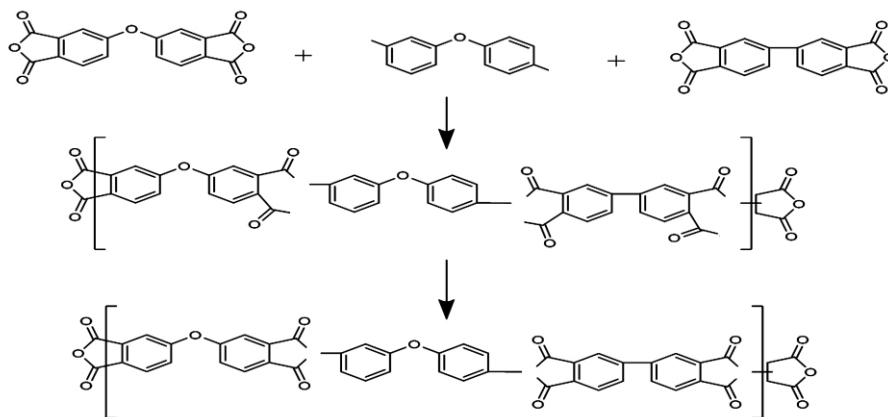


图7 可溶性PI改性环氧丙烯酸树脂合成路线

Fig. 7 The synthesis route of epoxy acrylic resin modified by the soluble PI

将改性前后的环氧丙烯酸树脂热固化后进行热重分析,结果如图8所示.

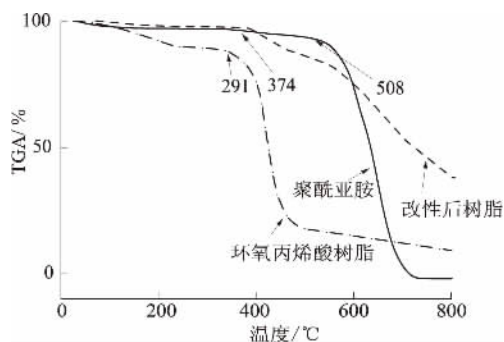


图8 环氧丙烯酸树脂改性前后热重对比图

Fig. 8 Thermal contrast of epoxy acrylic resin before and after modification

由图8可知,环氧丙烯酸树脂的分解温度为 $291\text{ }^\circ\text{C}$,聚酰亚胺的分解温度为 $508\text{ }^\circ\text{C}$,改性树脂的分解温度为 $374\text{ }^\circ\text{C}$.由此可知,改性后的环氧丙

时温度分别为 $464\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $554\text{ }^\circ\text{C}$,其分解温度为 $508\text{ }^\circ\text{C}$.聚酰亚胺的热稳定性良好,可以用其对环氧丙烯酸树脂改性以提高它的耐热性.

4 可溶性PI对环氧丙烯酸树脂改性

目前已经初步进行了用该可溶性PI对环氧丙烯酸树脂改性的实验,即以滴加的方式将质量比1:1.3的可溶性的PI加入到环氧丙烯酸树脂(由NPEL-128型号的环氧树脂和丙烯酸在以三乙胺为催化剂,2,6-二叔丁基对甲酚为阻聚剂下自制所得,其中环氧树脂的环氧当量为 185 g/当量)中,滴加时间为2 h,催化剂为对甲苯磺酸,质量分数为1%,在 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 下高温反应8 h.可溶性PI对环氧丙烯酸树脂改性的合成路线如下图7所示.

烯酸树脂热稳定性有所提高,且在较长的一段温度范围内其失重率比较低.从耐热性来看,改性效果比较明显,后期可进行改性工艺条件的优化.

5 结论

(1) 笔者优化了一种可溶性聚酰亚胺的工艺条件:3,4'-二氨基二苯醚(3,4'-ODA):3,3',4,4'-联苯四羧酸二酐(BPDA):3,3',4,4'-二苯基四羧酸二酐(ODPA) = 1:0.505:0.505(摩尔比),在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下反应2 h合成聚酰胺酸PAA,再向PAA溶液中分别加入反应物总质量1%的三乙胺和乙酸酐,在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下反应4 h将聚酰胺酸脱水得到可溶性聚酰亚胺PI.

(2) 实验制得的可溶性聚酰亚胺重均分子量为 2.64×10^4 ,溶解性和耐热性良好,将其用于对环氧丙烯酸树脂改性,环氧丙烯酸树脂的分解温度由原来的 $291\text{ }^\circ\text{C}$ 提升至 $374\text{ }^\circ\text{C}$,有效提高了改性树脂的耐热性.

参考文献:

- [1] 龚云表,石安富.合成树脂与塑料手册[M].上海:上海科学技术出版社,1993.
- [2] 章亚东,李广利.大孔聚苯乙烯树脂改性及对 MgCl_2 负载研究[J].郑州大学学报(工学版),2013,34(6):41-43.
- [3] 杨金田,黄卫,周永丰,等.可溶性共聚酰亚胺的合成与性能研究[J].高分子学报,2006(4):610-614.
- [4] CHOI J K, PAEK K Y, YOON T H. Adhesive and dielectric properties of novel polyimides with bis(3,3',5,5'-tetrafluoro-4-trifluoromethyl phenyl phosphine oxide (mDA7FPPO) [J]. European Polymer Journal, 2009, 45(6): 1652-1658.
- [5] LIAW D J, WANG K L, HUANG Y C. Advanced polyimide materials: Syntheses, physical properties and applications, [J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(7): 907-974.
- [6] QI H X, LIU F, CHEN Y W, et al. Studies on high performance nonvolatile polyimides coating: Gamma ray initiated bulk copolymerization of vinyl polar monomer and maleimide-terminated polyimides with flexible backbone and the modifications [J]. Progress in Organic Coatings, 2012, 73(1): 33-41.
- [7] CALLE M, LOZANO A, CAMPA J. Novel aromatic polyimides derived from 5'-t-Butyl-2'-pivaloylimino-3,4,3'',4''-m-terphenyltetracarboxylic dianhydride with Potential Application on Gas Separation Processes [J]. Macromolecules, 2010, 43(5): 2268-2275.
- [8] SHAHRAM M A, LEILA A F. Soluble polyimides from a semi-aliphatic diamine containing ester, amide and ether groups [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2011, 29(1): 93-100.
- [9] WANG C Y, ZHAO X Y, LI G, et al. High solubility and optical transparency of novel polyimides containing 3,3',5,5'-tetramethyl pendant groups and 4-tert-butyl-toluene moiety, [J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(9): 1526-1532.
- [10] 姚盼,张秋禹,陈莹,等.可溶性聚酰亚胺制备研究进展[J].工程塑料应用,2013,41(5):110.
- [11] 丁孟贤.聚酰亚胺——化学、结构与性能的关系及材料[M].2版.北京:科学出版社,2012.
- [12] 傅献彩,沈文霞,姚天扬.物理化学[M].北京:高等教育出版社,1990.

Preparation Technology of a Soluble Polyimide Used for UV Resin Modification

SHI Xiaohua, YAN Shaoge, ZHANG Weijie

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

Abstract: Epoxy acrylic resin has the shortcoming of the heat resistance and flexibility, when it was used in UV curable solder resist ink for flexible circuit board. A soluble polyimide with suitable molecular weight and good heat resistance was prepared to modify the epoxy acrylic resin. The soluble polyimide (PI) with different monomer combinations was made by different imidization methods. The better preparation process of polyimide was determined. Firstly, the polyamic acid (PAA) was synthesized by 3,4'-ODA、BPDA、ODPA, of which the molar ratios was 1:0.505:0.505, at 0 °C about 2 h, and then the polyamic acid was used to make polyimide (PI) with the triethylamine as catalyst and acetic anhydride as dehydrating agent at 90 °C about 4 h. The molecular weight of this PI was 2.64×10^4 , and its decomposition temperature was 508 °C. The decomposition temperature of epoxy acrylic resin modified by the soluble PI was improved from 291 °C to 374 °C and its heat resistance was improved.

Key words: polyimide; solubility; epoxy acrylic resin; modify; preparation

文章编号: 1671-6833(2016)05-0023-04

盆景状 ZnO 的制备及气敏性能研究

张永辉, 刘春彦, 刘焕桢, 巩飞龙, 李 峰

(郑州轻工业学院, 河南省表界面科学重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘 要: 通过水热法首次制备出盆景状三维材料, XRD 和热分析测试结果表明制备的材料由碱式碳酸锌($\text{Zn}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 和 ZnO 组成, 产物经过高温煅烧后得到结晶性良好且侧面和底部孔状结构的 ZnO 材料. 利用 FESEM 对材料的形貌进行了系统的表征, 发现盆景状 ZnO 由纳米片自组装对称生长而成, 且每一层生长都会得到规则的六边形结构. 将材料制备成气敏元件并研究其气敏性能. 结果表明, 构筑的气敏元件在 340 °C 时对乙醇气体具有最高的灵敏度, 同时具有良好的响应-恢复特性和稳定性. 该材料可以应用于改善基于乙醇传感器的设计与制作.

关键词: ZnO; 盆景状; 水热法; 纳米片; 气体传感器

中图分类号: O614.24⁺1; O611.62 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.005

0 引言

ZnO 是一种位于 II-VI 族最重要的 N 型金属氧化物半导体材料($E_g = 3.4 \text{ eV}$), 在光催化^[1]、太阳能电池^[2]、水处理^[3]和发光二极管^[4]等方面有着广泛的应用. 除此之外, 作为重要的气敏材料, ZnO 被用于有毒气体如 H_2S ^[5]、 CO ^[6]、丙酮^[7]、 NO_2 ^[8]和乙醇^[9]的检测. 研究表明, 材料的气敏性能很大程度上取决于材料的形貌和表面状态, 三维 ZnO 材料因具有较大的比表面积、较大空隙率和结构相对稳定等特点成为人们的研究重点^[10]. 樊慧庆^[11]等利用水热法制备出了由纳米片自组装而成的三维结构 ZnO 前驱物, 经过高温退火, 得到了具有多孔结构的多层三维 ZnO 材料, 最后分别研究了由 ZnO 纳米粒子和 ZnO 三维材料制作气敏元件的性能. 结果表明, 具有三维和多孔结构的 ZnO 材料更利于气体的吸附和交换, 因此对各种有害气体都展现出了较强的灵敏度, 且对丙酮具有最好的选择性. 张海娇^[12]等同样利用水热法制备了具有花状结构的多孔三维 ZnO

材料, 气敏性能测试表明, 三维多孔花状 ZnO 材料因具有较大的比表面积和丰富的活性位点, 对正丁醇展现出了极其优越的选择性. 同样也有研究小组制备了纳米花形片状氧化锌微球^[13]和多级结构氧化锌^[14]及其在光催化领域的应用.

利用简单的水热合成反应, 本课题组已经成功制备出多种三维金属氧化物材料, 包括六圆环碟状 ZnO 材料^[15]、暴露高能面的三维 ZnO 双球^[16]和三维海胆状 Co_3O_4 ^[17]双球, 在此研究基础上, 本研究采用水热法首次大量制备了三维盆景状 ZnO 材料, 对材料的结构和形貌进行了表征, 并将产物制成旁热式气敏元件, 深入研究了材料的气敏性能, 结果表明制备的气体传感器具有良好 3S 性质, 即较高的灵敏度, 优异的选择性和稳定性.

1 实验部分

1.1 实验仪器与试剂

采用德国 Bruck D8 型 X 射线衍射仪对样品进行结构分析; 高解析热场发射扫描电子显微镜 JSM-7001F 和高分辨透射电子显微镜 JEM-

收稿日期: 2016-02-09; 修订日期: 2016-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21371157、21301158); 河南省重点科技攻关资助项目(132102210424); 河南省科技创新人才计划项目(豫科人组 2015-4 号); 骨干教师项目(2012XGGJS04、2014GGJS-081) 和郑州轻工业学院校内基金(2014XJJ001)

作者简介: 张永辉(1981—), 男, 河南郑州人, 郑州轻工业学院副教授, 博士, 主要从事功能纳米材料研究, E-mail: zyh0114@126.com.

2100 对材料进行形貌观察和分析. 采用郑州炜盛电子科技有限公司出产的 WS-30A 对制备的元件进行气敏测试分析.

试验中所用到的乙酸锌、尿素、无水乙醇均来自天津风船化学试剂科技有限公司, 聚乙烯吡咯烷酮(PVP) 来自天津市科密欧化学试剂有限公司, 所有试剂为分析纯级别, 未进一步纯化.

1.2 材料的制备

分别称取 1 mmol 乙酸锌和尿素于 50 mL 烧杯中, 加入 40 mL 乙醇和水的混合溶液(体积比为 3:1), 搅拌 5 min 使其完全溶解, 然后加入 0.200 0 g 聚乙烯吡咯烷酮(PVP) 搅拌 30 min, 待溶液形成均一稳定的混合液后转移至 40 mL 的聚四氟乙烯反应釜中, 180 °C 反应 6 h. 待反应釜自然冷却至室温, 分别用去离子水和无水乙醇洗涤 5 次, 置于恒温干燥箱内 60 °C 干燥 12 h, 最后得到白色固体粉末.

1.3 气敏元件的制备及气敏性能测试

制备旁热式气敏元件, 具体步骤为: 首先取适量的 ZnO 粉末在玛瑙研钵中充分研磨 10 min, 随后加入少量的松油醇, 继续研磨至浆料呈均匀的糊状. 将该浆料均匀涂覆到乙醇清洗过的 Al_2O_3 陶瓷管上, 将陶瓷管置于烘箱中 60 °C 干燥 30 min, 待陶瓷管表面样品凝固后转移至马弗炉内 600 °C 煅烧 1 h, 以除去有机粘合剂. 将气敏元件焊接并置于老化台上, 300 °C 老化 7 d, 采用静态配气法在 WS-30A 气敏元件测试系统中进行气敏性能测试, 测试气体包括丙酮、甲醇、苯、氯苯、甲苯、乙醇、乙腈等. 定义灵敏度为电阻在空气和待测气体中电阻的相对值 $S = R_a/R_g$ 表示, 其中 R_a 表示气敏元件在空气中的电阻值, R_g 表示气敏元件在待测气体中的电阻值.

2 结果与讨论

2.1 材料表征

图 1 中 (a) 和 (b) 分别是样片退火前和退火后的 XRD 图谱. 图 1 (a) 与标准图谱对照可知: 退火前大部分尖锐的都是 ZnO (JCPDS Card, NO. 36-1451) 的标准峰, 除此之外在 2θ 角 13.04°、28.12°、31.15°、32.85°、33.49° 等位置存在较弱的衍射峰, 对照标准卡片证明这些峰为碱式碳酸锌 $\text{Zn}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (JCPDS Card, NO. 11-

0287) 的衍射峰, 这表明制备的材料为 ZnO 和 $\text{Zn}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的混合物, 图 1 (b) 为样品 400 °C 退火 2 h 后的 XRD 图谱, 所有的衍射峰都与标准的 ZnO (JCPDS Card, NO. 36-1451) 相吻合, 并且衍射图谱中没有出现其他杂质的衍射峰且峰形尖锐, 说明产物具有较高的纯度和结晶度.

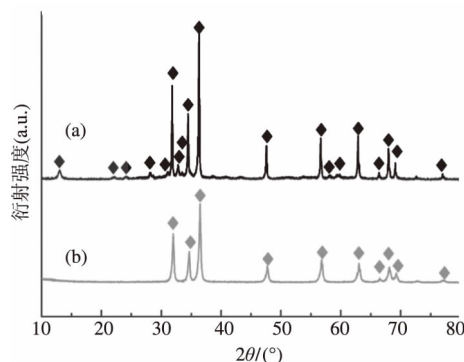


图 1 退火前 (a) 和退火后 (b) 样品的 XRD 图
Fig. 1 XRD patterns of precursor before (a) and after annealing (b)

为了进一步研究材料的组成, 对材料进行了热分析表征. 图 2 为材料在 N_2 气氛下测试的 TG/DTA 曲线. 从 TG 图中可以看到, 从开始升温到质量到达稳定, 损失的总质量只有 3.34%. 质量损失大致分为两个阶段, 第一阶段是材料表面自由水的去除, 质量损失约为 0.12%; 第二阶段为 $\text{Zn}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的分解过程, 质量损失约为 3.22%. 碱式碳酸锌的分解过程理论损失质量为 26.36% (Eq. 1), TG 测试结果实际损失为 3.22%, 由此可以确定材料中碱式碳酸锌含量占 12.21%, ZnO 含量占 87.79%. DTA 测试结果可以看出没有明显的放热峰, 也可以说明前驱物中发生分解

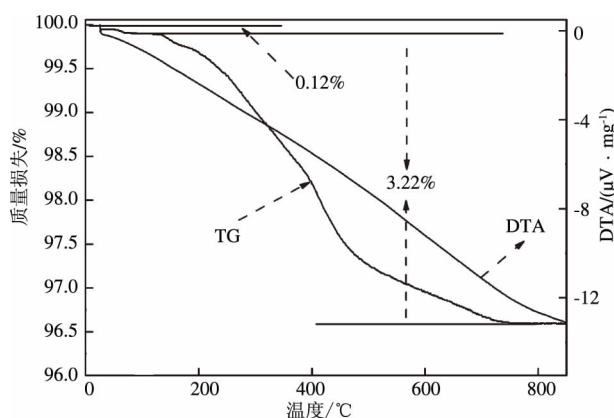


图 2 样品的热分析曲线图

Fig. 2 TG/DTA curves of the precursor

的质量较少,大部分产物是 ZnO 材料。

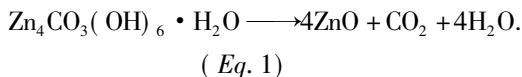


图3为盆景状 ZnO 材料退火前后的 FESEM 照片,插图为样品退火前后高倍率的俯视图;盆景状 ZnO 退火前(b)和退火后(e)侧视图;盆景状 ZnO 退火前(c)和退火后(f)底部图片。从图3(a)可以看出,大量的盆景状材料已被成功制备,插图3(b)为材料放大后的俯视图,从中可以看到材料由纳米片对称自组装生长十几代而成,在正中心部位形成一个孔洞,每一代自组装的结果都呈现六边形结构。图3(b)和3(c)为材料的侧视图和俯视图,可以清晰的看出:退火前,材料侧面是光滑且具有棱边的结构,底面为规则的六边形光滑结构。退火后,材料的基本形貌没有发生变化(图3(d)),但在材料的侧面和底部都出现了大量的孔状结构,这可能是由于 $\text{Zn}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 受热分解造成的结果,最终形成表面有孔的 ZnO 材料。这种孔洞的表面可以提高材料的比表面积,加快气体的传递和吸附能力,从而提高材料的气敏性能。

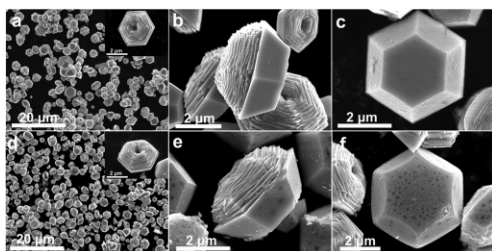


图3 盆景状 ZnO 退火前后的 FESEM 图片
Fig.3 FESEM of bonsai-like ZnO before and after annealing

2.2 气敏性能分析

图4(a)为退火后三维盆景状 ZnO 材料制备的气敏元件在 100 mg/L 乙醇气体中的温度-灵敏度曲线。随着温度升高,气敏元件的灵敏度值先增大后迅速下降,在 340 °C 达到最大值 11.575,表明气敏元件的最佳工作温度为 340 °C。在最佳温度 340 °C 下,我们研究了元件对不同有害气体的选择性,包括甲醛、乙醇、苯、甲苯、氯苯、乙醇、丙酮、甲醇、氨水、CO,结果如图4(b)所示。气敏元件对乙醇具有最高的选择性,对其他几种气体的响应较低,说明由三维盆景状 ZnO 材料制备的气敏元件对乙醇气体具有最好的选择性,可以用于乙醇传感器的开发和应用。

最佳工作温度下,我们研究了元件在不同浓度乙醇气体的响应和恢复。结果表明,随乙醇气体浓度的增大,气敏元件的灵敏度也呈增大趋势,基本呈线性关系(插图4(c)),图4(c)为元件对 5、10、50、100、200、500 mg/L 乙醇气体的动力学响应-恢复曲线,灵敏度分别为 4.7、6.7、5.11.6、15.3、29.8,从动力学曲线可以看出,元件对各个浓度乙醇气体的响应和恢复时间都比较短。图4(d)为气敏元件对 100 mg/L 乙醇气体的动力学响应-恢复曲线,在 30 s 时注入乙醇气体,120 s 时除去乙醇气体,从图中可以看出,元件对 100 mg/L 乙醇气体的响应时间为 20 s,恢复时间为 12 s,器件对于乙醇气体具有较快的响应-恢复特性,因此该盆景状 ZnO 材料可用于快速地检测乙醇气体。

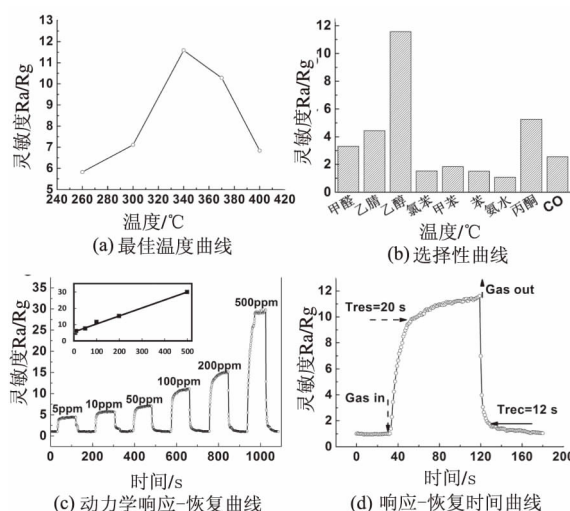


图4 盆景状 ZnO 气敏测试结果

Fig.4 The gas sensing properties of bonsai-like ZnO

实际应用中,半导体材料器件的稳定性往往存在一定的缺陷,为了进一步检验材料的实际应用价值,我们对材料的稳定性进行了系统的研究。将制作的气敏元件置于老化台上 300 °C 老化,空气湿度为 40% ~ 45%,温度为 20 ~ 25 °C,每隔 7 d 进行一次性能测试,模拟实际应用 60 d,测试结果如图 5。元件的气敏性能基本没有发生变化,表明制备的三维盆景状 ZnO 材料具有良好的稳定性,可以满足实际生活的应用,并应用于相关传感器的设计与开发。

3 结论

通过水热法和退火过程首次构筑了表面粗糙的三维盆景状 ZnO 材料。该材料由纳米片自组装

生长而成且底部为规则的六边形底座,退火后材料的表面会出现大量的孔状结构,且基本形貌没有发生变化,制备的气敏元件对乙醇气体具有较高的灵敏度、较快的响应-恢复特性和较强的稳定性.该材料可应用于乙醇传感器的设计与制作.

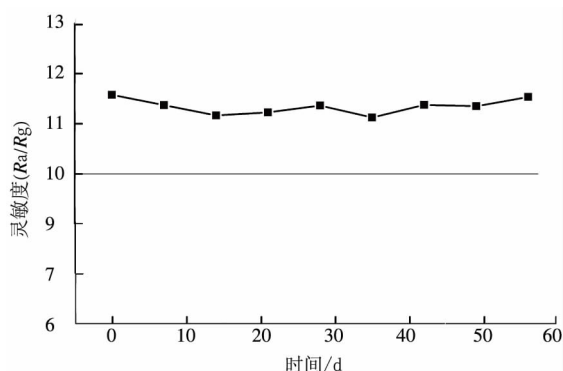


图5 气敏元件对 100 mg/L 乙醇气体的稳定性曲线

Fig. 5 the stability of sensor in 100 mg/L ethanol

参考文献:

- [1] LI B X, LIU T X, WANG Y F, et al. ZnO/graphene-oxide nanocomposite with remarkably enhanced visible-light-driven photocatalytic performance [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 377(1): 114 - 121.
- [2] BRISENO A L, HOLCOMBE T W, BOUKAI A I, et al. Oligo and polythiophene/ZnO hybrid nanowire solar cells [J]. Nano Letters, 2010, 10(1): 334 - 340.
- [3] TAN W K, RAZAK K A, LOCKMAN Z, et al. Optical properties of two-dimensional ZnO nanosheets formed by hot-water treatment of Zn foils [J]. Solid State Communications, 2013, 162: 43 - 47.
- [4] VAROL S F, SAHIN D, KOMPITSAS M, et al. The impact of different ZnO growth methods on the electrical and optical properties of a n-ZnO/p-GaN: Mg/c-plane sapphire UV LED [J]. Rsc Advances, 2014, 4(26): 13593 - 13600.
- [5] ZHANG Y, XIANG Q, XU J Q, et al. Self-assemblies of Pd nanoparticles on the surfaces of single crystal ZnO nanowires for chemical sensors with enhanced performances [J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, 19(27): 4701 - 4706.
- [6] KHOANG N D, HONG H S, TRUNG D D, et al. On-chip growth of wafer-scale planar-type ZnO nanorod sensors for effective detection of CO gas [J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2013, 181: 529 - 536.
- [7] XIAO Y H, LU L Z, ZHANG A Q, et al. Highly enhanced acetone sensing performances of porous and single crystalline ZnO nanosheets: high percentage of exposed (100) facets working together with surface modification with Pd nanoparticles [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(8): 3797 - 3804.
- [8] CHEN M, WANG Z H, HAN D M, et al. High-sensitivity NO₂ gas sensors based on flower-like and tube-like ZnO nanomaterials [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2011, 157(2): 565 - 574.
- [9] 王真真, 王文闯, 田永涛, 等. 敏感层涂敷方法对 ZnO 基传感器酒敏性能的影响 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2): 83 - 87.
- [10] ZHANG J, WANG S R, XU M J, et al. Hierarchically porous ZnO architectures for gas sensor application [J]. Crystal Growth & Design, 2009, 9(8): 3532 - 3537.
- [11] LI J, FAN H Q, JIA X H. Multilayered ZnO nanosheets with 3D porous architectures: synthesis and gas sensing application [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(35): 14684 - 14691.
- [12] ZHANG H J, WU R F, CHEN Z W, et al. Self-assembly fabrication of 3D flower-like ZnO hierarchical nanostructures and their gas sensing properties [J]. Cryst EngComm, 2012, 14(5): 1775 - 1782.
- [13] 田进军, 薛艳, 刘玉民. 花形 ZnO 纳米片微球的制备及其光催化性能的研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(6): 55 - 58.
- [14] 全微雷, 张金敏, 沈俊海, 等. 多级结构氧化锌的构筑、形貌调控及其光催化活性 [J]. 无机化学学报, 2015, 31(8): 1626 - 1636.
- [15] LI F, DING Y, GAO P X, et al. Single-crystal hexagonal disks and rings of ZnO: low-temperature, large-scale synthesis and growth mechanism [J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2004, 43(39): 5238 - 5242.
- [16] LI F, GONG F L, XIAO Y H, et al. ZnO twin-spheres exposed in + / - (001) facets: stepwise self-assembly growth and anisotropic blue emission [J]. ACS Nano, 2013, 7(12): 10482 - 10491.
- [17] XIAO Y H, LIU S J, LI F, et al. 3D hierarchical Co₃O₄ twin-spheres with an urchin-like structure: large-scale synthesis, multistep-splitting growth, and electrochemical pseudocapacitors [J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(19): 4052 - 4059.

(下转第 32 页)

冻融环境下混凝土结构耐久性研究综述

郑元勋¹, 杨培冰¹, 康海贵²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 对国内外冻融环境下混凝土结构耐久性研究现状及发展趋势进行了系统的总结及归纳, 并对该领域未来研究方向进行了展望. 基于对国内外文献的研读与分析, 首先对冻融环境下混凝土的破坏机理、冻融试验方法和标准进行了归纳与梳理; 并分别从理论研究及数值模拟方法上对非预应力混凝土结构、预应力混凝土结构耐久性研究方法进行归纳总结, 同时提出增强混凝土抗冻性能的对策措施, 最后分析了未来冻融环境下混凝土结构的耐久性研究趋势. 研究表明: 针对冻融环境作用下混凝土结构耐久性研究已取得一定的研究成果, 但基于大尺寸预应力构件开展的冻融环境作用下的耐久性研究尚未见报道, 应作为下一步重点研究的方向.

关键词: 混凝土结构; 耐久性; 研究综述; 冻融环境; 破坏机理

中图分类号: TU 502 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.006

0 引言

混凝土作为工程建设中最主要的一种建筑材料, 广泛应用于房屋建筑、公路桥涵、水利大坝等结构中, 混凝土材料及结构的坚固性、稳定性和可靠性直接影响着工程结构的安全性及使用寿命. 在我国北方高寒地区, 混凝土建筑物常常发生冻融破坏, 特别是和水有接触的混凝土建筑物, 所遭受的冻融破坏更加严重. 遭受冻融损伤的混凝土结构耐久性会随着冻融次数的增加逐渐降低, 进而导致混凝土结构使用寿命缩短, 不仅造成极大的工程经济损失还会导致工程安全事故, 因此, 冻融环境对混凝土结构耐久性的研究逐渐引起了广大学者的重视, 相关研究也在国内外得以广泛开展, 笔者在广泛研读国内外相关文献的基础上, 对目前冻融试验方法、标准、冻融环境下混凝土结构耐久性研究及预测评估方法、冻融环境下混凝土结构抗冻性能对策等进行了归纳总结, 并对未来研究趋势进行了展望.

1 混凝土冻融试验方法和标准

混凝土冻融试验方法一般分3种: 慢冻法、快

冻法和盐冻法, 对应的试验条件分别为气冻水融、水冻水融和大气环境中且与盐接触. 笔者简要介绍冻融循环试验中常用的慢冻法和快冻法^[1].

1.1 慢冻法试验条件和步骤

将养护好的尺寸为100 mm × 100 mm × 100 mm的混凝土试件吸水饱和, 放入冻融箱进入冷冻. 混凝土试件需放置在冻融箱中的试件架上, 与地面保持一定距离, 保证整个混凝土都受到冷冻侵蚀. 冻融箱中的空气温度范围为(-20 ~ -18) °C, 冷冻时间不少于4 h. 冷冻阶段结束后立刻开始融化阶段, 融化阶段中试件处于完全浸水状态, 水温保持在18 ~ 20 °C, 融化时间不少于4 h. 融化完毕后, 即完成一次冻融循环. 慢冻法完成整个冻融循环较慢, 模拟效果更接近现场环境下的混凝土冻融现象.

1.2 快冻法试验条件和步骤

采用尺寸为100 mm × 100 mm × 400 mm的混凝土试件, 同慢冻法, 快冻法的混凝土试件吸水饱和后放入规定尺寸的试件盒内, 将试件盒放入冻融箱中的试件架中后加水. 冷冻和融化过程中, 试件中心最低温度控制在(-18 ± 2) °C, 最高温度

收稿日期: 2016-05-01; 修订日期: 2016-06-19

基金项目: 中国博士后面上基金资助项目(79439); 河南省交通运输厅科技攻关资助项目(2013-2-42); 河南省交通运输厅科技资助项目(2014K37-2)

作者简介: 郑元勋(1978—), 男, 河南驻马店人, 郑州大学副教授, 博士后, 主要从事结构耐久性、结构监控、检测及加固等研究, E-mail: yxzheng@zzu.edu.cn.

控制在 3 ~ 7 °C. 每次冻融循环的时间控制在 2 ~ 4 h 为最佳, 融化时间应大于冻融循环时间的 1/4. 快冻法可以很快得到冻融循环后的试验结果, 但相比慢冻法, 模拟效果与实际情况存在一定差异.

2 冻融环境下混凝土结构耐久性研究现状

冻融环境下混凝土结构耐久性的研究持续开展, 在混凝土冻融损伤破坏机理研究方面提出了诸多学说, 其中美国鲍尔斯提出的“静水压力假说”和“渗透压假设”^[2-3] 最为经典. 近年来关于冻融环境对混凝土结构耐久性的影响主要集中在以下方面.

宋玉普^[4] 利用 Weibull 分布及对数正态分布, 提出混凝土结构的可靠度计算公式为

$$P_r(n) = \exp\left[-\left(\frac{N-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (1)$$

式中: $P_r(n)$ 为冻融循环次数 n 下的可靠度, N 是冻融循环寿命; γ 为最小寿命参数; η 为特征寿命参数; β 为 Weibull 形状参数.

结合三参数威布尔概率模型^[5], 根据失效概率和可靠度的关系,

$$P_f(n) + P_r(n) = 1. \quad (2)$$

$$P_f(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n-r}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (3)$$

同时遵循冻融循环损伤等效的原则, 在正负峰值温度差水平进行分阶段处理的前提下, 以此类推得出 k 阶段正负峰值温度差冻融作用下混凝土结构的失效概率为

$$P_{fk}(n_1, n_2, n_3, \dots, n_k) = 1 - \exp\left[-\left(\left(\frac{n_1 - \gamma_1}{\eta_1}\right)^{\frac{\beta_1}{\beta_2}} + \frac{n_2}{\eta_2}\right)^{\frac{\beta_2}{\beta_3}} + \dots + \frac{n_k}{\eta_k}\right)^{\beta_k}\right]. \quad (4)$$

此方法基于宏观损伤力学理论, 提出混凝土在冻融环境下的可靠性, 同时得到失效概率公式, 可以计算不同正负峰值温度差下有限次冻融循环次数的失效概率.

唐光普^[6] 认为动弹性模量在工程中不直接使用, 需要建立演化模型来实现映射. 蔡昊^[7] 基于不考虑损伤局部化的修正 Loland 模型和混凝土单轴拉伸行为描述混凝土弹性模量在混凝土冻融循环中的演化规律, 在不考虑初始损伤情况下

$$\begin{cases} \bar{E} = E(1 - an), \\ a = \frac{c(\xi + 1)\sigma_{\max}^\xi}{E^\xi}, \\ b = \frac{1}{\xi + 1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: E 为无损伤状态的弹性模量; \bar{E} 为损伤状态的弹性模量; c 、 ξ 为材料参数; n 为冻融循环次数; σ_{\max} 为一个冻融循环内承受的最大平均静水压力.

应用修正 Loland 模型对三维静水作用下混凝土的损伤进行演化模拟, 并利用最大主应变等效到一维情况, 可以得到

$$\bar{K} = K\left(1 - \frac{E^\xi}{K^\xi}an\right)^b. \quad (6)$$

在各项同性弹性损伤假定下, 建立混凝土冻融损伤 \bar{K} 和 \bar{E} 的关系

$$\bar{K} = \frac{\bar{E}}{3(1 - 2\nu)}. \quad (7)$$

式(6)和式(7)中: K 为混凝土初始体积模量; \bar{K} 为损伤状态下的体积模量; $\bar{\nu}$ 为损伤状态下的泊松比. 根据式(6)和式(7)可导出泊松比的演化过程规律

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2} - \frac{1 - 2\nu}{2} \left\{ \frac{1 - an}{[1 - 3(1 - 2\nu)]\xi an} \right\}. \quad (8)$$

在此基础上, 唐光普根据 William-Warnke 五参数模型^[8] 提出了混凝土冻融破坏模型, 逆向求出 a 、 b 、 ξ , 目的是将动弹性模量演化映射到破坏面上来反应出强度特征的变化, 从而依据强度的变化反应冻融循环后混凝土的耐久性.

宁作君^[9] 提出了能量耗散模型, 认为混凝土内部形成的微裂缝会在冻融环境中继续生长延伸, 在此过程中会消耗混凝土的内能, 降低断裂能, 可得到 N 次冻融循环后断裂能损失率 ΔD_n 的表达式为

$$\Delta D_n = \left(1 - \frac{G_n}{G_0}\right) \times 100\%. \quad (9)$$

式中: G_0 为冻融循环前试件的断裂能; G_n 为 n 次冻融循环后试件的断裂能.

Ababneh 等^[10] 提出超声波模型, 通过脉冲传播速度 V 、共振频率 f_1 两个指标来评估混凝土的盐冻损伤. 通过结合混凝土结构失效损伤度与基

于脉冲传播速度 V 的动弹性模量表达式得到基于脉冲传播速度 V 的冻融损伤度 D 的表达式为

$$D = 1 - \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2. \quad (10)$$

式中: V_i 为 n 次冻融循环后混凝土试件的脉冲传播速度; V_0 为冻融循环前混凝土试件的脉冲传播速度。

同理可得到基于共振频率 f_i 的冻融损伤度 D 的表达式为

$$D = 1 - \left(\frac{f_i}{f_0} \right)^2. \quad (11)$$

式中: f_i 为 n 次冻融循环后混凝土试件的共振频率; f_0 为冻融循环前混凝土试件的共振频率。

吴庆令等^[11]以质量损失率作为表征混凝土冻融损伤程度的变量,提出了质量损失率模型,混凝土质量损失率表达式为

$$W_1 = \frac{W_n - W_0}{W_0} \times 100\%. \quad (12)$$

式中: W_1 为质量损失率; W_0 为冻融循环前试件的质量; W_n 为 n 次冻融循环后试件的质量。

吴庆令等认为质量损伤可用单段损失模式或双段损伤模型表示. 混凝土结构在经历反复冻融后,表层会发生剥落侵蚀而导致质量损失,然而李金玉^[12]研究高强混凝土发现,高强混凝土在 300 多次冻融循环后,内部产生微裂缝,微裂缝随着冻融循环次数的增加逐渐扩展,但是整个混凝土结构表面并没有发生明显剥蚀,所以对高强混凝土来说,质量损失率并不能描述其冻融损伤,结论表明,质量损失率指标仅适用于表面产生明显剥落侵蚀的普通混凝土。

刘荣桂^[13]依据损伤力学分析,发现预应力混凝土结构的冻融破坏是一种低周疲劳损伤,低周疲劳损伤中塑性变形的变化要比应力变化大,所以用应变表示低周疲劳

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p. \quad (13)$$

式中: ε_e 为弹性应变; ε_p 为塑性变形。

将每一段荷循环中的混凝土损伤表示为塑性变形 ε_p 的幂指数函数^[14]

$$\frac{\partial D_m}{\partial n} = \left(\frac{\varepsilon_p}{C_1} \right)^{r_1}. \quad (14)$$

在弹性变形较小时,损伤演化方程可以表示为应力 σ 的函数,即

$$\frac{\partial D_m}{\partial n} = \left(\frac{\sigma}{C_2} \right)^{r_2}. \quad (15)$$

并利用 $\sigma = E\varepsilon_e$,得到低周疲劳的损伤模型为

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{C_2}{E} \left(\frac{\partial D_m}{\partial n} \right)^{\frac{1}{r_2}} + C_1 \left(\frac{\partial D_m}{\partial n} \right)^{\frac{1}{r_1}}. \quad (16)$$

式中: C_1 、 r_1 、 r_2 、 C_2 是与温度相关的材料参数. 一般材料中 $C_1 = D_u^{0.6}$, $C_2 = 3.5\sigma_u$, $r_1 = 1.67$, $r_2 = 8.33$, σ_u 为强度极限应力, D_u 是表示材料延性的参数,它受力时面积收缩率 R_a 的关系表示为: $D_u = -\ln(1 - R_a)$, 面积收缩率可以看似等同于应变 ε ^[15] D_m 为损伤度; n 为冻融循环次数。

张峰^[16]则以抗拉强度为冻融损伤的标准,以实验数据为依据,通过数值拟合的方法,得到冻融损伤度 D 和冻融循环次数之间的关系式,即:

$$D = 1 - f_{tsn}/f_{ts0} = 1 - (1 - 0.00296n)^{0.234}. \quad (17)$$

式中: f_{ts0} 为冻融循环前试件的初始抗拉强度; f_{tsn} 为经 n 次冻融循环后试件的抗拉强度。

Cho^[17]通过应变的变化描述了混凝土冻融损伤,得到快速冻融试验结果,发现残余应变与实验结果吻合度较高,建立了两者之间极限函数,同时建立了等效塑性应变的极限状态函数,两者分别为

$$g(\bullet) = 300 - (5632.71 + 4957.77x_1 - 2300x_2 + 6.64x_3 - 4411.99x_1^2 + 163.27x_2^2 - 8.88 \times 10^2 x_3^2). \quad (18)$$

式中: 数值 300 为假设的混凝土破坏时应变临界值。

$$g(\bullet) = 1.0 - (-1.403 + 1.553x_1 - 0.662x_2 + 0.000717x_3 + 6.798x_1^2 + 0.0440x_2^2 + 4.50 \times 10^6 x_3^2). \quad (19)$$

式中: 数值 1.0 为假设混凝土破坏时的等效塑性应变临界值。

混凝土发生冻融破坏时,内部发生的应变很容易监测获取,所以用应变来反映混凝土的冻融损伤和寿命是非常理想的,但是杜鹏^[18]认为应变作为寿命终止的极限指标值有待于确定。

于孝民等^[19]通过试验,用数据拟合的方式得到混凝土断裂能与冻融循环次数的关系为

$$G_F = -0.0025n^2 - 0.0943n + 24.502. \quad (20)$$

式中: G_F 为断裂能. 能量耗散因其包含了应变和强度两方面的内容,从比较广的范围内反映了混凝土的损伤情况。

张连英等^[20]对冻融循环后不同强度等级的混凝土试件进行快速冻融试验,基于不同强度等

级混凝土试件的强度变化情况,并结合冻融循环条件下混凝土单轴压缩试验数据,建立了冻融循环作用下不同强度等级混凝土试块损伤演化方程

$$D = \frac{-0.48586}{1 + \exp[(n - 44.76341)/4.545]} + 0.48586 \quad (21)$$

式中: D 为损伤变量; n 为冻融循环次数。

3 提高冻融环境下混凝土结构抗冻性能对策研究

工程的安全和健康依赖于混凝土结构良好的耐久性,提高混凝土的抗冻性能一定程度上可以提高混凝土的耐久性能,增加结构的使用寿命。诸多研究表明:只有从混凝土内部因素中的质量和构造出发,同时结合外部因素的施加和保护,才能提高混凝土的抗冻性能。

3.1 降低混凝土水灰比

混凝土越密实,水就越难进入混凝土,就能减少混凝土冻融损伤。与混凝土密实度相关的因素是混凝土内部的孔隙率,孔隙率越低,密实度越好,降低水灰比,可以一定程度上降低结构的孔隙率,进而提高混凝土的抗冻性能。李金平^[21]认为水泥品种和水灰比是影响混凝土耐久性的因素,水泥内部熟料成分越多,则表明水泥的水化产物越多,水化产物可以提高混凝土抗冻性能。

3.2 选取合适混凝土品种

文献[22]认为含有自然河流骨料的混凝土具有更大的抗压强度、更大的堆积密度及更好的抗冻性能。李金平^[21]认为从提高结构耐久性角度出发,水泥选用需水量小的普通硅酸盐水泥或选用掺加高细粉煤灰的高性能水泥,同时选用高活性水泥;骨料根据孔隙率最小的原则选用合理的连续级配,严格控制含泥量。

相比于试验,李金平^[21]指出实际工程中,并不是标号越高的混凝土抗冻性能越强,比如高强混凝土早期和后期易开裂的问题,更容易导致冻害侵蚀。

3.3 掺入矿物或者其他物质

程宏强等^[23]认为,掺加一定量的钢纤维,能够有效提高混凝土的抗冻性能,在一定范围内,随钢纤维掺量的增加,强度损伤逐渐减小。

相关研究表明,混凝土抗冻性能与其内部的孔结构、水饱和程度、受冻龄期、以及混凝土强度

因素有关,其中最主要的因素是孔结构。段桂珍^[24]认为掺入适量粉煤灰、硅粉等矿物,可以细化混凝土中的孔结构,既有利于气泡分散,又有利于抵抗冻融危害。同时还提出引气混凝土抗冻性能优于普通混凝土是因为引气混凝土内部充满了封闭气泡,在冻融侵蚀时,能够缓冲冻融产生的压力。混凝土含气量的多少,也影响混凝土的抗冻性,进而影响混凝土的耐久性,其中,平均气泡间隔系数^[25-26]被认为是影响混凝土抗冻性能的重要因素。曾力等人^[27]也通过试验得出结论:对于掺加矿物掺合料混凝土,随着龄期的增长,混凝土的密实性提高,再结合李金平等人^[21]的研究,混凝土密实性提高,抗冻性能也得到提高,从而证实矿物掺合料对混凝土抗冻性能的作用。

3.4 适当控制预应力结构的应力比

刘荣桂^[28]基于损伤理论对预应力混凝土冻融破坏进行研究,发现随着应力水平的提高,混凝土的抗应变能力是增大的,抗冻能力也得到了提高,但是并没有阐述应力大小和抗冻耐久性的关系。周奇峰^[29]在研究无粘结预应力混凝土结构抗冻融耐久性时,认为压力荷载可以在一定程度和范围上缓解冻融造成的损伤,并通过试验对比提出:压应力比在0.01~0.50时,压应力与混凝土冻融循环寿命呈现正相关;而压应力比达到0.75时,混凝土冻融循环寿命较无应力状态低。

4 冻融环境下混凝土耐久性研究趋势

针对冻融环境下混凝土耐久性的研究不论是在理论还是在试验方面均已取得一定的研究成果,这些研究成果的取得对掌握冻融环境作用的耐久性损伤机理及提高冻融环境下结构耐久性具有一定的理论价值及工程意义,现有研究成果包括依据损伤力学原理、基于相关假设、借助数值方法建立了相应的损伤模型;基于试验研究分析冻融循环对混凝土强度、相对动弹性模量、应变等因素的影响,并以此推导出冻融环境下混凝土的剩余寿命等。

目前还存在以下问题亟待解决:诸多混凝土损伤模型中大多是基于理论假设来推导的,并不完全符合实际工程;且现有研究成果大多是针对非预应力结构开展的,针对大尺寸预应力构件的研究较少,考虑到预应力结构在实际工程应用的广泛性,在以后的研究中应针对大尺寸预应力构

件开展冻融环境下的耐久性研究,同时,相关理论如人工神经网络、层次分析、灰色系统、模糊数学等将更广泛的应用于未来混凝土结构耐久性研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国工业建筑出版社, 2009.
- [2] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance [J]. *Journal of the ACI*, 1945, 16(4): 245 – 272.
- [3] POWERS T C, HELMUT H R A. Theories of volume change in hardened portland cements paste during freezing [J]. *Highway Research Board*, 1953(32): 85 – 21.
- [4] 宋玉普, 冀晓东. 混凝土冻融损伤可靠度分析及剩余寿命预测[J]. *水利学报*, 2006, 27(3): 259 – 263.
- [5] 蒋仁言. 威布尔模型族特性、参数估计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [6] 唐光普, 刘西拉, 施士升. 冻融条件下混凝土破坏面演化模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2572 – 2578.
- [7] 蔡昊. 混凝土抗冻耐久性预测模型[D]. 北京: 清华大学土木与水利学院, 1998.
- [8] WILLAM K J, WARNKE E P. Constitutive models for the triaxial behavior of concrete [C] // *International Association of Bridge and Structural Engineers Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses*. Bergamo: Italy: Springer, 1974: 1 – 30.
- [9] 宁作君. 冻融作用下混凝土的损伤与断裂研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2009.
- [10] ABABNEH A N, XI Y. Evaluation of environmental degradation of concrete in cold regions [C] // *Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering*. Maine: American Society of Civil Engineers, 2006: 1 – 10.
- [11] WU Q L, YU H F, CHEN X X. Service life prediction method of concretes based on mass loss rate: establishment and narration of mathematical model [C] // *Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals*, Beijing: American Society of Civil Engineers, 2010: 3253 – 3260.
- [12] 李金玉, 曹建国, 徐文雨, 等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. *水利学报*, 1999(1): 41 – 49.
- [13] 刘荣桂, 付凯, 颜庭成. 基于损伤理论的预应力混凝土冻融破坏研究[J]. *混凝土*, 2007(1): 1 – 3.
- [14] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [15] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. *Mechanics of solid materials* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [16] 张峰, 李术才, 李守凯. 混凝土随机冻融损伤三维预测模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(1): 31 – 35.
- [17] CHO T J. Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, (21): 2031 – 2040.
- [18] 杜鹏, 姚燕, 王玲, 等. 基于冻融损伤的混凝土寿命预测研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(4): 77 – 84.
- [19] 于孝民, 任青文. 冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(1): 80 – 82.
- [20] 张连英, 刘瑞雪, 李雁, 等. 冻融循环下不同强度混凝土损伤力学特性的试验研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(S1): 143 – 146.
- [21] 李金平, 盛煌, 丑亚玲. 混凝土冻融破坏研究现状[J]. *路基工程*. 2007(3): 1 – 3.
- [22] BELGRADE, SERBIA. Frost resistance of concrete with crushed brick as aggregate [J]. *Architecture and Civil Engineering*, 2010, 8(2): 155 – 162.
- [23] 程红强, 高丹盈, 朱海堂. 钢纤维混凝土抗冻耐久性试验研究[C] // *第十二届全国纤维混凝土学术会议*, 北京: 新型建筑材料, 2008: 231 – 233.
- [24] 段桂珍, 方从启. 混凝土冻融破坏研究进展与新思考[J]. *混凝土*, 2013(5): 16 – 20.
- [25] 严捍东, 孙伟, 李钢. 大掺量粉煤灰水工混凝土气泡参数和抗冻性研究[J]. *工业建筑*, 2001, 31(8): 46 – 48.
- [26] 许丽萍, 吴学礼, 黄士元. 抗冻混凝土的设计[J]. *上海建材学院学报*, 1993, 6(2): 112 – 123.
- [27] 曾力, 朱蕴东, 赵卓. 基于渗透性的混凝土力学和耐久性能指标相关性试验[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2013, 34(1): 1 – 4.
- [28] 刘桂荣, 付凯, 颜庭成. 基于损伤理论的预应力混凝土冻融破坏研究[J]. *混凝土*, 2007(1): 1 – 3.
- [29] 周奇峰. 无粘结预应力混凝土结构抗冻融耐久性[D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2008.

The Overview of Concrete Structure Durability under the Freeze-thaw Condition

ZHENG Yuanxun¹, YANG Peibing¹, KANG Haigui²

(1. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: This paper systematically introduced and summarized the research status and development trend of the durability of concrete structure under freeze-thaw condition at home and abroad. The future direction of the research in this field was also been explored. Based on the analysis of related publications, the paper firstly summarized the failure mechanism of concrete in freeze-thaw environment and freeze-thaw test methods and standards. The paper also summarized the durability research methods of reinforced concrete structures and prestressed concrete structures by theoretical analysis and numerical simulation methods. At the same time, the countermeasure to enhance the frost resistance of concrete was put forward. Finally, the future research trend of the durability of concrete structure in freezing-and-thawing was analyzed. The research shows that certain research achievements were made in the study of concrete structure under freeze-thaw condition. However, there are few research results in this field aiming at large size prestressed components which should be taken as the primary research direction in the next step.

Key words: concrete structure; durability; overview; freeze-thaw condition; damage mechanism

(上接第 26 页)

Synthesis of Bonsai-like ZnO and Its Gas Sensing Properties

ZHANG Yonghui, LIU Chunyan, LIU Huanzhen, GONG Feilong, LI Feng

(Zhengzhou University of Light Industry, State Laboratory of Surface and Interface Science and Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 3D bonsai-like ZnO materials with defects on their surfaces have been prepared via a hydrothermal method and a subsequent annealed process for the first time. The characterization of X-ray diffraction (XRD) and TG/DTA suggest that the as-prepared samples are composed with ZnO and $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$. We carefully investigate the morphology of our materials by field emission scanning electron microscopy (FESEM). The result shows that the nanosheets grow symmetrically with a self-assembly process to form every hexagon generation resulting in 3D bonsai-like ZnO structure. Then we fabricate the gas sensor with our ZnO materials and study their gas sensing properties systematically. The results indicate that the as-prepared gas sensor behave the highest sensitivity to 100 ppm ethanol vapor at 340 °C, meanwhile it also exhibits an excellent response-recover property and stability. The 3D bonsai-like ZnO materials have a great potential to design and fabricate ethanol gas sensor in the future.

Key words: ZnO; bonsai-like; hydrothermal method; nanosheets; gas sensor

考虑含筋率影响的弯矩增大系数计算方法

林上顺¹, 陈宝春²

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘 要: 已有文献指出, 钢筋混凝土偏压柱的弯矩增大系数与含筋率有关, 而我国结构设计规范中弯矩增大系数的计算不考虑含筋率的影响。为此, 在收集的 33 根试件资料基础上, 结合所开展的有限元分析, 进行了理论分析, 同时开展有限元参数分析。结果表明: 弯矩增大系数计算式中的曲率影响系数不仅与长细比、偏心率有关, 还与含筋率有关; 在长细比、偏心率相同的情况下, 含筋率越大, 弯矩增大系数越大。根据分析结果, 提出了考虑含筋率影响的曲率影响系数计算公式, 应用收集到的文献试件验证了公式的计算精度。

关键词: 含筋率; 弯矩增大系数; 承载力; 钢筋混凝土偏压柱

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2016.05.007

0 引言

偏心距为 e_0 的钢筋混凝土偏压长柱, 在轴力 N 作用下会产生横向挠度 Δ , 因此构件承担的实际弯矩为 $N(e_0 + \Delta)$, 其值大于初始弯矩 Ne_0 。实际弯矩与初始弯矩的比值常被称为弯矩增大系数或偏心增大系数, 通常用 η 表示^[1-3]。

关于弯矩增大系数的计算方法, 国内外已开展大量的研究。1977 年, 原国家建委建筑科学研究院建筑结构研究所指出“含筋率对 η 是有影响的, 因为配置的钢筋增加了柱的刚度, 使 η 值减小”^[2]。我国 1985 版的公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTJ 023—85)^[3] 第 4.1.19 条规定, 当构件全部纵向钢筋的配筋率大于 3% 时, 混凝土截面惯性矩应乘以 1.2。可见, 在这个阶段, 我国一些规范和文献普遍认为 η 随含筋率的增大而减小。

在我国现行的混凝土结构设计规范 (GB 50010—2010)^[4] 与公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTG D62—2004)^[5]、美国混凝土结构设计规范 (ACI 318—05) 中, 弯矩增大系数仅考虑长细比、偏心率的影响, 与含筋率无关^[6-7]; 然而, 在欧洲混凝土结构设计规范 (Euro-code 2: EN1992-1-1: 2004) 中, 二阶弯矩的计算考

虑了含筋率的影响^[6-7]。可见, 在弯矩增大系数的计算方面, 国内外规范并不一致, 需要进一步开展系统深入的研究。

文献 [8] 在收集既有试件的基础上, 进一步开展了 14 根钢筋混凝土偏压柱极限承载力试验, 发现弯矩增大系数计算式中的曲率影响系数 ζ 不仅与长细比、偏心率有关, 还与含筋率有关, 且 ζ 的计算式对弯矩增大系数 η 的计算结果有较大影响^[8]。笔者在文献 [8] 研究的基础上, 利用 ANSYS 通用软件提供的参数化设计语言 (ADPL) 等高级分析技术^[9-10], 进一步开展有限元参数分析, 对曲率影响系数的计算方法进行研究。

1 规范弯矩增大系数的计算

1.1 中国 JTJ 023—85 规范公式

1985 版公路桥涵设计规范 (JTJ 023—85) 第 4.1.16 条规定, 弯矩增大系数计算式如式 (1)^[3]

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{\gamma N_j}{10\alpha_e E_h I_h \gamma_b} l_0^2}, \quad (1)$$

式中: N_j 为计算纵向力; E_h 为混凝土的弹性模量; I_h 为混凝土截面的惯性矩; l_0 为压杆的计算长度; α_e 为与偏心有关的系数; γ_b 为构件工作条件系数, 取 0.95; γ_c 为材料安全系数, 取 1.25。

收稿日期: 2016-01-18; 收稿日期: 2016-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1305245)

作者简介: 林上顺 (1972—), 男, 福建永泰人, 福建工程学院高级工程师, 博士, 从事桥梁结构研究, E-mail: midas2008@126.com.

1.2 中国 JTG D62—2004 规范公式

JTG D62—2004 规范中,弯矩增大系数计算如式(2)~式(4)^[5]

$$\eta = 1 + \frac{1}{1400e_0/h_0} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2; \quad (2)$$

$$\zeta_1 = 0.2 + 2.7 \frac{e_0}{h_0} \leq 1.0; \quad (3)$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} \leq 1.0. \quad (4)$$

式中: e_0 为轴向力对截面重心轴的偏心距; h_0 为截面有效高度; h 为截面高度; ζ_1 为荷载偏心率对截面曲率的影响系数; ζ_2 为构件长细比对截面曲率的影响系数。

1.3 中国 GB 50010—2010 规范公式

GB 50010—2010 中的弯矩增大系数计算式见式(5)和式(6)^[4]

$$\eta = 1 + \frac{\left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_c}{1300(M/N + e_a)/h_0}; \quad (5)$$

$$\zeta_c = \frac{0.5f_c A}{N}. \quad (6)$$

式中: M 为弯矩设计值; ζ_c 为偏心率对截面曲率的影响系数; f_c 为混凝土抗压强度设计值; A 为构件横截面面积; e_a 为附加偏心距。

式(5)的公式源自 GB 50010—2002 中的弯矩增大系数计算式(与式(2)一致)。根据 GB 50010—2010 的条文说明,该规范修订增加了 500 MPa 钢筋,截面的极限曲率有所增大,为便于计算,同时偏安全考虑,式(2)分母中的 1400 改为 1300; 在弯矩增大系数计算式中,取式(2)中的长细比对曲率的影响系数 ζ_2 为 1.0, 偏心率对曲率的影响系数 ζ_c 与 GB 50010—2002 中的 ζ_1 计算式相同。

1.4 美国 ACI 318—05 规范公式

与 JTG D62—2004 不同,美国规范 (Building Code Requirements For Structural Concrete ACI 318—05) 采用一阶弹性分析计算构件的弯矩,然后通过弯矩放大系数考虑二阶效应的影响,弯矩增大系数如式(7)~式(10)^[6]所示

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N_d}{0.75P_c}}; \quad (7)$$

$$P_c = \frac{\pi^2 E_c I_t}{l_0^2}; \quad (8)$$

$$E_c I_t = \frac{0.4E_c I}{1 + \beta_d}; \quad (9)$$

$$E_c = 4739f_{ck}^{0.5}. \quad (10)$$

式中: f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; β_d 为轴向持续荷载与总轴向荷载的比值; E_c 为混凝土弹性模量。

1.5 欧洲 EUROCODE 2 规范公式

欧洲规范 Eurocode 2: Design of Concrete Structures (EN 1992-1-1: 2004) 中,挠度 Δ 的计算采用基于名义曲率的简化方法。若轴力产生的附加弯矩为 $N_d \Delta$, 则考虑附加弯矩的总弯矩如式(11)。挠度 Δ 的计算考虑了试件的含筋率、徐变系数等因素,如式(12)和式(13)^[7]

$$M = M_0 + N_d \Delta; \quad (11)$$

$$\Delta \approx \Phi \frac{l_0^2}{10}; \quad (12)$$

$$\Phi = \Phi_0 K_r K_\phi. \quad (13)$$

式中: Φ 为截面曲率; Φ_0 为极限曲率; K_r 、 K_ϕ 为计算参数(与含筋率、长细比、混凝土强度等级等相关)。

2 试件的弯矩增大系数计算分析

文献[8]指出,当试件的尺寸、材料以及长细比、偏心率确定时,试件的承载力随弯矩增大系数的确定而确定。反之,若已知试件的承载力,代入钢筋混凝土柱承载力公式,可反求试件的弯矩增大系数 η 。可见,弯矩增大系数与试件的承载力一一对应。

2.1 试件资料介绍

文献[8]收集了大量的钢筋混凝土偏压试件的试验资料,这些试件的长细比和含筋率的统计详见该文献的表4。试件的边界条件为两端铰接;试验装置主要由台座、加载装置、测试仪表等组成;受压构件采用柱顶加载,如图1所示。

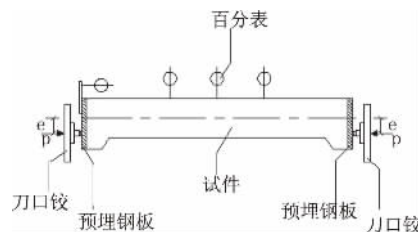


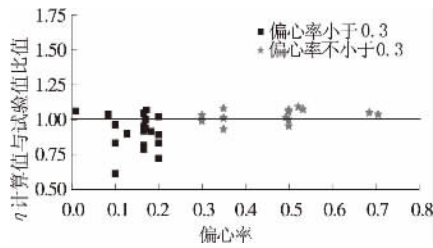
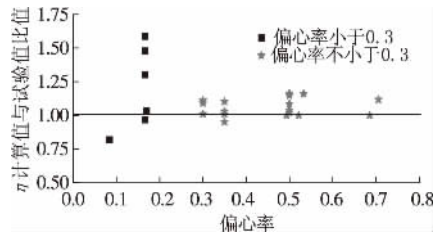
图1 混凝土偏压柱加载布置图^[8]

Fig.1 Loading design of reinforced concrete column

文献[8]开展了14根钢筋混凝土偏压柱的极限承载力试验,各试件的参数详见该文献的表2。根据试件轴向和横向误差的测量结果,试件 F4-3 的横向偏差达到 5 mm(往远加载侧),在进行承载力计算时将横向误差值与设计的偏心距进行叠加,作为该试件的偏心距。

2.2 试件的试验值与规范计算值的比较

分别采用文献[8]提出的 η' 计算方法,以及 JTG D62—2004、GB 50010—2010 中的 η 计算公式,对文献[8]的表2、表4中长细比不小于15的试件进行计算。将 η 除以 η' 得到二者的比值,见图2、图3。

图2 η 与 η' 的比值(JTG D62—2004)Fig.2 The ratio of η and η' (JTJG D62—2004)图3 η 与 η' 的比值(GB 50010—2010)Fig.3 The ratio of η and η' (GB 50010—2010)

从图2可以看出,对于偏心率小于0.3的试件,按JTJG D62—2004计算的 η 大部分偏小;对于偏心率不小于0.3的试件,按JTJG D62—2004计算的 η 大部分偏大.从图3可以看出,按GB 50010—2010计算的 η 大部分偏大,且部分试件偏大较多.

3 有限元参数分析

从文献[8]的有限元分析可知,采用有限元方法进行钢筋混凝土偏压柱的承载力计算具有足够的精度,可用于参数分析.

3.1 有限元参数分析

根据文献[8]的有限元计算结果与试验结果比较可知,二者比值的均值为0.984,方差为0.002,表明有限元计算方法具有较高的精度,可用于参数分析.笔者在相关研究的基础上,进一步开展有限元参数分析,对试验数据进行补充.在有限元参数分析中,试件的边界条件和加载方法与文献[8]的表2、表4中的试件完全相同.应用ANSYS程序计算试件的承载力.其中混凝土采用Solid65实体单元,混凝土的应力-应变关系与GB 50010—2002相同;钢筋采用Link8单元,钢筋的应力-应变关系曲线取理想弹塑性双折线曲线;柱端加载所用的钢垫板采用Solid45单元进行模拟.钢筋与混凝土之间采用分离式单元,假定钢筋与混凝土通过共用节点联结在一起,不考虑相对滑移,其有限元模型如图4(为体现钢筋与混凝土之间的粘结关系,仅示出钢筋混凝土柱的部分模型).计算时,采用增量法对模型进行加载,采用弧长法进行非线性问题的求解,并取偏压柱的

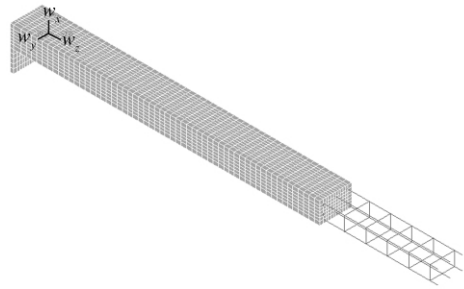


图4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

荷载-位移曲线的峰值点所对应的荷载作为该柱的极限承载力.

有限元参数分析中,钢筋混凝土柱的长细比取值为15.0、17.5、20.0、22.5、25.0、27.5、30.0,偏心率取值为0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40.有限元计算时,截面尺寸及截面形式与第一批试件一致.混凝土立方体强度为38.5 MPa,钢筋屈服强度为300 MPa,弹性模量为 2.0×10^5 MPa.

从工程实际看,钢筋混凝土偏压柱的单侧含筋率一般不大于2.0%,按照JTJG D62—2004关于受压构件最小含筋率的规定,参数分析试件的单侧含筋率取0.251%、0.566%、1.005%、1.571%、1.901%,截面配筋方式为对称配筋,保护层厚度取20 mm.

3.2 弯矩增大系数变化规律分析

3.2.1 弯矩增大系数与长细比的关系

图5(a)~图5(c)给出了含筋率为0.251%、1.005%、1.901%的钢筋混凝土柱,其 η 随长细比的变化规律.由图5可见,钢筋混凝土柱的 η 随长细比的增大而增大;在长细比相同情况下,偏心率越大, η 越小; η 与长细比的关系接近于直线,其斜率随着偏心率的增大而减小;当长细比为15时, η 随偏心率的变化幅度相对较小,随着长细比增大, η 随偏心率的变化幅度逐渐增大;不同含筋率的钢筋混凝土柱的 η 随长细比的变化趋势均相同,但变化幅度并不一致.

3.2.2 弯矩增大系数与偏心率的关系

图6给出了长细比为15、20、25、30的钢筋混凝土柱,在含筋率为0.251%、1.005%、1.901%的情况下,其 η 随偏心率的变化规律.由图6可见,含筋率变化时,钢筋混凝土柱的 η 均随偏心率的增大而减小,当偏心率小于0.3时, η 随偏心率的变化幅度较大;当偏心率不小于0.3时, η 随偏心率的变化幅度较小;在各种含筋率情况下,若偏心率相同, η 均随长细比的增大而增大;在相同的长细比与偏心率情况下,不同含筋率所对应的 η 有所差异.

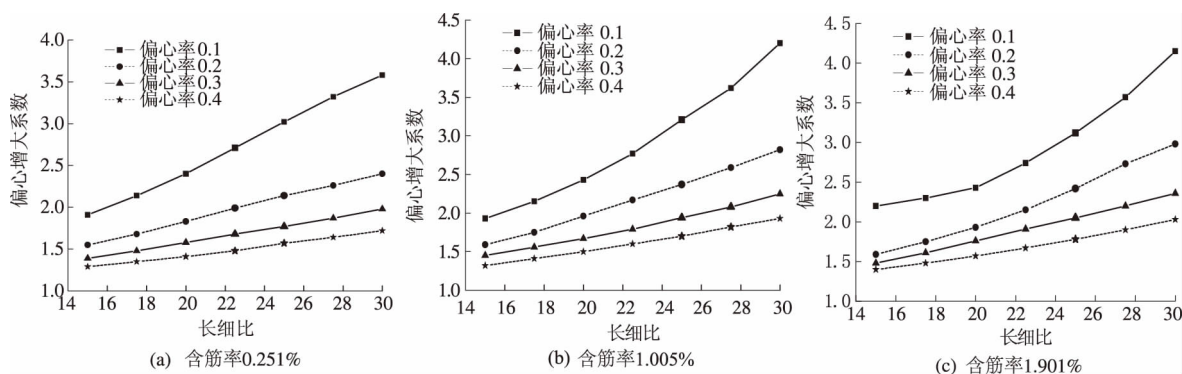


图5 弯矩增大系数与长细比的关系

Fig. 5 Relationship between bending moment increase coefficient and slenderness ratio

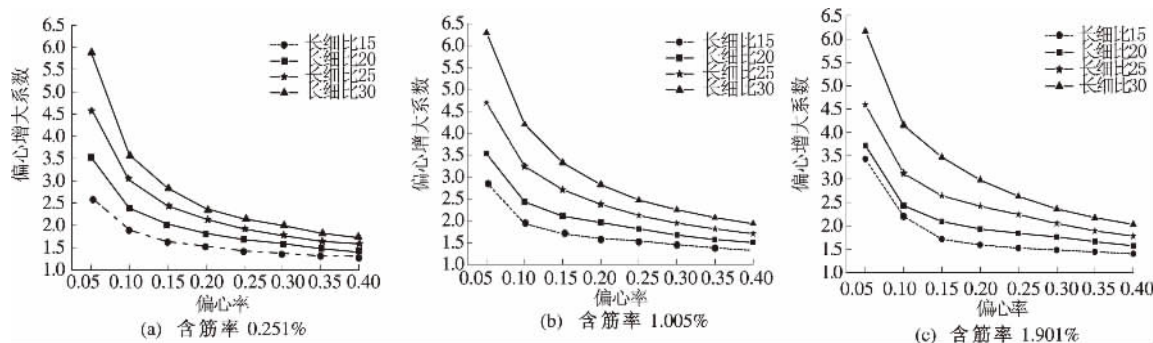


图6 弯矩增大系数与偏心率的关系

Fig. 6 Relationship between bending moment increase coefficient and eccentricity

3.2.3 弯矩增大系数与含筋率的关系

图7分别给出了长细比为15、20、25、30的钢筋混凝土柱,在偏心率为0.1、0.2、0.3情况下,其 η 随含筋率的变化规律。从图7可见,在相同的含筋率情况下, η 随长细比的增大而增大;偏心率越大, η 随长细比的变化幅度越小。

从图7还可以看出,当钢筋混凝土柱的长细比达到30且含筋率不大于1.0%时, η 随含筋率的变化幅度相对较大;当含筋率大于1.0%时, η 随含筋率的变化幅度相对较小。

3.3 包括含筋率参数的弯矩增大系数计算公式

文献[6]推导了弯矩增大系数的计算式,如式(2)所示。在推导过程中,混凝土极限应变 ε_{cu} 取0.0033,长期荷载作用下的压应变增大系数

K_y 取为1.25。对于试件,应不考虑长期荷载的影响,此时 K_y 应取为1.0,式(2)改写为式(14)

$$\eta = 1 + \frac{1}{1.631e_0/h_0} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta \quad (14)$$

式(14)没有考虑含筋率的影响,但从本文第3节的有限元参数分析结果可见,含筋率对弯矩增大系数有一定的影响。因此,笔者将式(14)中的曲率影响系数 ζ 表达为式(15)的形式

$$\zeta = \zeta_1 \left(\frac{e_0}{h_0}, \rho \right) \zeta_2 \left(\frac{l_0}{h}, \rho \right), \quad (15)$$

式中: ρ 为截面单侧含筋率。

根据第3节的分析,当偏心率小于0.3时,弯矩增大系数随偏心率的变化幅度较大;当偏心率不小于0.3时,弯矩增大系数随偏心率的变化幅

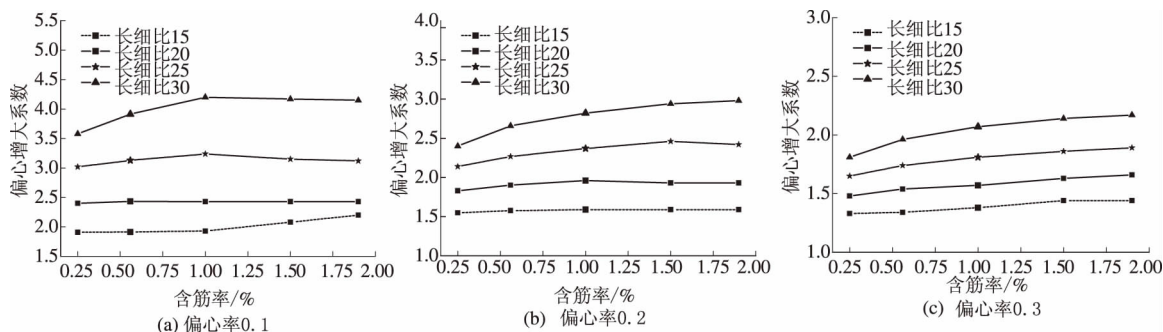


图7 弯矩增大系数与含筋率的关系

Fig. 7 Relationship between bending moment increase coefficient and reinforcement

度较小.因此,以偏心率0.3为界,分别进行分析.

3.3.1 偏心率不小于0.3的钢筋混凝土柱

根据图5、图6、图7等弯矩增大系数计算结果,利用式(14)可求出 ζ 值.计算结果表明,在各种含筋率情况下,当钢筋混凝土柱的长细比相同时,偏心率大于0.3的钢筋混凝土柱的 ζ 值,与偏心率为0.3的钢筋混凝土柱的 ζ 值基本一致.因此,对于偏心率不小于0.3的钢筋混凝土柱,其 ζ 值与偏心率无关,即:当 $\frac{e_0}{h} \geq 0.3$ 时

$$\zeta_1\left(\frac{e_0}{h_0}, \rho\right) = 1, \quad (16)$$

其 $\zeta_2\left(\frac{l_0}{h}, \rho\right)$ 值可按式(17)~式(19)计算

$$\zeta_2\left(\frac{l_0}{h}, \rho\right) = K_1 \zeta_{0.3}; \quad (17)$$

$$K_1 = 0.078(100\rho) + 0.851; \quad (18)$$

$$\zeta_{0.3} = -0.021 \frac{l_0}{h} + 1.426. \quad (19)$$

3.3.2 偏心率小于0.3的钢筋混凝土柱

根据图5、图6、图7等弯矩增大系数计算结果,利用式(14)可求出 ζ 值.为便于工程应用,其 $\zeta_2\left(\frac{l_0}{h}, \rho\right)$ 值仍按式(17)~式(19)计算,从式(15)可见,若 ζ 和 $\zeta_2\left(\frac{l_0}{h}, \rho\right)$ 确定, $\zeta_1\left(\frac{e_0}{h_0}, \rho\right)$ 随之确定.

经过回归与拟合,得到 $\zeta_1\left(\frac{e_0}{h_0}, \rho\right)$ 的计算式

$$\zeta_1\left(\frac{e_0}{h_0}, \rho\right) = A_2 + B_2 \frac{e_0}{h_0} \leq 1.0; \quad (20)$$

$$A_2 = 0.049(100\rho)^2 - 0.213(100\rho) + 0.785; \quad (21)$$

$$B_2 = -0.251(100\rho)^2 + 0.877(100\rho) + 0.774. \quad (22)$$

3.4 考虑含筋率影响的计算公式的精度分析

图8为不同计算结果与实验值之比.按3.3节提出的计算公式对文献[8]的表2、表4中的试件进行承载力计算.笔者公式的计算结果与试验值比值见图8(a),其均值为0.977,方差为0.005;仅少量试件的计算结果大于试验值,最大偏差仅为12.8%.可见,笔者提出的拟合公式具有较高的计算精度.

按GB 50010—2010计算方法对文献[8]的表2、表4中的试件进行承载力计算,计算结果与试验值的比值见图8(b).从图8(b)可见,当试件的长细比大于21时,所有试件的计算结果均小于试验值,且偏低较多,可见GB 50010—2010的计算方法较为保守.

按JTG D62—2004的方法对文献[8]的表2、表4中的试件进行承载力计算,其计算结果与试验值的比值见图8(c),可见较多试件的承载力计算值大于试验值,偏于不安全.

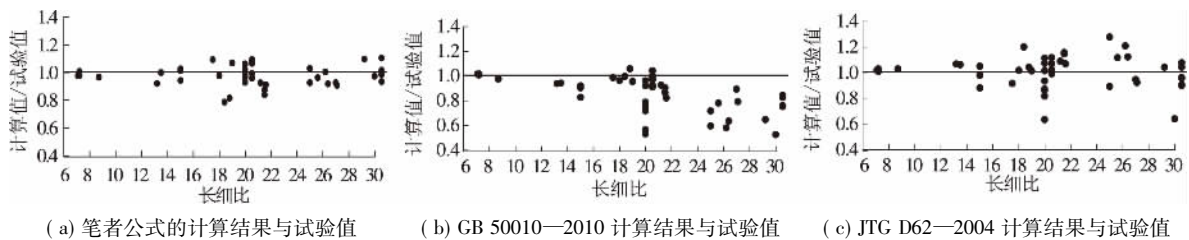


图8 计算结果与试验值比较

Fig. 8 The ratio of the calculation results to experimentd results

3.5 讨论

JTJ 023—85 规范中弯矩增大系数的计算采用刚度表达式.该规范在计算偏压柱的刚度时,考虑了钢筋对截面刚度的贡献,因此根据含筋率对混凝土截面的惯性矩进行适当放大,其结果是含筋率越高,弯矩增大系数越小.在现行的规范中,弯矩增大系数的计算采用曲率表达式,即通过计算钢筋混凝土偏压柱的极限曲率和曲率影响系数,然后进一步计算其弯矩增大系数.因此,旧版规范的弯矩增大系数与构件刚度密切相关;而现行规范的弯矩增大系数与构件的极限曲率密切相关.

文献[11]对钢筋混凝土偏压柱的极限曲率计算进行了研究,指出了含筋率对钢筋混凝土柱的极限曲率有一定的影响,同时指出:对于小偏心

受压构件,规范的曲率影响系数近似公式与配筋率无关,存在较大的不合理性;对于大偏心受压构件,规范的近似取值较为合理.从本文3.3节的分析可见, $\zeta_1\left(\frac{e_0}{h_0}, \rho\right)$ 仅对规范中偏心率不大于0.3的受压构件进行修正;从图6可以看出,对于偏心率大于0.3的试件,当含筋率变化时,弯矩增大系数的变化幅度不大.可见,笔者的分析结论与文献[11]可互相验证.

图8(a)中钢筋混凝土柱的承载力计算,其弯矩增大系数计算式中的曲率影响系数均考虑了含筋率的影响;而图8(b)和图8(c)中钢筋混凝土柱的承载力计算,分别采用GB 50010—2010规范和JTG—2004规范的公式,其弯矩增大系数计算

式中的曲率影响系数不考虑含筋率的影响,其计算结果与试验结果存在一些偏差.计算误差的根源在于曲率影响系数的计算不够合理,从而导致弯矩增大系数的计算误差,并影响了钢筋混凝土偏压柱承载力计算结果的精度.

4 结论

钢筋混凝土偏压柱的试验和有限元参数分析表明,曲率影响系数不仅与偏心率和长细比有关,还受到含筋率的影响;在笔者的参数分析范围内,含筋率越大的偏压柱,其弯矩增大系数越大.

笔者提出的包括含筋率参数的曲率影响系数计算式,对规范的弯矩增大系数计算式进行了修正,其计算精度比现有的不考虑此影响的我国规范计算方法有所提高.式(14)的弯矩增大系数计算式适用于钢筋混凝土偏压试件的承载力计算,然而在实际工程中,钢筋混凝土压弯构件在长期荷载作用下的极限压应变可能大于试件,还可能由于施工误差存在附加的偏心距,所有这些因素均将导致其弯矩增大系数大于短期荷载作用下的试件,因此,弯矩增大系数的计算是一个复杂的问题,还有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- [2] 国家建委建筑科学研究院建筑结构研究所. 钢筋混凝土偏心受压构件的纵向弯曲[C]//钢筋混凝土结构研究报告选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1977: 182-200.
- [3] 中华人民共和国交通部. JTJ 023—85 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] 贡金鑫, 魏巍巍, 胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [7] European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of Concrete Structures (EN 1992-1-1: 2004) [S], Lausanne: Elsevier Science Publishers, 2004.
- [8] 陈宝春, 林上顺. 钢筋混凝土偏压柱承载力计算中的曲率影响系数[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 156-163.
- [9] 韩艳, 陈政清, 李开言. 在 ANSYS 中实现双肢薄壁桥墩参数优化设计的方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(6): 15-18.
- [10] 刘世忠, 刘永健, 程高, 等. 公路桥梁车桥耦合振动数值分析方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(1): 94-98.
- [11] 陈旭, 周东华, 韩春秀, 等. 钢筋混凝土柱稳定问题的图算法[J]. 工程力学, 2014, 32(10): 106-113.

Calculation Method of Moment Enlargement Coefficient Considering Effect of Reinforcement Ratio

LIN Shangshun¹, CHEN Baochun²

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, College of Civil Engineering, Fujian University of Engineering, Fuzhou, Fuzhou 350118, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: It is pointed out that moment enlargement coefficient of eccentrically loaded reinforced concrete column is related with reinforcement ratio which is not yet considered by China structural design specification. Therefore, based on 33 specimen test data from references and load-bearing capacity tests of 14 eccentrically-loaded reinforced concrete columns, theoretical and FEM parametric analysis were carried out. Results show that the curvature influence coefficient in the calculation formula of moment enlargement coefficient is not only related with slenderness ratio and eccentricity, but also with reinforcement ratio. Bending moment enlargement coefficient increases with reinforcement ratio under the condition of constant slenderness ratio and eccentricity. A calculation formula of curvature influence coefficient considering the effect of reinforcement ratio is put forward with its accuracy verified by specimen data from published papers.

Key words: reinforcement ratio; bending moment enlargement coefficient; load-carrying capacity; eccentrically loaded reinforced concrete column

端部质量对有无损伤悬臂梁的模态影响分析

闫安志¹, 陶天增², 张振华¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116000)

摘要: 工程实际中许多结构可简化为端部带有集中质量的悬臂梁, 笔者通过数值模拟软件建立了端部带有集中质量的悬臂梁有限元模型, 并进行了模态分析. 研究了端部集中质量的改变对悬臂梁固有频率的影响, 同时建立带有 I 型裂纹的悬臂梁(端部带有集中质量与不带有集中质量两种)模型, 改变裂纹的位置和深度, 研究了裂纹深度和裂纹位置对悬臂梁的频率变化规律. 通过对比发现, 裂纹越靠近端部对梁的频率影响越小, 集中质量对带有裂纹悬臂梁固有频率有一定的影响.

关键词: 悬臂梁; 端部集中质量; 转动惯量; 裂纹; 有限元

中图分类号: TB123

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.008

0 引言

工程实际中很多结构可简化为端部带有集中质量的悬臂式结构, 例如端部带有发动机的飞机机翼, 大型吊车, 大型悬索大桥, 悬臂挑梁, 共振式破碎机, 并且生活中的悬臂梁大部分都为柔性悬臂梁(梁长/梁高 > 5). 此类结构都可简化为端部带有集中质量的悬臂梁(CBCM, cantilever beam with concentrated mass on its free end)来研究, 对于此类结构关注更多的是其振型和频率等. 陆海桃等^[1]通过试验和数值模拟研究了集中质量对悬臂梁振动模态的影响, 文中只考虑了质量大小对悬臂梁频率的影响. 王栋等^[2]对附带有集中质量的转动惯量梁做了相关的理论分析, 并建立了梁-质量系统的频率特征方程. Wang 等^[3]根据达朗贝尔原理将悬臂梁自由端的集中质量等效为惯性力和惯性力矩来研究其动力特性. Mousavi^[4]和 Abramovich^[5]分别对带有端部集中质量的欧拉梁和铁木辛柯梁进行了动力学研究. 吴泽玉^[6]对于振型的构件位移分解及规律进行了研究.

结构中的裂纹是结构安全性的一大隐患. 初始裂纹可能是制造缺陷或长期使用过程中由于过载或材料疲劳而产生的, 柔性结构一般对所处的工作环境也比较敏感, 所以柔性结构产生物理缺陷的几率比较大^[7]. 研究不同端部质量情况下, 不同位置的裂缝、不同深度的裂缝对悬臂梁固有

属性的影响, 具有良好的代表性. 裂纹对悬臂梁振动频率的影响, 王璋奇^[8]、江凡^[9]通过理论假设建立了含有裂纹的悬臂梁的振动微分方程, 并进行了求解, 得出了特征方程. Morassi^[10]、沈亚鹏^[11]、赵彬^[12]、刘文光^[13]从理论方面研究了单裂纹、多裂纹对悬臂梁振动的影响以及振动与疲劳耦合分析. 葛永庆^[14]通过数值模拟研究了裂纹参数对叶片静频、动频的影响.

为了更加贴近工程实际, 笔者以工程中常见的 CBCM 为研究对象, 建立了 CBCM 有限元模型, 分析了考虑和不考虑集中质量转动惯量对 CBCM 的弯曲和扭转频率的影响, 以及 CBCM 在有裂纹发生时, CBCM 的频率变化规律.

1 端部带有集中质量的悬臂梁有限元模型以及理论计算

振动工程中常用两种梁模型: 欧拉-伯努利梁和铁木辛柯梁. 其中, 欧拉-伯努利梁只考虑弯曲变形, 铁木辛柯梁既考虑弯曲变形又考虑转动惯量和剪切变形. 由文献[15]可知, CBCM 的特征方程为:

$$\alpha L \beta = \frac{1 + \operatorname{ch} \beta L \cos \beta L}{\operatorname{ch} \beta L \sin \beta L - \operatorname{sh} \beta L \cos \beta L}$$

式中: $M/\rho A L = \alpha$, α 的物理意义为附加质量与梁质量之比; ρ 为梁的密度; A 为梁的横截面积; L 为梁的长度; $\beta^4 = M\omega^2/EI\alpha L$, ω 为梁的固有频率; E

收稿日期: 2016-02-30; 修订日期: 2016-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308195); 河南省科技厅科技攻关项目(132102210252)

作者简介: 闫安志(1965—), 男, 河南人, 河南理工大学教授, 博士, 主要从事结构振动控制研究, E-mail: yanzhi@hpu.edu.cn.

为弹性模量; I 为梁的转动惯量.

在 ANSYS 中既支持自定义梁截面又基于铁木辛柯梁的梁单元是 Beam188 和 Beam189. 笔者取工字钢(GB 706—88)梁, 型号 32a, 梁长取 2 m, 采用 Beam189, 将悬臂梁划分为 100 个单元, 采用 Mass21 质量点单元代替梁端部集中质量. 悬臂梁模型如图 1 所示.

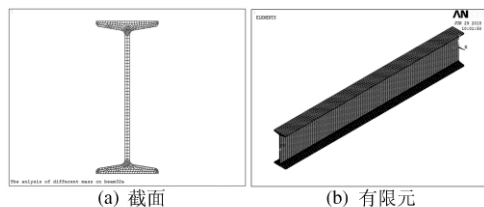


图 1 工字钢截面和钢梁有限元模型

Fig. 1 I-beam section and I-beam stereogram finite element model

2 模态分析

模态是结构的一种固有振动特性, 是一种研究结构动力特性的方法. 通过 ANSYS 对其进行模态分析, 可得到悬臂梁的前六阶模态如图 2 所示.

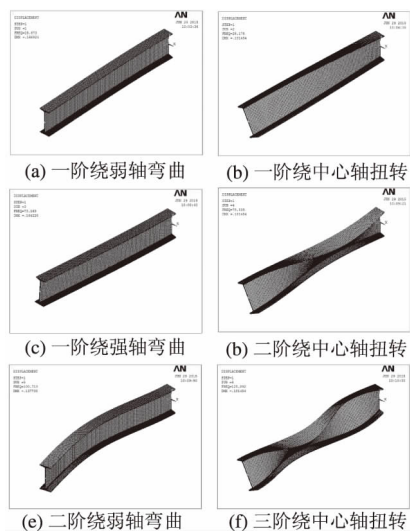


图 2 端部带有集中质量的悬臂梁前六阶模态

Fig. 2 First six modes of CBCM

为了研究集中质量对悬臂梁频率的影响, 利用 ANSYS 的 Block Lanczos 算法, 得到梁各阶频率随质量比的变化规律, 如图 3(a) 所示.

为了模拟端部较大质量对弯曲振动的影响, 利用 mass21 单元的参数特性, 将端部质量假定为一密度为 7850 kg/m^3 的球体, 仅考虑球体的质量及其绕梁轴线的转动惯量的影响, 忽略球体半径的影响, 梁固有频率随质量比的变化规律, 如图 3(b) 所示.

从图 3(a) 可知, 一阶绕弱轴弯曲、一阶绕强

轴弯曲和二阶绕弱轴弯曲频率随 α 的增大而减小. 当 α 为 0.96 时, 一阶绕弱轴和一阶绕强轴弯曲频率变化最大, 分别减小 55% 和 54%; 但是, 二阶绕弱轴弯曲频率, 仅减小 17%. 然而, 一阶、二阶和三阶扭转频率却不受集中质量变化的影响, 原因是集中质量单元加在了轴线的端部中心节点, 并且忽略了集中质量的转动惯量.

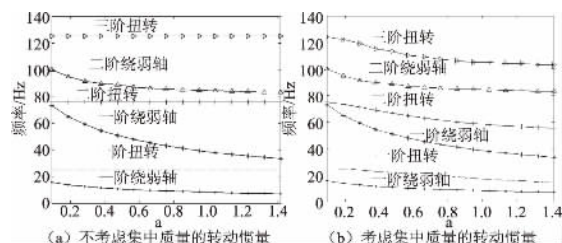


图 3 悬臂梁固有频率随质量比的变化

Fig. 3 The natural frequency of CBCM with the change of the mass

从图 3(a) 和 (b) 对比可知, 当考虑集中质量的转动惯量时, 梁的一阶绕弱轴、一阶绕强轴和二阶绕弱轴弯曲频率随质量比的变化规律与不考虑集中质量转动惯量时相同; 其前三阶扭转频率随增大而减小. 当为 0.96 时, 一阶、二阶和三阶扭转频率分别减小了 43%、26% 和 17%.

3 裂纹对 CBCM 的频率变化

选取长 2 m, CBCM 端部集中质量为 30 kg (α 为 0.19) 和无集中质量的梁作为计算模型. 研究 7 个不同位置裂纹及同一位置上不同深度裂纹对悬臂梁固有频率的影响, 同时研究质量比 α (不考其转动惯量) 对有裂纹时的悬臂梁固有频率的影响. 笔者在距离梁固定端 0、0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 和 1.8 m 处, 分别生成裂纹深度为 5、10、20、30、40、50 和 60 mm 的 7 组模型. 在计算中, 由于循环地运行 ANSYS, 为了节约时间, 编制 MATLAB 程序调用 ANSYS 进行计算^[16-17].

采用 solid95 单元建立带有裂纹的悬臂梁. 由于裂纹的形状对梁的振动频率没有明显的影响^[18], 故而为了方便, 采用 I 型裂纹. 有裂纹的悬臂梁模型如图 4(a) 所示, 裂纹细节如图 4(b) 所示.

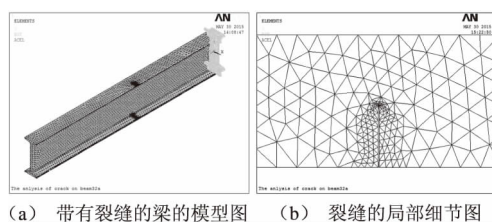


图 4 带有裂纹的梁模型及裂纹局部图

Fig. 4 I-beam model with crack and its crack local graph

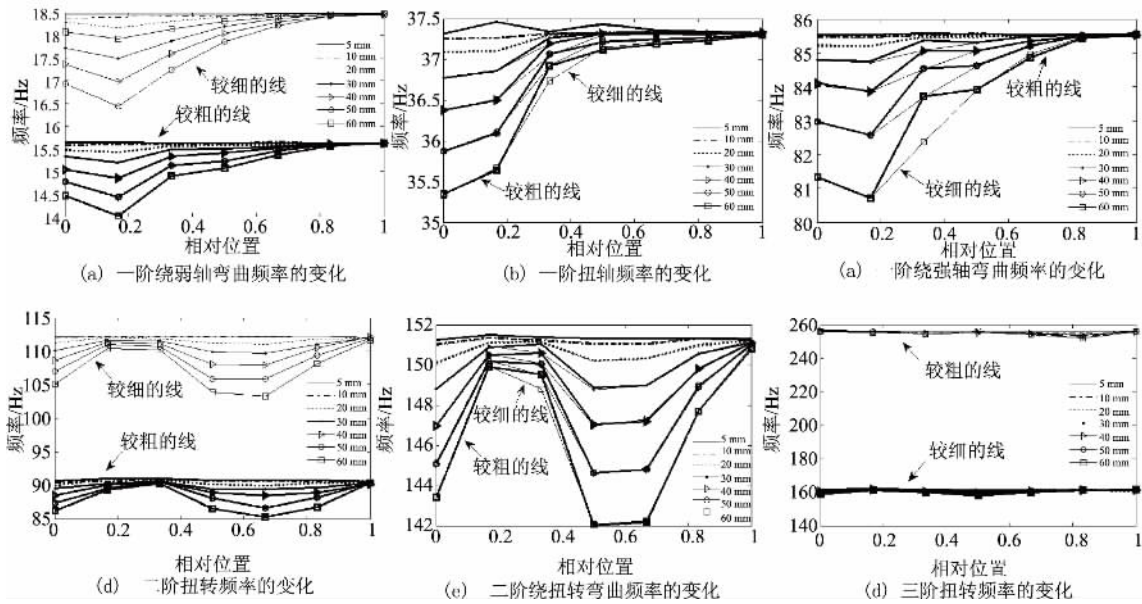
为了对比研究裂缝的位置和深度对悬臂梁振动特性的影响,表 1 给出了 CBCM 和无集中质量的悬臂梁模型在无裂缝情况下的前六阶固有频率. 笔者将具有相同深度但裂缝位置变化的悬臂梁模型编为一组,每组有 7 种裂缝位置不同的

梁,共 7 组. 这 7 组悬臂梁的前六阶固有频率随裂缝位置变化的情况,如图 5 所示. 由图 5 可知,悬臂梁的各阶固有频率随裂缝位置的变化基本一致,距离固定端越远影响越小. 有集中质量时,仅仅使得梁的频率数值相应减小.

表 1 无物理缺陷(裂缝深度为 0 mm)的悬臂梁前六阶频率

Tab. 1 First six order frequency of a cantilever beam without physical defect

阶次	一阶绕弱轴弯曲	一阶绕中心扭转	一阶绕强轴弯曲	二阶绕中心扭转	二阶绕弱轴弯曲	三阶绕中心扭转
固有频率(无集中质量)	18.434	37.335	85.550	112.24	151.35	256.29
固有频率(CBCM)	12.418	37.311	74.671	85.550	146.67	151.35



注: 较细线表示无集中质量,较粗线表示 CBCM 梁

图 5 前六阶固有频率随裂纹深度和位置的变化

Fig. 5 First six natural frequency of the beam varies according to depth and position of the crack

裂缝深度对 CBCM 的影响: 将具体的频率值与表 1 中的数据进行比较,当裂缝深度为 5 mm、10 mm 时对梁的各阶频率影响很小,其中 5 mm 深裂缝对于一阶扭转频率几乎没有影响,10 mm 深度裂缝对于各阶频率影响也比较小. 当裂缝深度大于 10 mm 时,影响很明显,其中 60 mm 深度裂缝对各阶的频率影响都很大,例如在二阶绕弱轴弯曲频率中,频率差值最大达到 8 Hz.

裂缝位置对 CBCM 的影响: 将具体的频率值与表 1 中的数据进行比较,0 mm 处出现裂缝,对一阶扭转频率影响最大; 300 mm 处(梁的 3/20 处)出现裂缝时,对一阶绕弱轴、一阶绕强轴弯曲频率影响最大; 900 mm 处(梁的 9/20 处)出现裂缝时,对二阶绕弱轴弯曲、三阶扭转频率影响最大; 1 200 mm 处(梁的 3/5 处),对二阶扭转、二阶绕弱轴弯曲频率影响最大. 频率变化的原因是由裂缝位置和固有振型节点(线)的远离程度决定

的. 在振型节点附近出现裂纹对该阶频率影响很小,而在振型腹点处出现裂纹,则对振型所对应的频率影响很大. 且裂纹越深,梁的频率越低,说明裂缝的出现降低了梁的刚度. 在前五阶频率中,频率大致都收敛到一点处,也即出现在 1 800 mm 处(梁的 9/10 处)的裂缝对梁的前五阶频率影响非常小.

考虑端部集中质量对有裂纹悬臂梁的影响时,一阶绕弱轴弯曲、二阶扭转、三阶扭转频率,整体上与不考虑集中质量时的规律一样,但是其整体上比不考虑集中质量时小.

4 结论

通过对 CBCM 梁的建模和模态分析,得到如下有结论:

(1) 随着悬臂梁端部集中质量的增加,梁的各阶弯曲频率相应减小. 当端部质量较小时,可以

不考虑集中质量的转动惯量对扭转频率的影响。

(2) 当端部质量较大时,必须考虑集中质量的转动惯量影响。随着悬臂梁端部集中质量的增加,梁的各阶弯曲频率和扭转频率相应减小。

(3) 裂纹深度和位置对悬臂梁频率影响很大,裂纹位置对悬臂梁不同阶振型对应的频率影响规律各不相同,裂纹深度越大,梁固有频率越低。同时端部有集中质量时,对各阶固有频率的影响规律各不相同。

参考文献:

- [1] 陆海桃,全艳文. 集中质量对悬臂梁振动模态影响的分析研究[J]. 装备制造技术, 2014(10): 122-124.
- [2] 王栋. 附带有考虑集中质量的转动惯性的梁固有振动分析[J]. 振动与冲击, 2010(29): 221-225.
- [3] WANG H, MENG Q, FENG W. Discussion of the improved methods for analyzing a cantilever beam carrying a tip-mass under base excitation [J]. Shock & Vibration, 2014, 20(1): 153-160.
- [4] MOUSAVI S A, HEPPLER G R Comments on 'natural frequencies of a uniform cantilever with a tip mass slender in the axial direction' [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(12): 2964-2968.
- [5] ABRAMOVICH H, HAMBURGER O. Vibration of a cantilever timoshenko beam with a tip mass [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 148(1): 162-170.
- [6] 吴泽玉, 王栋炜, 汪志昊. 基于振型的构件位移分解及规律研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(5): 68-72.
- [7] 李济泽. 具有裂缝的柔性悬臂梁的振动特性研究[D]. 福建: 福州大学机械工程系, 2003.
- [8] 王璋奇, 贾建援. 悬臂梁裂纹参数的识别方法[J]. 机械强度, 2002, 24(2): 225-279.
- [9] 江凡, 薛冬新, 宋希庚. 裂纹悬臂梁的扭转弹簧模型及其实验验证[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(2): 143-145.
- [10] ANTONINO M. Crack-induced changes in eigenparameters of beam structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(9): 1798-1803.
- [11] 沈亚鹏, 唐照千. 裂纹对悬臂梁板振动频谱的影响[J]. 固体力学学报, 1982, 2: 247-251.
- [12] 张佳文, 赵彬. 含多裂纹悬臂梁的振动分析[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2009, 18(3): 1-4.
- [13] 刘文光, 陈国平. 含裂纹悬臂梁的振动与疲劳耦合分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 140-144.
- [14] 葛永庆, 安连锁. 裂纹参数对叶片固有频率影响的研究[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 519-522.
- [15] 张义民. 机械振动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 3.
- [16] 李朔东, 马纲. 基于 ANSYS 的模态分析二次开发及应用[J]. 航天制造技术, 2004, 10: 8-11.
- [17] 宋宏伟, 刘浩. 基于 MATLAB 与 ANSYS 的结构优化设计[J]. 大连民族学院学报, 2011, 13(3): 284-287.
- [18] 张利民, 王克明, 吴志广. 叶片模态分析的单元类型选择[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(2): 21-24.

The Mode Analysis of the Cantilever Beam with Concentrated Mass on Its Free End in the Case of Damage and No Damage

YAN Anzhi¹, TAO Tianzeng², ZHANG Zhenhua¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Department of Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: Many structures in the engineering, which can be simplified as cantilever beam with concentrated mass on its free end. The finite element model of the cantilever beam with concentrated mass on its free end is established, and the mode analysis of it is carried out in this paper. The effect on the natural frequency of the CBCM in the case of the mass change is studied. At the same time, a kind of cantilever beam model with I shaped crack is established. This kind of model includes two models: the free end of the beam with and without concentrated mass. Changing the position and depth of the crack, it can be found that the frequency of the beam is affected mostly by the crack depth. And the position of crack is closer to its free end of the beam, the influence of frequency of the beam is smaller. By comparison, it can be found that the lumped mass have a certain effect on the natural frequency of cracked cantilever beam. This research has certain guiding significance to optimization design, damage detection, maintenance of the cantilever beam with concentrated mass on its free end.

Key words: cantilever beam; concentrated mass; moment of inertia; crack; finite element method

文章编号: 1671-6833(2016)05-0043-04

高速逆流色谱法分离红色西瓜瓤粗提物中番茄红素

阮宝玉^{1,2}, 赵文恩¹

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 食品工业学院 食品工业系, 越南 岬港)

摘 要: 应用高速逆流色谱法(HSCCC)从红色西瓜瓤粗提取物中分离番茄红素. 在超声波作用下以 $v_{\text{石油醚}}:v_{\text{丙酮}}=2:1$ 作为提取溶剂, 从400 g成熟西瓜瓤匀浆中提取粗制番茄红素, 至所有色素提取出. 然后用 $v_{n\text{-正己烷}}:v_{\text{乙醇}}:v_{\text{二氯甲烷}}=20:12:7$ 构成的两相溶剂系统进行制备高速逆流色谱分离, 从约223 mg粗提物中得到约30 mg番茄红素. 用峰面积归一化法计算, 产品纯度为98.3%.

关键词: 番茄红素; 分离; 高速逆流色谱法; 西瓜

中图分类号: TS207.3; TS202.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2016.05.009

0 引言

番茄红素是具有最强单线态氧和过氧自由基清除活力的一种类胡萝卜素^[1], 它能防止过氧亚硝基导的细胞修饰作用, 也能降低因接触过氧化剂引起的脂质过氧化和氧化性DNA损伤^[2]. 流行病学、组织培养和动物研究提供的令人信服证据都表明, 番茄红素可防止慢性病发生, 有对抗包括前列腺癌和肺癌等广谱癌症的化学防治效果, 可降低心血管疾病的发生率, 在与炎症关联的几种疾病模型上显示出抗炎效应, 对降低骨质疏松和包括阿尔茨海默氏症的神经退行性疾病危险都有健康有益作用^[3-4]. 目前, 番茄红素不仅被广泛用于医药、食品和饮料工业(作为食品着色剂), 还在化妆品配方中使用. 同时在膳食补充品、功能食品和化学分析领域对高纯度番茄红素的需求日益增加.

番茄红素存在于番茄、红瓤西瓜、红柚、番石榴和木鳖果中, 它通常由番茄及其制品中分离和提纯获得^[5,6]. 但是已有报道商品红瓤西瓜中番茄红素达45.1~53.2 $\mu\text{g/g}$ 鲜重(fw), 平均含量为48.2 $\mu\text{g/g}$ fw, 这比报道的番茄中番茄红素的含量(平均含量30.2 $\mu\text{g/g}$ fw)要高60%^[7]. 最近研究结果表明, 美国50个商品级品种的红瓤西瓜中番茄红素的含量为33~100 mg/kg fw, 绝大多数有籽杂交种的平均番茄红素含量为50~70 mg/kg fw. 无籽类型的番茄红素含量高的为70~

90 mg/kg fw, 极高的超过90 mg/kg fw^[8]. 由此可见, 西瓜是一种提取纯化番茄红素极好的原料.

HSCCC是一种高效分离包括类胡萝卜素在内多种天然产物的技术^[9-11]. 作为一种液-液分配色谱术, HSCCC能避免由于在固定相上不可逆吸附而导致的样品损失或变性, 从而有较高的天然产物分离效能和优秀的产物回收率. HSCCC已成功用于从番茄酱中分离番茄红素^[12-14], 但对用HSCCC从西瓜中分离番茄红素至今未见有报道, 本试验用HSCCC从西瓜瓤的粗提取物中分离番茄红素.

1 试验部分

1.1 仪器

本研究使用TBE-300B高速逆流色谱仪(上海同田生物技术有限公司, 中国上海). 仪器装有3个制备型的聚四氟乙烯螺旋分离柱(内径1.6 mm, 总容积300 mL)和一个20 mL的进样环路. β 值($\beta=r/R$, 其中 r 是从分离柱到支架轴的距离, R 是旋转半径即旋转器的夹持器轴和中心轴之间的距离)从内部端口的0.47变化到外部端口的0.73. 转速0~1 000 r/min可调. 系统装有一个TBP5002泵(流速为: 0.1~50 mL/min; 增量: 0.5 mL/min; 压力范围: 0~2 MPa). HSCCC系统还配有S型的恒流泵和8823B的UV-Vis检测器(北京新技术研究所), 在波长450 nm下监测, 运用N2000软件. 通过HX 1050恒温循环仪(张江高科技园区, 中国上海)调整实验温度.

收稿日期: 2016-04-01; 修订日期: 2016-06-14

作者简介: 阮宝玉(1979—), 男, 越南岬港人, 郑州大学博士研究生, 主要从事食品化学研究, E-mail: ngbangoc@yahoo.com.

1.2 试剂

高效液相色谱分析用色谱级的乙腈和甲醇为天津四友精细化学品有限公司产品, HSCCC 用其他有机溶剂为国产分析纯级, 氯仿经纯化后用于高效液相色谱分析。

1.3 红瓢西瓜番茄红素粗提物的制备

按文献[15]的方法稍加修改提取番茄红素粗提取物。为防止提取时番茄红素降解和异构化, 使用棕色玻璃仪器, 提取过程在弱光下进行。取 400 g 成熟西瓜瓢匀浆, 超声波作用下以 $v_{\text{石油醚}}: v_{\text{丙酮}} = 2:1$, 按固液比约 1:3 (g/mL) 提取至瓜瓢所有颜色除去。提取物用布氏漏斗抽滤。合并滤液并转移至分液漏斗, 用 250 mL 蒸馏水洗涤 3 次, 洗出水溶物。排出水相, 再用 100 mL 蒸馏水洗涤有机相。在低于 35 °C 下将有机相旋蒸至干, 干燥物在零下 80 °C 的氮气中保存。

1.4 两相溶剂系统和样品液的制备

无固相支持物, 溶质的保留完全取决于其在相互平衡的两相体系之间的分配比率, 即分配系数 K 。 K 值通过分离漏斗的分配实验获得, 依据公式 $K = C_{\text{固定相}}/C_{\text{流动相}}$ 计算获得。在前期实验的基础上, 本分离纯化选用由 $v_{n\text{-正己烷}}: v_{\text{乙腈}}: v_{\text{二氯甲烷}} = 20:12:7$ 构成的两相溶剂系统。在使用前室温下用力摇动分液漏斗 2 min 以使混合溶剂彻底平衡, 然后静置 2 h, 两相溶剂分开。样品液是将红瓢西瓜粗提物溶于 HSCCC 溶剂系统的下相获得, 15 mL 样品溶液中含有约 223 mg 番茄红素粗品。

1.5 高速逆流色谱分离过程

HSCCC 以反相模式运行。在固定相(上相)填充装柱之后, 开启逆流分配系统开关, 然后以 850 r/min 转速运行装置, 这时将流动相(下相)以 1.5 mL/min 的流速泵入柱子首端。为实现色素的有效分离, 在流体动力平衡建立后立即将溶于下相中的样品通过注射器经由进样器注入柱中。柱温设定为 25 °C, 用 UV-Vis 检测器在 450 nm 下连续监测柱子的流出液, 收集峰值部分流出液, 以获得番茄红素。

1.6 高效液相色谱法(HPLC)对 HSCCC 样品的分析

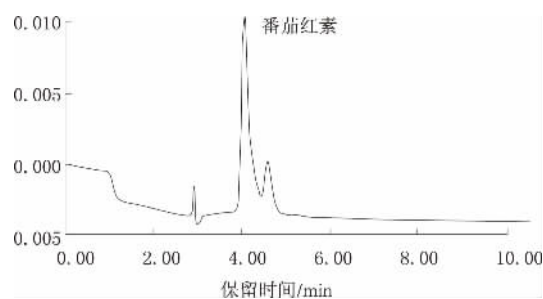
高效液相色谱分析在配有 1525 泵和 2998 光电二极管阵列检测器的 Waters 液相色谱系统上进行, 用 Empower Software (Waters) 进行数据分析。将 10 μL 溶于流动相的样品经 0.45 mm 的膜过滤后注入高效液相色谱柱(Water Spherisorb 5 μm ODS2 4.6 \times 250 mm)。对第一轮和第二轮 HSCCC 收集产物分析时使用的流动相为 $v_{\text{乙腈}}: v_{\text{甲醇}}: v_{\text{氯仿}} = 7:2:1$, 进行产物纯度分析和鉴别时使用的新流动相为 $v_{\text{乙腈}}: v_{\text{甲醇}}: v_{\text{氯仿}} = 5:3:2$ 。流速为

1.0 mL/min。

2 结果与讨论

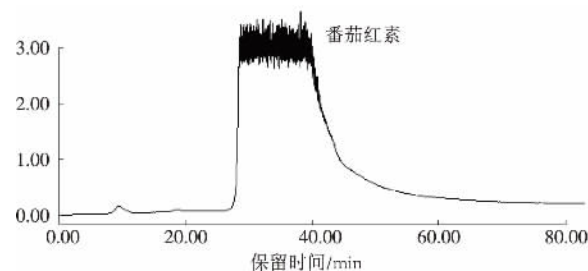
在将红瓢西瓜色素粗提物溶于流动相后进行 HPLC 分析, 红瓢西瓜的色素主要为番茄红素。图 1 是 HPLC 分析的红瓢西瓜色素粗提取物的色谱图。由于 2 min 保留时间之前的吸收干扰, 依 450 nm 处吸收得到的总峰面积计算得出的粗提物中只含有 47.6% 的番茄红素。

红色西瓜瓢的色素粗提物直接用来进行 HSCCC 分离如图 2 所示。合适的非水性两相溶剂系统是利用 HSCCC 达到纯化的关键点, 参考高效液相法分析类胡萝卜素最常用溶剂, 并避免使用毒性较大的氯仿, 选择 n -正己烷、乙腈和二氯甲烷 3 种溶剂。经多次 HSCCC 分离试验, 发现体积比为 20:12:7 的 n -正己烷:乙腈:二氯甲烷溶剂系统可达到理想的番茄红素分离效果。正如图 2 在 450 nm 吸收所示, 随着 HSCCC 分离操作的进行番茄红素得到分离纯化, 主峰包括几乎全部目标化合物番茄红素。



HPLC 条件: 色谱柱: Water Spherisorb 5 μm ODS2 4.6 \times 250 mm; 流动相: 乙腈/甲醇/氯仿 (7:2:1, $v/v/v$); 流速: 1.0 mL/min。

图 1 红瓢西瓜色素粗提物在 450 nm 处的 HPLC 色谱图
Fig. 1 HPLC chromatogram of the crude extract from red watermelon flesh detected at 450 nm



HSCCC 条件: 溶剂系统: n -己烷/乙腈/二氯甲烷 (20:12:7, $v/v/v$); 流速: 1.5 mL/min; 转速: 850 rad/min。

图 2 制备 HSCCC 对红瓢西瓜色素粗提物中番茄红素的分离
Fig. 2 Lycopene isolation of the crude extract from red watermelon flesh by preparative HSCCC separation

经过两轮 HSCCC 可从 400 g 红西瓜瓤中获得约 223 mg 粗提取物,进而得到约 30 mg 番茄红素.用 HPLC 对 HSCCC 分离的产物进行纯度鉴别,如图 3(a) 所示,第一轮 HSCCC 后所得番茄红素产物纯度是 87%. 为得到更高纯度的番茄红素制品,通过进行第二轮 HSCCC 将第一轮 HSCCC 的产物做进一步分离,所得番茄红素产物的纯度提高到 98.3% (图 3(b)), 条件与图 1 相同.

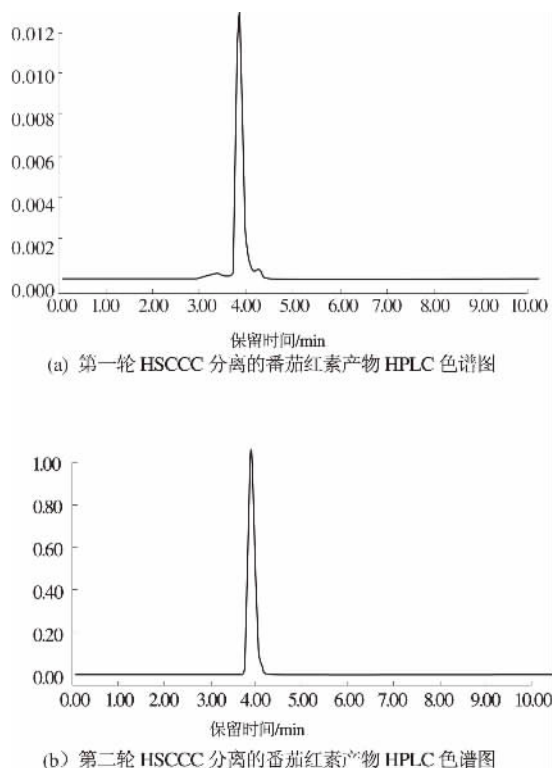


图 3 HSCCC 分离的番茄红素产物 HPLC 色谱图

Fig. 3 HPLC chromatogram of lycopene product isolated by first run (a) and second run (b) of HSCCC.

HPLC 分析使用新的流动相之后,第二轮 HSCCC 分离得到的番茄红素样在 HPLC 色谱图上显示的仍是单一峰(图 4(a)), 而从 Sigma 公司购置的番茄红素标样的纯度显示仅 94.05% (图 4(b)). 此外,对 HSCCC 分离得到的纯度 98.3% 番茄红素样进行鉴别,其在 HPLC 色谱图上的保留时间(RT)与标样一致,光谱学数据(图 4(a)插入图,最大吸收三峰波长为 445、472、503 nm; % III/II = 65)与文献记载的数据完全一致^[16],进一步证实了样品的番茄红素属性.

3 结论

本试验为首次采用 HSCCC 从红色西瓜瓤粗提取物分离获得番茄红素,通过使用确定的 $v_{n\text{-正己烷}}:v_{\text{乙腈}}:v_{\text{二氯甲烷}}=20:12:7$ 两相溶剂系统获得纯度为 98.3% 番茄红素,该方法对用于从其他富

含番茄红素水果中分离高纯度番茄红素具有很好的指导借鉴意义.

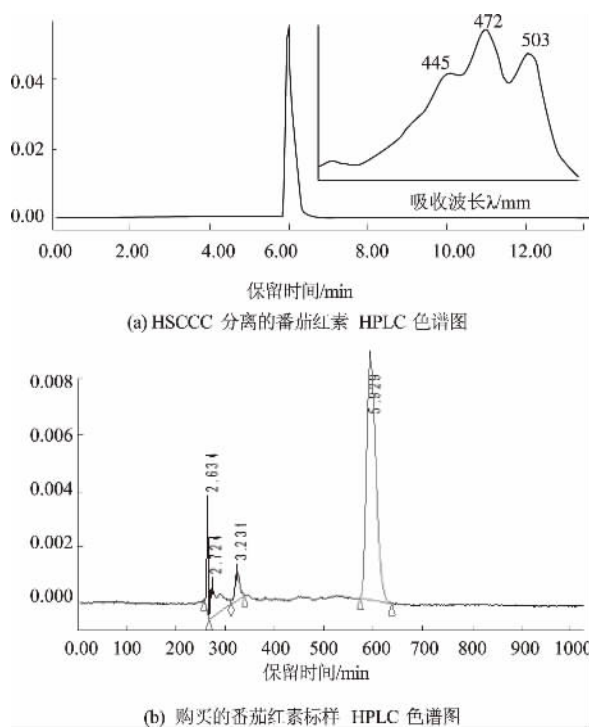


图 4 用新流动相($v_{\text{乙腈}}:v_{\text{甲醇}}:v_{\text{氯仿}}=5:3:2$)分析的番茄红素样 HPLC 色谱图

Fig 4 HPLC chromatogram of lycopene analysed using new HPLC flow phase (acetonitrile: methanol: chloroform (5:3:2))

参考文献:

- [1] ERDMAN J W, FORD N A, LINDSHIELD B L. Are the health attributes of lycopene related to its antioxidant function [J]. Arch Biochem Biophys, 2009, 483 (2): 229 - 235.
- [2] KIM J Y, LEE J S, HAN Y S. et al. Pretreatment with lycopene attenuates oxidative stress-induced apoptosis in human mesenchymal stem cells [J]. Biomol Ther, 2015, 23(6): 517-524.
- [3] WANG Y, CUI R, XIAO Y, et al. Effect of carotene and lycopene on the risk of prostate cancer: a systematic review and dose-response meta-analysis of observational studies [J]. PLoS ONE, 2015, 10(10): e0140415.
- [4] MCENENY J, WADE L, YOUNG I S, et al. Lycopene intervention reduces inflammation and improves HDL functionality in moderately overweight middle-aged individuals [J]. J Nutr Biochem, 2013, 24(1): 163 - 168.
- [5] POOJARY M M, PASSAMONTI P. Optimization of extraction of high purity all-trans-lycopene from tomato pulp waste [J]. Food Chem, 2015, 188: 84-91.
- [6] NAVIGLIO D, CARUSO T, IANNECE P, et al. Charac-

- terization of high purity lycopene from tomato wastes using a new pressurized extraction approach [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(8): 6227 - 6231.
- [7] USDA-NCC. Carotenoid Database for US Foods 1998 [Online]. Available: www.nal.usda.gov/fric/food-comp/ [2001].
- [8] PERKINS P, COLLINS J K, DAVIS A R, et al. Carotenoid content of 50 watermelon cultivars [J]. J Agric Food Chem, 2006, 54(7): 2593 - 2597.
- [9] AMAN R, CARLE R, CONRAD J, et al. Isolation of carotenoids from plant materials and dietary supplements by high-speed counter-current chromatography [J]. J Chromatogr A, 2005, 1074(1/2): 99-105.
- [10] BALDERMANN S, REINHARD A, KOHLER N, et al. Application of high-speed counter-current chromatography for the isolation of 9-cis-neoxanthin from fresh spinach [J]. J Chromatogr A, 2007, 1151(1/2): 183 - 186.
- [11] SKALICKA-WOZNIAK K, GARRARD I. Counter-current chromatography for the separation of terpenoids: a comprehensive review with respect to the solvent systems employed [J]. Phytochem Rev, 2014, 13: 547 - 572.
- [12] WEI Y, ZHANG T, XU G, et al. Application of analytical and preparative high-speed counter-current chromatography for separation of lycopene from crude extract of tomato paste [J]. J Chromatogr A, 2001, 929(1/2): 169 - 173.
- [13] BALDERMANN S, ROPPETER K, KOHLER N, et al. Isolation of all-trans lycopene by high-speed counter-current chromatography using a temperature-controlled solvent system [J]. J Chromatogr A, 2008, 1192(1): 191 - 193.
- [14] 姚佳, 蒲彪. 番茄红素提取工艺及检测方法的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2010, 46(3): 18 - 21.
- [15] KANG B, ZHAO W, HOU Y, et al. Expression of carotenogenic genes during the development and ripening of watermelon fruit [J]. Sci Hort, 2010, 124(3): 368 - 375.
- [16] BRITTON G, LIAAEN-JENSEN S, PFANDER H. Carotenoids handbook [M]. Basel: Birkhäuser, 2004.

Isolation of Lycopene from the Crude Extract of Red Watermelon Flesh by High-speed Counter-current Chromatography

RUAN Baoyu^{1,2} ZHAO Wenen¹

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Faculty of Food Industry, College of Food Industry, Danang, Vietnam)

Abstract: High-speed counter-current chromatography (HSCCC) was applied to the isolation of lycopene from the crude lycopene extract of red watermelon flesh. The crude lycopene extract was obtained from the homogenized flesh of ripened fruit extracted with petroleum ether and acetone (ratio 2:1, *v/v*) under supersonic wave conditions. The preparative high-speed counter-current chromatography with a two-phase solvent system composed of *n*-hexane: acetonitrile: dichloromethane (20:12:7, *v/v/v*) was performed obtaining lycopene with a purity of 98.3% from the crude extract.

Key words: lycopene; isolation; high-speed counter-current chromatography; watermelon

基于 Spark 的并行极速神经网络

邓万宇, 李力, 牛慧娟

(西安邮电大学 计算机学院, 陕西 西安 710121)

摘 要: 随着数据规模的快速膨胀, 基于单机的串行神经网络结构面临着巨大的计算挑战, 难以满足现实应用中的扩展需求. 在极速学习机(extreme learning machine, ELM)基础上, 基于 Spark 并行框架提出一种并行的极速神经网络学习方法, 以 Spark 平台特有的 RDD 高效数据集管理机制对其进行封装, 并将大规模数据中的高复杂度矩阵计算进行并行化, 实现 ELM 加速求解, 仅需一组 Map 和 Reduce 操作即可完成算法的训练. 在大量真实数据集上的实验结果表明, 基于 Spark 的并行 ELM 算法相较于串行 ELM 获得了显著的性能提升.

关键词: 极速学习机; 神经网络; 并行化 ELM 算法; Spark

中图分类号: TP389.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2016.05.010

0 引言

极速神经网络(extreme learning machine, ELM)已被广泛应用于数据挖掘、模式识别等众多领域^[1]. 相较于应用更为广泛的单隐藏层前馈 BP 神经网络, ELM 具有隐藏层输入权及阈值可随机生成, 有效克服了 BP 迭代次数过于频繁, 计算量、内存开销及耦合性过大等问题, 仅需要一次学习即可完成训练的优势. 更重要的是, 传统基于梯度下降的 BP 神经网络算法, 以反向传播误差的方式对参变量进行迭代调整和网络训练, 导致计算过程难以并行化, 无法集成和发挥分布式计算平台的并行计算优势. 因此, 人们正努力构建各种更为高效的并行化计算框架或平台, 通过汇集计算机节点与计算资源, 将大规模数据进行并行化处理. MapReduce 是大家熟知的一种高容错分布式计算框架, 然而 MapReduce 计算过程中因重复加载数据导致的大量磁盘 I/O 操作非常耗时低效, 使其难以成为构建高性能并行机器学习算法的开发平台^[2-3]. 最近, Spark 在解决磁盘 I/O 问题上被视为 MapReduce 的升级与替代者, Spark 是一种基于内存的集群式计算平台, 允许机器将数据缓存在内存中, 从而避免了反复的磁盘 I/O 操作^[4]. 此外, Spark 采用一种全新的弹性分布式数据集(RDD)来解决容错问题, 大大降低了容错

不足导致的风险. 单机串行 ELM 已经得到了深入研究, 然而单机平台的容量与承载能力在面对大规模数据膨胀问题时正面临极大的挑战, 为此笔者基于 Spark 提出一种并行神经网络极速学习方法, 以 Spark 平台特有的 RDD 高效数据集管理机制对极速学习机进行封装, 将大规模数据中的高复杂度矩阵计算进行并行化, 实现 ELM 的并行加速求解.

1 Spark 系统

传统的 MapReduce 框架在进行信息处理过程中需要对数据进行大量的磁盘 I/O 操作, 并行效率较为低下. 基于内存的分布式计算框架 Spark 很好的解决了频繁的磁盘 I/O 问题. Spark 是一种高效的基于内存的多功能集群式计算平台, 允许计算节点将中间结果缓存于内存中, 从而解决了反复迭代等高密度计算过程中的磁盘频繁 I/O 操作. Spark 主要包括分布式文件系统、弹性分布式数据集、容错机制等几个模块.

1.1 分布式文件系统

Spark 沿用 Hadoop 平台所提供的分布式文件系统(hadoop distributed file system, HDFS), 这款文件系统设计之初就是为了便捷的存储及操作大规模数据, 此外, HDFS 内嵌了高容错性策略: ①数据复写机制使同一份数据在多个节点产生副

投稿日期: 2016-03-04; 修订日期: 2016-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61572399); 陕西省科技新星资助项目(2013KJXX-29)

作者简介: 邓万宇(1979—), 男, 河南南阳人, 西安邮电大学副教授, 博士, 主要从事数据挖掘、机器学习与知识服务研究, E-mail: 58028654@qq.com.

本. 当一个节点发生故障, 仍可对其其他的节点的数据副本进行存取. ②HDFS 以心跳机制检测节点可用性. HDFS 有唯一的主节点(namenode) 及多个从节点(datanode), 主节点对 HDFS 文件系统命名空间进行管理, 而从节点则用于以块为单位存储数据. 从节点周期性发送心跳给主节点, 当主节点无法获取集群上某从节点的心跳包时, 则认定该节点已经死亡, 并且不再对该节点进行 I/O 操作.

1.2 弹性分布式数据集(RDD)

RDD 主要由位于 HDFS 之上的分布式文件构造, 或是由其他 RDD 转化而来. 在 Spark 中数据被封装成一个包含多个分片的 RDD, 分片是指 Spark 中数据的分布式片段, 是 Spark 缓存管理器加载的基本单元. 每个从节点仅需要保存训练集的一部分分片, 如果从节点内存充足, 分片将被缓存于从节点内存中, 否则存储于磁盘内. 在同一时间区间内每个从节点仅需要管理本节点所持有的数据分片, 而无需对整个数据集负责. 该机制可令计算过程实现并行化. 设有 s 个从节点以及 p 个分片, 当指定 $p > s$ 时, p 个分片可以在 s 个从节点并行计算, 从而充分实现并行化. Spark 允许用户根据应用的具体需求指定不同的分片个数 p . 事实上, Spark 根据用户的训练集大小给出一个最小分片个数 p_{\min} , 当用户未指定 p 的值, 或者所指定的 p 值小于 p_{\min} 时, Spark 将认为 $p = p_{\min}$. 除此之外, Spark 支持对 RDD 的两种并行操作, 称为 transformation 和 action, 其中 transformation 用于从已存在的数据创建新的 RDD, 包括如 map 和 filter 等操作. 而 action 则是对 RDD 进行计算, 包括 reduce 和 collect 等.

1.3 Spark 的容错机制

Spark 拥有高容错性的关键在于只读权限的 RDD, 当数据集中某个分片丢失, Spark 将申请对原始 RDD 进行 transformation 操作重新计算并创建分片信息. lineage 机制用于保存并记录 RDD 之间的 transformation 操作, 并以作为集中式元数据保存于主节点中. lineage 可以保证对 RDD 进行有效的重新计算, 并且只读权限的 RDD 可以保证如果需要重新执行 lineage 中已执行过的某个操作时, 可以获得相同的计算结果.

2 ELM 并行化实现

2.1 ELM 算法描述

ELM 由 Huang 于 2004 年提出^[1], 单隐藏层前馈神经网络发展而来, 但 ELM 相较于传统的单隐藏层前馈神经网络, 仅需要对隐藏层节点的个数进行设置, 并随机生成隐藏层偏差和输入权值,

采以最小二乘法求得输出权值, 仅一次计算而无需迭代, 相较于 BP 等其他神经网络有显著的提高^[5], 并具有优秀的泛化性能.

设隐藏层节点数为 \tilde{N} , 激励函数为 $g(x)$, N 个训练样本为 $\{(x_i, t_i) | x_i \in R^n, x_i \in R^m\}_{i=1}^N$, 则单隐藏层前馈神经网络统一模型可表示为:

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g_i(x_j) = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g(a_i \cdot x_j + b_i) = y_j, \quad (1)$$

$$j = 1, 2, \dots, N.$$

其中:

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in R^n;$$

$$t_1 = [t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}]^T \in R^m.$$

g_i 代表第 i 个隐藏层节点的激励函数 $g(a_i \cdot x_i + b_i)$; $a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}]^T$ 为连接到第 i 个隐藏层节点的输入权值; $\beta_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{im}]^T$ 为连接到第 i 个隐藏层节点的输出权值; b_i 为第 i 个隐藏层节点的偏差(bias), y_i 为第 j 个样本的输出, 训练误差为 $\sum_{j=1}^N \|y_j - t_j\|^2$. 模型预测与输出完全拟合时, 式(1)可表示为:

$$H\beta = T. \quad (2)$$

其中

$$H(a_1, \dots, a_{\tilde{N}}, b_1, \dots, b_{\tilde{N}}, x_1, \dots, x_N) =$$

$$\begin{bmatrix} g(a_1 \cdot x_1 + b_1) & \dots & g(a_{\tilde{N}} \cdot x_1 + b_{\tilde{N}}) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ g(a_1 \cdot x_N + b_1) & \dots & g(a_{\tilde{N}} \cdot x_N + b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix}_{N \times \tilde{N}}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_{\tilde{N}}^T \end{bmatrix}_{\tilde{N} \times m}, \quad T = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_N^T \end{bmatrix}_{N \times m}.$$

式中: H 为 N 个样本相关的隐藏层输出矩阵; β 为模型输出权重, 其最小二乘解为

$$\hat{\beta} = H^+ T. \quad (3)$$

式中: H^+ 为 H 的摩尔彭若思广义逆(Moore-Penrose generalized inverse). 回归预测 Y 可表示为:

$$Y = H\hat{\beta} = HH^+ T. \quad (4)$$

该多元回归的误差为:

$$\|e\| = \|Y - T\| = \|HH^+ T - T\|. \quad (5)$$

H^+ 的求法主要包括正交投影法^[6], 迭代法以及 SVD 分解法(single value decomposition)法^[17]等. ELM 算法描述如下:

算法1 ELM 算法

给定 N 个独立训练样本集 激励函数 $g(x)$ 及隐藏层节点个数 N .

步骤1: 随机分配输入权值和偏差:

$$(a_i, b_i), a_i \in R^N, b_i \in R, i = 1, 2, \dots, \tilde{N};$$

步骤2: 计算隐藏层输出矩阵

$$H(a_1, \dots, a_{\tilde{N}}, b_1, \dots, b_{\tilde{N}}, x_1, \dots, x_N) = \begin{bmatrix} g(a_1 \cdot x_1 + b_1) & \dots & g(a_{\tilde{N}} \cdot x_1 + b_{\tilde{N}}) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ g(a_1 \cdot x_N + b_1) & \dots & g(a_{\tilde{N}} \cdot x_N + b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix}_{N \times \tilde{N}};$$

$$S = \{(x_i, t_i) \mid x_i \in R^n, t_i \in R^m, i = 1, 2, \dots, N\}$$

步骤3: 计算输出权值: $\hat{\beta} = H^\dagger T$.

2.2 ELM 算法并行化策略

ELM 具有无需迭代、一次求解的优点. 但隐藏层输出矩阵 H , 在训练样本较大时, 存在存储、计算开销过大的缺点^[8]; 并且 ELM 需要将数据及中间结果载入内存, 这在单节点情况难以实现. 因此, 如何减少磁盘 I/O 时间、内存开销, 结合 Spark 平台基于内存操作的优势, 是 ELM 并行化实现的关键.

算法1中步骤(1)需要产生一个 $N \times \tilde{N}$ 维阵. 步骤(2)为矩阵乘法运算, 可以采用并行化方式运行. 步骤(3)则主要计算 H 矩阵的摩尔彭若思伪逆矩阵 H^\dagger , 可以采用并行的 EVD 法进行求解. H 是一个 $N \times \tilde{N}$ 维的矩阵, 因此 $H \times H^T$ 是一个 $N \times N$ 维方阵, 在现实应用环境下, 训练集往往较为庞大, 故而以基于内存的计算方法对 $H \times H^T$ 矩阵进行操作将变得不现实. 而隐藏层节点 \tilde{N} 远小于 N , 故转为

$$H^\dagger = \text{inv}(H^T \times H) \times H^T.$$

进而对 $\hat{\beta} = \text{inv}(H^T \times H) \times H^T \times T$ 计算. 所以并行化的关键在于对 $H^T \times H, H^T \times T$ 的并行化计算. 令除此之外在获得 $H^T \times H$ 之后, 令 $Y = H \times H^T$, 则 X 的特征值分解为 $Y = V \times \Sigma \times V^T$, 因此可通过 $Y^{-1} = V \times \Sigma^{-1} \times V^T$ 计算 $\text{inv}(H^T \times H)$. 经过上述分析, 并行化的关键在于如何将算法设计为基于每个样本的操作. 如上, ELM 计算的瓶颈在于对 $\text{inv}(H^T \times H), H^T \times H$ 的并行化. 因此算法高度并行化的关键在于将数据集的操作转化为针对单个样本向量的操作, 并且在减少 transformation 次数及 action 次数的前提下, 以向量集合作为输出节点输出^[9].

2.2.1 并行算法设计

训练样本结合个数为 N , 隐藏层输出矩阵 H

$$\text{表示为 } H = \begin{bmatrix} H_{[1]} \cdot \\ \vdots \\ H_{[\tilde{N}]} \cdot \end{bmatrix}.$$

其中:

$H_{[i]} \cdot = [g(a_1 \cdot x_i + b_1), \dots, g(a_{\tilde{N}} \cdot x_i + b_{\tilde{N}})]$ 为 H 的第 i 个行向量, 即为第 i 个训练样本 x_i 的隐藏层节点输出向量.

令 $Y = H^T \times H, Z = H^T \times T$, 则 Y, Z 可以表示如下

$$Y_{[i][j]} = \sum_{k=1}^N H_{[k][i]} \times H_{[k][j]}, \quad (6)$$

$$Z_{[i][j]} = \sum_{k=1}^N H_{[k][i]} \times H_{[k][j]}. \quad (7)$$

观察可知, 不妨令 Y 的第 i 行向量

$$\begin{aligned} Y_{[i]} \cdot &= [Y_{[i][1]}, \dots, Y_{[i][\tilde{N}]}] \\ &= [\sum_{k=1}^N H_{[k][i]} \times H_{[k][1]}, \dots, \sum_{k=1}^N H_{[k][i]} \times H_{[k][\tilde{N}]}] \\ &= \sum_{k=1}^N [H_{[k][i]} \times H_{[k][1]}, \dots, H_{[k][i]} \times H_{[k][\tilde{N}]}] \\ &= \sum_{k=1}^N H_{[k][i]} \times [H_{[k][1]}, \dots, H_{[k][\tilde{N}]}] \\ &= \sum_{k=1}^N H_{[k][i]} \times H_{[k]} \cdot \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可得

$$\begin{aligned} Y &= \begin{bmatrix} Y_{[1]} \cdot \\ \vdots \\ Y_{[\tilde{N}]} \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N H_{[k][1]} \times H_{[k]} \cdot \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^N H_{[k][\tilde{N}]} \times H_{[k]} \cdot \end{bmatrix}_{\tilde{N} \times \tilde{N}} \\ &= \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} H_{[k][1]} \\ \vdots \\ H_{[k][\tilde{N}]} \end{bmatrix} \times H_{[k]} \cdot = \sum_{k=1}^N (H_{[k]} \cdot)^T \times H_{[k]} \cdot \quad (9) \end{aligned}$$

同理 Z 可表示为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{[1]} \cdot \\ \vdots \\ Z_{[\tilde{N}]} \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N H_{[k][1]} \times T_{[k][\cdot]} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^N H_{[k][\tilde{N}]} \times T_{[k][\cdot]} \end{bmatrix}_{\tilde{N} \times 1} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} H_{[k][1]} \\ \vdots \\ H_{[k][\tilde{N}]} \end{bmatrix} \times T_{[k][\cdot]} = \sum_{k=1}^N (H_{[k][\cdot]})^T \times T_{[k][\cdot]}. \quad (10)$$

经上述一系列推导, Y 、 Z 的计算可以转化为对 N 训练样本独立并行化运算, 并最终求和的方式获得, 令第 k 个样本输出为 $\tilde{N} \times \tilde{N}$ 维矩阵 $\tilde{Y}_{[k]}$ 和 $\tilde{N} \times 1$ 维向量 $\tilde{Z}_{[k]}$.

$$\tilde{Y}_{[k]} = (H_{[k][\cdot]})^T \times H_{[k][\cdot]}; \quad (11)$$

$$\tilde{Z}_{[k]} = (H_{[k][\cdot]})^T \times T_{[k][\cdot]}. \quad (12)$$

即 $Y = \sum_{k=1}^N \tilde{Y}_{[k]}$; $Z = \sum_{k=1}^N \tilde{Z}_{[k]}$. $\tilde{Y}_{[k]}$ 和 $\tilde{Z}_{[k]}$ 可以在 N 个分片上分布式存储, 并实现并行 map 方法计算. 在 map 计算结束后, 需要将所分片上的 $\tilde{Y}_{[k]}$ 和以 reduce 方法进行求和, 并最终在主节点获取 $\tilde{Y}_{[k]}$ 、 Y 和 Z 的值. 整个算法主节点和从节点需要两次通信, 第一次通信是主节点生成输入神经元权值向量 a 和隐层阈值 b 等参数, 并将各参数传递给从节点^[10]. 第二次通信则是将各从节点数据通过 reduce 操作汇集到主节点内.

算法 2、算法 3 将详细描述计算过程.

算法 2 $\hat{\beta} = H^+ T$ 的分布式求解

步骤 1: 主节点构造输入权值和偏差向量 (a_i, b_i) , $a_i \in R^N$; $b_i \in R$; $i = 1, 2, \dots, \tilde{N}$, 激励函数 $g(x)$, 并将 (a, b) , $g(x)$, \tilde{N} 以广播形式交给各从节点.

步骤 2: 从节点调用算法 3 计算 $\tilde{Y}_{[k]}$ 和 $\tilde{Z}_{[k]}$, 并汇总各从节点结果, 将 $Y = \sum_{k=1}^N \tilde{Y}_{[k]}$; $Z = \sum_{k=1}^N \tilde{Z}_{[k]}$ 交还主节点.

步骤 3: 主节点以 EVD 分解, 得到 $\hat{\beta} = \text{inv}(Y) \times Z$.

算法 3: $\tilde{Y}_{[k]}$ 和 $\tilde{Z}_{[k]}$ 的分布式求解

1: 从节点得到输入权值和偏差向量 (a, b) , $g(x)$, \tilde{N} , 当前训练样本的输入样本数组 $inarr$, 输出样本为 out .

2: 定义空数组 h 作为样本的隐藏层输出向量;

3: for $i = 1$ to \tilde{N} ;

4: $x = 0$;

5: for $j = 1$ to $InArr.length$;

6: $x += inputarr[j] \times a_{[i][j]}$

($a_{[i][j]}$ 为第 j 个输入神经元到第 i 隐藏层节点的权值);

7: endfor.

8: $h.append(g(x + b_{[i]}))$

(将 $g(x + b_{[i]})$ 添加到 h 中, $b_{[i]}$ 为第 i 个隐藏层节点阈值),

9: endfor.

10: 定义长度为 $\tilde{N} \times \tilde{N}$ 的向量 y , 和长度为 N 的向量 z ,

11: for $i = 1$ to \tilde{N} ,

12: $x = 0$,

13: for $j = 1$ to \tilde{N} ,

14: $y.append(h_{[i]} \times h_{[j]})$

(将 $h_{[i]} \times h_{[j]}$ 添加到 y 中),

15: endfor.

16: $z.append(h_{[i]} \times out)$

($b_{[i]}$ 为第 i 个隐藏层节点阈值),

17: endfor.

18: 当前从节点得到单个样本的输出 $\tilde{Y}_{[k]}$ 和 $\tilde{Z}_{[k]}$.

3 基于 Spark 的具体实现

3.1 数据的存储

当样本规模 N 和隐层节点个数 \tilde{N} 较大时,优化向量 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[k]}$ 、 $\tilde{\mathbf{Z}}_{[k]}$ 的数据存储方式,将有效提升算法性能。

算法3中,每个样本 k 都将产生向量 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[k]}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_{[k]}$,该向量通常较为稀疏。例如当前为第 j 个样本,目标数组 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[j]}$ 用于表示矩阵 $\mathbf{H}_{[j]}^T \cdot \mathbf{H}_{[j]}^T$,由于该矩阵为 \tilde{N}^2 维的方阵,因此 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[j]}$ 可表示为 $(0.92, 0, 0, 0, 0.88, 0.35, 0, \dots, 0)_{\tilde{N}^2}$, 设 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[j]}$ 只有三组非零的 index-value 对需要存储。在内存中 index-value 的存储形式为“1:0.92”,“5:0.88”和“7:0.35”,其封装形式主要有两种:①类表示(class approach CA);②数组表示(array approach AA)^[11]。如图1、图2所示。

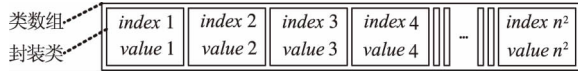


图1 类表示

Fig.1 Class approach

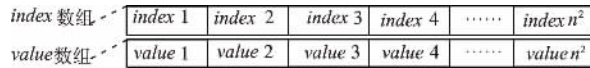


图2 数组表示

Fig.2 Array approach

类表示是将 index-value 对封装在类中,并以数组形式存储每一样本的一簇类对象:数组表示直接将 index 和 value 分别用两个数组进行存储。

类表示的优势在于源码的高可读性,但由于每个类在内存还需存储该类相应的头文件,因此类表示相较于数组表示需要消耗更多的内存。除此之外,类表示法需要通过指针才能对类元素进行存取,数组表示则可以直接操作索引和值,因此算法中选择以数组表示法对向量 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[k]}$ 、 $\tilde{\mathbf{Z}}_{[k]}$ 进行存储^[12]。

3.2 任务均衡 MapPartition 和 Coalesce 函数

在算法2($\hat{\beta} = \mathbf{H}^T \mathbf{T}$ 的分布式求解)中,每个样本 $x[k]$ ($k \in N$) 在 map 阶段都会产生向量组 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[k]}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_{[k]}$,在 reduce 阶段主节点将会对所有 N 组向

量进行求和: $\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{Y}}_{[k]}$; $\mathbf{Z} = \sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{Z}}_{[k]}$ 。该过程需要

从节点把全部 N 组向量 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[k]}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_{[k]}$ 传输并缓存于主节点,该默认方式将使计算任务严重倾斜并趋于串行,无法充分发挥集群的并行计算优势^[13]。

为减少主节点计算量,均衡计算任务,从节点在提交结果之前进行两级运算:第一级,选择 Spark 中的 mapPartitions 代替 map 函数,对每个分片内所有向量进行求和,一个分片仅产生唯一一组中间变量;第二级,调用 Coalesce 函数对当前节点内所有分片结果进行求和,最终每个节点仅产生一组结果,如图3。

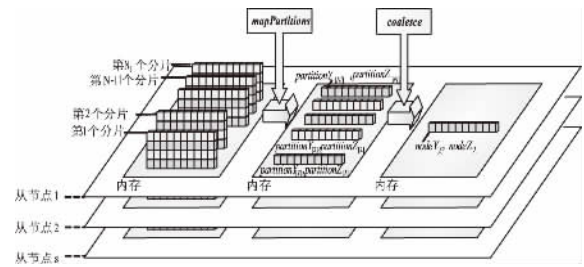


图3 任务均衡

Fig.3 Task equilibrium

如图3所示,当前第 i 个节点内共有 N_i 个分片,通过 mapPartitions 操作对分片内的向量进行粗粒度求和,令一个分片产生一组结果,向主节点提交的数据量下降至每个节点仅包含 N_i 个向量 partition $\mathbf{Y}_{[j]}$ 和 partition $\mathbf{Z}_{[j]}$ ($j \in N_i$)。mapPartitions 使原本的计算结果 $\tilde{\mathbf{Y}}_{[k]}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_{[k]}$ ($k \in N$) 下降为每个节点仅包含 N_i 个向量 partition $\mathbf{Y}_{[j]}$ 和 partition $\mathbf{Z}_{[j]}$ ($j \in N_i$),共 p 组($\sum_{i=1}^s N_i = p$, s 为节点总数)。

第二步,每个节点仅包含 N_i 组向量,为达到充分利用从节点计算资源的目的,在 mapPartitions 之后调用 coalesce 函数,同一从节点 i 的所有分片最终仅产生一组输出向量 Node $\mathbf{Y}_{[i]}$, Node $\mathbf{Z}_{[i]}$ ($i \in s$):

$$\begin{cases} \text{NodeY}_{[i]} = \sum_{j \in N_i} \text{partitionY}_{[j]} \\ \text{NodeZ}_{[i]} = \sum_{j \in N_i} \text{partitionZ}_{[j]} \end{cases} \quad i \in s.$$

通过 mapPartitions 与 coalesce 相互使用,使得所有本地分片在从节点得以充分计算,令从节点提交到主节点的向量数量由 N 个下降至 s ,从而使计算任务得以均衡分配,算法并行度显著提高。

此外,稀疏向量的求和操作通过构造稠密向量进行,由于稠密向量包含所有列元素,因此可以与稀疏矩阵直接进行对位求和,从而避免反复构

造索引数组与值数组.

3.3 broadcast(广播变量)

广播变量机制,是指将主节点的参数以只读形式缓存于从节点中,每个从节点仅保存一份副本,该节点内所有分片都可共享使用.

算法 2($\hat{\beta} = H^+T$ 的分布式求解)中, $\tilde{Y}_{[k]}$ 和 $\tilde{Z}_{[k]}$ 的计算需要同一组神经元权值向量 a 、隐层阈值 b 、隐层个数 \tilde{N} 等参数信息,由于节点个数 s 小于分片个数 p ,因此算法实现阶段,以从节点为单位进行广播变量拷贝,既可保证所有分片获得参数信息,又能减少参数副本的数量,从而节省内存空间及通信消耗.

p 个分片以只读方式共享 a 、 b 、 \tilde{N} 等参数信息,因此将第一传递过程中的参数 a 、 b 、 \tilde{N} 定义为广播变量.由 3.2 节 mapPartitions 阶段操作可知,

位于同一节点的所有分片可共享广播变量.

4 性能评估

为验证算法的性能,我们以不同规模的数据集对算法进行测试,并将 SparkELM 与 SVM、BP、ELM 等算法进行对比,主要以时间加速比(speed-up ratio)和测试精度(testing accuracy)进行评估.所使用数据集在 LIBSVM 数据集网站均可以下载^[14].Spark 实验平台为 Debian 操作系统机器,共 7 台机器,都为 16 GB 内存,四核 Xeon E5440 (2.83 G),集群版本 Hadoop 2.5.0、Java 1.7.0_74、Spark1.3.1.

4.1 数据集

选定卫星图像(satimage)、航空记录(shuttle)等 4 种真实的分类数据集以及汽车价格(autoPrice)、股票价格(stocks)等 9 种回归数据集对 SparkELM 算法的性能进行验证.回归数据集信息如表 1,分类数据信息如表 2 所示.

表 1 回归数据集信息

Tab.1 Regression datasets

数据集	样本数目		属性数目	
	训练样本	测试样本	连续属性	类别
diabetes	576	192	8	2
segment	1 500	810	36	7
iJCNN	464 810	116 202	22	2

数据集	样本数目		属性数目	
	训练样本	测试样本	连续属性	类别
shuttle	43 500	14 500	7	2
satimage	4 435	2 000	36	6

表 2 分类数据集信息

Tab.2 Classification datasets

数据集	样本数目		属性数目	
	训练样本	测试样本	连续属性	类别
delta	3 000	4 129	6	1
elevators	4 000	5 517	6	0
auto price	80	79	14	1
Triaziones	100	86	60	0
servo	80	87	0	4

数据集	样本数目		属性数目	
	训练样本	测试样本	连续属性	类别
bank domains	4 500	3 692	8	0
stocks domain	450	500	10	0
machine cPU	100	109	6	0
california housing	8 000	1 246	8	0

Satimage 通过已知的 3×3 像素的图像,对中心像素的类别进行预测.陆地卫星一次扫描结果(Landsat MSS imagery)包括 4 幅不同频谱图像,每幅图像包含 $2\,340 \times 3\,380$ 个像素.为了实验需要,每幅图像截取 82×100 像素构造 Satimage 数据集.构造方法是:将 82×100 像素划分为多个 3×3 像素的正方形,因每组图像共有 4 幅,因此可切出 4 个正方形,这 4 个正方形构造一条数据记录,显然数据维度是 $4 \times 9 = 36$.图像是矩阵形式,为便于计算,采用自上到下、自左向右的顺序将其矢量化(如图 4 所示).所求目标特征应该是第

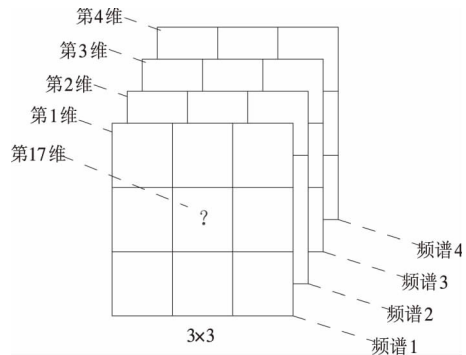


图 4 Satimage 由 36 维像素预测中心像素类型

Fig.4 Satimage prediction center pixel type by 36 dims

17、18、19、20 维. 若认为目标特征的类别仅与自己有关,那么可以直接采用第 17、18、19、20 维进行预测. 若目标特征还和周围像素有关,则选择全部像素. 笔者取用全部 36 维像素,该方法较普遍. 数据共有 6 种类型: red soil、cotton crop、grey soil、damp grey soil、soil with vegetation stubble、very damp grey soil,分类目标是根据 36 维像素预测中心像素类型.

Shuttle 根据飞行器所处的环境信息来判断飞机应选择人工降落或是自动降落(如图 5 所示). 数据有 9 个属性,2 个类别,58 000 条样本,7 个属性分别是 time、stability、error、sign、wind、magnitude、visibility. 7 个类别分别是 Auto(自动降落)和 NoAuto(人工降落). 80% 的数据将选择人工降落(NoAuto),其余为自动降落,因此默认的分类精度是 80%,目标的精度是 99% ~ 99.9%. 数据集以随机切割产生训练集(43 500 个样本)和测试集(14 500 个样本).

数据集 IJCNN. 给定一个长度为 $T = 49\ 990$ 的时间序列,序列中的每个样本都包含 4 个输入: $x_1(k), \dots, x_4(k)$ 和一个输出 $y(k)$. 另外长度为



图 5 Shuttle 判断飞行器的降落方式

Fig. 5 Shuttle determine the landing mode of an aircraft

91 701 的时间序列用来测试. 属性 $x_1(k)$ 表示与系统自然周期相关的二进制同步脉冲,为 10 位二进制形式,并以 9 个 0,一个 1 的规模出现. 属性 $x_2(k), x_3(k), x_4(k)$ 是 $[-1.5, 1.5]$ 之间的实数,其中 $x_4(k)$ 和 $y(k)$ 最为相关,因此后面构造特征时不仅考虑了 $x_4(k)$,还考虑了它的前后时刻的信息. 我们采用文中的方法对时间序列进行特征构造: $x_1(k)$ 扩展为 $x_1(k-5), \dots, x_1(k+4)$ 等 10 个特征; $x_4(k)$ 扩展为 $x_4(k-5), \dots, x_4(k+4)$ 等 10 个特征, $x_2(k), x_3(k)$ 直接使用;最终形成 22 个特征. 训练数据中 90% 的训练集为第 1 类,因此分类精度默认为 90%,分类任务为构造模型已达到更高分类精度.

表 3 和 4 为不同算法的比较. 对比表 3、表 4 中 4 种算法在 13 个真实数据集的表现知,SparkELM 算法在大部分数据集上的“Sigmoid”函数: $g(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 隐藏层初始节点都选取 5 个,每次递增 5,并基于 5-折交叉验证的方式选取最优个数,继而进行 50 次试验选取最优结果并取其平均值进行采集. 对于 SVM 的核函数则选取径向基函数,并采用 Hsu 和 Lin 提出的排列组合方法选择最优的参数 C 和高斯核 γ 进行设置: C 和 γ 的取值范围是 $C = [2^{12}, 2^{11}, \dots, 2^{-2}]$, $\gamma = [2^4, 2^3, \dots, 2^{-10}]$,共 225 种组合,对于每组 (C, γ) 进行 50 次随机试验,并对最优结果的平均值进行采集. 实验数据被归一化到 $[0, 1]$ 之间,输出归一化到 $[-1, 1]$.

4.2 训练时间与误差

BP、ELM 和 SparkELM 的激励函数都选择分类及回归 RMSE 精度比 BP、SVM 有更好的泛化性能,并相较于 ELM 也有优秀表现.

表 3 4 种不同算法的均方差(RMSE)

Tab. 3 RMSE of 4 algorithms

数据集	BP		SVM		ELM		SparkELM	
	训练样本	测试样本	训练样本	测试样本	训练样本	测试样本	训练样本	测试样本
delta ailerons	0.040 9	0.048 1	0.041 8	0.042 9	0.042 3	0.043 1	0.038 2	0.041 5
delta elevators	0.054 4	0.059 2	0.053 4	0.054 0	0.055 0	0.056 8	0.054 0	0.053 1
auto price	0.065 2	0.093 7	0.065 2	0.093 7	0.075 4	0.099 4	0.075 4	0.104 3
triaziones	0.143 2	0.182 9	0.143 2	0.182 9	0.189 7	0.200 2	0.161 4	0.203 5
servo	0.084 0	0.117 7	0.084 0	0.117 7	0.070 7	0.119 6	0.096 1	0.118 3
bank domains	0.045 4	0.046 7	0.045 4	0.046 7	0.040 6	0.036 0	0.043 7	0.043 1
stocks domain	0.050 3	0.051 8	0.050 3	0.051 8	0.025 1	0.034 8	0.024 1	0.298 7
machine cpu	0.035 2	0.082 6	0.057 4	0.081 1	0.033 2	0.053 9	0.025 9	0.056 4
california housing	0.108 9	0.118 0	0.108 9	0.118 0	0.121 7	0.126 7	0.117 4	0.153 6

表 4 4 种算法在分类问题上的精度比较

Tab. 4 Accuracy comparison of 4 algorithms in classification problem

数据集	BP		SVM		ELM		SparkELM	
	训练样本	测试样本	训练样本	测试样本	训练样本	测试样本	训练样本	测试样本
Diabetes	0.866 3	0.744 3	0.787 6	0.773 1	0.786 8	0.775 7	0.784 7	0.781 2
Segment	0.969 2	0.862 7	—	—	0.973 5	0.949 5	0.969 3	0.954 3
shuttle	0.999 7	0.994 0	—	—	0.996 5	0.994 0	0.995 2	0.993 1
Satimage	0.952 6	0.823 4	—	—	0.935 2	0.890 4	0.926 2	0.892 0

4.3 不同参数下的性能变化分析

在 Spark1.3.1 中, reduce 阶段, 数据集的分片方式将直接影响算法性能, 同时算法的最优分片数与群节点有很大联系, 因此我们在数据集拥有不同节点数的情况下, 调整数据分片数量, 来进行并行性能测试. 我们选择使用 shuttle、ijcnn 两个数据集进行试验, 为保证结果的准确性, 将所使用的 shuttle 数据增加至原始数据的 100 倍. 集群的节点数由 1 个增加至 6 个, 分片由 1 个增加至 10 个. 为在不同节点情况下, 不同分片数对算法产生的影响, 首先控制每组实验的节点数不变, 令分片个数逐渐增多, 算法的执行时间如图 6(a) ~ (f) 所示.

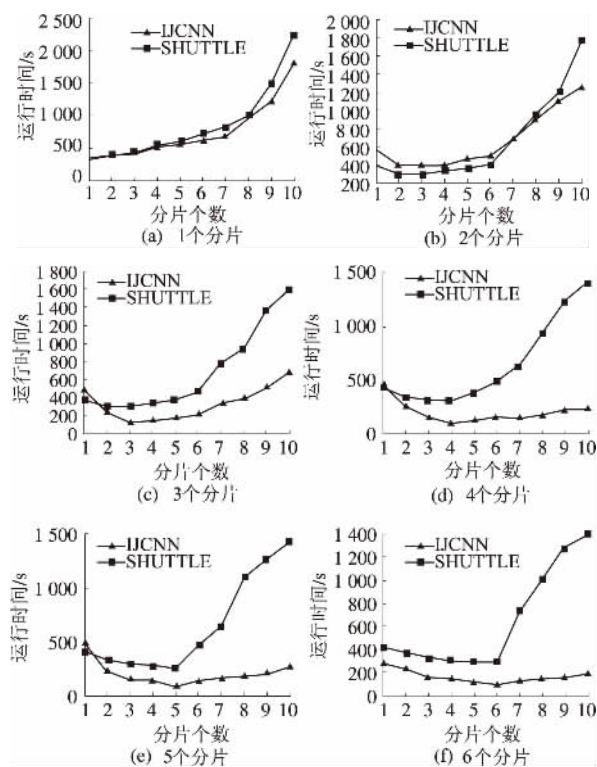


图 6 运行时间随分片变化的情况

Fig. 6 Time cost changing with splits

由图 6(a) ~ (f) 所示, 在每组实验中保持集群节点个数不变, 将分片由 1 个增加至 10 个, ELM 算法训练时间都呈现先下降再逐渐攀升的趋势. 训练时间首先随着分片的增多而逐渐减少, 当分片数趋近于节点数的某个邻域范围时, 训练时间达到最小值, 而后随着分片数量的增多, 算法的时间逐渐增加. 呈现上述结果的主要原因是由于, ELM 程序计算时间主要由 mapPartitions 与 reduce 两阶段的计算组成, 当 mapPartitions 阶段完成后, 需要将各从节点计算结果汇总至主节点进行 reduce 计算, 因此算法除从节点和主节点计算用时外, 还包括信息传递的通讯时间; 在当前节点数不变得情况下, 而随着分片数量的增加, 当分片数趋近于节点数时, 主节点得以最佳分片方式将数据集分发至各从节点进行运算, 此时可保证在不需额外通信开销的情况下, 最大程度利用集群所有计算资源, 并且由于分片个数趋近于节点个数, 因此仅需要一个批次的数据传输即可完成分片结果至主节点的数据汇总, 从而使通信开销降至最低; 集群中所有从节点在分片个数等于节点个数时已被充分利用, 因此在分片个数大于节点个数并逐渐呈现增长趋势时, 某些集群将出现各节点数据分片分配不均匀的情况, 获取较多计算任务的从节点在进行额外任务的计算时, 其他节点将出现停等现象, 除此之外, 数据汇总时由于该节点将产生额外的传输开销, 因此 ELM 算法整体通信代价将逐渐增加, 导致算法时间进一步提升, 故其所用时间也将呈增长趋势.

当数据集分片方式固定, 集群节点个数对算法性能的影响可通过观察图 7(a) ~ (f) 可知: 当提升集群从节点数量, 集群节点逐渐趋近于分片个数时, 主节点将计算任务重新分配, 减少了各节点的平均任务数量及计算时间, 提升了算法的整体并行性能, 新添加节点提交任务所增加通信时

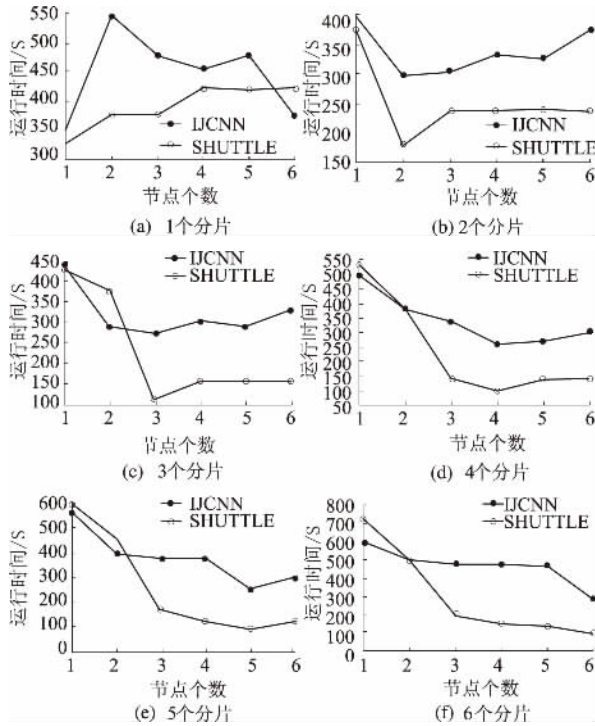


图7 分片固定时运行时间随节点个数变化情况

Fig. 7 Time cost changing with nodes(fixed partition number)

间,相较于算法提升时间而言要小得多,该阶段ELM算法的整体性能随着节点增加将有所提升;当节点数大于分片个数并继续增加时,由于集群所有从节点已获得较为均匀的最小分片计算任务,其后所添加的节点并未使mapPartitions-reduce阶段的计算时间有所减少,反而增加了额外通信开销,整体而言,并未使ELM算法性能有所提升。

因此,节点个数接近于分片数时,ELM算法整体时间代价最小,性能最优。通常而言,集群在没有任务丢失的前提下,可以使ELM算法性能最为高效的分片个数 $P_{\text{最佳}} \approx$ 节点个数 s 。

4.4 加速比

为评价SparkELM算法的加速性能,我们引入加速比 $S(n)$ 对算法性能进行衡量,加速比的计算公式定义如下:

$$S(n) = \frac{\text{单节点下的计算时间}}{n \text{ 个节点下的计算时间}}$$

选取数据集IJCNN为例,并增加节点个数,将内核个数从4枚增加至24枚,为保证在节点个数不同时算法具有最优的运算性能,算法基于上述3.2节中论述的最优分片原则,将按照在当前节点最优分片区间对数据集进行划分,以保证ELM算法在当前集群的节点情况下具有最佳的

并行性能。此外,为增加测试的数据规模,提升mapPartitions-reduce阶段运算时间的比重,减少通信消耗对计算的影响,实验中将原数据集IJCNN分别复制100倍、200倍、400倍和800倍作为训练集对ELM算法进行测试,4种情况表现如图8所示。

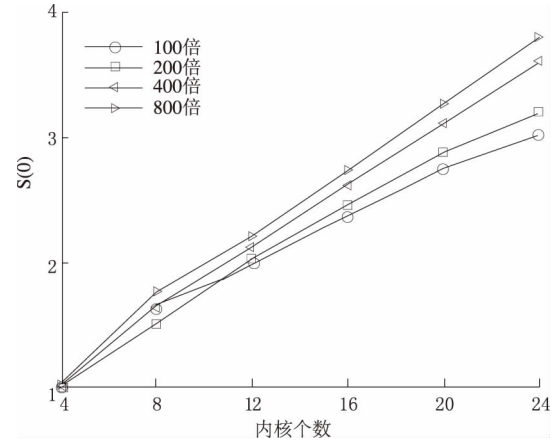


图8 最优分片下集群加速比

Fig. 8 The acceleration ratio under optimal slicing number

最优的并行化系统的加速效果应呈现线性增长特性,集群节点个数以 n 倍增长时,加速效果也保持 n 倍提升。但事实上,随着节点个数的增长,节点间通信代价也随着增大,加速效果难以呈现线性增长。正如图8中所示,随着数据规模增大,尤其当数据量极为庞大时,通信代价将被弱化,各节点的计算时间在总时间中将占较大比重,算法的加速效果也将趋于线性增长。结合具体情况,当数据规模较大时,以最优分片对数据集进行划分,同时大规模提升集群的节点数量,可以使ELM算法的并行度呈线性提升。

5 结论与展望

ELM算法能解决回归及分类问题,并有训练速度快、泛化性能良好等特点,但在面对日益膨胀的大规模数据时仍亟待并行化扩展。本论文通过分析ELM的运算机制,基于Spark并行编程框架,设计并实现了并行SparkELM算法,实验表明,SparkELM算法不仅满足大数据量的计算需求,而且有良好的加速表现。在未来的工作中,我们将进一步对并行算法进行改进,以充分利用计算机资源。由于Spark仍然在持续升级更新之中,因此使用API之前必须明确底层实现机制及版本差异,优化算法设计及实验。此外,不同于传统的

同时支持规约操作和主从结构的交互式接口(如 MPI), Spark 仅支持主从结构模式, 需要两种交互模式相结合: 主节点首先应分配任务, 并将重要参数信息传递给从节点; 从节点应将计算结果返回给主节点. 因此应在设计上谨慎操作以减少算法在此种交互模式下开销, 保证算法拥有最优性能, 在后续开发中, 我们将结合更高性能的 Spark 版本, 对算法进行更新调整.

参考文献:

- [1] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: Theory and applications [J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1/3): 489 – 501.
- [2] HE Q, ZHUANG F Z, LIN J C, et al. Parallel implementation of classification algorithms based on mapreduce [C]. //In Proceedings of Rough Sets and Knowledge Technology, 2010, 655 – 622.
- [3] VERMA A, LORA X, GOLDBERG D E, et al. Scaling genetic algorithms using mapreduce [J]. In Proceedings of International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2009, 13 – 18.
- [4] HUANG G B, ZHOU H, DING X, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification [J]. *Syst Man Cybern Part B Cybern IEEE Trans*, 2012, 42(42): 513 – 529.
- [5] CAO J, LIN Z, HUANG G B, et al. Voting based extreme learning machine [J]. *Inf Sci*, 2012, 185(1): 66 – 77.
- [6] LIANG N Y, HUANG G B, SARATHANDRAN P, et al. A fast and accurate on-line sequential learning algorithm for feedforward networks [J]. *IEEE Transactions on Neural Network*, 2010, 17(6): 1411 – 1423.
- [7] SUN Z, LIN T, RISHE N. Large-scale matrix factorization using mapReduce [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Data Mining Workshops, 2010, 242 – 1248.
- [8] ZAHARIA M, CHOWDHURY M, RANKLIN M J, et al. Spark: cluster computing with working sets [C] in Proceedings of the 2nd USENIX conference on Hot topics in cloud computing, 2010. 15(1): 1765 – 1773.
- [9] ODESKY M, SPOON L, VENNERS B. Programming in Scala [M]. *Artima*, 2008.
- [10] ODESKY M, ALTHERR P, CREMET V, et al. The Scala language specification [M], 2008.
- [11] PANDA B, HERBACH J S, BASU S, et al. Planet: massively parallel learning of tree ensembles with mapreduce [C]. //In: Proceedings of the 35th international conference on very large data bases, 2009, 2(2): 1426 – 1437.
- [12] CHU C T, SANG K K, LIN Y A, et al. Map-Reduce for machine learning on multicore [J]. In Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems, 2006(19): 281 – 288.
- [13] FAN R E, CHANG K W, HSIEH C J, et al. LIBLINEAR: A library for large linear classification [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2010, 9(12): 1871 – 1874.
- [14] HE Q, SHANG T, ZHUANG F, et al. Parallel extreme learning machine for regression based on mapreduce [J]. *Neurocomputing* 102(2): 52 – 58.

Spark-based Parallel Extreme Learning Machine

DENG Wanyu, LI Li, NIU Huijuan

(School of Computing Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: With the rapid expansion of the scale of the data, stand-alone serial neural networks are facing enormous computational challenges. It is difficult to meet the expansion of real-world applications. In this paper, we proposed a parallel extreme learning machine (parallel ELM) algorithm based on Spark. By leveraging Spark parallel platform with efficient management mechanism and efficient matrix computations of large-scale data, the acceleration for solving ELM is achieved. The learning process of parallel ELM takes only one set of Map and Reduce operation to complete. The experimental results on a large number of real data sets show Spark-based parallel ELM algorithm can achieved a significant performance improvement compared with the serial ELM.

Key words: extreme learning machine; neural network; parallelization ELM algorithm; Spark

文章编号: 1671-6833(2016)05-0057-05

OFDMA 系统多业务频谱切换策略的 CPN 建模及性能评价

陆彦辉¹, 李兆平^{1,2}, 韩书君¹, 杨守义¹

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河北省长途通信传输局 石家庄传输局, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 为保障用户的不同服务要求, 对不同业务执行区分服务并实现频谱切换管理是通信系统亟需解决的主要问题之一. 研究切换问题的传统方法是 Markov 建模, Markov 模型具有无记忆特性, 并且易于产生状态空间爆炸问题, 这使得频谱切换策略的研究大多停留在单业务 OFDMA 系统. 应用着色 Petri 网 (colored petri nets, CPN) 开发适用于多业务 OFDMA 系统的频谱切换策略, 建立了 4 种兼顾切换用户和新到用户传输性能的频谱切换策略的 CPN 模型. 仿真结果表明, CPN 能够克服 Markov 模型的局限性, 便于分析复杂系统, 特别是到达规律服从多种数学分布的多业务系统频谱切换策略.

关键词: 频谱切换; Markov; 着色 Petri 网; 多业务; 数学分布

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.011

0 引言

频谱切换是无线资源管理的一项重要技术^[1], 能够满足用户通信服务质量要求的条件下, 最大限度的提高资源利用率和系统容量, 同时避免系统拥塞. 一项好的频谱切换策略, 不仅能够保障用户的通信质量^[2], 而且能够满足多用户共存的不同通信需求, 使系统资源分配更科学合理^[3].

OFDMA 系统将传输带宽划分成一系列正交的互不重叠的子载波, 把不同的子载波集分配给不同的用户实现多址, 从而实现系统资源的优化利用^[4], 成为 4G 和未来移动通信系统的关键技术之一. 目前, 关于频谱切换策略的研究大多是基于认知无线电系统或 CDMA 系统^[5], 针对多业务系统尤其是 OFDMA 多业务系统频谱切换策略的研究成果较少, 且现有的多业务系统研究是应用 Markov 理论分析^[6-7]. 多业务系统的 Markov 模型结构十分复杂, 易产生状态空间爆炸^[8]. 因此, 1997 年, Fernando J. 等^[9]使用 Petri 网建立了无线资源管理模型. 马玉琨等^[10]于 2009 年采用随机 Petri 网 (stochastic petri nets, SPN) 实现了 OFDMA 系统的接纳控制模型. 虽然已经证实 SPN 能够克服 Markov 模型的无记忆特性^[11-12], 但 SPN

与 Petri 网的共同之处是没有数据概念和层次概念, 因而所有模型结构和数据操作都是建立在同一层次内. 当系统较为复杂时, 尤其业务到达规律为非指数分布时, SPN 同样会出现状态空间爆炸问题. CPN 与 SPN 类似, 属于高级 Petri 网, 能够模拟多种复杂系统^[13], 具有很强的可视性结构^[14-15], 其分层结构能克服状态空间爆炸问题.

笔者使用 CPN 模型与 Markov 模型研究单业务系统的频谱切换策略分析方法, 并搭建多业务系统中频谱切换的 CPN 模型, 提出 4 种不同的频谱切换策略. 最后设计了业务到达服从多种数学分布的 CPN 模型, 并使用 CPN Tools 进行仿真.

1 多业务系统中频谱切换的 CPN 模型

假设 OFDMA 多业务通信系统中同时存在实时用户和非实时用户两类, 各类用户又分别包含新到用户和切换用户. 因此, 系统中同时存在实时新到用户、实时切换用户、非实时新到用户和非实时切换用户. 4 种用户相互统计独立, 用户到达服从泊松分布, 用户离开服从负指数分布, 相应参数如表 1 所示.

图 1 为多业务系统一般化模型的 CPN 结构, 由 7 个变迁和 5 个库组成. 7 个双线框代替各自的子页面, 表示 7 个事件的发生. “信道估计”是对系

收稿日期: 2016-03-30; 修订日期: 2016-06-27

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-12-0699)

作者简介: 陆彦辉 (1972-), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事宽带无线通信、着色 Petri 网理论及应用研究, E-mail: ieyhlu@zzu.edu.cn.

统空闲资源的统计,“资源分配”实现频谱切换策略,另外 4 个变迁分别代表相应用户到达.不同切换策略的区别主要存在于资源分配页面.

表 1 多业务系统中用户参数

Tab. 1 User parameters of multiple-business system

用户	到达率	离开率	占用信道数
实时新到用户	λ_{n1}	μ_1	a
实时切换用户	λ_{h1}	μ_1	a
非实时新到用户	λ_{n2}	μ_2	b
非实时切换用户	λ_{h2}	μ_2	b

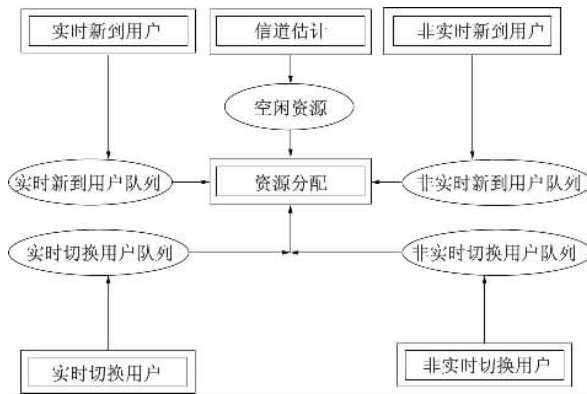


图 1 多业务系统一般化模型的 CPN 结构图

Fig. 1 A generalized model of CPN structure in multiple business system

2 模型分析

2.1 传统 Markov 模型的单业务分析方法

假设系统中的一类业务包括新到用户和切换用户,其中,新到用户与切换用户工作时需占用的信道数相同,新到用户到达率为 λ_n ,切换用户到达率为 λ_h .系统中的新到用户和切换用户的数目比例设为 2:1,因此 $\lambda_h = \lambda_n/2$.用户的到达和离开统计独立,已有的相关研究中大都将新到用户和切换用户视作两种业务,设置两种用户离开率,本文中,同一类业务的新到用户和切换用户设置相同服务率 μ .系统为切换用户预留 N_0 个资源,即当系统可用资源大于 $N_0 = N - m$ 时,可同时为新到用户和切换用户分配资源,否则,不为新到用户分配资源.为了与传统分析方法对比,笔者给出 Markov 排队模型的状态图,如图 2 所示. k 表示系统中被占用资源数, $P(k)$ 表示 k 状态存在的概率.被占用资源数小于 m 时,资源可分配给新到用户和切换用户;被占用资源大于 m 时,资源只分配给切换用户.

由状态图分析可得

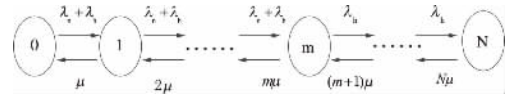


图 2 单业务资源预留的排队模型

Fig. 2 Queuing model of single business resources reserved strategy

$$P(k) = \begin{cases} \frac{1}{k!} \cdot \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^k}{\mu^k} P(0), & 0 \leq k \leq m \\ \frac{1}{k!} \cdot \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^m \cdot \lambda_h^{k-m}}{\mu^k} P(0), & m < k \leq N \end{cases} \quad (1)$$

$$P(0) = \left[\sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^k}{\mu^k} + \sum_{k=m+1}^N \frac{1}{k!} \cdot \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^m \cdot \lambda_h^{k-m}}{\mu^k} \right]^{-1} \quad (2)$$

因此,新到用户阻塞率为

$$p_{\text{new_block}} = \sum_{k=m}^N P(k) \quad (3)$$

切换用户阻塞率为

$$p_{\text{handoff_block}} = P(N) \quad (4)$$

2.2 4 种不同的多业务频谱切换策略

资源分配的设计原则:①切换用户优先于新到用户;②缓冲队列中的等待用户优先于一般新到用户;③实时用户优先于非实时用户.

切换用户进入系统时可用资源充足,则为切换用户分配资源;可用资源不足,则阻塞切换用户.新到用户的资源分配方案如图 3 所示.

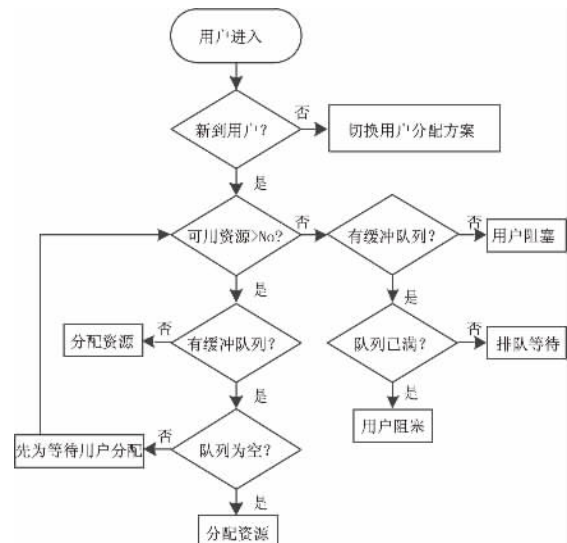


图 3 新到用户资源分配方案

Fig. 3 The distribution plans for new users

表 2 为 4 种多业务频谱切换策略的设计方案及各用户的优先级.由单业务分析方法可知,资源预留数越多,优先级对新到用户的抑制作用越大.

表 2 4 种多业务频谱切换策略

Tab. 2 User parameters of multiple-business system

设计方法	策略中的用户优先级	设计方法	策略中的用户优先级
Pro. 1	实时预留	Pro. 3	最高: 实时切换用户
	非实时预留		非实时切换用户
	无缓冲队列		次高: 实时等待用户
Pro. 2	实时预留	Pro. 4	非实时等待用户
	非实时预留		最低: 实时新到用户
	实时缓冲队列		非实时新到用户
Pro. 3	实时预留	Pro. 4	最高: 实时切换用户
	非实时预留		非实时切换用户
	实时缓冲队列		次高: 实时等待用户
Pro. 4	实时预留	Pro. 4	次低: 非实时等待用户
	非实时预留		最低: 实时新到用户
	实时缓冲队列		非实时新到用户

为了方便分析,将实时与非实时切换用户的资源预留数目设为相同.考虑新到用户的利益,Pro. 2、Pro. 3 和 Pro. 4 通过添加缓冲队列,增加新到用户分得资源的机会. Pro. 4 中设置缓冲队列的优先级,使实时等待用户的优先于非实时等待用户.

2.3 业务到达服从多种分布的 CPN 模型

传统 Markov 模型分析方法中,业务到达服从泊松分布,改变到达规律意味着整个模型的重新计算.而 CPN 模型中只需要改善业务到达的控制模块,即可从仿真结果中得出相应分析结果.

图 4 为用户到达规律的设置,用户按照泊松分布进入系统,由变迁“用户到达”实现.更改变迁控制函数,即可实现用户到达服从泊松分布、正态分布、均匀分布等数学分布.



图 4 用户到达页面

Fig. 4 The users arriving page

多分布 CPN 模型的设计选取多业务系统 Pro. 4 策略,将实时用户的到达和离开均设置为正态分布,非实时用户设置为均匀分布.

3 仿真结果分析

仿真中系统信道总数 $N = 50$,实时用户工作占用资源数 $a = 1$,非实时用户占用资源数 $b = 2$.切换用户到达率 $\lambda_{h1} = \lambda_{n1}/2$, $\lambda_{h2} = \lambda_{n2}/2$.系统对用户的平均服务时间为 $1/\mu_1 = 1/\mu_2 = 100$ s.新到用户和切换用户到达强度为 λ_n/μ 和 λ_h/μ .资源预留数目 $N_0 = 3$,等待队列长度 $k = 3$.

图 5 为 CPN 模型与传统 Markov 排队模型的数据结果,其中 $N_0 = 0$ 表示未设置任何优先级,此时新到用户与切换用户的阻塞率曲线变化相同.

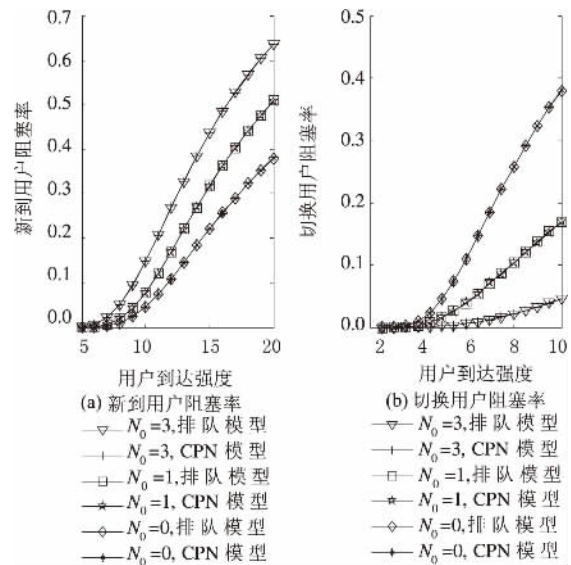


图 5 单业务分析方法的仿真曲线

Fig. 5 The simulation curve of single business analysis method

从图 5 中可以看出,相同条件下 CPN 与 Markov 排队模型的数据结果完全吻合.资源预留策略使得切换用户阻塞率明显降低,其代价是新到用户阻塞率升高.系统为切换用户预留的资源数越多,新到用户阻塞率就越高.考虑新到用户阻塞率不宜过高,一方面适当控制预留资源数,另一方面为新到用户添加缓冲队列.

图 6、图 7 为 4 种方案中实时用户、非实时用户阻塞率变化曲线. Pro. 2 比 Pro. 1 添加了实时等待队列,增加了实时用户分得资源的机会,相应减少了其他用户分得资源的机会,因此图 6(a) 中

Pro. 2 比 Pro. 1 低,图 7(a) 中 Pro. 2 比 Pro. 1 高. 同理,Pro. 3 中比 Pro. 2 添加了非实时新到用户等待队列,图 6(a) 中 Pro. 3 比 Pro. 2 高,图 7(a) 中 Pro. 3 比 Pro. 2 低. Pro. 4 与 Pro. 3 对比,实时等待用户优先于非实时等待用户,因此图 6(a) 中 Pro. 4 比 Pro. 3 低,图 7(a) 中 Pro. 4 比 Pro. 3 高.

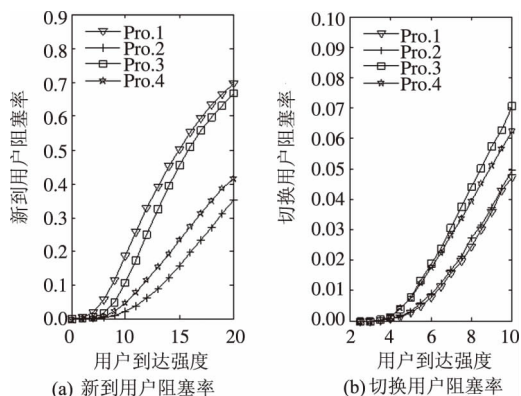


图 6 多业务实时用户各方案对比

Fig. 6 The option comparison of real-time multiple business methods

图 7(a) 中可以看出非实时新到用户的阻塞率对比中 Pro. 1 和 Pro. 4 存在交点. 原因是 Pro. 4 比 Pro. 1 增加了 2 个等待队列和 1 个优先级设置. 交点之前,用户到达强度较低,等待队列的缓冲作用大于优先级的抑制作用. 随着用户到达强度的逐渐增加,优先级对非实时用户的抑制作用愈发明显,并逐渐超过等待队列的缓冲作用,因此,交点之后 Pro. 4 的阻塞率会比 Pro. 1 高.

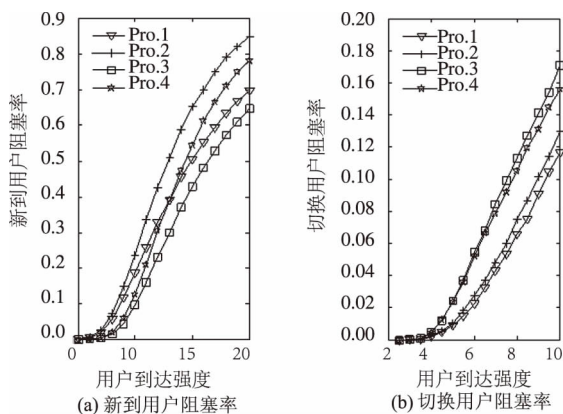


图 7 多业务非实时用户各方案对比

Fig. 7 The option comparison of non-real-time multiple business methods

图 6(b) 和图 7(b) 中,Pro. 1 ~ 4 中都为切换用户设置了资源预留,因此阻塞率十分接近. 而 Pro. 3 和 4 比 Pro. 1 和 2 多了新到用户等待队列,因此 Pro. 3 和 4 比 Pro. 1 和 2 阻塞率高.

图 8 为系统中用户到达服从不同数学分布时,各用户阻塞率随用户到达率的变化曲线. 图中显示,两种分布下的实时用户阻塞率变化趋势相似,原因是正态分布可视作泊松分布的极限分布. 而均匀分布与泊松分布之间不存在直接关系,因此这两种分布下的非实时用户阻塞率变化趋势差异较大. 研究表明,CPN 模型不但可以实现 Markov 语义的频谱切换模型,而且能够在已有模型中实现用户服从不同到达规律,从而克服了 Markov 无记忆特性问题.

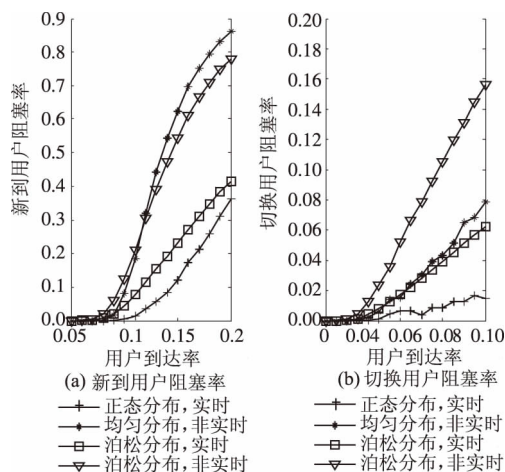


图 8 用户不同到达规律的阻塞率曲线

Fig. 8 The blocking probability curves for different arriving laws of users

4 结论

CPN 模型与 Markov 排队模型都可以通过采取资源预留策略和添加缓冲队列的方式改善部分用户的传输性能,实现单业务 OFDMA 通信系统的频谱切换策略. 资源预留策略可以降低切换用户的阻塞率,但以提高新到用户阻塞率为代价. 为新到用户添加缓冲队列,可以降低新到用户的阻塞概率,提高系统性能. 与 Markov 模型相比,CPN 模型可视性强,可以对现实复杂系统进行高度仿真与精确的性能分析,避免状态空间爆炸问题的出现. CPN 模型中的多种数学分布功能满足了系统业务不同到达规律的需求,克服了传统 Markov 模型的无记忆特性问题. 下一步的研究将细化不同用户的传输需求,使设计模型更接近实际应用.

参考文献:

- [1] 陆彦辉. B3G 移动通信系统中无限资源管理技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学信息与通信工程学院, 2006.

- [2] WU C Y, HE C, JIANG L G. Spectrum handoff scheme based on recommended channel sensing sequence [J]. Communications China. 2013, 10(8): 18–26.
- [3] 张天魁,冯春燕. B3G/4G 移动通信系统中的无线资源管理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [4] 杨守义, 郝万明. 认知无线电中考考虑公平性的 OFDMA 资源分配策略 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 55–59.
- [5] TRIGUI E, ESSEGHIR M, BOULAHIA LM. Spectrum handoff algorithm for mobile cognitive radio users based on agents' negotiation [C]. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). France: IEEE, 2013, 750–756.
- [6] SONG Y, XIE J. Prospect: a proactive spectrum handoff framework for cognitive radio ad hoc networks without common control channel [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2012, 11(7): 1127–1139.
- [7] TUMULURU V K, WANG P, NIYATO D, et al. Performance analysis of cognitive radio spectrum access with prioritized traffic [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1895–1906.
- [8] LU Y H, ZHANG Y Q, YANG S Y, et al. Modeling radio resource management in cognitive radio system based on OFDMA using colored petri net [J]. Journal of Electronics, 2010, 27(5): 671–676.
- [9] JAIMES R F J, MUNOZ R D, MOLINA C, et al. Modeling resource management in cellular systems using petri nets [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1997, 46(2): 298–312.
- [10] 马玉琨, 陆彦辉, 杨守义. OFDMA 系统中接纳控制的 Petri 网模型 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7675–7677.
- [11] ZENG R F, JIANG Y X, LIN C, et al. Dependability analysis of control center networks in smart grid using stochastic petri nets [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(9): 1721–1730.
- [12] JENSEN K, KRISTENSEN LM, WELLS L. Colored petri nets and cpn tools for modeling and validation of concurrent systems [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007, 10(9): 213–254.
- [13] 黄阳. 基于着色 Petri 网的知识流建模及应用研究 [D]. 南京: 南京邮电大学管理学院, 2014.
- [14] SCHOENEN R, YANIKOMEROGLU H. Erlang analysis of cellular networks using stochastic petri nets and user-in-the-loop extension for demand control [C]. Proceedings of the Globecom 2013 Workshop-broadband Wireless Access, USA: IEEE, 2013: 298–303.
- [15] YAO Y Y, LU Y H, YANG S Y. Modeling multi-traffic admission control in OFDMA system using colored petri net [J]. Journal of Electronics, 2012, 29(6): 509–514.

The CPN Modeling and Performance Evaluation about Spectrum Handoff Strategies in OFDMA Multi-service Communication System

LU Yanhui¹, LI Zhaoping^{1,2}, HAN Shujun¹, YANG Shouyi¹

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Long-Distance Communication Transmission Shijiazhuang Sub-bureau of Hebei, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: With the increasing diversified demand on communication system, the differentiation in multi-service is one of the major problems faced with the communication system on the premise of ensuring quality of service requirements of users. Markov model is the traditional way to study the switch problem, however, the memory-less quality and the state space explosion problem of the Markov model make the research about the spectrum handover strategies stay at the single business OFDMA system. This paper utilizes the Colored Petri Nets (CPN) to develop the spectrum switching strategies suitable for multiple business OFDMA system. Four different spectrum strategies considering both the switching users and new users are discussed using CPN model in this paper. The results show that CPN can overcome the limitation of Markov, and facilitate the research of the spectrum handoff quality about the complex system, especially the multiple business system contenting several mathematical distributions for the users' arrival laws.

Key words: spectrum handoff; Markov; colored petri net; multi-service system; mathematical distribution

文章编号: 1671-6833(2016)05-0062-05

混沌调制技术降低无线充电系统 EMI 水平研究

高金峰¹, 余 亚¹, 张旭辉², 司丞坤³

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 奇瑞汽车股份有限公司博士后科研工作站, 安徽 芜湖 241000; 3. 三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000)

摘 要: 定频 PWM (pulse width modulation) 控制模式下发射/接收线圈电流频谱能量集中, 导致对外电磁干扰水平较高. 将混沌载频调制技术应用在电动汽车无线充电系统的高频逆变器中. 这种调制技术能够展宽发射/接收线圈的电流频谱, 将相同的传输能量类似随机地分布在不同的频线上, 从而改善空间电磁场的频率谱, 降低了无线充电系统对外电磁干扰水平. 计算机模拟和实验结果都证明了方法的有效性.

关键词: 定占空比混沌载频调制; 无线充电; 电磁干扰; 高频逆变器

中图分类号: TM464 **文献标志码:** A **doi:** 10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2016. 05. 012

0 引言

发展电动汽车是节能、环保和低碳经济的需求, 无线充电是电动汽车充电技术的发展趋势^[1-2]. 无线充电系统发射/接收线圈存在高频交流, 其产生的电磁干扰 (EMI) 是设计者需要重点关注的问题. 对于标准 PWM 控制方式, 无线充电系统逆变器输出电流的频谱是离散谱, 它的能量集中在开关频率及倍频处. 因此, 对外的电磁辐射水平较高, 难以满足电磁兼容性的要求.

目前, 利用通信工程中的扩频技术降低 EMI 的方法备受关注. 其基本思想是, 通过调制信号频率, 将集中在各次谐波处的能量扩展到宽范围的边带内, 消减了谐波峰值, 从而降低对外电磁干扰水平^[3]. 采用不同的调制函数, 扩频技术可分为: 周期调制技术^[4]、随机调制技术、混沌调制技术等. 周期调制是使用周期函数作为调制信号, 调制后边带内频谱是离散的, 频谱峰值抑制能力弱. 随机调制和混沌调制后信号频谱是连续的, 降低 EMI 效果较好. 但随机调制技术所使用的理想随机信号难以获取, 混沌信号是一种易于获取的类随机信号. 大量文献研究表明混沌调制技术能有效降低 EMI 水平^[5-7]. 文献[7]给出了定占空比混沌载频调制 (CCFMFD) 模式在降低 BUCK 型直

流变换器输出电流峰值上作用明显的结论.

笔者介绍了 CCFMFD 模式的原理与实现方法. 在保证无线充电系统负载端输出电压、输出功率、输出效率不变的情况下, 对比分析了标准 PWM、CCFMFD 两种方式下发射线圈中电流的频谱. 计算机模拟和实验验证了该方法在降低无线充电系统电磁干扰上的有效性及实际系统的可实现性.

1 无线充电系统等效模型

图 1 是无线充电系统结构图. 发射线圈和接收线圈等效成一个松耦合变压器^[8]. L_1 是发射线圈等效电感, L_2 是接收线圈等效电感, M 是两个线圈间的互感. R_1 与 R_2 分别是发射线圈和接收线圈在高频下的等效电阻. 为了提升功率传输能力、减小对电源视在功率的要求, 系统采用原边串联、副边并联型补偿结构, 串联电容 C_1 和并联电容 C_2 使发射线圈和接收线圈工作在谐振或接近谐振的状态^[9]. 二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 组成全桥整流电路, C_3 为滤波电容, R_L 为负载电阻. 无线充电系统的工作原理是, 直流电经全桥逆变电路转变为高频交流, 然后通过发射线圈以电磁能的形式发送出去. 通过磁场耦合, 接收线圈将来自发射端的磁场能量转换成电能, 再经过整流滤波后对负载供电.

收稿日期: 2016-02-17; 修订日期: 2016-06-13

基金项目: 上海市宝山科委产学研合作项目 (CXY-2012-40)

作者简介: 高金峰 (1963—), 男, 河南项城人, 郑州大学教授, 博导, 主要从事非线性理论与功率电子学等研究,

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

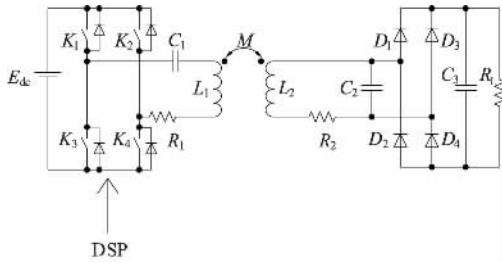


图1 无线充电系统结构图

Fig. 1 Structure of wireless charging system

2 定占空比混沌载频调制

混沌信号具有内在随机性、连续谱的特征,且易于获取、实现.文献[7]用混沌信号代替随机信号,形成了4种混沌开关模式.其中CCFMFD模式表示开关信号在每个周期内具有恒定的占空比,而周期(或载频)是混沌变化的,中心频率与标准PWM方式下的固定频率一致.这种调制方式将原本集中在开关频率及倍频上的能量扩展到一个更宽的频带上,使信号频谱由离散谱扩展为连续谱.因此,在信号总功率(能量)相同的前提下,减小了频谱中的谐波峰值,相应的降低了EMI水平,更易于符合国际EMC规范^[10].

笔者使用C-MEX S函数^[11]编写了逆变器开关信号发生模块.图2为Logistic混沌信号波形. Logistic映射是一种常用的混沌模型,迭代公式简单,易于实现.基于Logistic映射的混沌调制技术是一种软件手段,这种技术不需要增加硬件,便可以达到降低电磁干扰的目的,具有经济性.将Logistic映射迭代产生的混沌序列,叠加到标准PWM开关信号上,产生频率跟随混沌序列一起变化的开关信号. Logistic映射迭代公式为

$$X_{n+1} = k \times X_n \times (1 - X_n). \quad (1)$$

取 $k=4$, X 具有遍历性, $X \in (0, 1)$.

CCFMFD模式下逆变器开关频率可以表示为

$$f = f_0 + 2 \times (X - 0.5) \times \Delta f. \quad (2)$$

式中: f_0 为中心频率; X 为混沌序列; Δf 为频率最大偏移量.

为了更好的研究 Δf 对扩展频谱的影响,引入频率抖动宽度,定义为

$$\zeta = \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (3)$$

当 $\zeta = 0$ 时,系统工作于标准PWM方式;当 $\zeta \neq 0$ 时,系统工作于CCFMFD模式.

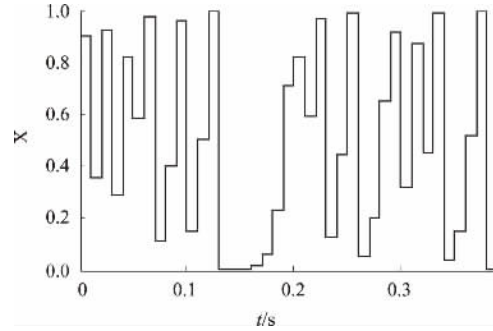


图2 Logistic混沌信号波形

Fig. 2 Waveform of Logistic chaotic signal

3 计算机模拟与实验结果分析

在MATLAB/simulink平台上对无线充电系统进行仿真.仿真参数如下:直流电源 $E_{dc} = 60$ V,发射线圈等效电感 $L_1 = 7 \times 10^{-4}$ H,发射端串联补偿电容 $C_1 = 10$ nF,接收线圈等效电感 $L_2 = 6.18 \times 10^{-5}$ H,接收端并联补偿电容 $C_2 = 100$ nF.滤波电容 $C_3 = 2000$ μ F,负载 $R_L = 65$ Ω .开关频率为64 kHz,占空比取0.5,采样时间为 1.5625×10^{-7} s.

根据文献[12]可知,采用串-并联补偿的无线充电系统简化模型的传递函数为

$$G(s) =$$

$$\frac{\frac{k^2}{MC_2(1-k^2)}s^2}{s^4 + \frac{\omega_0^3}{Q_2}s^3 + \omega_0^2\left(1 + \frac{1}{1-k^2}\right)s^2 + \frac{\omega_0^3}{Q_2}s + \omega_0^4}. \quad (4)$$

式中: $Q_2 = \frac{R}{\omega_0 L_2}$ 为二次侧品质因数,此处 Q_2 约为

2.2, R 代表接收端之后电路的等效负载.

图3为无线充电系统简化模型的幅频特性曲线,横轴为归一化频率,以64 kHz为基准.可以看出,幅频特性曲线在较宽的频带范围内变化很小.以此作为参考,选择合适的频率抖动宽度,混沌调制技术对系统的影响也就较小.

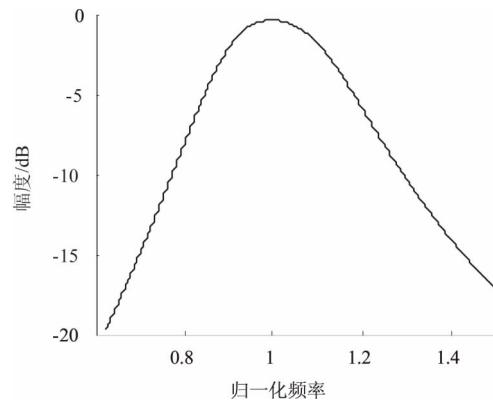


图3 无线充电系统幅频特性

Fig. 3 Amplitude frequency characteristics of wireless charging system

令 $\zeta = 0$, 系统工作于标准 PWM 方式, 无线充电系统逆变器开关频率固定为 64 kHz, 占空比为 0.5. 令 $\zeta = 0.025, 0.05, 0.1$, 系统工作于 CCFMFD 模式, 开关频率在 $64 \pm \Delta f$ (kHz) 范围内混沌变化, 占空比保持 0.5 不变.

图 4 为 $\zeta = 0, 0.025, 0.05, 0.1$ 时无线充电系统逆变器输出电流频谱. 横坐标对应的是谐波次数, 纵坐标为各次谐波的幅度, 以 PWM 模式下基频处峰值为基准. 如图 4(a) 所示, 由于采用了标准 PWM 方式, 无线充电系统逆变器输出电流频谱呈离散状态, 具有较高的谐波峰值, 对外的电磁干扰比较严重. 从图 4(b)、(c) 和 (d) 可以看出, 相比于标准 PWM 方式, CCFMFD 模式下逆变器输出电流频谱从离散谱拓宽为连续谱, 倍频处的

谐波峰值均有降低. 随着 Δf 的增大, 谐波频谱变得更加“连续、均匀”, 峰值降低的幅度也越大.

表 1 为标准 PWM 模式和 CCFMFD 两种模式下 1~19 次谐波频谱峰值的分贝值比较结果, $\zeta = 0.05$. 从表 1 中可以看出, 在 CCFMFD 模式下, 逆变器输出电流各奇次谐波邻域内的峰值都有不同程度的降低. 其中, 频谱中基频处的峰值降低了约 34%.

图 5 为不同 ζ 下, 负载电压波形和传输效率曲线对比, ζ 依次为 0、0.025、0.05、0.1. 效率计算公式为

$$\eta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_1 i_1 dt} \quad (5)$$

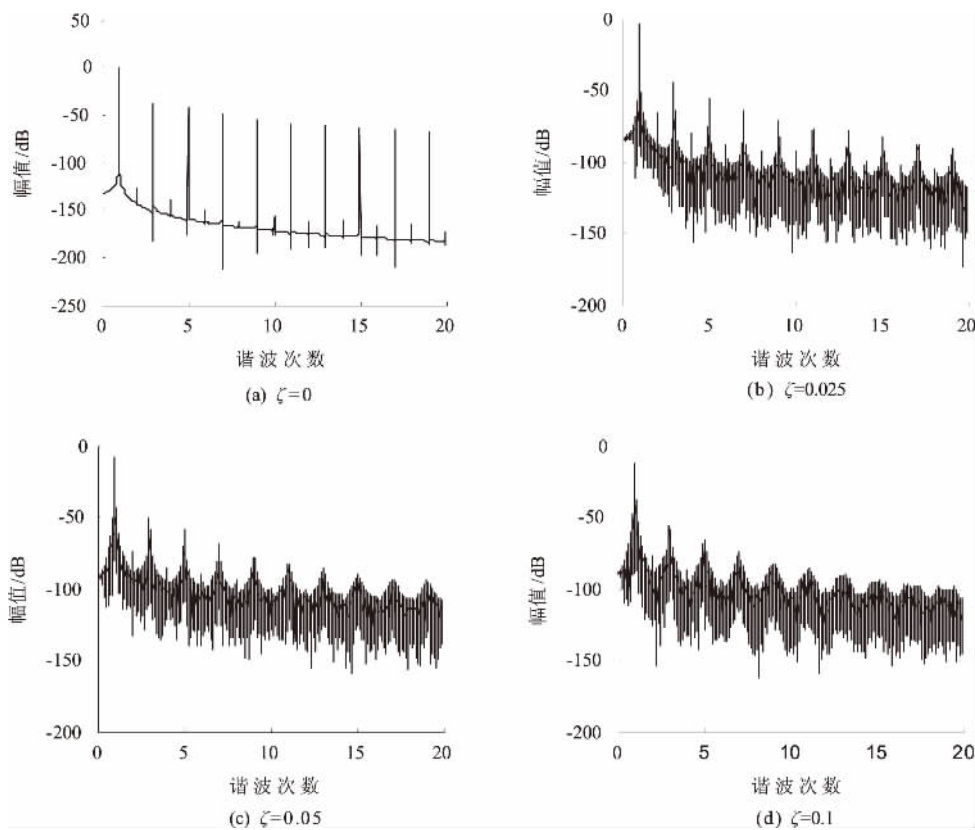


图 4 不同 ζ 下输出电流频谱

Fig. 4 Output current spectrum with various ζ

表 1 CCFMFD 和 PWM 相比峰值减小的值

Tab. 1 Compare to PWM, reduction of output current spectral peaks of CCFMFD

开关方式	谐波次数										dB
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
PWM	0	-37.7	-44.5	-51.0	-53.4	-56.5	-59.8	-62.8	-65.7	-70.0	
CCFMFD	-3.80	-48.1	-55.8	-59.6	-66.3	-70.6	-75.6	-77.8	-81.0	-83.7	
峰值减小量	3.80	10.4	11.3	8.60	12.9	14.1	15.8	15.0	15.3	13.7	

式中: u_2 、 i_2 分别代表输出电压和输出电流; u_1 、 i_1 分别代表输入电压和输入电流。

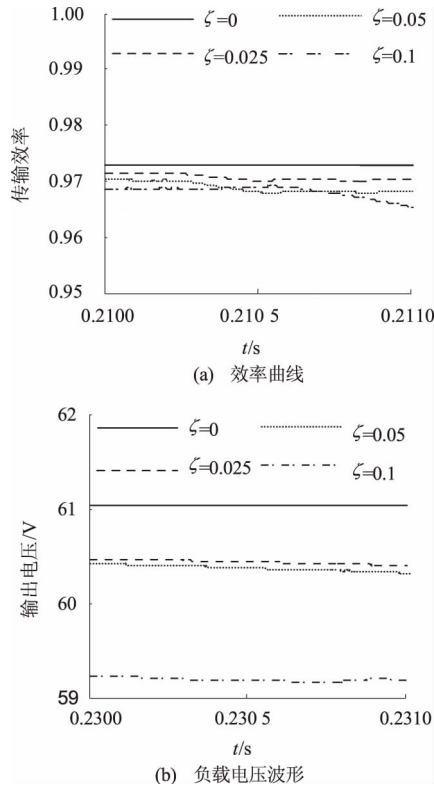


图5 不同 ζ 下效率曲线和负载电压波形
Fig.5 Load voltage waveforms and Efficiency curves with various ζ

当 $\zeta = 0.025, 0.05$ 时,负载电压和效率均有微小的波动,但与标准 PWM 下的情形几乎相等. 当 ζ 增大至 0.1 时,负载电压下降,功率输出减小,系统效率有少许降低. 仿真发现,当 $\zeta = 0.05$ 时,谐波频谱峰值已经有较大幅度的降低,此时的频率抖动对系统输出影响较小,因此, $\zeta = 0.05$ 是一个合适的选择.

实验中使用 TMS320F2812 控制器中事件管理器(EV)模块实现了标准 PWM 和 CCFMFD 两种开关模式,对电动汽车无线充电系统发射线圈电流对外电磁干扰问题进行了研究. 图 6(a) 为标准 PWM 模式下电动汽车无线充电系统的实验波形和频谱. 图 6(b) 为 CCFMFD 模式下电动汽车无线充电系统的实验波形和频谱. 在图 6(a) 和 (b) 中,通道 2(i_1) 显示的是无线充电系统发射线圈电流波形,通道 3(u_1) 显示的是无线充电系统逆变器输出电压波形,最下面的是无线充电系统发射线圈电流对应的频谱,频谱的纵坐标为各次谐波对应的分贝值. 显然,采用混沌调制后,发射线圈电流频谱“毛刺”减少,谐波峰值降低,即集中的能量被分散到更宽的频带上. 由于 ζ 的选取较合

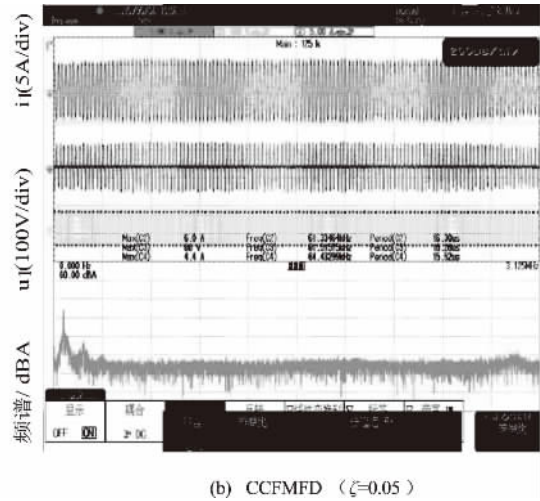
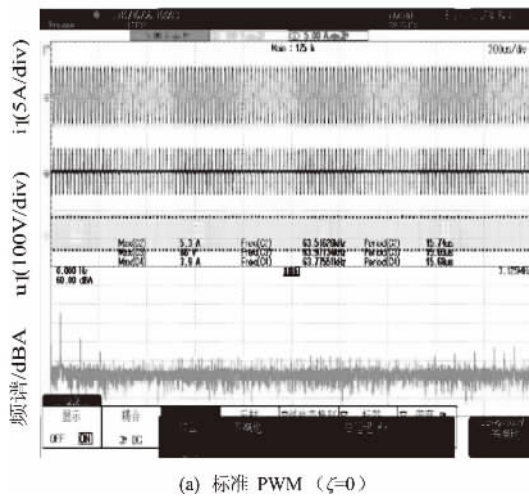


图6 实验波形和频谱

Fig.6 Experimental waveforms and spectrum

适,使用混沌调制后,充电系统的输出性能变化不大. 实验证明了应用混沌调制技术降低 EMI 的有效性.

4 结论

提出将混沌调制技术应用于降低电动汽车无

线充电系统电磁干扰水平. 仿真和实验结果均表明: ① CCFMFD 模式能拓宽各次谐波频谱,有效降低各次谐波频谱峰值; ② 可以结合幅频特性曲线选择合适的 ζ ,既能尽可能地降低电磁干扰,又能保证无线充电系统的工作稳定. 总体来说,对于对电磁干扰要求严格的电动汽车无线充电系统,

混沌调制技术在降低 EMI 增强 EMC 上具有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] 曹玲玲, 陈乾宏, 任小永, 等. 电动汽车高效率无线充电技术的研究进展 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 1-13.
- [2] DEFLOIRIO F, GUGLIELMI P, PINNA I, et al. Modeling and Analysis of Wireless "Charge While Driving" Operations for Fully Electric Vehicles [J]. Transportation Research Procedia, 2015(5): 161-174.
- [3] 齐琛, 陈希有, 牟宪民. PWM 逆变器混合扩频调制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 38-44.
- [4] STEPINS D, HUANG J. Optimization of modulation waveforms for improved EMI attenuation in switching frequency modulated power converters [J]. Power Engineering and Electrical Engineering, 2015, 13(1): 10-21.
- [5] 陆益民, 张波, 毛宗源. 混沌 SPWM 原理及其谐波抑制特性分析 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 126-129.
- [6] ZHANG Z, CHAU K T, WANG Z, et al. Improvement of electromagnetic compatibility of motor drives using hybrid chaotic pulse width modulation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4018-4021.
- [7] 高金峰, 吴振军, 赵坤. 混沌调制技术降低 Buck 型变换器电磁干扰水平研究 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 23-27.
- [8] 何秀, 颜国正, 马官营. 互感系数的影响因素及其对无线能量传输系统效率的影响 [J]. 测控技术, 2007, 26(11): 57-60.
- [9] 栗安鑫, 张江飞, 张祖洸. 磁耦合电能传输系统两类建模法的等效性分析 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(5): 40-43.
- [10] 张建军, 张莉明, 丘水生. 混沌调制抑制开关变换器 EMI 的实验研究 [J]. 航天控制, 2006, 24(4): 87-90.
- [11] 张亮, 郭仕剑, 王宝顺, 等. MATLAB7. X 系统建模与仿真 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [12] 程志远, 朱春波. 非接触式大功率感应充电系统谐振变换器的设计 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(1增): 404-408.

Research on Suppressing Electromagnetic Interference Level of Wireless Charging System by Using Chaotic Modulation Technology

GAO Jinfeng¹, YU Ya¹, ZHANG Xuhui², SI Chengkun³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou university, Zhengzhou 450001, China; 2. Chery Automobile Postdoctoral Working Station, Wuhu 241000, China; 3. Sanmenxia Power Supply Company, Sanmenxia 467001, China)

Abstract: In the PWM control mode with fixed frequency, the concentrated energy of current spectrum in transmitting/receiving coil resulted in the high level of external electromagnetic interference. This paper applied the chaotic carrier-frequency modulation with fixed-duty cycle to the high-frequency inverter of wireless charging system in electric vehicle. The modulation technique could broaden current spectrum of transmitting/receiving coil, randomly-like distributed the same transmission energy over different frequency lines, thus improving the frequency spectrum of electromagnetic field in space and reducing the level of external electromagnetic interference of wireless charging system. Both simulation and experimental results are given to support the validity of the method.

Key words: CCFMFD; wireless charging; EMI; high-frequency inverter

文章编号: 1671-6833(2016)05-0067-05

低碳型 35 kV GIS 的气室电场强度计算及结构优化

程 显^{1,2}, 王海燕², 闫广超², 焦连曜¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 气体绝缘金属封闭开关柜气室的电场分布是其结构设计时需考虑的关键问题, 应尽可能使气室内电场分布均匀, 避免场强集中处发生闪络和放电现象。直接使用 SF_6/N_2 混合气体替代纯 SF_6 气体作为 35 kV 电压等级 GIS 气室绝缘介质无法满足其绝缘要求。笔者针对此问题对 GIS 气室进行电场分析和结构优化研究。运用 Solidworks 软件建立 GIS 气室结构三维模型并进行有限元分析; 基于静电场理论对气室模型进行电场数值计算, 计算结果表明气室中隔离断口、接地断口、绝缘拉杆等处的电场强度过高, 针对这些部位进行结构优化, 并对优化后的气室模型进行校验计算。计算结果证明, 优化后 GIS 气室内电场强度较之前显著降低, 电场强度最大值低于替代气体绝缘强度, 替代气体可满足优化后气室的绝缘要求。

关键词: GIS 气室; 场强计算; 绝缘介质; 电场分布; 结构优化

中图分类号: TM561.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.013

0 引言

随着电力系统的不断发展, 运行可靠、结构紧凑的气体绝缘金属封闭开关柜(gas insulated metal enclosed switchgear, GIS)成为配电网必不可少的组成单元。目前绝大部分 GIS 均采用 SF_6 气体作为绝缘介质, SF_6 气体具有良好的绝缘性能, 同时也有严重的温室效应。随着人们环境保护意识的不断加强, 2020 年将在全球限制 SF_6 气体的使用^[1-2]。研究发现, 在氮气中混入少量 SF_6 气体可大幅提高氮气的绝缘强度^[3]。30% $\text{SF}_6/70\%$ N_2 混合气体在气压为 0.15 MPa 时耐电强度可达 5.5 kV/mm, 略低于同等压力下的纯 SF_6 气体, 因此采用低 SF_6 含量的 SF_6/N_2 混合气体替代纯 SF_6 气体作为 GIS 的绝缘介质是当下降低 SF_6 气体使用量的有效方法之一^[4-5]。目前, 已有 SF_6/N_2 混合气体在电力行业作为绝缘介质应用, 主要用来解决高原或严寒地区纯 SF_6 气体液化温度较高的问题和充气电缆的绝缘问题, 在 GIS 中的应用较少且混合气体中 SF_6 气体含量均较高(在 50% 以上), 对降低 SF_6 气体使用量的意义不明显^[6-7]。

GIS 气室的结构设计是保证其电场分布合

理、绝缘强度可靠的关键, 合理的电场分布可减少电场强度集中部位并降低该部位的场强值, 避免闪络和放电现象发生。电场分布研究主要通过实验测量和仿真计算的方法。高压实验成本较高, 引入测量探头会使电场产生畸变, 导致测量结果有一定误差。随着数值模拟技术与电磁场仿真软件的发展, 电场仿真计算应用日益广泛。电场仿真计算较实验测量成本低且效率更高, 电场仿真在产品设计与优化方面更具优势^[8-11]。目前, 电器产品的设计与优化主要通过电场仿真计算的方法, 文献[8]研究了 72.5 kV 真空灭弧室的电场分布; 文献[9]应用仿真计算的方法对 40.5 kV 真空断路器绝缘结构进行了优化设计; 文献[10]应用 ANSYS 软件对高压 SF_6 断路器灭弧室进行了优化设计。

笔者针对 0.15 MPa SF_6 (体积分数为 30%) / N_2 (体积分数为 70%) 混合气体充入 35 kV 电压等级 GIS 气室作为绝缘介质时, 气室内出现部分部位电场强度高于替代气体绝缘强度的问题, 以气室结构为对象开展研究, 运用仿真软件 ANSYS 进行电场数值模拟计算得出气室内场强较高区域, 通过对气室结构优化设计使其符合替代气体

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407163、51477024); 中国博士后科学基金资助项目(2014M552012, 2015T80778)

作者简介: 程显(1982—), 男, 河南平顶山人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事高压电器研究, E-mail: chengxian@zzu.edu.cn.

的绝缘强度要求,为环保气体应用于 35 kV GIS 提供设计依据。

1 气室模型建立与电场计算

1.1 气室模型建立

气室内部主要包括母线、母线套管、真空灭弧室、内绝缘锥、三工位隔离接地开关、连接部件等。气室部件多为非对称结构,采用 3 维模型可以更准确的反映气室模型特征。根据气室实际结构尺寸建立的气室 3 维模型如图 1 所示。

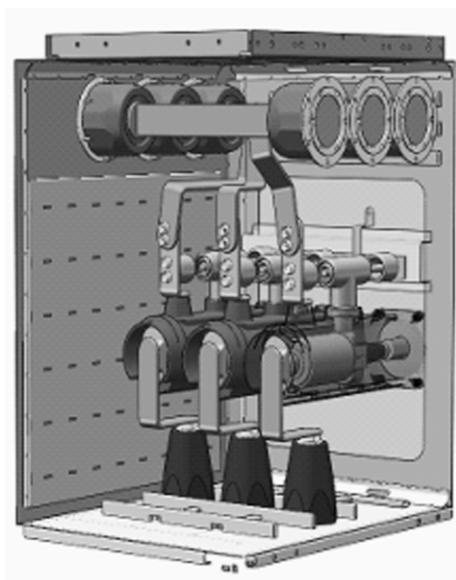


图 1 GIS 气室模型

Fig. 1 GIS gas chamber model

1.2 场强求解方法

场强计算过程中主要条件设定气室外壳接地,即其为整个计算区域边界,计算区域包括上述部件以及气室所充入的绝缘介质。气室内部的材料主要分为导体和绝缘材料:导体材料铜是良导体,电场计算时作为等势体处理;绝缘材料包括聚氯乙烯、 SF_6/N_2 混合气体、环氧树脂等,这些材料在工频电场作用下,内部位移电流远大于传导电流可视为理想电介质。由于工频电压频率较低可以忽略感生电场的影响,因此气室内部电场可以认为是静电场。上述气室电场分布可由静电场方程描述,静电场的基本方程微分形式可表示如下

$$\nabla \cdot D = \rho. \quad (1)$$

$$\nabla \times E = 0. \quad (2)$$

$$D = \varepsilon E. \quad (3)$$

上述 3 个方程构成了静电场的基本方程,其中 D 为电位移; ρ 为电荷密度; E 为电场强度; ε 为介电常数,由材料属性决定。为便于计算,引入电

位函数的概念,用 φ 表示电位,静电场的电场强度矢量等于负的电位梯度,即

$$E = -\nabla\varphi. \quad (4)$$

联立上式可以得出

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}. \quad (5)$$

式(5)是静电位的微分方程,通过求解此方程可以确定空间任一点的电位。通过施加边界条件和激励源,静电场分布即可唯一确定。静电场的边界条件可表示为

$$-\varepsilon_1 \frac{\partial\varphi_1}{\partial n} + \varepsilon_2 \frac{\partial\varphi_2}{\partial n} = \sigma. \quad (6)$$

式中: σ 为分界面上分布的自由电荷面密度; ε 为分界面两种介质的介电常数。

进行电场计算前还需对气室模型进行网格划分,划分的网格质量对仿真结果有很大影响,笔者采用四面体网格划分 GIS 气室模型,划分后的 GIS 气室剖分节点 7 245 180 个,可满足计算精度的要求。

1.3 场强计算

根据 GB 3906—2006 设计要求,35 kV 电压等级 GIS 应能够耐受工频电压为:隔离断口 118 kV / 1 min,接地断口 95 kV / 1 min; 雷电冲击耐受电压:隔离断口 215 kV,接地断口 185 kV。仿真计算中以雷电冲击耐受电压值进行测算,在隔离断口与接地断口分别施加 215 kV 和 185 kV 电压,接地触头与外壳始终保持零电位。图 2 为气室内三工位开关隔离断口闭合时的电场分布情况,气室内整体电场分布不均匀,断口和绝缘拉杆处最甚。图 3、图 4 分别为三工位开关接地断口和隔离断口在合闸位置时气室的电场强度分布情况。

由图 2~4 可知,三工位开关工作在接地位置时,电场强度最大值出现在隔离断口的端部,其值为 6.29 kV/mm; 隔离断口处于闭合状态时,接地断口的电场强度最大值为 6.6 kV/mm; 除此之外,绝缘拉杆和真空灭弧室上下接线端子上的电场强度分别为 5.87 kV/mm 和 5.25 kV/mm,也高于或接近替代气体 5.5 kV/mm 的绝缘强度。因此,需要对这些部位进行结构优化使该处及临近区域的电场分布更加均匀,满足 GIS 气室的绝缘要求。

2 气室结构优化与电场校验计算

2.1 气室结构优化

通过上述场强计算可知气室内存在电场强度

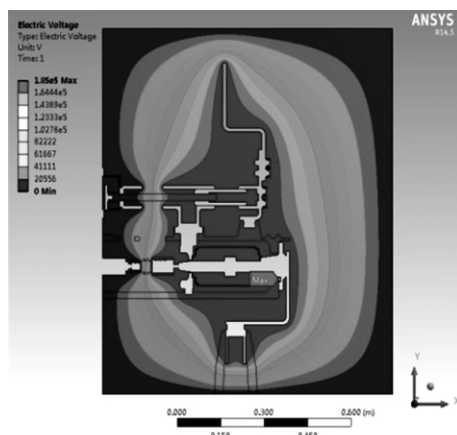


图2 GIS 气室电场分布

Fig.2 The electric field distribution of GIS chamber

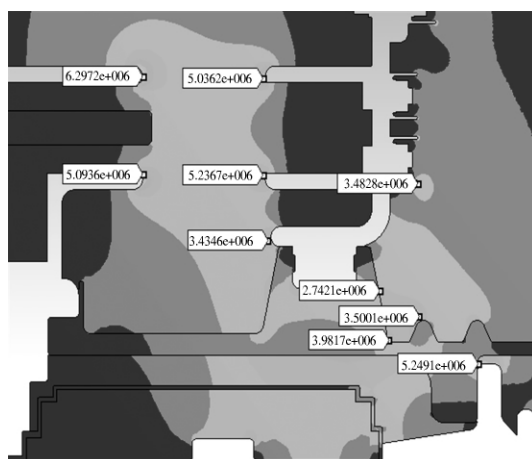


图3 隔离断口电场强度分布

Fig.3 The electric field strength distribution of disconnecting break

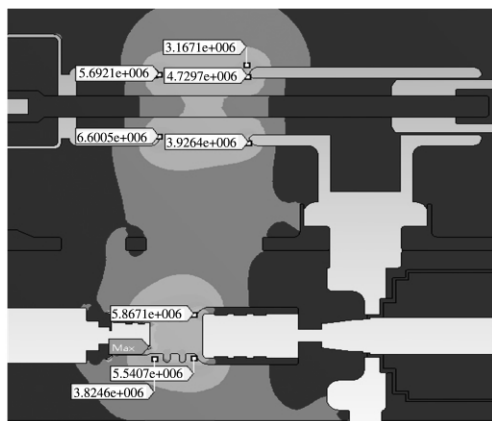


图4 接地断口与绝缘拉杆电场强度分布

Fig.4 The electric field strength distribution of grounding break and insulated rod

较为集中且场强过高部位,必须对其重新进行结构优化. 其中,隔离开关、接地开关断口部位倒角过于尖锐导致该处电场强度特别集中,可以通过增加屏蔽罩的方法来降低电场强度;绝缘拉杆与

其伞裙连接处形状不规则,且绝缘拉杆等效绝缘长度不足容易发生闪络,可以通过增大绝缘杆与绝缘伞裙端接处曲率半径、增多伞裙个数以增加等效绝缘长度的方法降低其电场强度;其他场强较为集中但未超过限定值的部位可以通过优化母线排形状、增大母线转角和固定件端部曲率半径、使用表面平滑度更好的配件等方法尽可能均匀电场分布. 对优化后的部位进行建模并重新代入GIS气室模型进行电场计算,如果场强计算值低于设定的场强值则该处优化符合设计要求,反之则需进一步结构优化,直至场强计算值低于设定值. 气室结构优化设计的流程如图5所示.

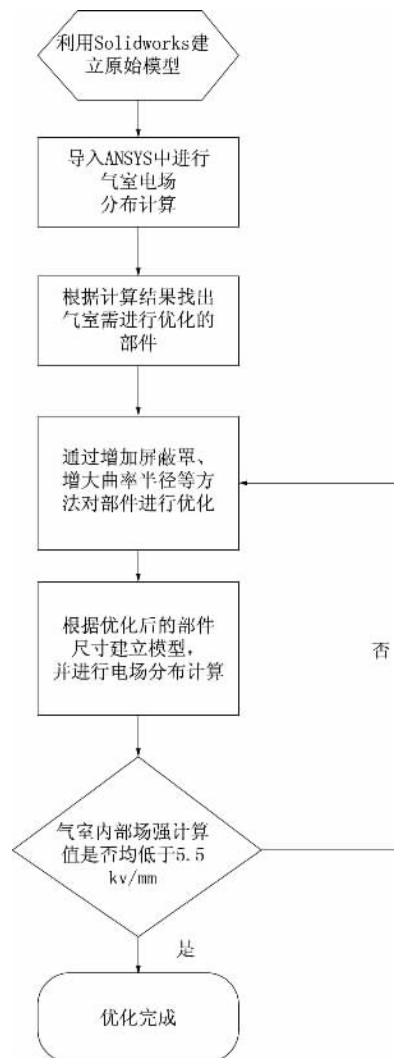


图5 优化流程图

Fig.5 Optimization process

2.2 结构优化结果

依照图5中优化设计流程,最终完成的GIS气室三维模型如图6所示. 原气室内场强过高而重新优化的部件电场强度计算结果如图7、图8、图9所示,图7是隔离断口优化后电场强度分布

图,图 8 是接地断口优化后电场强度分布图,图 9 是绝缘拉杆表面电场强度分布图。

由图 7~9 可知,电场强度分布规律虽与之前相同,高场强区域仍集中在隔离断口、接地断口端部和绝缘拉杆表面,但上述电场强度的最大值已降至 5.05 kV/mm,低于替代气体的绝缘强度值 5.5 kV/mm,替代气体此时可以满足气室内的绝缘要求。气室内结构优化前后电场强度集中区域的场强值对比如表 1 所示。

3 结论

(1) 针对 SF_6/N_2 混合气体替代 SF_6 气体作为 35 kV GIS 气室绝缘介质无法满足气室绝缘要求的问题,建立了气室结构 3 维模型并进行电场计

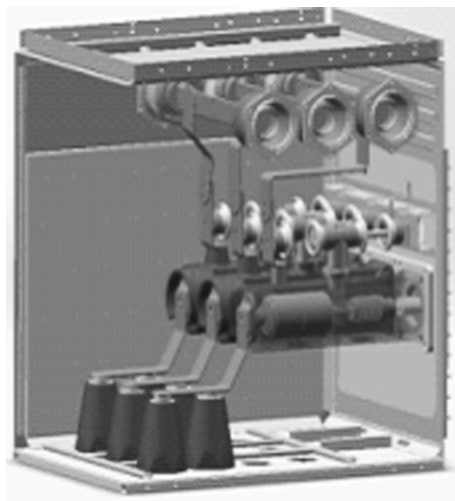


图 6 优化后气室三维模型

Fig. 6 The optimized chamber three-dimensional model

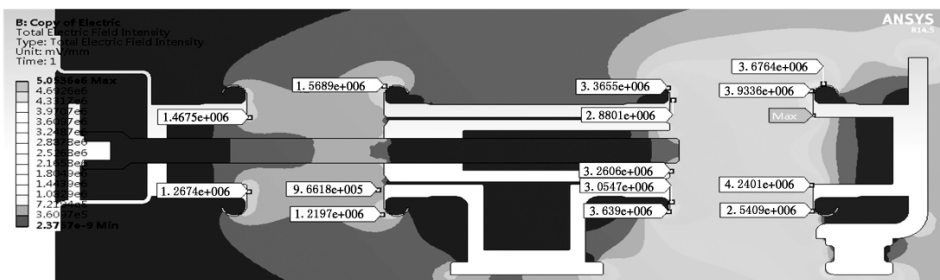


图 7 隔离断口优化后电场强度分布

Fig. 7 The optimized electric field strength distribution of disconnecting break

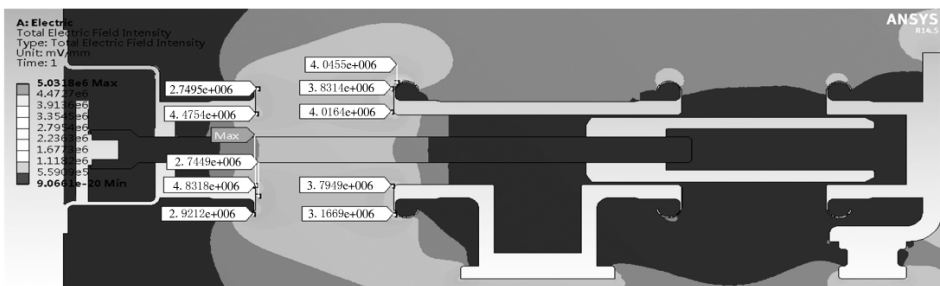


图 8 接地断口优化后电场强度分布

Fig. 8 The optimized electric field strength distribution of grounding break

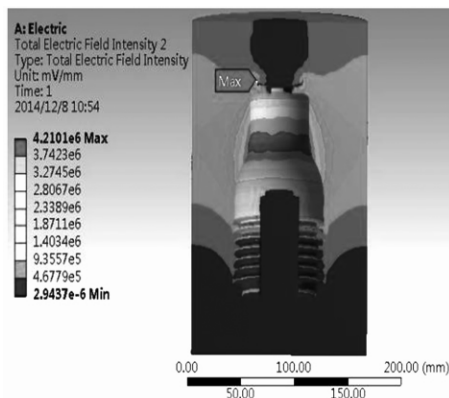


图 9 绝缘拉杆优化后电场强度分布

Fig. 9 The optimized electric field strength distribution of insulated rod

表 1 气室内结构优化前后电场强度集中处场强对比

Tab. 1 Mix proportion of concrete

优化 部位	改进前电场强度 /($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)	改进后电场强度 /($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)
隔离断口	6.29	5.05
接地断口	6.60	5.03
绝缘拉杆	5.87	4.21
线座搭接端	5.25	5.06

算。计算结果表明,气室内隔离断口、接地断口和绝缘拉杆等处电场强度较为集中,电场强度最大值均超过替代气体的绝缘强度。

(2) 对气室内主要部件进行了结构优化设计,并对优化后的气室模型重新进行电场计

算,计算结果表明气室内部电场强度最大值已降至 5.5 kV/mm 以下。

(3) 通过对气室上述部位的结构优化, SF_6/N_2 混合气体可以作为 35 kV GIS 气室的绝缘介质,为 SF_6/N_2 混合气体应用于中压低碳型 GIS 提供了依据,基于研究成果的 35 kV GIS 样机 2015 年 5 月通过试验测试,绝缘水平满足相关标准要求。

参考文献:

- [1] The Working Group III. Intergovernmental panel on climate change: fifth assessment report [R]. Geneva, Switzerland: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [2] 李惠芬. SF_6 气体替代面临诸多挑战 [J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 50-51.
- [3] 李旭东,周伟,屠幼萍,等. 0.1~0.25 MPa 气压下二元混合气体 SF_6-N_2 和 SF_6-CO_2 的击穿特性 [J]. 电网技术, 2012, 36(4): 260-264.
- [4] 郭臻,张乔根,文韬,等. 雷电冲击下稍不均匀电场中 SF_6/N_2 混合气体的协同效应 [J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 69-75.
- [5] CHRISTOPHOROU L G, VAN B R J. SF_6/N_2 mixtures basic and HV insulation properties [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 952-1003.
- [6] 牛文军,魏俊梅,张铎,等. 550 kV SF_6/N_2 充气母线绝缘性能研究 [J]. 高压电器, 2014, 50(1): 77-80.
- [7] 刘彦军,李松琴. 户外 SF_6 断路器在严寒地区可靠运行的措施 [J]. 高压电器, 2001, 37(5): 53-61.
- [8] 邱志斌,黄道春,阮江军. 72.5 kV 真空灭弧室电位和电场分布研究 [J]. 高压电器, 2012, 48(11): 36-42.
- [9] 杨敬华,范承勇. 40.5 kV 真空断路器绝缘结构电场分析及优化设计 [J]. 电网技术, 2011, 35(12): 146-152.
- [10] 和彦森,张俊民,袁海文. 高压 SF_6 断路器灭弧室电场优化与分析 [J]. 高压电器, 2006, 42(6): 442-449.
- [11] 孙纪东. 中压 GIS 设备的气室绝缘研究与设计 [J]. 电气时代, 2009(5), 78-83.

The Electric Field Strength Calculation and Structure Optimization for Low-carbon 35kV GIS Chamber

CHENG Xian¹, WANG Haiyan², YAN Guangchao², JIAO Lianhao¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. Ping Gao Group Co, Ltd, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: The chamber electric field distribution of gas insulated metal enclosed switchgear is an important issue for its structural design. The chamber electric field distribution should be as uniform as possible to avoid flashover and discharge phenomenon in the high electric field strength place. In this paper, SF_6/N_2 mixed gas replaces SF_6 gas as an insulation dielectric of 35kV voltage class GIS chamber. The electric field analysis and structural optimization are conducted to solve flashover problem in the chamber caused by the alternative gas insulated strength lower than the maximum electric field strength of chamber. The Solidworks software is used to build a three-dimensional model of GIS chamber, and its finite element analysis is conducted. The electric field intensity of chamber model is calculated based on the electrostatic field theory. The calculation dates show that the electric field strength values of disconnecting break, grounding break and insulated rod, etc in the chamber are too high. The structure optimization is conducted for those parts, and the optimized chamber model is carried on a verification calculation. The results proved that the electric field strength of optimized GIS chamber is significantly lower than previous one. Its maximum value is lower than the alternative gas dielectric strength, so the alternative gas can meet the insulation requirement of optimized gas chamber.

Key words: GIS gas chamber; electric field strength calculation; insulation dielectric; electric field distribution; structure optimization

文章编号: 1671-6833(2016)05-0072-05

基于 MATLAB 的汽车线性最优控制主动悬架仿真研究

刘本学, 蔺超云, 郭沛东, 栗良玉

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了论证主动悬架在改善汽车行驶平顺性方面的优越性, 在建立车辆 1/4 主动悬架模型和随机路面激励模型的基础上, 采用线性最优控制作为主动悬架的控制策略, 并设计线性最优控制器, 利用 MATLAB 建立频域和时域的主动悬架仿真模型, 在随机路面激励上对主动悬架分别在频域和时域内进行仿真并与被动悬架进行对比分析. 结果表明: 主动悬架能够有效降低车身加速度、轮胎动载荷和悬架动挠度, 从而显著提高汽车的行驶平顺性和操纵稳定性. 该设计的模型建立、最优设计和仿真分析为主动悬架的进一步研究及实际应用提供了有益参考.

关键词: 汽车; 主动悬架; 线性最优控制; 平顺性

中图分类号: U461.4

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.014

0 引言

为了提高主动悬架的性能, 使汽车获得良好的行驶平顺性和操纵稳定性, 国内外学者在主动悬架控制策略设计方面做了大量的研究: Kashani、Nagai Magao、Watanabe 等^[1-3]在模糊控制、神经网络控制等现代控制理论方面做了突出贡献; 国内从上世纪 80 年代中期, 以何渝生、胡海岩、丁科^[4-6]为代表的学者开始了这方面的研究工作.

近几年, 多数国内外研究都是采用现代控制理论基于两自由度车辆模型开展的, 但激励是通过座椅传递给人的, 为了更多地考虑人乘坐舒适性, 笔者是在两自由度的车辆模型的基础上建立 1/4 车辆三自由度振动模型, 应用线性最优控制理论, 对主动悬架的性能开展仿真研究.

1 基于线性最优控制的主动悬架模型建立

1.1 主动悬架 1/4 车辆模型

由于笔者侧重悬架系统控制策略的研究, 1/4 车辆模型恰好能体现汽车的垂直振动特点, 而三质量车辆模型能够体现人体对振动的敏感程度与路面不平度的关系, 所以笔者选择 1/4 车辆三质量模型来分析汽车的行驶平顺性^[7-8].

依据人-车-路的相互作用建立主动悬架的 1/4 车辆三质量模型如图 1 所示.

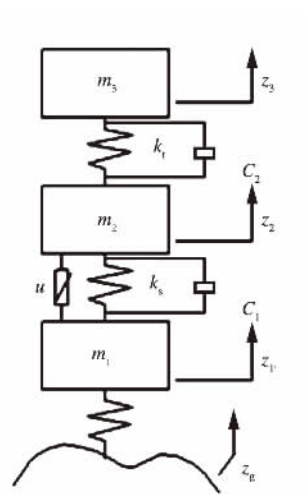


图 1 三质量车辆模型

Fig. 1 Three-mass vehicle model

图中: m_1 为非簧载质量, 即车轮质量; m_2 为簧载质量, 即车身质量; m_3 为人体质量; k_w 为轮胎刚度; k_s 为悬架刚度; k_t 为座椅刚度; c_1 为悬架阻尼; c_2 为座椅阻尼; z_1 为车轮垂直位移; z_2 为悬架垂直位移; z_3 为座椅垂直位移; z_g 为路面不平度激励; u 为作动器的控制力.

根据牛顿第二运动定律, 建立车辆模型的动

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-06-19

基金项目: 国家青年科学基金资助项目(11402234)

作者简介: 刘本学(1977—), 男, 河南新蔡人, 郑州大学讲师, 工学博士, 主要从事车辆动态仿真与可靠性评估研究,
E-mail: liubenxue@zzu.edu.cn.

力学方程:

$$m_3 \ddot{z}_3 + c_2(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_t(z_3 - z_2) = 0. \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_s(z_2 - z_1) - c_2(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - k_t(z_3 - z_2) - u = 0. \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + k_w(z_1 - z_g) + u - c_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_s(z_2 - z_1) = 0. \quad (3)$$

当上述方程中的 $u=0$ 时,即将图 1 中作动器 u 去掉,该主动悬架车辆模型就变成被动悬架车辆模型。

1.2 主动悬架线性最优控制(LQR)

笔者选择线性最优控制,即 LQR 作为主动悬架的控制方法。线性最优控制是指在理想系统模型的基础上,采用控制对象的状态响应和控制输入的加权二次型作为性能指标,保证在动态稳定的条件下控制对象实现最优控制^[9]。

(1) LQR 控制状态方程

设系统的状态变量为:

$$\mathbf{X} = [z_3 - z_2 \quad \dot{z}_3 \quad z_2 - z_1 \quad \dot{z}_2 \quad z_1 - z_g \quad \dot{z}_1]^T. \quad (4)$$

把路面激励速度功率谱密度近似处理为白噪声,即 $w = \dot{z}_g$ 。结合车辆模型的动力学方程(1) ~

(3) 经整理后系统的状态方程可写为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}\mathbf{W}. \quad (5)$$

式中:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_2} & 0 & -\frac{1}{m_1} \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{G} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{U} = [u]; \quad \mathbf{W} = [w];$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_t}{m_3} & -\frac{c_2}{m_3} & 0 & \frac{c_2}{m_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{k_t}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{k_s}{m_2} & -\frac{c_1+c_2}{m_2} & 0 & \frac{c_1}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{k_s}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & -\frac{k_w}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} \end{bmatrix}.$$

(2) 最优控制器设计

笔者所研究的车辆模型为线性系统,为了提高悬架性能,具有良好的平顺性和操纵稳定性并控制系统所需要的能量较小,选择以车身加速度、悬架动挠度和轮胎相对动载为动态变量组成的二次型方程作为性能评价指标,把动态系统的最优控制问题转化为线性系统的二次型最优控制问题^[10-12]。综合考虑选择的性能指标为:

$$J = \int_0^\infty [q_1 \dot{z}_2^2 + q_2 (z_2 - z_1)^2 + q_3 k_w (z_1 - z_g)^2 + ru^2] dt. \quad (6)$$

式中: q_1, q_2, q_3 为加权系数; r 为能量约束系数。

将上式写成矩阵形式

$$J = \int_0^\infty [\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{N} \mathbf{U} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}] dt. \quad (7)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \frac{q_1 k_t}{m_2^2} & \frac{q_1 c_2}{m_2^2} & -\frac{q_1 k_t^2}{m_2^2} & -\frac{q_1 (c_1 + c_2)}{m_2^2} & 0 & \frac{q_1 c_1}{m_2^2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R} = [r + \frac{q_1}{m_2^2}].$$

式中:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{q_1 k_t^2}{m_2^2} & \frac{q_1 k_t c_2}{m_2^2} & -\frac{q_1 k_t^2}{m_2^2} & -\frac{q_1 k_t (c_1 + c_2)}{m_2^2} & 0 & \frac{q_1 k_t c_1}{m_2^2} \\ \frac{q_1 k_t c_2}{m_2^2} & \frac{q_1 c_2^2}{m_2^2} & -\frac{q_1 k_t c_2}{m_2^2} & -\frac{q_1 c_2 (c_1 + c_2)}{m_2^2} & 0 & \frac{q_1 c_1 c_2}{m_2^2} \\ -\frac{q_1 k_t^2}{m_2^2} & -\frac{q_1 k_t c_2}{m_2^2} & \frac{q_1 k_t^2}{m_2^2} + q_2 & \frac{q_1 k_t (c_1 + c_2)}{m_2^2} & 0 & -\frac{q_1 k_t c_1}{m_2^2} \\ -\frac{q_1 k_t (c_1 + c_2)}{m_2^2} & -\frac{q_1 c_2 (c_1 + c_2)}{m_2^2} & \frac{q_1 k_t (c_1 + c_2)}{m_2^2} & \frac{q_1 (c_1 + c_2)^2}{m_2^2} & 0 & -\frac{q_1 c_1 (c_1 + c_2)}{m_2^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_3 k_w & 0 \\ \frac{q_1 k_t c_1}{m_2^2} & \frac{q_1 c_1 c_2}{m_2^2} & -\frac{q_1 k_t c_1}{m_2^2} & -\frac{q_1 c_1 (c_1 + c_2)}{m_2^2} & 0 & \frac{q_1 c_1^2}{m_2^2} \end{bmatrix};$$

主动悬架的最优控制力为 $u = -\mathbf{K}\mathbf{X}$. (8)

其中 $\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$, \mathbf{P} 可根据如下 Riccati 微分方程

$$\dot{\mathbf{P}} + \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0. \quad (9)$$

2 建立随机路面激励模型

路面不平度是个随机过程,主要采用路面功率谱密度描述它的统计特性.当汽车匀速行驶时,汽车在随机路面上速度的时域功率谱是不随频率变化的白噪声信号,所以路面激励可由谱密度为 $2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u$ 的白噪声信号通过一积分器产生^[14],即:

$$z_g = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} \int w(t) dt. \quad (10)$$

式中: $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数; u 为车速; n_0 为参考空间频率; $w(t)$ 为零均值单位白噪声.

目前我国的路面谱中 B、C 两级所占比例较大,笔者选取 C 级路面垂直位移作为激励进行仿真,路面不平度系数 $G_q(n_0) = 256 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,车速 $v = 40 \text{ km/h}$,参考空间频率 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$,在 MATLAB/Simulink 中的仿真模型如图 2 所示,仿真结果如图 3 所示.

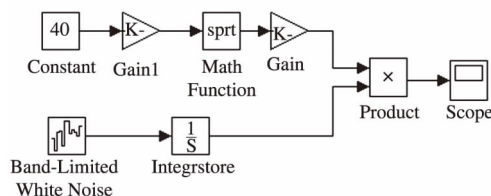


图 2 路面谱仿真模型

Fig. 2 Road spectrum simulation model

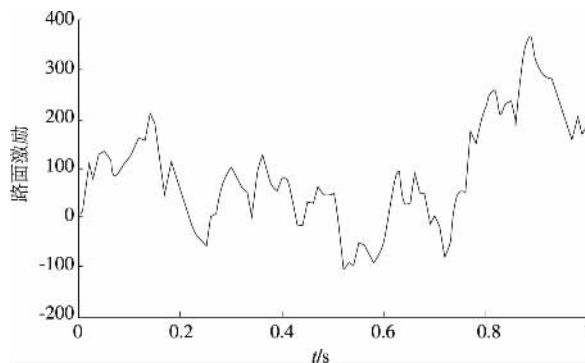


图 3 C 级路面下白噪声随机路面输入

Fig. 3 White noise random road input under C level pavement

3 基于 Matlab 的仿真分析

笔者选用某轿车悬架系统为例,其主要技术参数如表 1 所示.根据经验积累和反复调试,加权系数和能量约束系数确定为 $q_1 = 1$ 、 $q_2 = 5$ 、 $q_3 = 80\,000$ 、 $r = 1$.利用 MATLAB 编程和 Simulink 仿真模块分别建立主动悬架最优控制的频域仿真模型和时域仿真模型(如图 4 所示).令作动器的控制力 $u = 0$,主动悬架的仿真模型就变为被动悬架的仿真模型.将两种悬架在 40 km/h 的车速下分别在时域和频域内进行仿真,并将仿真结果进行对比分析.仿真结果如图 5 ~ 图 7 所示.

表 1 汽车主要质量和性能参数表

Tab. 1 Table of main quality and performance parameters of vehicle

参数名称	人体质量	车辆质量	车轮质量	车轮刚度	悬架刚度	座椅刚度	悬架阻尼	座椅阻尼
数值(单位)	56 kg	290 kg	30 kg	128 000 N/m	16 812 N/m	9 950 N/m	1 137 N · s/m	264 N · s/m

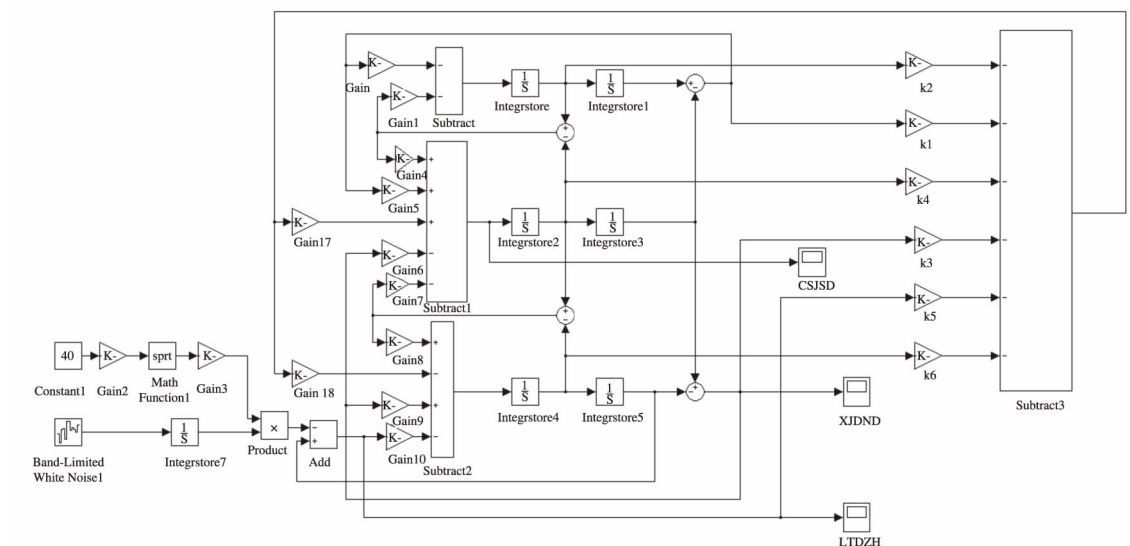


图 4 基于线性最优控制的主动悬架时域仿真模型

Fig. 4 Time domain simulation model of active suspension based on linear optimal control

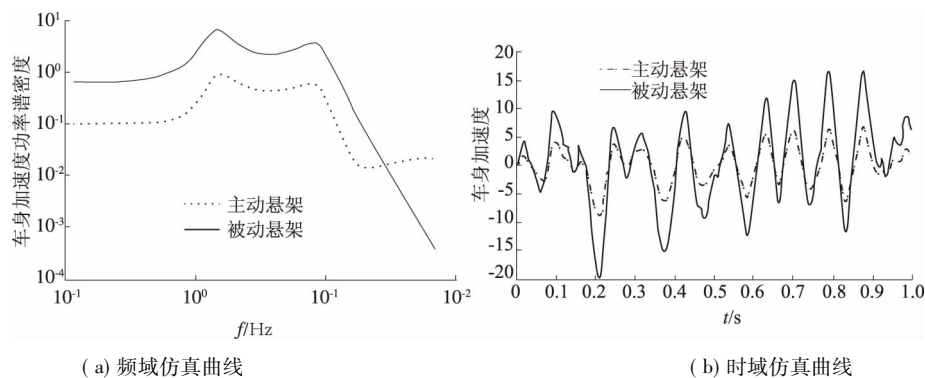


图5 车身加速度仿真曲线

Fig. 5 Simulation curve of vehicle body acceleration

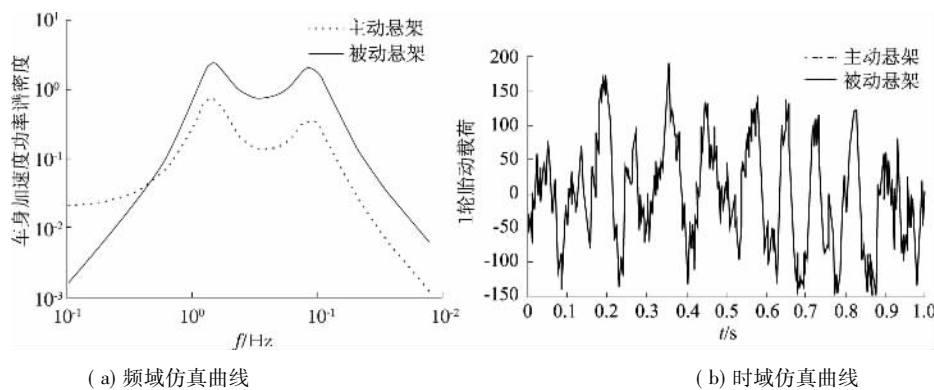


图6 轮胎动载荷仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve of tire dynamic load

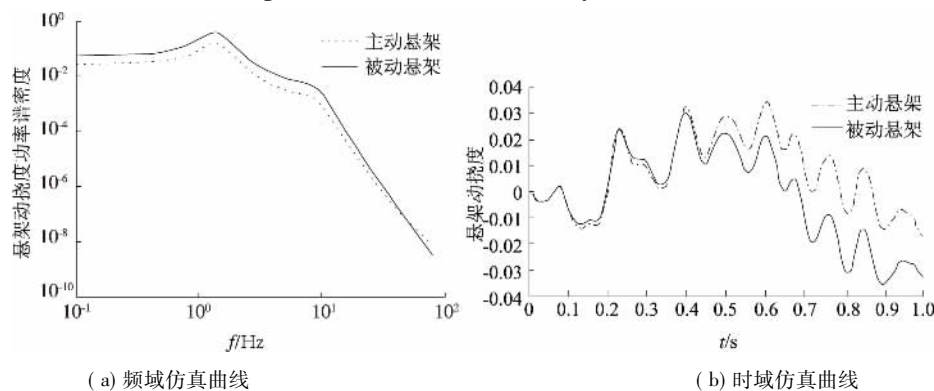


图7 悬架动挠度仿真曲线 a) 频域仿真曲线; b) 时域仿真曲线

Fig. 7 Simulation curve of suspension dynamic deflection

由图5可得: 在0.1~50 Hz频段内, 主动悬架的车身加速度降为被动悬架的1/8, 而在50 Hz以上的频段, 主动悬架高于被动悬架, 但汽车的工作频率主要集中在中低频段; 在时域仿真图中, 主动悬架的仿真曲线变化范围在-8~6, 而被动悬架的变化范围在-20~17, 降幅在60%以上。

由图6可得: 在频域仿真图中, 在0.1~0.5 Hz频段内, 主动悬架的轮胎动载荷高于被动悬架, 而在0.5 Hz以上的频段, 主动悬架显著降低, 降低为被动悬架的1/5; 在时域仿真图中, 主动悬架和被动悬架的仿真曲线基本重合, 没有明显

变化。

由图7可得: 在频域仿真图中, 主动悬架的悬架动挠度比被动悬架有稍微的降低, 降幅约为10%左右; 而在时域仿真图中, 主动悬架悬架动挠度仿真曲线的变化范围在-0.015~0.035, 而被动悬架的变化范围在-0.035~0.031, 降幅在20%以上, 从总体上看, 主动悬架的曲线更平滑和收敛。

4 结论

(1) 应用线性最优控制的主动悬架能够显著

提高汽车的行驶平顺性和操纵稳定性,从而改善了汽车的乘坐舒适性。

(2) 相较于被动悬架,主动悬架在车身加速度、轮胎动载荷和悬架动挠度均有明显的改善,其中,在频域范围内,车身加速度降低为被动悬架的 $1/8$,轮胎动载荷降低为 $1/5$,悬架动挠度降低为 $9/10$;在时域内,车身加速度降低了 60% ,轮胎动载荷没有变化,悬架动挠度降低了 20% ,表明线性最优控制在改善悬架性能方面起到良好的作用。

(3) 基于 MATLAB 的主动悬架平顺性仿真分析为进一步研究、开发主动悬架积累了宝贵经验,其仿真结果也为汽车悬架的实际设计提供了有益参考。

参考文献:

- [1] CHEN S A, LI X, ZHAO L J, et al. Development of a control method for an eletromagnetic semi-active suspension reclaiming energy with varying charge voltage in steps [J]. International Journal of Automotive Technology, 2015(5) : 765 – 773.
- [2] WANG R, JING H, KARIMI H R, et al. Robudt fault-tolerant H_{∞} control of active suspension systems with finite-frequency constraint [J], Mechanical System-sand Signal Processing, 2015(62) : 341 – 355.
- [3] JIN Y F, LUO X. Stochastic optimal active control of a half-car Nonlinear suspension under random road excitation [J]. Nonlinear Dyn, 2013(72) : 185 – 195.
- [4] 桑楠,魏民祥,白玉. 基于随机线性最优控制的汽车主动悬架控制器设计 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(3) : 56 – 60.
- [5] MACIEJEWSKI I, GLOWINSKI S, KRZYZYNSKI T. Active control of a seat suspension with the system adaptation to varying load mass [J]. Mechatronics. 2014, 24: 1242 – 1253.
- [6] 舒红宇,李伟,何渝生. 汽车主动悬架的理论分析及模型试验 [J]. 汽车工程, 1999, 13(3) : 129 – 135.
- [7] 陶向华,黄晓明. 人-车-路相互作用三质量车辆模型分析 [J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3) : 11 – 15.
- [8] 朱强,张越,陈江义,等. 混合动力客车独立前悬架运动学建模与操稳性仿真研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4) : 112 – 115.
- [9] 韩文涛,李磊,朱彤. 基于线性最优控制理论的汽车主动悬架控制方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2003(22) : 55 – 59.
- [10] 胡景煌. 汽车主动悬架的最优控制分析 [J]. 机电技术, 2012, 32(1) : 40 – 45.
- [10] 张立军,张天侠. 车辆非平稳行驶状态下的半主动悬架控制 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(6) : 189 – 193.
- [12] 刘艳红,齐书康. 基于逆系统方法的永磁同步风力发电系统随机最优控制 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3) : 16 – 19.
- [13] LI H, TANG C Y, ZHANG T X. Controller of vehicle active suspension systems using LQG method [J]. Automation and Logistics. 2008, 13: 401 – 404.
- [14] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

Research of Simulation in the Linear Optimal Control Active Suspension of Vehicle Based on Matlab

LIU Benxue, LIN Chaoyun, GUO Peidong, LI Liangyu

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

Abstract: In order to demonstrate that the active suspension is superior in improving the vehicle riding comfort, $1/4$ vehicle active suspension model and random road excitation model are established. Based on this models, by adopting linear optimal control as the active suspension control strategy, the linear optimal controller is designed. The frequency domain and time domain simulation model of active suspension is established by MATLAB. Frequency domain and time domain simulation of active suspension are carried out respectively under random road excitation and compared with the passive suspension. The results show that the active suspension can effectively reduce the vehicle body acceleration, the dynamic load of the tire and the dynamic deflection of the suspension, thereby improving the ride comfort the handling stability of the vehicle. The model establishment, the optimal design and the simulation analysis of the design provide a useful reference for further research and practical application for active suspension.

Key words: vehicle; active suspension; linear optimal control; ride comfort

文章编号: 1671-6833(2016)05-0077-05

纯电动汽车白车身耐撞性拓扑优化设计方法

雷正保, 刘助春, 廖卓

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 由于车辆碰撞工况多达9种且不同工况的碰撞力相差很大, 对车身进行多工况并行拓扑优化时最终的整体拓扑构型会更加趋向于碰撞力大的工况, 且车头、乘坐区、车尾由于碰撞力不同, 最佳优化质量比也不同, 故不能同时对整个车身进行多工况耐撞性拓扑优化. 为得到一个材料分布合理有效的整车构型, 通过对同一模型进行整体拓扑优化与分区域拓扑优化的对比分析, 提出一种先进行乘坐区拓扑优化, 然后在乘坐区结构已知的情况下, 对车头、车尾拓扑优化, 最后拼装成整车拓扑优化模型的白车身耐撞性拓扑优化设计方法.

关键词: 纯电动汽车; 耐撞性; 拓扑优化; 白车身

中图分类号: U270.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.015

0 引言

传统的拓扑优化方法都是基于灵敏度分析, 适用于解决线性静态问题. 但在碰撞类的动态分析中, 由于载荷与边界条件的瞬时性之间的复杂交互作用, 灵敏度太难获得, 因此, 这种常规的基于灵敏度的拓扑优化分析并不适用于碰撞类问题^[1-6]. 为了解决动态拓扑优化问题, 国外学者 Inou 等^[7]率先将自动网格模型(CA)与拓扑优化方法相结合; Patel 等则在 INOU 等的基础上整合 SIMP 插值模型, 提出一种以获得结构统一内能密度为目标的耐撞性拓扑优化方法—混合元胞自动机(HCA)^[8]; Marklund 利用二次响应面及线性响应面分别建立质量与速度的近似模型, 针对侧撞工况对B柱进行耐撞性优化设计^[9]. 目前国内对于耐撞性拓扑优化的研究很少. 文献[10]运用耐撞性拓扑优化方法对某车辆的门槛梁进行40%偏置碰撞和侧面碰撞的并行拓扑优化; 文献[11]对保险杠横梁进行基于混合元胞自动机的耐撞性拓扑优化. 以上研究主要集中在车身单个零部件的优化上, 尚无人对整个车身结构进行耐撞性拓扑优化的研究.

车辆碰撞工况较多, 车头、乘坐区各涉及4种工况, 车尾涉及1种工况, 不同工况对应的关键安全性部件不同(如正碰的安全性主要由头部构型决定). 把不同工况对应的关键安全性部件分开

进行对应碰撞工况的拓扑优化, 不仅能节省计算成本, 且得出的拓扑构型由于只受其对应工况的影响更具有针对性, 更能满足相应工况的安全性. 此外, 车辆不同碰撞工况的碰撞力相差极大, 而工况的碰撞力越大, 该工况对拓扑构型的影响也越大. 若同时对整个车身进行多工况拓扑优化, 则会出现碰撞力较大的工况对应的关键安全性部件材料堆积过多, 无明显轮廓构型; 碰撞力较小的工况对应的关键安全性部件的材料被删减过多, 得出的构型不合理, 而且车头、乘坐区、车尾由于碰撞力不同, 需要的最佳优化质量比也不同, 无法同时进行拓扑优化. 故笔者先对乘坐区进行耐撞性拓扑优化, 然后以乘坐区的拓扑优化结果为基础建立车头、车尾拓扑优化模型, 进行车头、车尾的拓扑优化, 最后拼装成整车拓扑构型.

1 耐撞性拓扑优化准则

混合元胞自动机(HCA)是利用元胞自动机CA单元来建立模型, 通过有限元仿真方法获得模型信号的优化算法. 该算法不需要计算灵敏度, 能够有效解决瞬态非线性的连续拓扑优化问题. CA元胞单元的信息只被该单元和邻近单元的状态所决定, 其利用相邻的单元信息来实现自身信息的更新重组, 其结果是所有周围单元的平均值.

$$U_i = \sum_{j=1}^n U_j / \sum_{i=1}^n 1. \quad (1)$$

收稿日期: 2016-03-28; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175050)

作者简介: 雷正保(1964—), 男, 长沙理工大学教授, 博士, 主要从事汽车安全技术研究, E-mail: doclei@foxmail.com.

1.1 材料参数

使用密度法参数化,将设计变量直接链接到单个材料单元,使每个变量都有自己的材料模型.材料性质则是通过插值模型来获得,使用幂次法则驱动中间材料特性向边界移动去获得构型.根据 SIMP 模型^[12-13],材料属性可被定义如下:

$$\begin{cases} \rho(x) = x\rho_0 \\ E(x) = x^p E_0 \\ \delta(x) = x^q \delta_0 \\ E_h(x) = x^q E_{h0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 是材料密度; E 是杨氏模量; δ 是屈服应力; E_h 是机械硬化模量; x 是设计变量,在 0~1 变化,其中 0 表示空的,1 表示满材料.

1.2 设计目标和约束

对于碰撞类的动态拓扑优化问题,往往要求结构在吸收最大能量的同时保持结构的稳定性,故以统一内能密度为动态拓扑优化的目标,则该优化问题可被表述为:

$$\begin{cases} \min_x \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L (w_j U_j(x_i) - U_j^*) \\ \sum_{i=1}^N \rho(x_i) V_i \leq M^* \\ C_k^l \leq C_k \leq C_k^u, k = 1, 2, \dots, K \\ x_{\min} \leq x_i \leq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: U 表述第 i 个单元的内能密度; V_i 表述第 i 个单元的体积; U^* 代表目标内能密度; C_k 代表 k 单元的约束; L 为工况个数; K 为约束个数; 其中 l 与 u 分别表示约束的上、下限.

1.3 仿真获取场变量

第 i 个单元在第 t 个迭代的场变量的数值是前 3 个迭代的场变量的加权和,

$$U_i^t = \sum_{j=1}^3 (x_i)^{j+1} U_i^{t-j} / \sum_{j=1}^3 (x_i)^{j+1}. \quad (4)$$

1.4 更新规则

当总质量满足约束后,变量在此次迭代中的总变化就会被计算出来,并且将不再更新,如果不满足,则继续循环迭代直至满足质量约束.

$$\Delta M^{(k)} = \sum_{i=1}^N |x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}|. \quad (5)$$

当质量的改变量小于设定的公差值,迭代停止.

$$\frac{\Delta M^{(k)} + \Delta M^{(k+1)}}{2} < \varepsilon_1. \quad (6)$$

式中: ε_1 为质量收敛误差因子,取 0.001.

2 整体与分区域拓扑优化对比

2.1 整体拓扑优化

整体拓扑优化模型如图 1 所示,固定横梁的两端,以整根横梁为初始优化区域,左、中、右 3 根立柱分别从不同位置以 13 888 mm/s 的速度垂直撞向横梁,两边的立柱的重量是中间立柱重量的三分之一,优化区域目标质量分数为 0.25. 经过 43 个迭代后,最终收敛的拓扑优化结果如图 2.

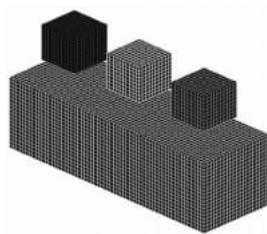


图 1 整体拓扑优化模型

Fig. 1 Overall topology optimization model



图 2 横梁拓扑构型

Fig. 2 Beam topologies

由图 2 拓扑构型可看出,由于中间立柱的重量是两边立柱的 3 倍,其碰撞力也更大,故横梁中间部位保留的材料比两边多,表明拓扑构型更加趋向于碰撞力较大的工况.

2.2 分区域拓扑优化

分区域拓扑优化模型如图 3 所示,工况设置跟整体拓扑优化相同,将横梁分成左、中、右 3 个区域,先分别以两端为初始优化区域,得到两端的拓扑构型,如图 4. 然后以两端的拓扑构型为基础,建立中间拓扑优化模型如图 5,以中间部分为初始优化区域. 经过 40 次迭代,得出拓扑构型如图 6. 对比图 6 与图 2 可知,先优化两端后优化中间得出的构型与整体优化的构型有较大差别. 故改变优化顺序,先以中间部分为初始优化区域,对此模型进行先优化中间后优化两端的分区域拓扑优化,先优化中间时中间收敛构型如图 7. 以中间收敛构型为基础重新建立两端拓扑优化模型如图 8.

经过 42 次迭代,最终得到收敛构型如图 9. 对比图 9 与图 2 可看出,先优化中间后优化两端得出的拓扑构型跟整体拓扑优化得出的构型基本一样,说明进行分区域拓扑优化时,先进行中间拓

扑优化后进行两端拓扑优化是可行的,而先优化两端后优化中间则误差较大。

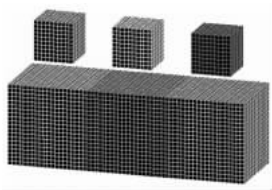


图3 分区域拓扑优化模型

Fig.3 Subregional topology optimization model

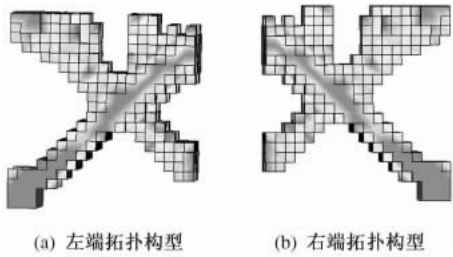


图4 左右端拓扑构型

Fig.4 Left and right ends topologies



图5 中间拓扑模型

Fig.5 Intermediate topology model

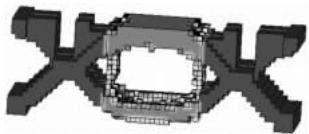


图6 中间部分拓扑构型

Fig.6 Intermediate portion topologies



图7 中间收敛构型

Fig.7 Intermediate convergence configuration

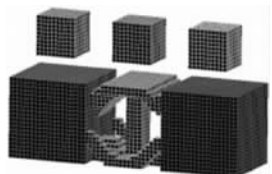


图8 两端拓扑优化模型

Fig.8 Ends topology optimization model

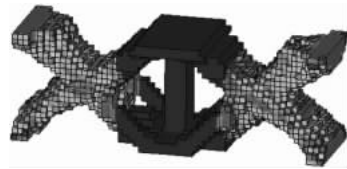


图9 收敛构型

Fig.9 Convergence configuration

3 白车身分区域耐撞性拓扑优化

车辆碰撞工况较多且不同工况对应的碰撞力相差很大,若同时对整车进行优化会导致最终的整体拓扑构型会更加趋向于碰撞力大的工况,且车头、乘坐区、车尾由于碰撞力不同,需要的最佳优化质量比也不同,故无法同时对整车进行多工况拓扑优化。由前文对同一模型进行整体拓扑优化与分区域拓扑优化的分析可知,先进行中间拓扑优化后进行两端拓扑优化的分区域拓扑优化是可行的,故先对乘坐区进行耐撞性拓扑优化,然后在乘坐区结构已知的情况下,进行车头、车尾拓扑优化,最后将三部分拼装得到整车拓扑优化结果。

3.1 乘坐区拓扑优化

依据某国产品牌纯电动汽车的技术参数建立纯电动汽车乘坐区拓扑优化模型,为了寻找最有效的载荷传递路径,最大化地拓展车厢设计空间,故模型扣除了行李舱、动力总成和风窗玻璃等部件,具体如图10所示。

将乘坐区作为初始优化设计区域,对其在弯曲载荷、顶压载荷及扭转载荷工况下进行拓扑优化。在拓扑优化中,质量分数对最终的拓扑优化结果的影响较大^[15]。选取质量分数 $\alpha = 0.1$ 时构型的材料删减过多,没有连接成连续体结构。而 $\alpha = 0.3$ 时,保留的材料过多,无明显的空间骨架结构特征,这两个质量分数约束下都不是理想的材料保留规则。重新进行拓扑优化设定后,最终选取 $\alpha = 0.2$,经历新的迭代计算后得到了如图11的拓扑优化结果,此时结果保留了清晰的应力传递区域范围和乘坐区车身承力布局。

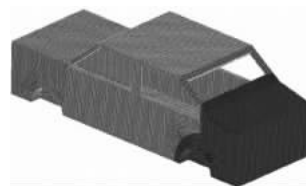


图10 乘坐区拓扑优化模型

Fig.10 Seating area topology optimization model

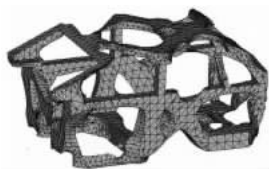


图 11 乘坐区拓扑优化结果

Fig. 11 Seating area topology optimization results

3.2 头部拓扑优化

结合收敛规则并与实际进行对比分析,对拓扑结果进行简化和抽象提取可得乘坐区构型,以得到的乘坐区构型为基础,依据 GB11551—2003 和欧洲正面碰撞法规 ECE 894.01 建立 100% 全宽碰撞有限元模型与 40% 偏置碰撞有限元模型. 由于纯电动汽车是由电机驱动车辆,传统燃油汽车机械传动系统所占的空间全部释放^[14],故无发动机等一系列高强度高刚度的承力部件等,具体如图 12 所示.

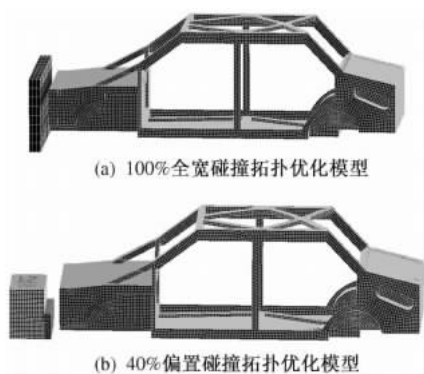


图 12 头部拓扑优化模型

Fig. 12 Head topology optimization model

将车头作为初始优化设计区域,其余部件作为非优化区域,对头部结构施加关于纵向平面对称约束,进行 100% 全宽碰撞与 40% 偏置碰撞的并行耐撞性拓扑优化. 根据汽车碰撞事故的概率分布,将全宽碰撞模型权重设为 1.6,40% 偏置碰撞模型权重设为 1.2. 选取质量分数为 0.2,经过 45 个循环迭代运算后,构型收敛如图 13.

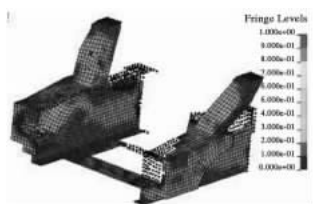


图 13 头部拓扑优化结果

Fig. 13 Head topology optimization results

3.3 尾部拓扑优化

根据中国汽车追尾碰撞的技术规范 GB20072—

2006 建立追尾碰撞试验有限元模型,台车及刚性移动壁的总质量为 1 100 kg,具体如图 14 所示.



图 14 尾部拓扑优化模型

Fig. 14 Tail topology optimization model

将车尾作为初始优化设计区域,设定质量分数为 0.25 此质量分数下尾部构型经过 40 次的迭代后收敛,最终的拓扑优化结果如图 15.



图 15 尾部拓扑优化结果

Fig. 15 Tail topology optimization results

结合实际车形及收敛规则,对各区域拓扑优化结果进行抽象处理与简化,最终拼装成整车构型如图 16. 该整车构型应力传递区域范围和承力布局清晰明确,材料分布合理有效,进一步说明分区域分步式拓扑优化适用于白车身.



图 16 整车拓扑构型

Fig. 16 Vehicle topologies

4 结论

通过对同一模型进行整体拓扑优化与分区域拓扑优化的对比分析,发现进行分区域拓扑优化时,先进行中间拓扑优化后进行两端拓扑优化是可行的,而先优化两端后优化中间则误差较大,故提出一种先进行乘坐区拓扑优化,再进行头部与尾部拓扑优化,最后拼装得到整车拓扑构型的纯电动汽车白车身耐撞性拓扑优化设计方法. 该优化方法通过对车身不同区域分开进行对应工况的拓扑优化,使各区域能各自独立的按照其所需最佳质量分数进行材料删减,最终得到一个材料分布合理有效的整车构型,这对于提高整车耐撞性具有重要的意义.

参考文献:

- [1] LEI Z B, HE R, LEI M X. Validating analysis on Influence of vehicle structure in considering crash compatibility [J]. Applied Mechanics and Materials Vols, 2012(29) : 209 – 211.
- [2] PATEL N M, KANG B S, RENAUD J E, et al. Crashworthiness design using topology optimization [J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 13(6) : 12 – 24.
- [3] 舒磊,方宗德. 汽车子结构的复合域拓扑优化 [J]. 汽车工程, 2008,30(5) : 35 – 37.
- [4] 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.
- [5] 李银霞,刘曼曼,高俊杰. 汽车人机工程综合评价指标体系研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(5) : 96 – 99.
- [6] BENDOSE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using homogenization method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998(2) : 197 – 224.
- [7] INOU N, SHIMOTAI N, UESUGI T. Cellular automaton generating topological structures [C] //Second european conference on smart structures and materials. glasgow, UK, 2011: 47 – 50.
- [8] PATEL N M, KANG B, RENAUD J E, et al. Crashworthiness design using topology optimization [J]. Journal of Mechanical Design, 2009(6) : 13 – 61.
- [9] MARKLUND P O, NILSSON L. Optimization of a car body component subject to side impact [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001(21) : 383 – 392.
- [10] 聂昕,黄鹏冲,陈涛,等. 基于耐撞性拓扑优化的汽车关键安全件设计 [J]. 中国机械工程, 2013, 23: 3260 – 3265.
- [11] 高云凯,张玉婷,方剑光. 基于混合元胞自动机的铝合金保险杠横梁设计 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015(3) : 456 – 461.
- [12] ROZVANY G I N, BENDOSE M P, KIRSH U. Optimality criteria a basis for multidisciplinary optimization [J]. Appl Mech Re, 1994(48) : 114 – 119.
- [13] YOON G H, KIM Y Y. Topology optimization of material-nonlinear continuum structures by the element connectivity parameterization [J]. Int J Numer Methods Eng. 1997, 69: 2196 – 2218.
- [14] 雷正保,李铁侠,赵仕琪. 多目标拓扑优化下电动汽车头部结构优化设计 [J]. 中国科技文, 2014(11) : 1324 – 1328.
- [15] 雷正保,何茹,王瑞. 纯电动汽车正面碰撞相容性车头拓扑优化设计 [J]. 计算力学学报, 2014(06) : 722 – 728.

Crashworthiness Topology Optimization Method of Pure Electric Car BIW

LEI Zhengbao, LIU Zhuchun, LIAO Zhuo

(Institute of Vehicle Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: As the vehicle collision condition up to 9 kinds and the impact force of different conditions vary greatly, the final overall topology configuration will tend to working conditions with bigger collision force when multiple parallel topology optimization are used in whole body. What's more, the best optimization mass ratio of front, car and rear is different for their different collision force. Thus multiple crashworthiness topology optimization can not be used in the whole body simultaneously. In order to obtain a vehicle configuration with reasonable and effective material distribution, we put forward a crashworthiness topology optimization method of pure electric ear BIW by the comparative analysis of the overall topology optimization and subregion topology optimization of one model. The method is doing the car topology optimization at first and doing the head and rear topology optimization after we get car topologies, in this way we obtain the vehicle topology optimization results finally.

Key words: pure electric vehicles; crashworthiness; topology optimization; BIW

文章编号: 1671-6833(2016)05-0082-04

特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构有限元分析

朱 强¹, 杜 鹏¹, 王建军², 秦东晨¹

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国石油集团石油管工程技术研究院 石油管工程重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘 要: 采用 ANSYS 建立套管接头的轴对称模型, 着重分析一种特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构的密封性能, 分别对 3 种工况(机紧、机紧+拉伸、机紧+内压+拉伸)进行求解, 获得了密封端接触压力和等效应力的分布规律, 对比分析了不同工况下密封端接触压力和等效应力, 揭示了拉伸载荷和套管内部压力对结构密封性的影响。结果表明, 该柱面/球面密封结构的接触压力和等效应力符合密封要求, 为特殊螺纹套管接头的进一步优化设计提供理论指导。

关键词: 特殊螺纹套管接头; 柱面/球面; 接触压力; 有限元

中图分类号: TE931.2 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.016

0 引言

随着我国石油和天然气资源开采向深井、超深井、水平井和非常规天然气井方向不断发展, 通常使用的普通石油套管已经不能满足需求, 而需要更多地使用特殊螺纹套管^[1]。特殊螺纹套管接头采用金属/金属密封结构, 与普通螺纹啮合密封套管相比, 具有良好的密封性能。金属/金属密封端有锥面/锥面、锥面/弧面、柱面/球面等密封结构形式^[2]。锥面/锥面密封结构易于制造, 该结构的有限元分析和实验研究较多且趋于成熟。窦益华等^[3]研究了锥面/锥面密封结构特殊螺纹接头上扣扭矩与密封性能和连接强度的关系; 曹银萍等^[4]研究了特殊油管接头锥面/锥面密封结构在不同载荷工况下的密封性。

球面密封结构制造相对比较困难、成本较高, 相关研究文献较少。蔡茂佳等^[5]研究了交变载荷下某型球面密封结构的连接强度和密封性。由于管道外径和密封结构参数的差异, 每种密封结构都呈现出不同的密封特性。笔者对一种柱面/球面密封特殊螺纹套管接头进行分析, 该特殊螺纹接头密封结构由主密封和扭矩台肩两部分组成, 如图 1。上部为接箍, 内表面密封部位为球面; 下部

为套管, 密封部位为柱面, 两者相互配合达到密封效果。采取合理的结构简化措施, 在 ANSYS 中建立特殊螺纹接头轴对称模型, 分析机紧、机紧+拉伸、机紧+内压+拉伸 3 种工况下套管接头密封性能, 揭示不同工况对其密封性能的影响, 为密封结构优化设计提供一定理论指导。

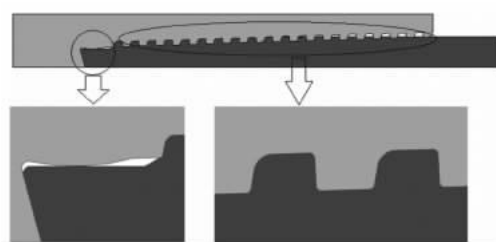


图 1 特殊螺纹套管接头结构

Fig. 1 The structure of premium connection

1 有限元模型

1.1 套管接头模型与简化

该特殊螺纹套管接头为 5 寸半($\phi 139.70 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$) 套管接头, 材料为 P110 钢级。接头螺纹部分采用偏梯形螺纹, 执行 API SPEC 5CT^[6] 和 API SPEC 5B^[7] 标准, 螺纹承载面为 3° , 导向面为 10° , 螺距为 5.08 mm , 每英寸 5 牙, 齿高为 1.57 mm , 螺纹锥度为 1:16。套管接头完整螺纹长度为

收稿日期: 2016-04-09; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 中国石油天然气集团公司资助项目(2014F-1501); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013KJXX-07)

作者简介: 朱强(1976—), 男, 陕西三原人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事机械结构研究, E-mail: zhuqiang@zzu.edu.cn.

46.76 mm,不完整螺纹长度为 50.39 mm. 采用球面/柱面金属密封结构形式,台肩面采用 -15° 扭矩台肩结构,具有抗过扭和辅助密封作用,密封和台肩结构如图 1 中密封端放大图所示.

基于 ANSYS 对套管接头进行分析,参考相关文献的处理方法^[8-9],采用如下简化假设:①螺纹升角较小,忽略螺纹升角影响;②按轴对称方式建模,有效减少计算量;③套管接头材料视为各向均匀的同性体;④根据圣维南原理,为了合理模拟套管的受力,套管长度大于螺纹长度 3 倍以上.

1.2 材料属性模型

P110 钢级材料屈服强度为 758 MPa,抗拉强度为 862 MPa,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3. 套管受力较大,材料在加载力过程中会超过屈服极限,产生塑性变形. 为了准确模拟材料塑性,在 ANSYS 中输入材料的真实应力—应变曲线^[8],工程应力—应变与真实应力—应变之间的转换关系如下

$$\begin{cases} \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \\ \sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \end{cases}$$

式中: ε 、 σ 为真实应变和真实应力; ε_0 、 σ_0 为工程应变和工程应力.

根据上式求出的真实应力—应变数据,采用 ANSYS 多线性随动强化模型进行材料定义,随动强化应力—应变曲线如图 2.

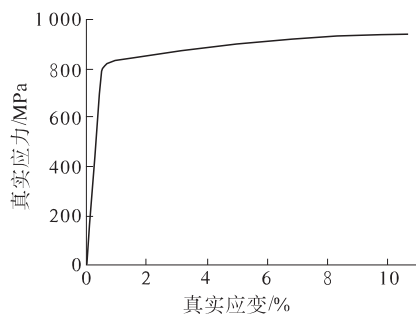


图 2 材料真实应力—应变多线性随动强化曲线

Fig.2 The true stress-strain curve with multi-linear kinematic hardening

1.3 有限元模型

采用 Plane183 单元对轴对称模型进行划分,接触部分使用接触单元定义接触对,通过不同实常数区分不同接触对. 接触分析采用库伦摩擦模型,摩擦系数为 0.02. 有限元网格(局部)模型和接触对如图 3 所示,其中线状部位为接触对.

特殊螺纹套管接头承受复杂载荷工况,分解后为机紧、轴向拉伸和内压工况^[9],不同工况加载

力不同,对套管接头的密封性能会产生影响. 综合套管接头受力情况,这里分别考虑机紧、机紧 + 拉伸、机紧 + 内压 + 拉伸 3 种工况下套管接头密封性能. 采用标准上扣扭矩模拟套管接头机紧后的状态;设置拉力为材料屈服强度的 80%,内压为 40 MPa. 施加载荷和约束后的模型如图 4,其中左端约束,右端施加轴向拉伸载荷或轴向压缩载荷,内表面施加压力.

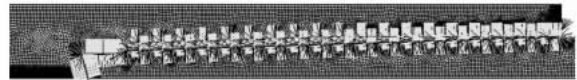


图 3 有限元网格(局部)和接触对定义

Fig.3 Finite element meshing model (partial) and contact pairs



图 4 施加载荷和约束模型图

Fig.4 Model diagram after applying loads and constraints

该分析涉及接触非线性、材料非线性和大变形. 分析过程中,求解选项的大变形开关打开. 非线性求解迭代使用完全牛顿法,即每一次迭代成功后都修改刚度矩阵. 同时为了求解容易收敛,打开线性搜索选项、自动时间步长和时间步长预测器.

2 有限元分析

特殊螺纹套管接头柱面/球面为主密封部位,保证密封性能;扭矩台肩结构主要用来抗过扭,同时起到辅助密封作用. 求解后得到 3 种工况下密封端结构 von Mises 应力云图,如图 5 所示. 套管和接头通过接触传递力,根据分析结果,提取上述分析模型主密封面和台肩面的接触应力. 密封部位具有良好密封性的条件是:①密封面有高于内压的接触压力;②密封面等效应力小于材料屈服强度,即不发生塑性变形^[10]. 通过这两个方面分析考察 3 种工况下套管接头的密封性能.

2.1 主密封面

主密封面指的是特殊螺纹套管的柱面/球面部位,通过柱面与球面的配合来保证整个接头密封性. 通过有限元分析并提取结果后,3 种工况下主密封面数据如表 1 和图 6.

表 1 3 种工况主密封面相关数据
Tab.1 Main sealing structure data in three different load conditions

工况	最大接触压力/MPa	平均接触压力/MPa	接触压力最大处的等效应力/MPa
机紧	1 000	500	650
机紧 + 拉伸	650	400	350
机紧 + 内压 + 拉伸	710	450	400

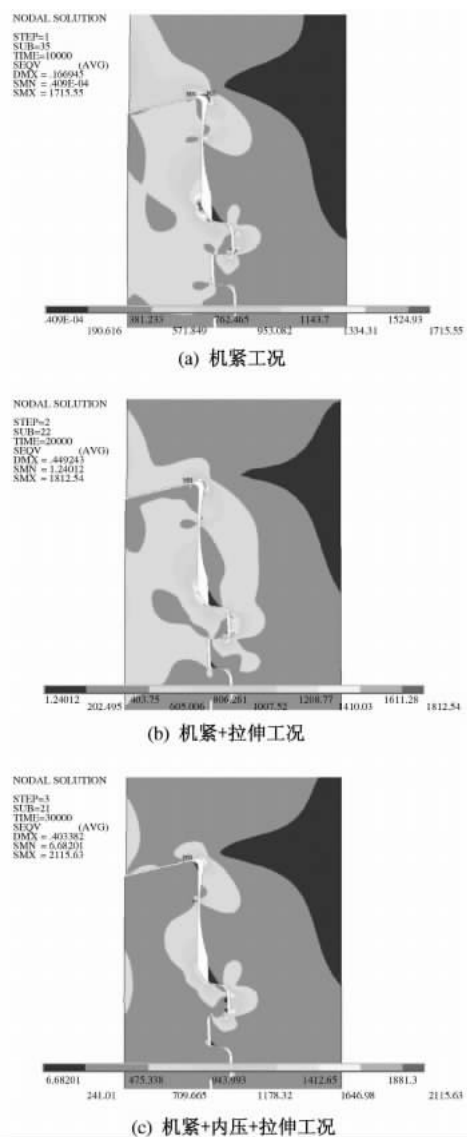


图 5 3 种工况密封端结构 von Mises 应力云图

Fig.5 Sealing structure von Mises stress in three different load conditions

机紧工况是模拟套管接头机紧后的状态. 从结果可以看出, 机紧后有效接触长度上最大接触压力约为 1 000 MPa, 平均接触压力约为 500 MPa, 接触区域材料等效应力维持在 650 MPa 左右. 机紧 + 拉伸工况是对套管进行机紧后加上轴向拉力的状况, 轴向拉力是特殊螺纹套管经常承

受的载荷. 在轴向拉力的作用下, 密封部位密封性能有所下降, 最大接触压力降为 650 MPa 左右, 平均接触压力为 400 MPa 左右, 等效应力为 350 MPa. 机紧 + 内压 + 拉伸工况是在上述机紧 + 拉伸工况基础上加上管道的内部压力, 这种工况更加符合套管实际工作状态. 在内压的作用下, 与上一工况相比, 最大接触压力增大为 710 MPa, 平均接触压力增大为 450 MPa, 等效应力增大为 400 MPa 左右. 套管接头材料的屈服强度为 758 MPa, 加载内压为 40 MPa, 3 种工况下主密封面的接触压力都远远大于内压, 并且等效应力小于材料的屈服强度, 符合密封条件要求.

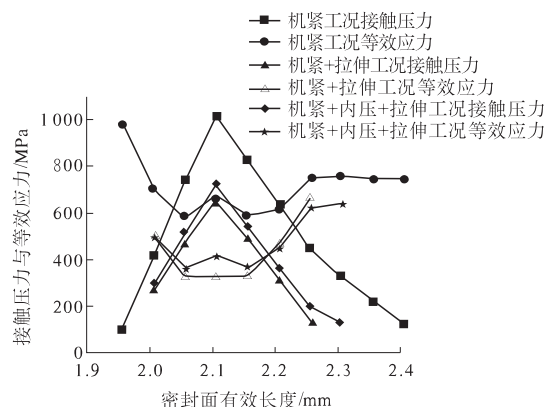


图 6 3 种工况主密封面上接触压力/等效应力随接触长度变化曲线

Fig.6 Main sealing structure contact pressures/VME stresses along the contact length in three different load conditions

从表 1 可以看出, 各项参数最低的工况是机紧 + 拉伸工况. 各项参数最高的工况是机紧工况. 从图 6 中看出, 在机紧状态下加上轴向拉伸载荷后, 接触压力曲线和等效应力曲线大幅下降, 但由于初始机紧的作用, 依然保有一定的接触压力. 加上内部压力后, 接触压力曲线和等效应力曲线有所提高, 但提高幅度不是很大, 没有超过机紧工况的结果曲线, 可以认为, 内部压力有助于密封部位的性能提升.

2.2 辅助密封面

辅助密封面为 -15° 扭矩台肩部位, 该部位金属与金属配合可以起到辅助密封的效果. 3 种工况下有限元分析结果如表 2 和图 7.

3 种工况下的接触压力曲线呈现两头高中间低的趋势, 等效应力曲线则在中间凸起. 机紧工况下, 接触压力最大值为 500 MPa, 大部分区域的接触压力值在 350 MPa 附近, 最大等效应力为 600 MPa. 机紧 + 拉伸工况下, 接触压力最大值为 390 MPa, 大部

分区域的接触压力值在 250 MPa 附近,最大等效应力为 500 MPa。机紧+内压+拉伸工况下,接触压力最大值为 390 MPa,大部分区域的接触压力值在 250 MPa 附近,最大等效应力为 460 MPa。

表 2 3 种工况辅助密封面相关数据
Tab.2 Shoulder side data in three different load conditions

工况	最大接触压力/MPa	平均接触压力/MPa	最大等效应力/MPa
机紧	500	300	600
机紧+拉伸	390	250	500
机紧+内压+拉伸	390	250	460

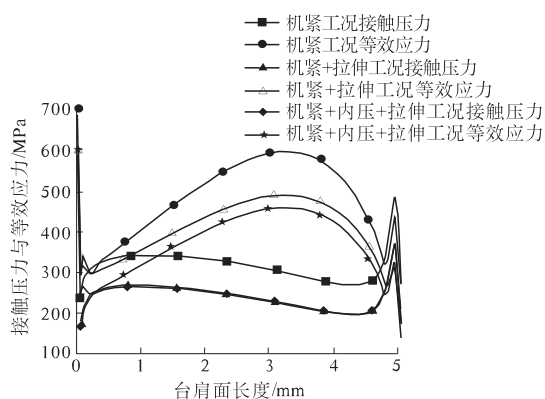


图 7 3 种工况台肩面上接触压力/等效应力
随接触长度变化曲线

Fig.7 Shoulder side contact pressures/VME stresses along the contact length in three different load conditions

从图 7 中可以看出,在机紧工况下,接触压力和等效应力数值整体都比较大,由于拉伸载荷的作用,在后两种工况下接触压力和等效应力的数值有所下降。后两种工况下接触压力曲线重合在一起,而等效应力曲线有较小的差值,表明内压对台肩面的接触影响较小。与主密封面相比较,3 种工况下辅助密封面的接触压力偏小,同时,辅助密封面的接触长度较主密封面长,在一定程度上增强了辅助密封面的辅助密封作用。

3 结论

特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构密封性能是决定复杂工况下油气开采的一项关键指标。通过合理简化,建立套管接头非线性有限元模型,通过 3 种不同工况下的数据对比和分析,得到如下结论。

(1) 在机紧、机紧+拉伸、机紧+内压+拉伸 3 种工况下,该套管接头柱面/球面主密封面的最大接触压力分别为 1 000 MPa、650 MPa 和 710

MPa,平均接触压力分别为 500 MPa、400 MPa 和 450 MPa,同时,接触部位的等效应力均小于材料的屈服强度。

(2) 对比机紧+内压+拉伸和机紧+拉伸两种工况,前者在有内压作用情况下主密封面最大接触压力增加了 9.2%,平均接触压力增加了 12.5%,而辅助密封面接触压力没有变化,这表明接头内部压力一定程度上可以提高主密封部位的密封能力,而对辅助密封部位的影响很小。

(3) 该柱面/球面密封结构特殊螺纹套管接头可以实现良好的密封,本研究为特殊螺纹套管接头的改进优化设计提供了一定理论指导。

参考文献:

- [1] 喻开安,郝龙,王树龙. 油套管特殊螺纹接头结构参数对性能的影响[J]. 石油矿场机械,2013,42(12):25-29.
- [2] 王建东,冯耀荣,林凯,等. 特殊螺纹接头密封结构对比分析[J]. 中国石油大学学报,2010,34(5):127-130.
- [3] 窦益华,王轲,于洋,等. 特殊螺纹油管接头上扣性能三维有限元分析[J]. 石油机械,2015,43(4):99-104.
- [4] 曹银萍,张福祥,杨向同,等. 不同载荷作用下特殊螺纹油管接头密封性分析[J]. 制造业自动化,2012,34(7):87-89.
- [5] 蔡茂佳,于洋,曹银萍,等. 交变载荷作用下特殊螺纹油管接头连接强度及密封性分析[J]. 制造业自动化,2014,36(2):76-91.
- [6] America Petroleum Institute. API SPEC 5CT: Specification for Casing and Tubing [S]. Ninth edition. USA: API, 2012.
- [7] America Petroleum Institute. API SPEC 5B: Specification for Threading, Gauging and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads [S]. Fifteenth edition. USA: API, 2008.
- [8] 高连新,金烨,史交齐. 圆螺纹套管接头应力分布规律研究[J]. 机械强度,2004,26(1):42-48.
- [9] 窦益华,于洋,曹银萍,等. 动载作用下特殊螺纹油管接头密封性对比分析[J]. 石油机械,2014,42(2):63-72.
- [10] 黄翠英,张宏,段庆全. 地下储气库特殊螺纹套管接头密封性分析[J]. 石油机械,2010,38(5):49-51.
- [11] 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.
- [12] 陈艳霞,林金宝. ANSYS 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2013.

(下转第 90 页)

文章编号: 1671-6833(2016)05-0086-05

凹坑型非光滑单元体排列方式对汽车气动阻力影响分析

谢金法, 张靖龙

(河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 基于仿生学非光滑表面, 分别在 MIRA 直背式汽车模型顶部布置矩形排列、菱形排列和等差排列的凹坑型非光滑单元体形成的非光滑表面, 分析不同排列方式对汽车气动阻力的影响. 通过应用 CFD 方法, 使用有限元分析软件 ANSYS 进行数值仿真. 仿真结果表明, 以矩形排列的凹坑型非光滑表面可以获得最好的气动减阻效果, 总减阻率可以达到 6.52%. 进一步分析发现, 其原因在于矩形排列的凹坑型非光滑单元体可以更好地减小模型受到的压差阻力和表面摩擦阻力, 最终减小模型受到的气动阻力.

关键词: 凹坑型非光滑单元体; 排列方式; 汽车; 气动阻力; 影响分析

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.017

0 引言

汽车在行驶过程中会与空气相互作用而产生气动阻力, 它的存在会对汽车的燃油经济性有重要的影响. 其中小型客车行驶中用于克服气动阻力而消耗的燃油量占其每百公里燃油消耗量的 50% 左右, 普通货车为 32% 左右^[1-2], 因此, 降低汽车在行驶过程中的气动阻力不仅能提高汽车的燃油经济性, 而且对节能环保也十分有利. 为进一步降低汽车行驶过程中受到的气动阻力, 研究人员将目光转向了仿生学研究中的具有减阻、脱附、抗磨等功能的非光滑表面. 国外从上世纪 60 年代开始对非光滑表面展开了研究^[3-4], 我国从 80 年代开始将其应用于农耕地具的脱附、减阻方面的研究^[5], 之后又对非光滑表面应用于汽车气动减阻上进行了研究, 但都集中于非光滑单元体的形态^[6-8]、几何尺寸^[9-12]、非光滑表面的布置位置^[13]等方面, 而对非光滑单元体排列方式的差异所引起的非光滑表面气动减阻性能不同的研究却很少. 有研究者仅将矩形排列的凹坑型非光滑单元体布置于类客车体模型 Ahmed 的不同表面上, 分析其对汽车气动阻力的影响^[14], 因此对非光滑表面排列方式的研究还不够全面, 有必要做进一步分析. 笔者分别将以矩形排列、菱形排列和等差排列的凹坑型非光滑单元体形成的非光滑

表面布置于 MIRA 直背式汽车模型的顶部, 以研究不同排列方式对汽车气动阻力影响的差异.

1 凹坑型非光滑表面

1.1 凹坑型非光滑单元体

仿生学研究发现, 自然界中的许多动物身体表面并非完全光滑的, 而是布有不同形态的非光滑单元体, 如凹坑型、凸包型、沟槽型等. 凹坑型非光滑单元体是笔者的研究对象, 文中将其抽象为半球体, 图 1 为凹坑型非光滑单元体所形成的凹坑型非光滑表面, 其中参数 D 、 W 、 L 、 S 分别为凹坑直径、凹坑间的纵向间距、横向间距及凹坑深度, 为便于计算, 笔者取 $S = D/2$.

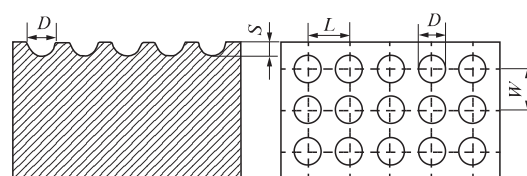


图 1 凹坑型非光滑表面

Fig. 1 Pit-type non-smooth surface

1.2 凹坑型非光滑单元体排列方式

仿生学研究发现, 排列方式不同的非光滑单元体构成的非光滑表面所具有的减阻、脱附、抗磨等性能是有差异的. 凹坑型非光滑单元体的排列方式大致可以分为矩阵排列、菱形排列和等差排

收稿日期: 2016-01-15; 修订日期: 2016-05-28

基金项目: 国家 863 资助项目(2012AA111603)

作者简介: 谢金法(1964—), 男, 江苏宜兴人, 河南科技大学教授, 博士, 主要从事车辆计算机辅助设计与分析 CAD/CAE、履带工程车辆等方面的研究, E-mail: jfxie821@163.com.

列3种,所形成的非光滑表面分别如图2中的(a)、(b)、(c)所示,其中图(c)中的参数 d 为等差排列时的公差.笔者将研究上述3种不同排

列方式的非光滑单元体所形成的非光滑表面对MIRA直背式汽车模型气动阻力影响的差异.

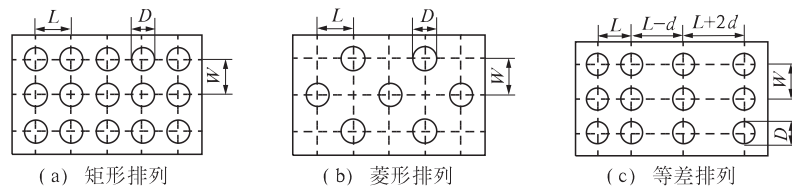


图2 凹坑型非光滑单元体排列方式

Fig. 2 Arrangements of pit-type non-smooth elements

2 标准MIRA直背式汽车模型及CFD计算设置

2.1 标准MIRA直背式汽车模型

图3为使用CATIA制作的MIRA直背式汽车模型,其外形尺寸为:长 \times 宽 \times 高 $=4\,165\text{ mm} \times 1\,625\text{ mm} \times 1\,421\text{ mm}$ ^[15].笔者使用ANSYS ICEM CFD对计算域进行网格划分,考虑到网格划分中可能出现由于车轮与地面接触处曲率过大而引起的网格畸变,特在模型制作时在车轮与地面接触处构建高度为5 mm,长度为30 mm的凸台以降低网格畸变的可能性,其结构如图4所示.

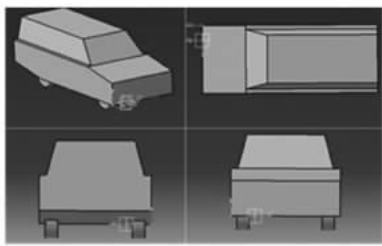


图3 标准MIRA直背式汽车原车模型

Fig. 3 MIRA square-back model vehicle

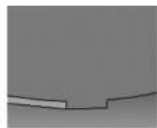


图4 车轮底部凸台

Fig. 4 Vehicle wheel with boss

2.2 CFD计算设置

CFD计算设置包括建立计算域、划分网格和设置求解器,用ANSYS ICEM CFD进行计算域的建立和网格划分,使用Fluent进行求解.计算域的大小对计算精度有重要影响,过小的导致来流无法均匀稳定、模型后方尾流不能充分发展,同时可能在计算域内产生回流而影响计算精度,因此,构

建合适大小的计算域是十分重要的.综合作者前期试验和参考相关文献,笔者所构建的计算域尺寸如下:入口距模型头部3倍模型长,出口距模型尾部7倍车长,高度为模型5倍高,宽度为模型7倍宽长方体计算域,其阻塞比为2.3%,小于工程要求的5%,且可以满足计算精度^[12].在计算域建立中考虑到计算机硬件条件的限制,以及计算域的对称性,因此在中心对称面处将计算域划分为相同的两部分,而实际计算时只使用其中的一部分,故而最终形成的计算域如图5所示.

由于MIRA直背式汽车模型外形较为复杂,因此在网格划分时选用ANSYS ICEM CFD中的非结构化四面体网格,为了提高计算精度,用密度盒在汽车模型周围进行网格加密,同时为了更加准确地获取所需的流场信息,在车身表面形成三棱柱网格以消除壁面函数的影响,此外,为了避免网格个数对计算结果的影响,在网格划分过程中,保持模型相同部分的网格尺寸不变.



图5 对称计算域

Fig. 5 Symmetric domain

在使用Fluent求解过程中,计算域的边界条件设置为:计算域入口为速度入口边界,来流为空气,速度为40 m/s,分析时认为流场稳定,且空气为低速不可压、定常均匀来流,温度为288 K,密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $0.072\,2\text{ m}^2/\text{s}$,湍流强度为0.5%,且不涉及传热问题;计算域出口为压力出口边界,表压为0,湍流强度为0.5%;计算域下表面为移动壁面边界,滑移速度为40 m/s;计算域上表面、左右侧面以及车身表面均为无滑移壁面边界;湍流模型为Standard Realizable模型,

并采用二阶迎风格式进行压力基稳态求解,收敛残差为 10^{-4} ,迭代次数为 2 000 次。

3 凹坑型非光滑单元体布置位置及其结构尺寸选定

3.1 凹坑型非光滑单元体布置位置

因为车顶是汽车各个表面中对尾流影响最大的表面之一,因此笔者将凹坑型非光滑表面布置于 MIRA 直背式汽车模型顶部,如图 6 所示。

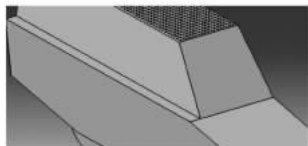


图 6 布置位置

Fig. 6 Arrangement position

3.2 凹坑型非光滑单元体结构尺寸选定

凹坑型非光滑表面主要是通过对边界层的控制来实现减阻的,因此,非光滑单元体的结构选择与边界层及其厚度有关,其深度应小于车身表面对数律区间的距离。目前,非光滑单元体的结构尺寸是通过计算平板边界层的厚度来确定的,其计算公式为:

$$\delta(l) = 0.035l / Re(l)^{1/7}. \quad (1)$$

式中: $\delta(l)$ 为平板层流边界层厚度; l 为平板特征长度,文中取模型车顶长度, $l = 2.624\text{m}$; Re 为雷诺数^[16],其计算公式为:

$$Re(l) = vl/u. \quad (2)$$

式中: v 为来流速度,文中为流体介质空气的来流速度,取 $v = 40\text{ m/s}$; u 为流体介质空气的运动黏度系数,笔者取 $u = 0.0722\text{ m}^2/\text{s}$ 。

经计算,平板层流边界层厚度 $\delta(l) = 32.5\text{ mm}$,因此,凹坑型非光滑单元体的深度不应大于 32.5 mm 。

经过前期多次试验,笔者将凹坑型非光滑单元体结构尺寸参数确定为: $D = 40\text{ mm}$, $W = 50\text{ mm}$, $L = 70\text{ mm}$, $d = 10\text{ mm}$ 。

4 计算结果

为保证计算结果的准确性,将原车模型顶部的黏性阻力系数与平板湍流边界层的黏性阻力系数进行了比较,误差为 4.27% ,小于工程要求误差 5% ,故精度在一定范围内可以保证。

汽车行驶中受到的气动阻力包括压力阻力和摩擦阻力,文中使用总减阻率 η 来衡量不同排列

方式的凹坑型非光滑单元体形成的非光滑表面对汽车气动阻力的影响,其计算公式为:

$$\eta = \frac{N_{sm} - N_{con}}{N_{sm}} \times 100\%. \quad (3)$$

式中: N_{sm} 为原车模型所受气动总阻力; N_{con} 为布有凹坑型非光滑表面的汽车所受气动总阻力。

CFD 计算结果如表 1 所示,从中可以看出,凹坑型非光滑单元体的布置可以减小模型受到的压差阻力和表面摩擦阻力,其中以矩形排列的凹坑型非光滑单元体的减阻效果最佳,总减阻率可以达到 6.52% 。

表 1 CFD 计算结果

Tab. 1 CFD computational results

凹坑排列方式	压差阻力/N	表面摩擦阻力/N	总阻力/N	总减率/%
原车方式	669.52	24.39	693.90	—
矩形排列	628.58	20.10	648.69	6.52
菱形排列	669.67	23.38	693.05	0.12
等差排列	667.89	23.80	690.97	0.42

5 计算结果分析

5.1 排列方式对中心对称面压力的影响

图 7 为原车和布有矩形排列、菱形排列、等差排列的凹坑型非光滑单元体形成的非光滑表面在 MIRA 直背式汽车中心对称面处的压力云图。从中可以看出:4 个模型在车头处压力相差不大,但是布有矩形排列非光滑表面模型的车尾处负压范围更小,且离车尾也较远,这样相对于其他排列方式,矩形排列时汽车受到的压差阻力也就更小,因此矩形排列时可以实现较好的减阻效果。

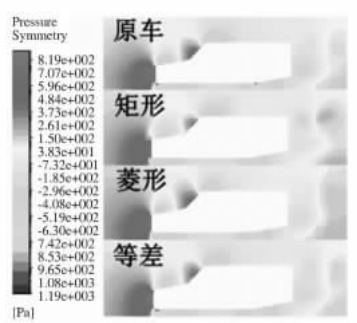


图 7 中心对称面处压力云图

Fig. 7 Pressure nephogram on symmetry

5.2 排列方式对车尾湍动能的影响

图 8 为原车和布有矩形排列、菱形排列、等差排列的凹坑型非光滑单元体形成的非光滑表面在距 MIRA 直背式汽车车尾 400 mm 处截面上的湍

动能图.从中可以看出:相对与其他3个模型,布有矩形排列非光滑表面的模型在车尾处的湍动能最小,这就意味着空气在流过车身表面时耗散的能量最小,因此汽车受到的气动阻力也最小.

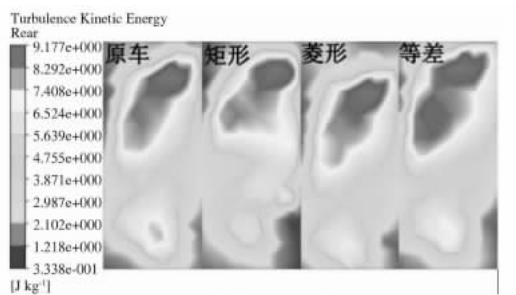


图8 车尾处湍动能

Fig.8 Turbulence kinetic energy on rear

5.3 排列方式对减阻机理的影响

由于空气具有黏性,所以行驶中的汽车必然会受到因空气黏性作用而产生的两种阻力:一种为车身表面空气分离时产生的压差阻力;另一种为车身表面切应力的积分而产生的表面摩擦阻力.通过分析可知,凹坑型非光滑表面具有减阻效果的原因在于:

(1) 凹坑的存在使汽车表面的粗糙度加大,而增加表面粗糙度是促使边界层内转捩点后移的方法之一,转捩点后移必然会使边界层的分离延迟,最终使汽车所受到的因边界层的分离而形成的压差阻力减小.通过对比不同排列方式可知,矩形排列形成的非光滑表面具有更高的表面粗糙度,因此获得的减阻效果也最好.

(2) 图9为矩形排列时距中心对称面50 mm处上凹坑中的速度矢量.从中可以看出,空气流经车顶时会在凹坑中形成与来流方向相反的反向旋转漩涡,而反向漩涡形成的“涡垫效应”使原来车顶处“气-固接触”的表面滑动摩擦在凹坑处变为“气-气接触”的滚动摩擦.并且由于滚动摩擦远小于滑动摩擦,因此凹坑型非光滑表面可以有效减小汽车表面边界层内的摩擦阻力.因为在相同条件下,矩形排列的非光滑表面有更多的“气-气”接触点,所以其减阻能力也就越强.



图9 凹坑中速度矢量图

Fig.9 Velocity vector in pit-type non-smooth element

6 结论

(1) 在相同条件下,以矩形排列的凹坑型非光滑单元体具有更好的减阻效果,其总减阻率可以达到6.52%.

(2) 矩形排列的凹坑型非光滑表面可以使车尾负压区范围更小、距车尾更远,从而可以减小汽车受到的压差阻力;同时通过使流过车表面的空气湍动能耗散最小,可以降低汽车受到的气动阻力.

(3) 矩形排列的凹坑型非光滑单元体可以更好地增加汽车表面粗糙度以及“气-气”接触点个数以减小汽车受到的压差阻力和表面摩擦阻力,从而更好的降低汽车受到的气动阻力.

参考文献:

- [1] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [2] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] WALSH M J, Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. AIAA Paper. 1982, 82-0169.
- [4] HAN M, LIM H C, JANG Y G, et al. Fabrication of a micro-riblet film and drag reduction effects on curved objects. TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. 2003.
- [5] 田丽梅,任露泉,韩志武,等. 仿生非光滑表面脱附与减阻技术在工程上的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 135-142.
- [6] 钱风超. 仿生鱼鳞形凹坑表面减阻性能的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2013: 1-26.
- [7] 赵军. 凹坑型仿生非光滑表面的减阻性能研究[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2008, 1-2.
- [8] 金益锋,谷正气,容江磊,等. 汽车凹坑型非光滑表面减阻特性的分析与优化[J]. 汽车工程, 2013, 31(1): 41-45.
- [9] 彭世冲,董彦非,阴小晖. 二维非光滑凹坑面减阻性能数值仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1): 36-44.
- [10] 张国耕. 车身仿生非光滑表面气动减阻特性研究[D]. 杭州: 浙江大学能源工程学系, 2010: 1-24.
- [11] 杨易,范光辉,聂云,等. 基于SAE模型非光滑表面对气动减阻的影响[J]. 机械科学与技术, 2014(4): 559-563.
- [12] 湛可. 非光滑车表汽车的空气阻力特性分析[D].

- 杭州: 浙江大学机械工程学系, 2013: 13 – 24.
- [13] 杨易, 聂云, 徐永康, 等. 车身非光滑表面位置对气动性能的影响 [J]. 华中科技大学学报, 2014, 42(1): 23 – 27.
- [14] 宋宝军. 类客车体非光滑气动减阻特性研究 [D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2014, 56 – 57.
- [15] 聂云. 车尾造型对凹坑型非光滑车身气动减阻的影响与优化 [D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2014, 56 – 57.
- [16] 韩占忠, 王国玉. 工程流体力学基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.

Influence Analysis of Pit-type Non-smooth Elements Arrangement on Aerodynamic Drag of Vehicle

XIE Jinfa, Zhang Jinglong

(College of Vehicle & Transportation Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Based on the bionics non-smooth surface, pit-type non-smooth elements arranged in rectangular, diamond and arithmetic are put on the roof of a MIRA square-back model vehicle to analyze the influence of different arrangements on the aerodynamic drag of model. In the application of CFD, the software ANSYS is used for numerical simulation, and results show that the pit-type non-smooth elements arranged in rectangular can obtain the best aerodynamic drag reduction performance, and the total drag reduction rate can reach 6.52%. Further analysis reveals that the rectangular arrangement can get a better pressure drag and surface shear stress reduction performance, so it eventually reduces the aerodynamic drag.

Key words: pit-type non-smooth element; arrangement; automobile; aerodynamic drag; influence analysis

(上接第 85 页)

Sealability Analysis of Premium Connection with Cylinder/Sphere Sealing Structure Based on FEM

ZHU Qiang¹, DU Peng¹, WANG Jianjun², QIN Dongchen¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. CNPC Tubular Goods Research Institute, CNPC Key Lab for Petroleum Tubular Goods Engineering, Xi'an 710077, China)

Abstract: With the increasing requirements for oil and gas resources exploitation, the premium connection is more and more widely used. The sealability is one of the important properties for premium connection, and in view of this the paper focuses on sealability analysis of premium connection with a kind of cylinder/sphere sealing structure based on finite element method (FEM). The axisymmetric model of the premium connection is established by using ANSYS. Three load conditions are considered as the machine tightening torque, machine tightening torque + axial tension, and machine tightening torque + internal pressure + axial tension conditions. Under these load conditions, the distribution rules of contact pressure and the VME stress of the sealing structure are obtained by ANSYS. Through comparisons of contact pressure and VME stress with different load conditions, the influence of tensile load and internal pressure on the premium connection sealability are analyzed. The result shows that the contact pressure and VME stress of cylinder/sphere sealing structure can meet the sealing requirements. The paper can provide a theoretical guidance for sealing structure design optimization of premium connection.

Key words: premium connection; cylinder/sphere structure; contact pressure; finite element method(FEM)

文章编号: 1671-6833(2016)05-0091-06

变焦相机自标定方法研究

赵书俊, 段绍丽, 张晓芳, 李 磊, 刘晓旻

(郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 研究了变焦式相机的标定方法, 采用基于二消失点的自标定方法对变焦摄像机的两个固定焦距下的一般参数进行标定, 通过与张正友标定方法、机器视觉软件 Halcon 标定的结果进行比较, 验证了该方法的可行性和鲁棒性。为了能够更好地反映变焦相机的变焦特性, 建立了能更精确描述变焦摄像机的厚透镜模型。笔者通过对变焦图像进行 SIFT 特征匹配, 根据匹配点对建立直线方程组, 采用最小二乘法估计变焦图像的缩放中心, 另外, 还计算了不同焦距之间的光心位移。实验结果表明, 光心位移与焦距的变化量有明显的差距, 从而说明厚透镜模型更适合用来描述摄像机的变焦镜头。

关键词: 变焦相机标定; 二消失点; 亚像素角点检测; 缩放中心; 光心位移

中图分类号: TB82 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.018

0 引言

相机标定是从二维图像获取三维空间深度信息的关键步骤^[1-2]。相机标定方法主要分为标定板标定方法、主动式标定法、相机自标定方法^[3]。标定板标定法需要精密加工的标定物, 利用二维图像与三维场景的匹配对应关系来标定相机参数; 主动式标定法不需标定物, 算法简单, 鲁棒性较高, 缺点是需要精确控制相机运动, 实验设备要求高^[4]。自标定方法不需要标定物, 仅利用二维图像信息来确定相机内参数^[5]。

由于变焦镜头比固定焦距镜头具有更大的功能和弹性, 变焦镜头的摄像机系统能适应各种视野、景深和光照条件的场景。目前, 变焦镜头在深度重建、安全监控、视觉跟踪、精密测量等领域得到了广泛应用和研究。2013年南开大学张雪波等^[6]提出了一种基于多参考点的变焦转换模型标定方法, 提高了标定的精度, 并将其成功地应用于视频监控系统下人体的身高测量中。石皓^[7]提出了一种用于鱼眼 PTZ 主从监控系统的标定方法。2014年 S. Álvarez^[8]提出一种应用在 ITS(智能交通系统)框架中的分层单目摄像机自动标定方法, Brückner^[9]提出一种由 PTZ(pan-tilt-zoom)相机组成的多相机系统内外参数的主动式自标定

方法。2015年, Hastedt 等^[10]标定了无人机摄影测量中物体空间内方位参数, 并分析了不同的主距离与不同主点对系统稳定性的影响。Zheng^[11]研究了一种新的捆绑调整变焦镜头内参标定方法, 通过建立关于变焦/聚焦内参新模型(变焦/聚焦相关内参共线方程), 定量分析了变焦镜头的不稳定性和变焦带来误差的联合影响。Zhigao^[12]在主从双 PTZ 相机合作跟踪的视频监控中, 提出一种新的框架, 利用平面几何约束实现主从相机的合作跟踪, 适用于监控基线宽、跟踪对象深度变化、场景动态变化的监控环境。

单一焦距下变焦镜头标定方法与普通相机标定类似。但变焦光学系统结构参数随着倍率、对焦和光阑孔径大小的调整而发生变化, 为了能够更好地反映变焦镜头的变焦特性, 需建立能更精确描述变焦特性的模型, 标定变焦相机一般参数、变焦图像的缩放中心、不同焦距之间的光心位移。研究表明, 厚透镜视觉模型具有更高的建模精度, 更适合变焦光学成像系统的建模^[13]。

笔者研究了变焦相机的标定方法。首先, 采用基于二消失点的自标定方法对变焦摄像机的两个固定焦距下的一般参数进行标定。然后对变焦图像进行 SIFT 特征匹配, 根据匹配点对建立直线方程, 采用最小二乘法估计缩放中心, 变焦图像的

收稿日期: 2016-02-08; 修订日期: 2016-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61307019、11404290); 河南省科技攻关计划重点项目(132102210396); 河南省科技合作项目(152106000045); 河南省基础与前沿技术研究项目(142300410225); 河南省科技开放合作项目(152106000045)

通讯作者: 刘晓旻(1973—), 女, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事光学精密检测与3D成像技术研究, E-mail: liumamara@zhu.edu.cn.

缩放中心可用来进行深度估计.

1 变焦镜头的成像模型

由于针孔成像模型难以精确反映变焦光学系统结构参数(如焦距或倍率)变化与模型参数之间的关系.为了定性分析,常采用薄透镜模型和厚透镜模型.薄透镜模型能较好的解释像面、图像弥散与成像景深的关系,但制造理想镜头困难.对于变焦相机镜头,光学元件之间还存在相对运动,采用针孔模型和薄透镜模型都不能较准确地反映变焦相机的成像模型,因此采用厚透镜模型,如图1.平面 H_{0xy} 和 H_{ixy} 为主平面; H_0 和 H_i 分别为外光心和内光心; f_0 和 f_i 分别为物距和像距.变焦时主平面 H_{0xy} 和 H_{ixy} 之间的距离会发生改变.

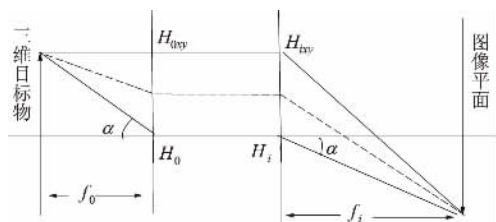


图1 厚透镜模型

Fig.1 Thick lens model

2 一般参数的标定

一般参数的标定是指焦距、主点、畸变系数等常见摄像机参数的标定.笔者在一个固定的变焦镜头参数下,采用一种基于二消失点的自标定方法标定变焦相机两个焦距下的一般参数,并完成深度估计.将二消失点自标定结果与现有的 Matlab 标定工具箱对棋盘格模板进行标定、机器视觉软件 Halcon 采用标准实心圆阵列图案的标定结果进行比较.

2.1 确定消失点

基于二消失点的相机自标定要求场景中有两组相互正交的平行直线,如图2.场景中包含矩形图案 ABCD,图像平面 EFGH, O 为相机的光心.假设 EF 和 GH、EH 和 FG 方向上的消失点分别为 M、N.根据矩形 ABCD 的几何特性和消失点的性质可得 $OM \perp ON$,也就是说对两组相互正交的平行直线成像的相机光心,位于由这两组平行直线投影得到的两个消失点为直径的球上.

因此,只要检测出场景中的矩形投影到图像平面上的4个顶点的坐标,就可计算出消失点 M 和 N 的坐标.故图像平面上矩形的4个角点的正确检测和精确定位是相机标定能否正确实现的前

提,同时也是决定标定精度的关键步骤.

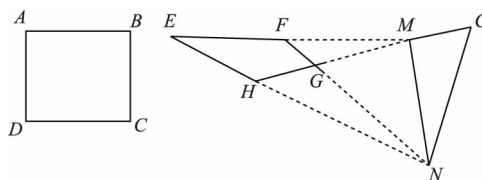


图2 矩形模板的消失点

Fig.2 Vanishing points of rectangle template

2.2 基于 Harris 的亚像素角点检测

Harris 算子是 Harris 等人提出的一种角点检测算法,该算法的检测结果是像素级的.为了提高相机标定精度,笔者引入迭代算法对 Harris 角点检测算法进行优化,获得亚像素级的角点坐标.

图3为笔者用于相机标定的棋盘格图像,棋盘格角点附近的点可以分为在边缘上的点和不在边缘上的点两类. P 点处灰度梯度为零,而 R 点上的灰度梯度 ∇I_i 方向与 OR 垂直,所以,在角点 O 附近点的灰度梯度均垂直于该点与角点的连线.

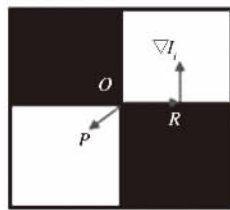


图3 棋盘格图像

Fig.3 Checkerboard image

∇I_i^T 为灰度梯度向量; $\vec{\beta}$ 为图像原点指向 O 点的坐标; $\vec{\gamma}$ 为图像原点指向第 i 点的坐标.实际图像可能受到噪声的影响,设存在误差 ε_i ,以角点邻域所有点的误差和 Φ

$$\Phi = \sum_i \varepsilon_i = \sum_i \nabla I_i^T \cdot (\vec{\beta} - \vec{\gamma}). \quad (1)$$

检测角点准确位置的问题转化为迭代优化问题

$$\sum \nabla I_i^k \cdot \nabla I_i^{kT} \cdot \vec{\beta}^k = \sum \nabla I_i^k \cdot \nabla I_i^{kT} \cdot \vec{\gamma}^k. \quad (2)$$

通过对初始 Harris 角点进行一定级数的迭代优化,就可以得到更精确的亚像素级角点坐标.

两种角点检测算法的结果对比如图4所示,其中‘•’表示 Harris 的角点检测位置,圆圈内‘×’表示笔者的角点检测位置,圆圈外‘+’表示角点实际位置.由图可以看出,亚像素的角点检测的算法更接近实际的角点位置.所以笔者采用基于 Harris 算法的亚像素级角点检测的方法,不仅提高了相机的标定精度,也提高了角点检测速度.

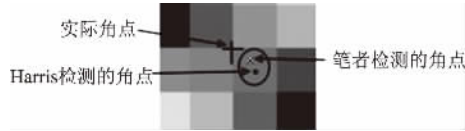


图4 两种角点检测方法的结果对比

Fig.4 Comparison of two different methods

2.3 相机内参数的线性求解

设在图像坐标系下由模板图像得到的两消失点为: $M(u_m, v_m)$ 、 $N(u_n, v_n)$, 则在相机坐标系下 M 、 N 的坐标为: $M[(u_m - u_0) dx, (v_m - v_0) dy, f]$ 、 $N[(u_n - u_0) dx, (v_n - v_0) dy, f]$, 由于相机光心位于由这两组平行直线投影得到的两个消失点为直径的球上, 因此可得到关于内参数的约束方程

$$\frac{1}{f_x^2}(u_0 - u_m)(u_0 - u_n) + \frac{1}{f_y^2}(v_0 - v_m)(v_0 - v_n) + 1 = 0. \quad (3)$$

式(3)中有4个未知数 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 , 在不考虑畸变的情况下, 从不同角度拍摄4幅图片就可以线性求解相机的4个内参数。

3 缩放中心的标定

对于变焦镜头而言, 必须考虑主点的变化或稳定性. 不同变焦图像之间总存在一个相对的缩放中心, 缩放中心的标定和计算方法对深度估计至关重要. 首先需要对变焦图像进行匹配, 得到若干匹配点对, 再采用最小二乘方法估计缩放中心。

3.1 图像的 SIFT 特征匹配

SIFT 是 David G Lowe 在 1999 年提出的基于不变量描述子的匹配算法, SIFT 算法在光强变化、图像旋转、比例缩放、仿射变换等情况下, 仍可以得到大量准确、稳定的 SIFT 特征点。

SIFT 特征匹配算法主要包括以下部分: ①构建尺度空间, 检测极值点; ②特征点过滤及精确定位, 去除低对比度和对噪声敏感的候选关键点, 去除边缘点; ③确定关键点的方向参数, 利用特征点领域像素的梯度方向分布特征来定关键点的方向; ④生成特征向量描述子, 利用特征点邻域像素梯度信息生成 128 维特征向量, 建立图像特征描述符; ⑤SIFT 特征向量的匹配, 采用特征向量的欧氏距离对 SIFT 的特征向量进行匹配。

3.2 估计缩放中心

理想情况下, 以缩放中心为原点的图像坐标系中, 匹配点的径向斜率相同. 实际情况中由于成像畸变等因素的影响, 即使正确的匹配点, 径向斜

率也不可能完全相同, 因此通过给出一个合理的阈值来筛选比较理想的匹配点, 尽量剔除那些因为匹配算法所造成的错误匹配。

假设对变焦图像进行 SIFT 特征匹配后得到 n 对匹配点, 由一对匹配点确定一条直线, 可获得 n 对匹配点的直线方程. 理想情况下, 缩放中心 (Z_x, Z_y) 经过每一条直线, 则有矩阵方程

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_n & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$\text{简写成} \quad A\beta = c. \quad (5)$$

显然, 求缩放中心 $\beta = (Z_x, Z_y)$ 的问题可转化为最小二乘参数估计问题, 即当 $N > 2$ 时, 缩放中心 β 由下式唯一确定

$$\tilde{\beta}_{LS} = (A^T A)^{-1} A^T c. \quad (6)$$

4 标定实验及结果分析

本实验使用普通手动变焦相机索尼 SLT - A58 作为获取图像的工具, 镜头 DT 3.5 - 5.6/18 - 55mm SAM II, 像素尺寸 $8.4 \mu\text{m} \times 8.4 \mu\text{m}$, 分辨率选择 2736×1824 , 变焦模式 18 ~ 55 mm 变焦环。

4.1 基于二消失点的变焦相机一般参数的自标定

Step1. 获取图像. 采集图像时, 光圈固定, 只聚焦一次, 分别对场景中包含两组相互正交的平行直线的平面棋盘格模板、矩形地砖图案从不同角度分别拍摄 20 幅图像. 每 4 幅图像做一组标定实验, 如图 5. 得到 5 组实验结果, 再求平均值。

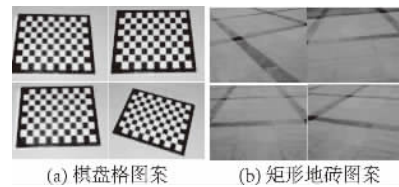


图5 实验图像

Fig.5 Experimental image

Step2. 图像预处理. 图像的预处理主要是彩色图像灰度化处理和图像去噪处理。

Step3. 角点检测. 基于 Harris 算法的亚像素角点检测方法检测角点. 为了减小镜头畸变对实验结果的影响, 选取图案中间的矩形进行标定。

Step4. 求取相机的内参. 求得每幅图像的 4 个角点后, 可由直线几何关系求得消失点, 然后利

用式(3)求解相机的内参数.

Step5. 实验结果与分析. 对平面棋盘模板、矩形地砖分别在焦距 35、55 mm 下, 从不同角度分

别拍摄 20 幅图像, 每 4 幅图像一组做一次标定实验, 得到 5 组实验结果, 对 5 组实验结果取平均值, 得到了相机内参数, 如表 1.

表 1 基于二消失点自标定结果

Tab. 1 Self-calibration results based on two vanishing points

$\times 10^{-3}$

不同焦距 f/mm		f_x	f_y	u_0	v_0
35	棋盘格	3 845.26	3 798.42	1 423.18	885.63
	矩形地砖	3 983.87	4 068.52	1 509.62	907.55
55	棋盘格	5 878.86	5 891.69	1 423.18	885.63
	矩形地砖	6 108.67	6 017.46	1 539.89	835.78

为了验证本文中基于二消失点自标定结果的准确性, 分别与机器视觉软件 Halcon 标定法、matlab 工具箱的张正友标定法的结果做了比较,

并列出了相机内参数的理论值, 如表 2 所示. 还分析了不同标定方法的相对误差, 如表 3 所示.

表 2 标定结果对比

Tab. 2 Comparison of calibration results

$\times 10^{-3}$

不同焦距 f/mm	方法	f_x	f_y	u_0	v_0
35	初始参数	4 127.36	4 146.92	1 368.00	912.00
	二消失点自标定	3 845.20	3 798.42	1 423.18	885.63
	Halcon 标定板	3 859.20	3 865.17	1 353.14	892.88
	张正友	4 074.04	4 080.53	1 384.08	909.31
55	初始参数	6 485.85	6 516.59	1 368.00	912.00
	二消失点自标定	5 878.86	5 891.69	1 383.56	905.63
	Halcon 标定板	5 905.33	5 913.69	1 344.28	913.87
	张正友	6 209.39	6 217.13	1 353.87	967.84

表 3 相对误差

Tab. 3 Relative error

不同方法的相对误差		f_x_error	f_y_error	u_0_error	v_0_error
$f=35\text{ mm}$	二消失点自标定	0.068 363 31	0.084 038 27	0.040 336 26	0.028 918 86
	Halcon 标定板	0.064 971 31	0.067 941 99	0.016 840 73	0.021 825 04
	张正友	0.015 583 25	0.018 261 17	0.011 751 94	0.002 949 64
$f=55\text{mm}$	二消失点自标定	0.093 586 808	0.095 893 711	0.011 374 25	0.006 984 65
	Halcon 标定板	0.089 505 616	0.092 517 712	0.017 339 181	0.002 050 439
	张正友	0.042 625 264	0.045 954 111	0.010 327 208	0.061 229 759

从表 1、2、3 可得, 二消失点自标定结果和借助 Halcon 软件的标定板标定方法、张正友方法所标定的结果相当, 说明了笔者算法具有较好的精度; 对矩形地砖图案、棋盘格图案在不同焦距下进行标定, 结果表明该方法简单, 且对场景的约束不高.

为了验证二消失点标定法的鲁棒性, 对图像加入 0~3 像素的噪声水平, 在每个噪声水平下进行 20 次独立实验, 重新计算相机参数, 其均方根误差变化曲线如图 6. 从图 6 中可看出, 相机内参数误差随噪声水平线性增大, 但误差仍然比文献

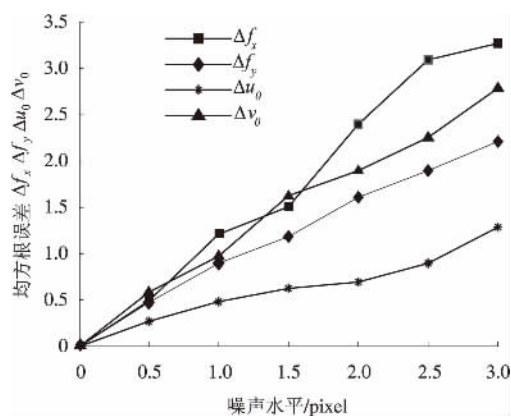


图 6 标定结果的均方根误差曲线

Fig. 6 RMSE of calibration results

[14]和文献[15]的误差小得多,所以仍能较好地完成标定,说明二消失点自标定算法的鲁棒性较好。

4.2 缩放中心的标定

采集图像时,光圈固定,只聚焦一次,从不同角度拍摄了7组变焦图像,每组数据都包含F35和F55两个焦距下的变焦图像,如图7(a)。对变焦图像进行SIFT特征匹配得到图7(b),得到73对匹配点。利用式(6)估算变焦图像的缩放中心,如图8所示。

利用同样的方法对7组变焦图像进行缩放中心的标定,7组实验的缩放中心标定结果如图9。

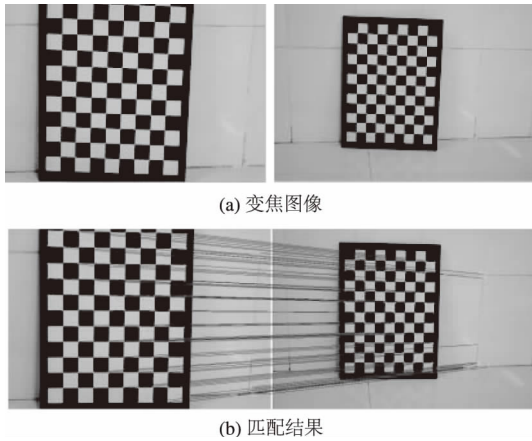


图7 SIFT 特征匹配

Fig. 7 SIFT feature matching



图8 缩放中心

Fig. 8 The zoom center

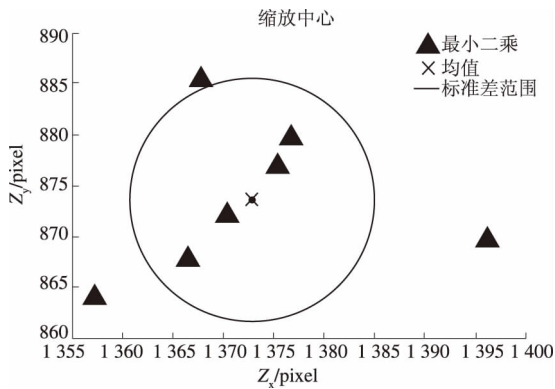


图9 缩放中心

Fig. 9 The zoom center

4.3 光心位移的标定

平面棋盘格上各特征点的坐标为 (x_{wi}, y_{wi}) ,

成像平面上的坐标为 (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}) ,图像坐标为 (u_i, v_i) 。则摄像机的外参数模型为:

$$\begin{cases} s [u_i & v_i & 1]^T = \mathbf{M} [n & 0 & p] \\ [x_{wi} & y_{wi} & 1]^T = \mathbf{H} \mathbf{P}_i. \end{cases} \quad (8)$$

式中: s 为深度系数; \mathbf{M} 为摄像机的四参数模型的内参数矩阵。根据Faugeras求取投影矩阵的方法求出 \mathbf{H} 单应性矩阵:

$$\mathbf{H} = \lambda \mathbf{M} [n & 0 & p] = [h_1 & h_2 & h_3]. \quad (9)$$

将已求出的内参数代入式(8)计算出摄像机坐标系相对于标定板上世界坐标系的外参数,而摄像机外参数中的平移向量就是变焦摄像机的外光心到世界坐标系原点的直线距离。因此通过标定板的一组变焦图像就能计算摄像机的光心位移。

标定板的变焦图像采用估算缩放中心时采集的7组变焦图像,图10为变焦镜头在两个不同焦距下的外光心分别到世界坐标系原点的深度值,即平移向量 z 轴的坐标值。

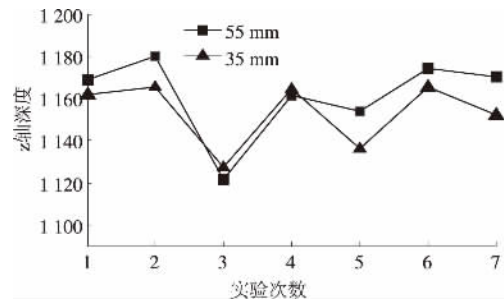


图10 平移向量 z 轴深度

Fig. 10 z axis depth of translation vector

图11则是焦距F35和F55之间光心位移标定结果的变化曲线。

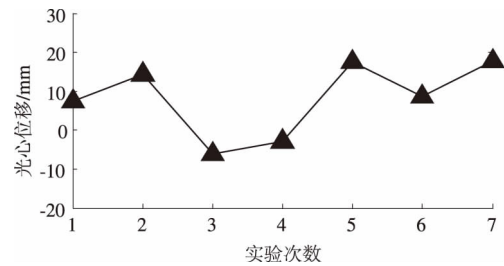


图11 光心位移

Fig. 11 The displacement of optical center

通过对7组实验的结果求平均值可得到光心位移标定结果为10.722 0 mm,所以光心位移与焦距的变化量有明显的差距,从而说明厚透镜模型更适合用来描述摄像机的变焦镜头。

5 结论

基于亚像素角点检测算法对变焦式相机在某

一固定焦距下进行二消失点自标定,运用消失点的几何特性建立关于相机内参数的约束方程,求出相机的内参数,将二消失点法的标定结果与借助机器视觉软件 Halcon 标定板法标定的结果进行对比,结果验证了该方法的有效性和鲁棒性;同时本文还计算了变焦图像的缩放中心、光心位移,结果表明,厚透镜模型更适合用来描述摄像机的变焦镜头.另外,计算出的缩放中心为后续的深度测量、三维重建提供数据基础.

参考文献:

- [1] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 陈继华, 李勇, 田增国, 等. 基于机器视觉的机械式表盘自动读表技术的实现 [J]. 郑州大学(工学版), 2015, 36(3): 101–105.
- [3] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中相机定标综述 (J). 自动化学报, 2000, 26(1): 43–55.
- [4] BASU A. Active calibration: Alternative strategy and analysis (C) // Proc. IEEE Conf. On Computer Vision and Pattern Recognition, 1993: 495–500.
- [5] 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展 [J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 110–122.
- [6] 张雪波, 路晗, 方勇纯, 等. 室外环境下 PTZ 摄像机全自动标定技术及其应用 [J]. 机器人, 2013, 35(04): 385–393.
- [7] 石皓, 赖世铭, 刘煜, 等. 一种用于鱼眼 PTZ 主从监控系统的标定方法 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(10): 2412–2417.
- [8] Álvarez S, Llorca D, Sotelo M. Hierarchical camera auto-calibration for traffic surveillance systems. Expert Systems With Applications [J]. 2014(41): 1532–1542.
- [9] Brückner M, Bajramovic F, Denzler J. Intrinsic and extrinsic active self-calibration of multi-camera systems. machine vision & applications [J]. Fe. 2014, 25(2): 389–403.
- [10] HASTEDT H, LUHMANN T. Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry [J]. The International Archives of the Photogrammetry, 2015, XL. 1 (W4): 321–328.
- [11] ZHENG S, WANG Z, HUANG R. Zoom lens calibration with zoom-and focus-related intrinsic parameters applied to bundle adjustment [J]. ISPRS Journal Of Photogrammetry & Remote Sensing. 2015(102): 62–72.
- [12] Zhigao C, Aihua L, Guoyan F, et al. Cooperative object tracking using dual-pan-tilt-zoom cameras based on planar ground assumption. IET Computer Vision [J]. 2015, 9(1): 149–161.
- [6] LAVEST J M, RIVES G, DHOME M. Three-dimensional reconstruction by zooming [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(2): 196–207.
- [7] 李华, 吴福朝, 胡占义. 一种新的线性相机自标定方法 [J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1122–1128.
- [8] 胡钊钧, 谈正. 一种基于二消失点的相机自标定新算法 [J]. 空间电子技术, 2005, 23(1): 42–46.

Research on Self Calibration Method of Zoom Camera

ZHAO Shujun, DUAN Shaoli, ZHANG Xiaofang, LI Lei, LIU Xiaomin

(School of physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, the calibration methods of camera zoom is studied. The self calibration method based on two vanishing points is used to calibrate the general parameters of zoom camera. Compared with the results of two methods of Zhang Zhengyou and the machine vision software Halcon, the feasibility and robustness of the method in this paper is verified. In order to better reflect the characteristics of the zoom camera, a thick lens model selected can describe the zoom camera more accurately. The linear equations can be established according to feature correspondences obtained by the method based on SIFT feature matching between zoom images, and then the zoom center can be identified with the least square method. In addition, the optical center displacement can also be calculated between different focal length. The experimental result shows that the variation between optical center displacement and focal length has a apparent significant gap, so that the thick lens model is more suitable to describe the zoom camera.

Key words: Zoom camera calibration; Two vanishing point; Sub-pixel corner detection; Zoom center; The optical center displacement