

- 中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1671-6833

CN 41-1339/T

CODEN ZDXGAN

郑州大学学报

工学版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE



2018.4

第39卷 第4期

Vo1.39 No.4

2018年7月出版

ISSN 1671-6833



9 771671 683182



郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE

编 委 会

特邀编委：

申长雨(中国科学院院士)

何季麟(中国工程院院士)

张孟杰(新西兰惠灵顿维多利亚大学)

刘炯天(中国工程院院士)

金耀初(英国萨里大学)

Kay Chen Tan (香港城市大学)

编委会主任：

邵国胜(郑州大学)

编委(按姓氏笔画为序)：

王 凌(清华大学)

王忠勇(郑州大学)

公茂果(西安电子科技大学)

叶国田(郑州大学)

刘国际(郑州大学)

刘春太(郑州大学)

许 群(郑州大学)

李 杰(同济大学)

吴泽宁(郑州大学)

张 涛(北京航空航天大学)

陈伟能(华南理工大学)

陈德良(郑州大学)

单崇新(郑州大学)

贾 瑜(郑州大学)

高丹盈(河南工程学院)

梁 静(郑州大学)

韩一帆(郑州大学)

臧双全(郑州大学)

王亚明(郑州大学)

王宗敏(中原工学院)

左其亭(郑州大学)

刘 波(中国科学院数学与系统科学研究院)

刘金盾(郑州大学)

关绍康(郑州大学)

麦立强(武汉理工大学)

李勇平(上海应用物理所)

张 冰(郑州大学)

张少军(郑州大学)

陈静波(郑州大学)

庞新厂(郑州大学)

赵明皞(郑州大学)

郭院成(郑州大学)

唐 珂(南方科技大学)

梁长浩(合肥物质科学院)

董 林(郑州大学)

潘复生(重庆大学)

目 次

土木与交通工程

- 砂层注浆模型试验水泥含量检测方法研究 潘荣凯, 杨 平, 陈 亮, 蒋兴起(1)
- 考虑温度场的架空钢芯铝绞线线股应力研究 张 猛, 张玉莹, 赵桂峰, 肖 宇(7)
- 炭黑改性沥青混合料的动态响应主曲线分析 栗培龙, 马松松, 李建阁, 张东阳(12)
- FSAE 方程式赛车车架的设计与轻量化 袁守利, 林家辉(18)
- 氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体对氢发动机散热影响研究 罗亚萍, 邱兆文(25)

化工与环境工程

- Fe_3O_4 磁性壳聚糖微球固定化脂肪酶研究 韩秀丽, 谷鹏举, 方书起, 陈俊英(30)
- 零价铁对上流式固定床中生物氧化三价砷的影响 万俊锋, 蔡利芳, 张玉聪, 王 岩(36)
- 基于 CFD 的电动汽车驱动电机冷却流道对比研究 沈 超, 余 鹏, 杨建中, 张东伟, 魏新利(41)
- 反应时间和碳磷比对单级好氧除磷的影响 彭赵旭, 韩 微, 彭志远, 雷志超, 陈 干(46)

电气与信息工程

- 基于隐马尔科夫模型的石油钻井事故预警方法 朱晓东, 袁坤杰, 王艳玲(51)
- 基于特征值的单机无穷大电力系统随机稳定性分析 张 振, 刘艳红(58)
- 基于 DRNN 网络的轮式机器人鲁棒 H_∞ 控制 彭金柱, 卞英楠, 周树亮(64)
- 运动准备电位单次检测技术研究 逯 鹏, 牛 新, 刘素杰, 胡玉霞, 胡航航(70)
- 一种自适应低剂量 CT 图像质量改善算法 蒋慧琴, 徐玉凤, 马 岭, 杨晓鹏, Toshiya Nakaguchi (75)
- 变时滞耦合不确定复杂网络修正函数投影同步 方 洁, 杜海明, 刘 娜(81)

机械工程

- 基于 MEMD 与 MMSE 的滚动轴承退化特征提取方法 李凌均, 金 兵, 马艳丽, 韩 捷, 郝旺身(86)
- 汽车鼓式制动器的多工况热-力耦合仿真分析 张三川, 郭向利, 田金坤(92)

CONTENTS

【Civil Engineering and Construction Engineering】

- Study on Cement Content Detection of Experimental Investigation of Grouting Model Test into Sand Stratum
..... **PAN Rongkai, YANG Ping, CHEN Liang, JIANG Xingqi (1)**
- Study on Stress of Overhead Steel Core Aluminum Wire Strand Considering the Effect of Temperature Field
..... **ZHANG Meng, ZHANG Yuying, ZHAO Guifeng, XIAO Yu (7)**
- Analysis of Dynamic Response Master Curve of Carbon Black Modified Asphalt Mixture
..... **LI Peilong, MA Songsong, LI Jiange, ZHANG Dongyang (12)**
- The Design of FSAE Formula Frame with Light Weight **YUAN Shouli, LIN Jiahui (18)**
- Study on the Influence of Graphene Oxide-Water and Glycol Nanofluids on Heat Transfer of Hydrogen Engine
..... **LUO Yaping, QIU Zhaowen (25)**

【Chemical Engineering and Environmental Engineering】

- Study on Immobilization of Lipase with Fe_3O_4 Magnetic Chitosan Microspheres
..... **HAN Xiuli, GU Pengju, FANG Shuqi, CHEN Junying (30)**
- Effect of ZVI on Microbial Oxidation of As^{III} in Up-flow Fixed Bed
..... **WAN Junfeng, CAI Lifang, ZHANG Yucong, WANG Yan (36)**
- Comparative Study on Cooling Channel for Electric Vehicle Drive Motor Based on CFD
..... **SHEN Chao, YU Peng, YANG Jianzhong, ZHANG Dongwei, WEI Xinli (41)**
- Impacts of Reaction Time and C to P Ratio on Single Aerobic Phosphorus Removal System
..... **PENG-ZHAO Xu, HAN Wei, PENG Zhiyuan, LEI Zhichao, CHEN Gan (46)**

【Electrical Engineering and Information Engineering】

- An Accident Prewarning Method of Oil Drilling Based on Hidden Markov Model
..... **ZHU Xiaodong, YUAN Kunjie, WANG Yanling (51)**
- Stochastic Small Signal Stability of Single Machine Infinite Bus Power Systems Based on Matrix Eigenvalue Analysis
..... **ZHANG Zhen, LIU Yanhong (58)**
- A Stable Robust Control for Wheeled Robotic System Based on DRNN Network and H_∞ Methods
..... **PENG Jinzhu, BIAN Yingnan, ZHOU Shuliang (64)**
- Study on Single Trial Detection of Readiness Potentials
..... **LU Peng, NIU Xin, LIU Sujie, HU Yuxia, HU Hanghang (70)**
- An Adaptive Quality Improved Algorithm in Low Dose CT Images
..... **JIANG Huiqin, XU Yufeng, MA Ling, YANG Xiaopeng, TOSHIYA Nakaguchi (75)**
- Modified Function Projective Synchronization of Uncertain Complex Dynamical Networks with Time-varying Coupling Delay ...
..... **FANG Jie, DU Haiming, LIU Na (81)**

【Mechanical Engineering】

- The Method of Degradation Feature Extraction of Rolling Bearing Based on MEMD and Multivariate Multiscale Entropy
..... **LI Lingjun, JIN Bing, MA Yanli, HAN Jie, HAO Wangsheng (86)**
- Thermo-mechanical Coupling Analysis of Automotive Drum Brake under Multiple Braking Conditions
..... **ZHANG Sanchuan, GUO Xiangli, TIAN Jinkun (92)**

砂层注浆模型试验水泥含量检测方法研究

潘荣凯¹, 杨平¹, 陈亮², 蒋兴起²

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 常州市轨道交通发展有限公司, 江苏 常州 213001)

摘要: 地铁建设中预注浆加固是常用的加固方式, 为研究预注浆工程中浆液扩散规律及分布情况, 研制一套由加压稳定系统、模型箱系统和注浆系统组成的注浆模型试验装置. 采用改进型 EDTA 二钠滴定检测水泥土中水泥含量的试验方法, 在注浆影响范围内分块取样, 与滴定检测结合形成分块滴定法并进行一次完整注浆试验验证. 研究表明, 注浆模型试验装置效果良好, 改进型 EDTA 二钠滴定法能准确检测水泥土中水泥含量, 分块滴定法能直观地显示浆液分布情况和扩散范围, 为类似模型试验研究浆液分布提供一种合理可行的试验方法.

关键词: 注浆; 装置研发; 改进型 EDTA 二钠滴定法; 分块法; 浆液分布

中图分类号: TU472

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.030

0 引言

冻结法施工联络通道后融沉现象会对周边环境产生不良后果, 控制工后融沉已成为软弱地层冻结需要解决的难题^[1]. 施工前进行预注浆加固可有效抑制融沉. 采用注浆模型试验研究浆液分布情况及扩散规律, 可为地下工程预注浆设计与工艺参数确定提供依据, 并可对现场施工进行指导.

国内外很多学者都开展了注浆模型试验研究, 张家奇等^[2]、田多等^[3]研制高压注浆试验装置以研究高压条件下浆液扩散机制; Gothall 等^[4-5]、Gustafson 等^[6]、王腾等^[7]研究了浆液在单裂隙和多裂隙下的扩散规律; 周茗如等^[8]、钱自卫等^[9]、Wang 等^[10]、Bezuijen 等^[11]、Eisa^[12]基于不同土层进行注浆试验; 在注浆效果检测方面, 曹兆虎等^[13]基于人工合成透明土材料和 PIV 图像处理技术, 开展楔形管桩沉桩及桩端后注浆施工过程的可视化模型试验; 程盼等^[14]通过动力触探原位测试和地质雷达等方法对松散土体注浆后加固效果进行检测; 姜春露等^[15]采用大型有机玻璃模型对弱胶结多孔岩石注水饱和及注浆过程中电阻率变化进行室内模拟试验; 胡熠等^[16]采用微型电极进行不同地下水条件注浆检测试验. 以上

试验均采用物理方法检测, 对仪器和操作要求较高, 取样量较大, 而在室内模型试验中应用化学滴定方法检测注浆效果的研究很少, 笔者通过设计研发注浆模型试验装置, 改进水泥土中水泥含量的化学滴定检测方法, 结合分块法研究浆液扩散和分布规律, 取得了良好的效果.

1 注浆模型试验装置研发

注浆模型试验装置如图 1 所示, 由加压稳定系统、模型箱系统、注浆系统组成.

1.1 加压稳定系统

加压稳定系统由一台液压机提供, 如图 1(a) 所示. 油箱上面是电动机, 液压油通过两根油管输送到液压缸, 液压缸既可提供压力, 也可提供拉力, 压盘通过控制器下降或上升. 顶板和底板尺寸为 700 mm × 700 mm × 30 mm, 4 根立柱高 1 280 mm, 如图 1(b) 所示, 顶板和底板各通过 4 个螺母与立柱固定, 底板上平行焊接两条导轨将模型箱定位并限制其位移.

1.2 模型箱系统

根据本试验前期模拟注浆所得结果, 浆液扩散范围在距离注浆口 120 mm 之内, 为减小或避免尺寸效应产生的影响, 注浆管伸入土体中长度

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478226); 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD); 常州市轨道交通科技计划项目(GD-GC-16006)

通信作者: 杨平(1964—), 男, 江西樟树人, 南京林业大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程教学与研究, E-mail: yangping@njfu.edu.cn.

为 140 mm, 注浆孔 A 和 F 到模型箱顶(底)部和侧边距离均不小于 150 mm, 如图 1(b) 所示. 模型箱由 4 块大小相同的钢板组合而成, 尺寸为 500 mm × 550 mm × 8 mm, 每两块板垂直焊接, 形成两个 L 形钢板, 在两个侧面对称开注浆孔, 注浆孔直径 10 mm, 内部为螺纹状, 用来与注浆管连接. 为模拟实际工程中冻结管布置方式, 注浆孔布置采用方形和梅花形两种方式, 其中 C、D、E、F 4 个孔组成方形布置, B、C、D 3 个孔组成梅花形布置, 工程中冻结孔间距为 800 mm, 按 10:1 比例缩小, 则模型箱上孔间距为 80 mm. 孔 A 与 F 距离为 283 mm, 单孔试验时可使用这两个孔同时注浆, 减少模型填筑次数. 将 M 12 螺丝前端切割成 10 mm 长的螺杆, 在注浆孔不使用时将螺丝拧进.

为固定模型箱并提高模型箱刚度, 制作 3 组抱箍, 每组抱箍两端用长 100 mm 的螺丝收紧. 同时制作一个 490 mm × 490 mm × 20 mm 的压板, 在装料

结束后将压板置于砂样上, 加压时与压盘接触.

1.3 注浆系统

注浆系统由注浆机和注浆管组成, 注浆机为 JBY 618 型高压双液注浆机, 如图 1(c) 所示, 既可进行单液注浆, 也可进行双液注浆. 注浆机由电钻提供压力, 将浆液从高压管输送到前端混合器中, 经过注浆管进入土体. 注浆管为使用外径 14 mm、内径 4 mm、壁厚 5 mm 的小口径钢管设计制作而成, 如图 2 所示. 注浆管分为 3 个部分: 第 1 部分为 50 mm 长、外径 8 mm 注浆段, 浆液从注浆口注入土体中, 注浆段末端为 3 个外径 7 mm、厚 1.5 mm 的橡胶皮圈, 防止浆液回流; 第 2 部分为 105 mm 长、外径 12.5 mm 螺纹段与模型箱中注浆孔连接, 螺纹段末端为螺母, 可向前旋进, 螺母前面为一个外径 12 mm、厚 2 mm 的橡胶皮圈, 可密封注浆孔与螺母之间的空隙; 第 3 部分为英制螺纹段, 与注浆机上的混合器连接, 内口做成漏斗形状, 方便浆液流进.

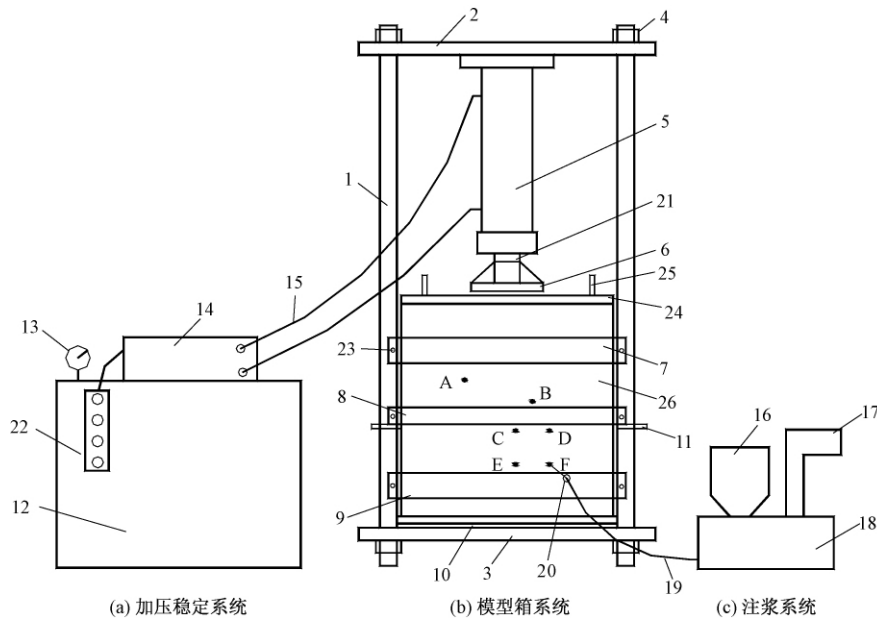


图 1 试验装置图
Fig. 1 View of test device

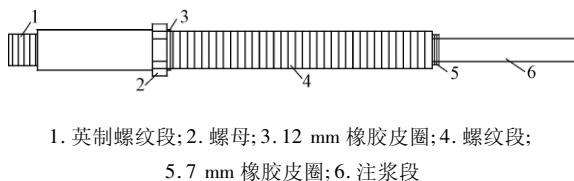


图 2 注浆管结构图

Fig. 2 Structure of grouting pipe

1.4 注浆模型试验步骤

注浆模型试验分为 8 个步骤, 如图 3 所示. 其

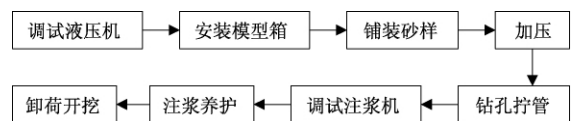


图 3 注浆模型试验步骤

Fig. 3 Steps of grouting model test

中铺装砂样时根据容积和密度计算值预先称重, 分层填装压实. 钻孔拧管需根据试验要求打开指定注浆孔上的螺丝, 并在注浆管中放置一根铁芯,

防止细砂在钻孔过程中进入管内导致注浆管进入土体中的距离无法达到规定长度. 注浆管拧至设定位置后抽出铁芯, 同时将螺纹段末端的螺母向前拧进并通过橡胶皮圈与模型箱侧壁紧密贴合达到密封效果.

2 改进型 EDTA 二钠滴定法

EDTA 是乙二胺四乙酸的简称, EDTA 二钠滴定法在施工现场检测水泥土搅拌桩中水泥含量的应用较多, 同时也可用来判断水泥与土混合的均匀性. 此检测方法精确度较高, 误差在 0.1 mL 之内, 且检测成本相对较低, 操作简便, 但取土质量过大易导致水泥不能完全反应, 且土样含水率的变化对滴定结果有一定影响, 因此需对此法进行改进.

2.1 试验所需器材及药品

50 mL 酸式滴定管; 滴定架; 10 mL 移液管; 200 mL 锥形瓶; 250 mL 烧杯; 1 L 容量瓶; 3 mL 塑料滴管; 25 mL、50 mL 比色管; 玻璃棒; 分析天平; 研钵; 20 mL 棕色广口瓶(装钙红指示剂); 5 L 聚乙烯桶(装氯化铵溶液); 1 L 聚乙烯容量瓶(装氢氧化钠溶液).

0.1 mol/L 乙二胺四乙酸二钠(简称 EDTA 二钠)溶液; 体积分数为 10% 氯化铵溶液; 体积分数为 1.8% 氢氧化钠溶液(内含三乙醇胺); 钙红指示剂(内含硫酸钾).

2.2 改进型 EDTA 二钠滴定法

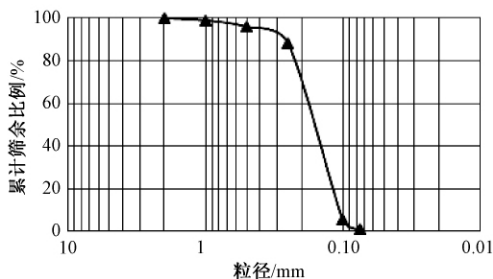
将配制好的水泥土试样放入烘箱中烘干, 取出试样放入研钵中研磨成极细颗粒并使其充分混合, 称取等量试样放入烧杯中进行滴定. 因本试验注浆所用硅酸盐水泥水化后会产生 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子, 在采用 EDTA 二钠滴定法进行水泥含量检测时, 加入氯化铵溶液溶出 Ca^{2+} 后, 需加入 NaOH 溶液使 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 等干扰离子沉淀, 同时 NaOH 溶液中加入少量三乙醇胺溶液起掩蔽作用. 反应后的溶液加入钙红指示剂可与 Ca^{2+} 形成红色络合物, 加入 EDTA 二钠溶液后 EDTA 二钠夺取络合物中的 Ca^{2+} , 使指示剂被释放出来, 溶液由络合物的颜色转变为游离指示剂的颜色, 用以指示滴定终点的到达.

改进后的 EDTA 二钠滴定法避免了试样取出后含水率变化对滴定产生的影响, 以往 EDTA 二钠滴定法在取样后需密封存放, 使得试验时与原含水率一致, 但在运输和试验过程中难以保证含水率不发生变化. 采用将取出试样烘干的方式, 将

含水率降为 0, 这样即使在先前操作过程中含水率发生变化也对后期试验没有影响. 同时, 经研磨后试样中的水泥与砂样充分混合, 所有试样称取同样质量水泥与砂样混合物进行滴定, 减少了在取样过程中由于试样质量损失引起的误差. 同时因开挖分块时块体较小, 各类药品消耗量也大大减少, 采用少量试样分析法可以更好地适应试验要求.

2.3 EDTA 二钠消耗量与水泥含量关系标定

为研究砂性土层注浆后水泥土中水泥含量与 EDTA 二钠溶液消耗量之间的关系, 制作水泥含量分别为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 的 6 个试样. 注浆试验采用干砂, 则制作试样的砂样含水率为 0%, 水泥水灰比为 1.5:1, 砂土颗粒级配曲线见图 4, 水泥、水和砂样配比见表 1.



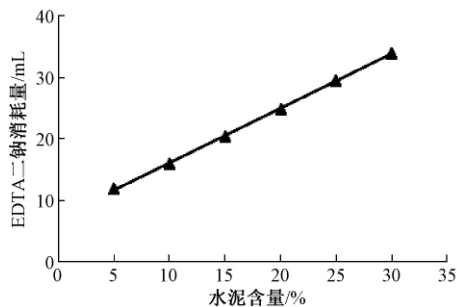


图5 水泥含量与 EDTA 二钠消耗量关系曲线

Fig.5 Relationship between cement content and sodium EDTA consumption

体以外的地方,因此在取出结石体时不能完全包含该部分浆液.为获得完整的浆液扩散范围,本试验中采用分块法结合 EDTA 二钠滴定法来确定浆液扩散规律,具体思路为:

(1) 根据前期试验初估的浆液扩散范围,确定一个注浆管管口上方 80 mm,下方 60 mm,左边和右边各 120 mm,前面 110 mm 的长方体,即长方体的尺寸为 240 mm × 240 mm × 140 mm.

(2) 确定每个分块大小,本模型为 40 mm × 40 mm × 20 mm,将长方体分为 7 层,并给每层编号,由上往下依次为 A、B、C、D、E、F、G.从注浆方向将每 1 层分成 6 行 6 列,给每 1 块编号,则第 1 层第 1 行第 1 列为 A11,第 1 层第 1 行第 2 列为 A12,第 2 层第 1 行第 1 列为 B11,依次类推.从上往下逐层分块,将每 1 块土样分别切割取出,放入对应编号的塑料杯中,对于水泥含量过高、强度过大导致无法切割的位置则不分块,在后期处理时用红色标记.

(3) 将所有土样用改进型 EDTA 二钠滴定法检测水泥含量,根据 EDTA 二钠消耗量与水泥含量关系曲线确定每个分块中的水泥含量.

(4) 在 AutoCAD 中建立与分块时所选取的长方体尺寸相同的模型,并同样进行分层分块操作,得到如图 6 所示的黑色线框图.

(5) 根据 AutoCAD 中不同颜色对应的色号,如表 2 所示,建立水泥含量与色号之间的关系,如图 7 所示,将水泥含量代入曲线中计算,得到相应的色号,四舍五入精确取整到整十,再由表 2 查到对应的颜色,即可得到各个编号土样在 AutoCAD 中对应的颜色.

(6) 依据各个编号对应的颜色和位置逐个逐层给线框图上色,其中水泥含量超过 16% 的结石体部分色号默认为 10(本试验重点检测水泥含量 < 16% 的分布),全部上完色后根据颜色分布

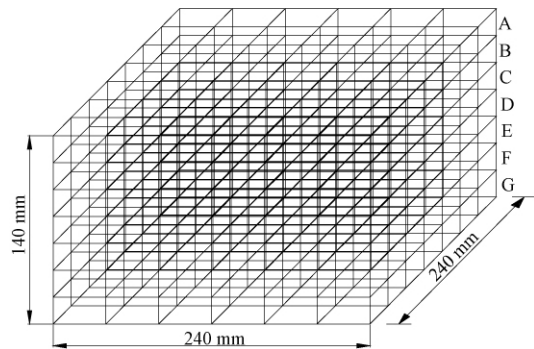


图6 分块线框图

Fig.6 Block diagram

表2 AutoCAD 中颜色与色号对应表

Tab.2 Different color and color number comparison in AutoCAD

颜色							
色号	10	20	30	40	50	60	80
颜色							
色号	90	100	110	120	130	140	160

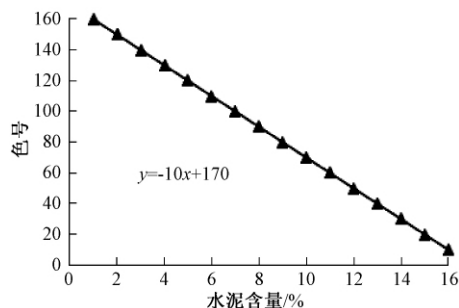


图7 水泥含量与色号关系曲线

Fig.7 Relationship between cement content and color number

研究浆液扩散规律.

4 注浆试验结石体形状及浆液扩散特性

本次试验注浆材料为水泥,水灰比 1.5:1,注浆量 400 mL,注浆压力 0.3 MPa,养护 1 d,采取模型上部不加压条件下注浆,模型箱中填料为干砂.按上述步骤完成注浆试验后进行分块法开挖并取出结石体,清理附着在结石体上的松散砂粒,得如图 8 所示形状,其长 76 mm、宽 46 mm、高 83 mm.大部分浆液位于注浆管上方,将结石体分成两部分,主体近似为长方体,长 65 mm、宽 53 mm、高 60 mm.表面有明显凹陷和凸起,另一部分为长方体外延展出一小块结石体,大致为较扁平的椭球体,其长 38 mm、宽 22 mm、高 23 mm.

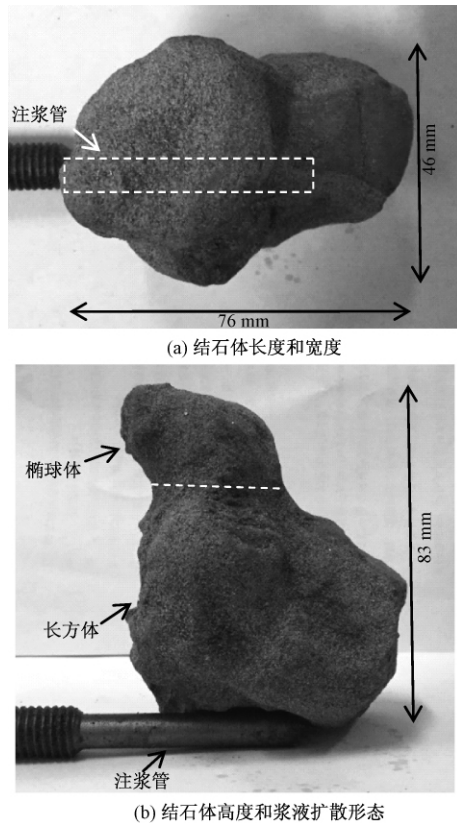


图8 结石体形状

Fig. 8 Stone body shape

按分块滴定法进行滴定和绘图,得到分层分块图如图9所示。由图9可知,共有96个分块中含有水泥,根据每个分块体积为 32 cm^3 得到浆液最大扩散范围约为 $3\ 072\text{ cm}^3$,与注浆量比值为7.68,说明渗透性良好,且注浆管上部扩散范围大于下部,原因是分层压实时,下部填料压实后再进行上部填料压实,上部压实对下部填料也有作用,使得下部密实度更高,注入浆液时,浆液往密实度较小的地方运动,且因上部未加荷载,浆液向上运动受到的阻力小于向下的阻力。同时,在钻孔时对土体产生扰动,上部砂土在重力作用下部分流失,使上部存在裂隙,注浆时浆液优先进入上方裂隙中并产生劈裂效果,后续浆液沿劈裂通道继续填充扩散,导致上部浆液较多。分层分块图清楚地显示了浆液分布情况,总体上,每层中间位置色号较高,说明浆液较多,往外逐渐减少,靠近注浆口的分层浆液扩散范围较大,越往外的分层扩散范围越小,水泥含量也越少。由图9(h)可以看出浆液分布范围较广,不同水泥含量的分块数量没有较大差异,说明从注浆口往外扩散时浆液减少较为缓慢,浆液渗透效果较好。同时B、C、D、E层红色块体位置分布较为零碎,说明结石体形状不规则,与实际开挖出的结石体基本一致。

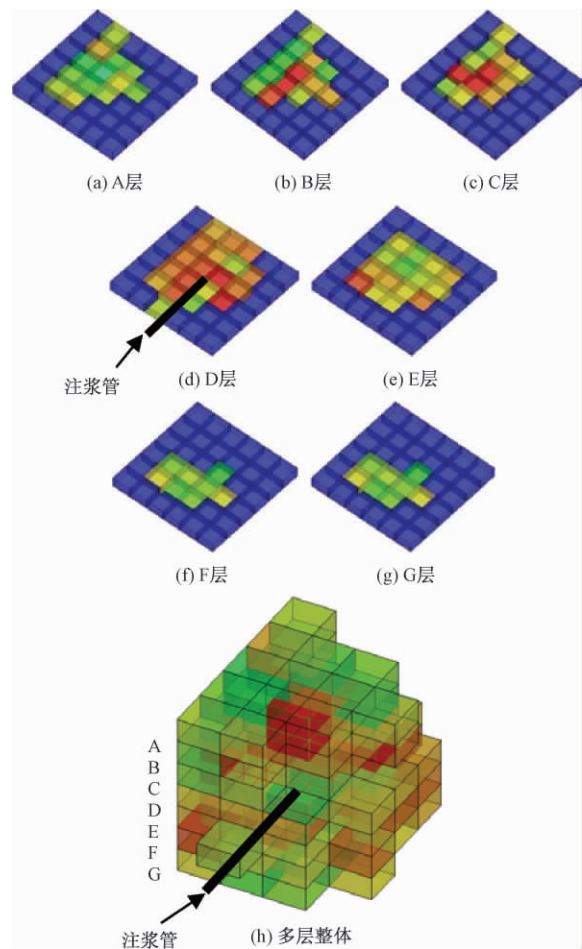


图9 分层分块色号图

Fig. 9 Hierarchical block diagram

5 结论

(1) 研制的砂性地层注浆模型试验装置及注浆试验方法合理可行,给出了模型试验方法。

(2) 笔者提出了适合模型试验水泥含量检测的改进型EDTA二钠滴定法,改进后的滴定法可避免含水率对滴定产生的影响,减少在取样过程中由于试样质量损失引起的误差,采用少量试样分析法能很好适应试验要求。

(3) 笔者提出了分块法研究浆液分布规律的思路,并给出了具体方法。

(4) 通过试验验证了笔者提出的注浆体水泥含量检测方法正确合理,可为类似研究提供新方法。

参考文献:

- [1] 庄惠敏,杨平,何文龙. 人工冻融软弱土融沉特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 62-66.
- [2] 张家奇,李术才,张霄,等. 一种新型综合注浆加固试验系统的研制及应用[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1268-1277.

- [3] 田多,师皓宇. 高压密封注浆试验系统的研制与应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(10): 111-113.
- [4] GOTHÄLL R, STILLE H. Fracture dilation during grouting[J]. Tunnelling and underground space technology, 2009, 24(2): 126-135.
- [5] GOTHÄLL R, STILLE H. Fracture-fracture interaction during grouting[J]. Tunnelling and underground space technology, 2010, 25(3): 199-204.
- [6] GUSTAFSON G, CLAESSON J, FRANSSON A. Steering parameters for rock grouting[J]. Journal of applied mathematics, 2013, 22(5): 1643-1652.
- [7] 王腾,周茗如,马连生,等. 基于断裂理论的湿陷性黄土劈裂注浆裂纹扩展[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(5): 1472-1481.
- [8] 周茗如,彭新新,苏波涛,等. 普通水泥与超细水泥注浆性能分析及其黄土注浆效果对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1673-1678.
- [9] 钱自卫,曹丽文,姜振泉,等. 孔隙砂岩多次化学注浆试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2226-2230.
- [10] WANG S Y, CHAN D H, LAM K C, et al. A new laboratory apparatus for studying dynamic compaction grouting into granular soils[J]. Soils and foundations, 2013, 53(3): 462-468.
- [11] BEZUIJEN A. Compensation grouting in sand-experiments[D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [12] EISA K. Compensation grouting in sand[D]. London: University of Cambridge, 2008.
- [13] 曹兆虎,孔纲强,文磊,等. 楔形管桩沉桩及桩端后注浆可视化模型试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 922-927.
- [14] 程盼,邹金锋,罗恒,等. 松散填土层中注浆效果检测方法试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3800-3806.
- [15] 姜春露,姜振泉,刘盛东,等. 多孔岩石化学注浆过程中视电阻率变化试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4202-4207.
- [16] 胡熠,谢强,陈子龙,等. 高密度电法岩溶路基注浆质量检测模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 86-91.

Study on Cement Content Detection of Experimental Investigation of Grouting Model Test into Sand Stratum

PAN Rongkai¹, YANG Ping¹, CHEN Liang², JIANG Xingqi²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Changzhou Rail Transit Co., Ltd., Changzhou 213001, China)

Abstract: Pre-grouting reinforcement was a common reinforcement pattern in subway construction. The grouting model test equipment with an assembly of stable pressurization system, model box system and grouting system was developed to study diffusion and distribution of the slurry in pre-grouting projects. Sodium EDTA titration method was improved to detect the cement content in cement soil. And this was combined with cutting samples in the range of the grouting influence to develop a block titration method and implement a complete grouting test. Results showed that the grouting model test equipment worked well, improved sodium EDTA titration method could detect the cement content in cement soil accurately, a visually clearer and more presentable distribution and diffusion range of slurry can be obtained by block titration method, a reasonable and feasible test method has been established to study the distribution of slurry for similar tests.

Key words: grouting; device development; improved sodium EDTA titration method; partition method; distribution of grouting

考虑温度场的架空钢芯铝绞线线股应力研究

张 猛, 张玉莹, 赵桂峰, 肖 宇

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 准确了解钢芯铝绞线在温度场中各层线股的应力分布, 可为架空导线的安全设计和抗疲劳分析提供理论依据. 根据钢芯铝绞线材料性能和协同变形特点, 采用理论分析和有限元模拟研究导线线股应力和温度之间的关系, 分析了导线平均温度和径向温差对最外层铝股应力的影响. 结果表明, 不考虑径向温差时, 铝股应力随着温度的升高而减小, 钢芯应力随着温度的升高而增大; 考虑径向温差时, 外层铝股的应力随着温差的增大而增大, 内部铝股和钢芯的应力随着温差的增大而减小, 温差达到 20 ℃ 时, 外层铝股应力增加 49% 左右.

关键词: 钢芯铝绞线; 有限元; 温度场; 径向温差; 分层应力

中图分类号: TM751

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.031

0 引言

钢芯铝绞线是目前应用较多的架空导线形式, 由单层或多层铝线股绞合在镀锌钢绞线外加强组成^[1], 具有分层结构的特性. 架空导线正常运行时, 受自身载流产生的焦耳热的影响, 其温度往往高于环境温度. 在钢芯铝绞线内部, 由于各层线股之间存在空气间隙, 且钢芯、空气与铝线的导热系数各不相同, 使得导线内部存在径向温差. 研究表明, 导线径向温差可达 5~25 ℃^[2-6], 这势必会影响导线各层线股的应力分布, 进而影响导线的工作安全性和使用寿命. 因此, 考虑温度和应力的耦合作用, 精确计算导线工作状态时线股的分层应力, 对于架空导线的安全设计和抗疲劳分析具有重要意义.

针对架空导线的分层应力, 国内外已开展了相关的研究^[7-11]. 但是, 上述研究工作均未考虑导线通电载流引起的温度变化(尤其是径向温差)对线股受力的影响, 使得分析结果与导线的实际工作条件有一定差异. 基于上述原因, 笔者拟采用理论分析和有限元模拟相结合的方式研究架空钢芯铝绞线线股应力和温度之间的关系, 以期导线的安全

设计和抗疲劳分析提供依据.

1 导线分层应力计算

架空输电导线在张力和温度的作用下会产生沿长度方向的轴向伸长. 架空导线的股状结构特点使得各层沿线股方向的伸长并不相同, 层间会发生相对滑动, 而且材料的泊松比对建立导线变形协调条件也有一定的影响, 但是已有研究表明^[1,12], 二者对导线分层应力的影响较小, 因此, 笔者在建立导线温度应力协调方程时采用如下假设^[10,13]:

(1) 同层线股受力状态相同, 且各线股的轴线位于同一圆柱面内;

(2) 正常工作条件下导线始终处于弹性阶段;

(3) 各层间不考虑摩擦力.

基于以上假设, 这里给出导线和线股伸长示意图如图 1 所示, 图 1(a) 表示的是导线在制造温度的初始条件下, 在张力和温度的共同作用下从 OA 伸长到 OB , 伸长量为 ΔL ; 图 1(b) 表示的是第 n 层单股绞线的伸长展开图. 当导线伸长量为 ΔL 时, 第 n 层线股的伸长量为 $\Delta l_n = l'_n - l_n$, 其中 l_n 和 D_n 分别为第 n 层线股伸长前后的长度. 线股伸长

收稿日期: 2017-07-24; 修订日期: 2017-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578512); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2015GGJS-151)

作者简介: 张猛(1978—), 男, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电力系统结构防灾减灾研究, E-mail: zhangmeng@zzu.edu.cn.

通信作者: 赵桂峰(1978—), 女, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电网基础设施防灾减灾研究, E-mail: gfhao@zzu.edu.cn.

量和导线伸长量有如下的关系^[3]:

$$\Delta l_n = \Delta L \cos \beta_n, \quad (1)$$

式中: β_n 为第 n 层线股的捻角.

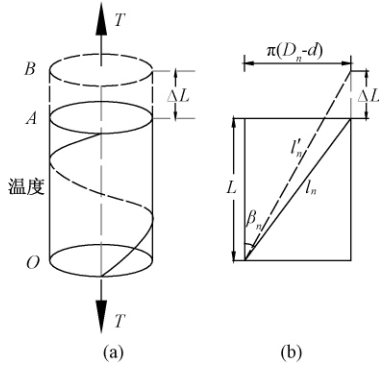


图1 导线和股线伸长示意图

Fig. 1 Diagram of elongation of wire and strand

第 n 层线股的伸长率 ε'_n 可写为:

$$\varepsilon'_n = \frac{\Delta l_n}{l_n} = \left(\frac{\Delta L}{L} \right) \cdot \left(\frac{L}{l_n} \right) \cdot \cos \beta_n = \varepsilon \cdot \cos^2 \beta_n, \quad (2)$$

式中: ε 为导线的轴向伸长率, 它比线股伸长率要大.

当只有弹性伸长时, 则线股截面上的股向应力 σ'_m 为第 n 层股线的弹性模量 E_n 和股向弹性伸长率之积, 可写为:

$$\sigma'_m = \varepsilon'_n \cdot E_n = \varepsilon \cdot \cos^2 \beta_n \cdot E_n. \quad (3)$$

在上述变形中, 有一部分变形是温度变化引起的, 所以在计算线股应力时应扣除这部分的温度应力, 则第 n 层线股的股向应力 σ'_n 为:

$$\sigma'_n = (\varepsilon'_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n) \cdot E_n = (\varepsilon \cos^2 \beta_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n) \cdot E_n, \quad (4)$$

式中: α_n 为第 n 层的线股的线胀系数, 对于硬铝线为 2.4×10^{-5} , 镀锌钢线为 1.2×10^{-5} ^[1]; E_n 为第 n 层的线股的弹性模量, 硬铝取 59 000 N/mm², 镀锌钢取 196 000 N/mm²^[11]; Δt_n 为第 n 层线股温度变化量.

考虑到钢芯的线胀系数要小于铝股的线胀系数, 有可能会表现出导线的整体应变小于铝股的温度应变而使铝股出现压应力, 上式与这一实际情况并不会矛盾.

则第 n 层线股的轴向应力为:

$$\sigma_n = (\varepsilon'_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n) \cdot E_n \cdot \cos \beta_n = (\varepsilon \cdot \cos^3 \beta_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n \cdot \cos \beta_n) \cdot E_n. \quad (5)$$

则整根导线各股轴向应力总和可以写为:

$$T' = \sum \sigma_n = \sum (\varepsilon \cdot \cos^3 \beta_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n \cdot \cos \beta_n) \cdot$$

$$E_n \cdot z_n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_n^2, \quad (6)$$

式中: 第 n 层线股的股径为 d_n , 股数为 z_n .

因为不考虑导线线股间的摩擦, 因此可以得到:

$$T' = T. \quad (7)$$

对于各股层温度已知的情况下, 上式中仅有一个未知数 ε , 求解比较容易. 求出导线整体应变 ε 后, 再回到式(5)中即可得到各股层在温度和张力作用下的各层轴向应力.

2 导线线股应力有限元分析

为了验证上述推导公式求解的正确性, 利用通用有限元分析软件 ANSYS 进行导线三维实体建模及力学加载, 并提取相关力学云图进行分析.

2.1 钢芯铝绞线结构参数

线股沿内层芯线轴缠绕与轴线方向所成的夹角称为捻角, 以 β_n 表示. 当线股以 β_n 沿芯线外表缠绕一圈时, 其顺轴线方向所爬行的高度 L (mm) 称为绞距. 设该层线股的丝径为 d (mm)、绕后该层外径为 D_n (mm), 其展开平面图如图 1(b) 所示, 其捻角的计算公式为:

$$\tan \beta_n = \frac{\pi(D_n - d)}{L}. \quad (8)$$

该层节径比 m 为该节距与该层外径 D_n 之比值, 由上式可写为:

$$m = \frac{L}{D_n} = \frac{\pi(D_n - d)}{D_n \tan \beta_n}. \quad (9)$$

绞线一般节径比在 10~26 之间, 外层比内层小.

采用导线型号为 LGJ-240/30, 导线参数如表 1 所示.

表1 导线 LGJ-240/30 结构参数

Tab. 1 LGJ-240/30 conductor parameter

导线	绞层/根	单根股线		节距/mm	捻角/(°)
		直径/mm	节径比		
钢芯	1 层/1	2.4	—	—	—
	2 层/6	2.4	20	157.5	5.7
铝股	3 层/9	3.6	15	181.2	10.5
	4 层/15	3.6	14	244.5	12.4

2.2 钢芯铝绞线有限元模型的建立与分析

导线建模首先建立各股导线的横截面, 然后在柱坐标系下建立螺旋环绕的母线, 用拖拉生成体的方法生成各股线的实体模型. 模型长度为 50 mm, 单元采用 Solid 45 单元, 划分网格采用扫

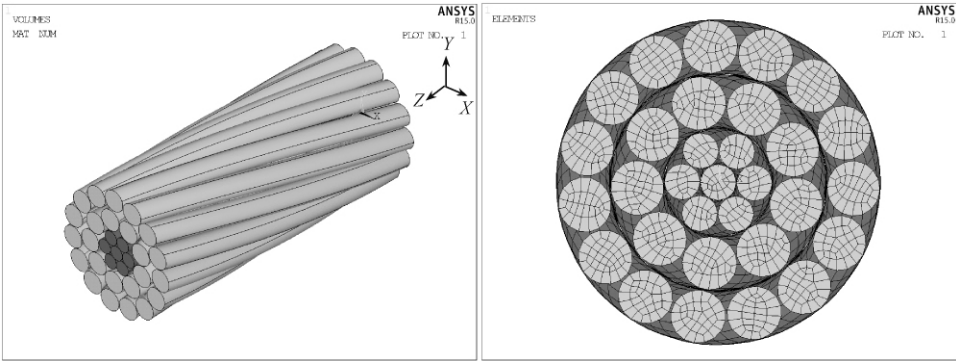


图 2 架空导线有限元模型及网格划分

Fig.2 Finite element model and mesh generation of overhead conductor

略网格划分有限元模型,划分后的网格如图 2 所示.

在边界条件的设置中,约束 $Z=0$ 面上节点的 X 、 Y 、 Z 方向上的自由度. 考虑输电导线是对称轴向受拉结构,因此在 $Z=50$ 平面外建立一个刚域点,然后和该面耦合成刚域,强制 50 mm 面的所有节点在导线轴向的位移相同. 最后在刚域点上施加拉力,目前我国架空输电线的运行张力一般为 15% ~ 25% RTS(导线额定拉断力).

对模型的刚域节点施加 25% 额定拉断力(在 20 ℃ 制造温度下)得到的 $Z=25$ mm 截面的轴向应力云图如图 3 所示.

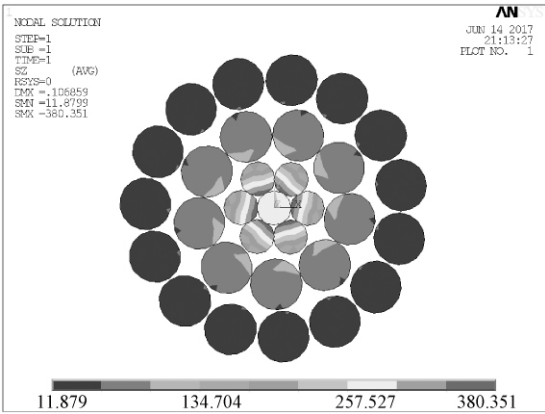


图 3 20 ℃ 下 $Z=25$ mm 处轴向应力云图

Fig.3 Nephogram of axial stress at $Z=25$ mm at 20 ℃

由图 3 可知,导线每股线材的截面应力并不相同,这是由导线的旋绕特性决定的,导线线股截面上各点的应变各不相同. 而理论计算只能计算出线股截面的“平均应力”,因此对每股导线进行应力积分,得到沿轴向的张力后计算出“平均应力”. 计算出的各层的轴向应力(即“平均应力”)如表 2. 从表 2 可知,导线在仅承受拉力作用下有限元分析得到的各层应力与理论方法得到的应力

值的最大误差为 9.6%,这是由于理论计算没有考虑各线股之间的接触和导线的泊松比的影响. 该误差符合工程要求,说明该方法能够计算各线股的分层应力.

表 2 有限元模型各层轴向应力与理论值对比

Tab.2 Comparison of axial stress and theoretical values of each layer in finite element model MPa

层数	钢芯层		铝股层	
	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
理论值	188.30	185.5	54.0	52.90
ANSYS 计算值	197.30	190.5	59.2	49.60
误差/1%	4.78	2.7	9.6	-6.24

注: 本表理论值为式(5)中取 $\Delta t_n = 0$ 计算出的各层应力.

3 温度对线股应力的影响

3.1 不同平均温度下各线股的受力分布

当导线处于自然对流条件(风速小于 0.5 m/s)下,整个导线的温度分布均匀,近似等温体,温度与电流之间呈线性关系^[13]. 由导线稳态热平衡方程^[6]可知,当导线内电流产生的焦耳热较小时,导线吸热基本来源于太阳照射产生的热量,则此时导线温度与环境温度接近且相对较低,我国现行设计规程规定导线的允许工作温度为 70 ℃^[2]. 据此,笔者设定导线制造温度为 20 ℃,运行时的初始张力为 15% RTS,导线整体温度从 30 ℃到 70 ℃每 10 ℃变化时 ANSYS 计算所得的导线 $Z=25$ mm 处各层应力分布如图 4 和表 3 所示.

由图 4 可知,导线在张力和平均温度的作用下,内部钢芯的应力随温度的增加而增加,外部铝股的应力随温度的升高缓慢降低,这是由于钢芯和铝股的线胀系数不同,温度升高后,铝股的应变比钢芯的大,而二者的协同变形限制了

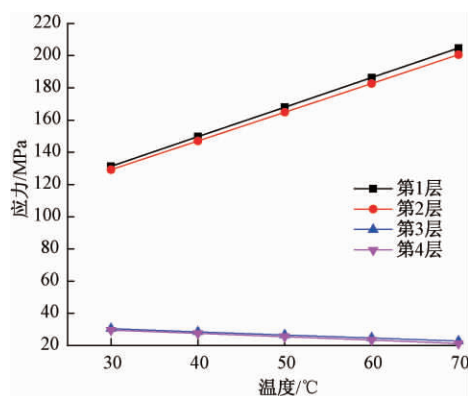


图4 各层股线应力和温度之间的关系

Fig.4 The relation between stress and temperature of ply strands

表3 15%RTS 作用下各层轴向应力

Tab.3 Axial stress of each layer under the action of 15% RTS MPa

温度/ °C	不同计 算法	钢芯层		铝股层	
		第1层	第2层	第3层	第4层
30	理论值	131.3	129.2	30.5	29.6
	ANSYS 值	132.2	124.0	30.3	30.3
40	理论值	149.7	147.0	28.5	27.6
	ANSYS 值	142.0	141.7	27.7	27.5
50	理论值	168.0	164.9	26.6	25.5
	ANSYS 值	160.9	159.4	25.0	24.6
60	理论值	186.4	182.7	24.7	23.4
	ANSYS 值	179.8	177.1	22.4	21.8
70	理论值	204.7	200.6	22.8	21.3
	ANSYS 值	198.6	194.8	19.8	18.9

铝股的变形,表现为铝股因温度受压,使拉力减小引起的拉应力,同时,减小的拉力全部由钢芯承担。

考虑到实际中导线最先发生破坏的是最外层铝股,因此主要关注最外层铝股的应力变化情况。

由表3可知,理论值与 ANSYS 计算值相差并不大,图5直观地表示最外层铝股应力理论值与 ANSYS 计算值之间的误差。

由图5可知,ANSYS 和理论计算的最外层铝股的应力比不考虑温度的最外层铝股的应力小,且二者都是随着温度的升高而线性下降的,但是二者的下降速度不尽相同,这可能是因为理论计算中采用的假定引起的。二者的计算差值并不大,最大误差为 6.8%,再次说明理论公式的正确性。

3.2 导线径向温差对股线应力的影响

导线内部径向温度分布一般为最外层的铝

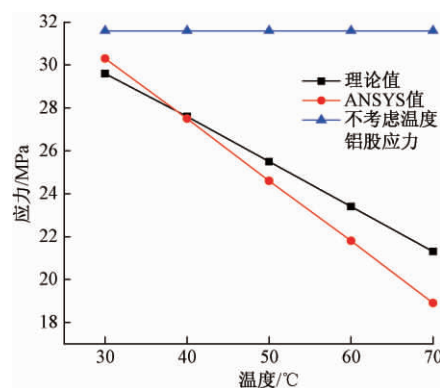


图5 ANSYS 和理论计算的最外层铝股应力

Fig.5 ANSYS and theoretical calculations are applied to the outer layer of aluminum strand stress

股温度最低,邻内层铝股及内部钢芯的温度差别不大^[14].因此本节对导线施加温度荷载时仅对最外层铝股施加逐级变化荷载,级差 5 °C. 为了对比,内部温度选择了 60 °C 和 70 °C 两种情况,初始张力为 20% RTS,具体的工况及结果如表4和表5所示。

表4 20%RTS、内层温度 70 °C 时各层应力值

Tab.4 Stress value of each layer at 20%RTS and 70 °C MPa

内层温 度/°C	外层铝股 温度/°C	钢芯层		铝股层	
		第1层	第2层	第3层	第4层
70	70	242.4	237.7	33.6	31.9
70	65	231.6	227.1	30.5	35.8
70	60	220.9	216.4	27.4	39.7
70	55	210.1	205.8	24.3	43.6
70	50	199.3	195.2	21.2	47.5

表5 20%RTS、内层温度 60 °C 时各层应力值

Tab.5 Stress value of each layer at 20%RTS and 60 °C MPa

内层温 度/°C	外层铝股 温度/°C	钢芯层		铝股层	
		第1层	第2层	第3层	第4层
60	60	224.0	219.8	35.5	34.0
60	55	213.3	209.2	32.4	37.9
60	50	202.5	198.6	29.3	41.8
60	45	191.7	188.0	26.2	45.7
60	40	181.0	177.4	23.1	49.5

由表4和表5可知,随着径向温差的增大,导线的最外层铝股的应力也随之增大,邻内层和内部钢芯的应力减小。这是由于外层铝股温度升高的幅度小于内层线股,相当于外层铝股相对收缩,在张力的作用下应力增大。当内部温度分别为 60 °C 和 70 °C,温差在 20 °C 时,最外层铝股的应

力分别增加了45.6%和48.9%,径向温差所带来的应力变化已不可忽略。

60℃和70℃下最外层铝线应力随温度级差的变化如图6所示,可知最外层铝股的应力大小和钢芯的温度有关,但应力变化却仅和径向温差的大小有关,和内部钢芯温度无关。

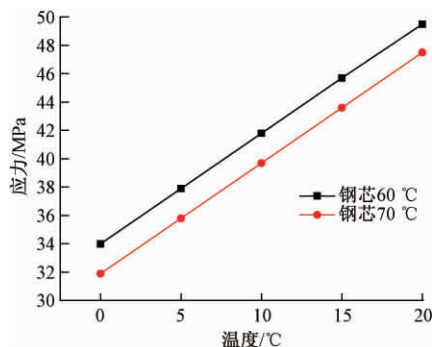


图6 最外层铝股应力随径向温差的变化

Fig.6 The variation of the stress of the outer aluminum stock with the radial temperature difference

4 结论

(1) 导线各层的张力分布并不均匀,外层铝股的张力虽大,但其应力却小于平均应力,因此用平均应力来进行线路设计并不准确。

(2) 不考虑径向温差时,铝股应力随着温度的升高而减小,且最外层铝股张力减小的速度大于邻内层,钢芯应力随着温度的升高而增大。

(3) 考虑径向温差时,外层铝股的应力值随着温差的增大而增大,内部铝股和钢芯的应力随着温差的增大而减小,减小的部分全部由外部铝股承担,温差达到20℃时,外层铝股所承担的张力值增加49%左右,而且增加的幅度和内部温度没有关系,只与径向温差有关。

参考文献:

- [1] 邵晓天. 架空送电线路的电力学计算[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 梁任. 架空导线运行温度及载流量的数值模拟分析[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2017.

- [3] BUSH R A, BLACK W Z, CHAMPION T C, et al. Experimental verification of a real-time program for the determination of temperature and SAG of overhead lines [J]. IEEE transactions on power apparatus & systems, 1983, 102(7): 2284–2288.
- [4] HALL J F, DEB A K, SAVOULLIS J. Wind tunnel studies of transmission line conductor temperatures [J]. IEEE transactions on power delivery, 1988, 3(2): 801–812.
- [5] DOUGLASS D A, KIRKPATRICK L A, RATHBUN L S. AC resistance of ACSR-Magnetic and temperature effects [J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1985, 104(6): 1578–1584.
- [6] DOUGLASS D A. Radial and axial temperature gradients in bare stranded conductor [J]. IEEE transactions on power delivery, 1986, 2(1): 7–15.
- [7] 林建华, 曾伟. 架空导线用钢芯铝绞线张力分层特性研究[J]. 电线电缆, 2015(4): 30–33.
- [8] FOTI F, MARTINELLI L. An analytical approach to model the hysteretic bending behavior of spiral strands [J]. Applied mathematical modelling, 2016, 40(13/14): 6451–6467.
- [9] 郑黎阳, 孙祖志. 铝绞线和钢芯铝绞线的应力分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 1997, 30(3): 65–68.
- [10] 蔡斯特, 芮晓明, 倪海云. 架空线路导线分层力学模型及应用研究[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(10): 8–12.
- [11] 黄欲成, 陈池, 汪峰, 等. 大跨越架空输电导线钢芯铝股应力分布特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 76–81.
- [12] 肖凯, 刘永斗, 李鹏云, 等. 架空导线温度应力场耦合数值分析[J]. 广东电力, 2015, 28(11): 97–102.
- [13] 何整杰, 李震彪, 梁盼望. 输电线温度及载流量的ANSYS计算方法[J]. 浙江电力, 2010, 29(8): 1–5.
- [14] 高琦. 架空导线温度场的数值模拟与分析[D]. 北京: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2016.

(下转第35页)

炭黑改性沥青混合料的动态响应主曲线分析

栗培龙¹, 马松松¹, 李建阁¹, 张东阳^{1,2}

(1. 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; 2. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 为了分析炭黑改性沥青的动态响应, 在不同试验温度及加载频率下进行基质沥青混合料和炭黑改性沥青混合料的简单性能试验(SPT), 分析了两种混合料动态模量和相位角的变化规律, 并根据试验数据, 采用 Sigmoidal 模型, 得到了沥青混合料的动态模量移位因子及模型参数, 形成了两种沥青混合料动态模量和相位角主曲线, 并对其进行了对比分析. 结果表明, 炭黑改性沥青混合料的活化能 ΔE_a 和移位因子 $\lg[a(T)]$ 在低于参照温度时小于基质沥青混合料, 而在高于参照温度时大于基质沥青混合料. 随着加载频率的升高, 动态模量主曲线呈“S”形曲线逐渐增大, 而相位角主曲线先增大后减小, 但不如动态模量主曲线光滑, 尤其在低频范围内数据分散. 动态模量主曲线和移位因子可以较好地描述加载频率和试验温度对炭黑改性沥青混合料黏弹性响应的影响. 炭黑改性沥青混合料在低于 37.8 °C 时的动态模量更大, 具有更好的抗变形能力; 随着温度的升高, 当温度超过 37.8 °C 时, 两种混合料的黏弹性响应差异不大, 即在低频或高温条件下的炭黑改性效果不显著.

关键词: 道路工程; 炭黑改性沥青混合料; 简单性能试验(SPT); 动态模量; 相位角

中图分类号: U414.1

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.022

0 引言

废轮胎裂解炭黑在材料领域具有广泛的应用前景, 一些学者开展了炭黑基本结构及其改性应用技术研究^[1-2]. 但炭黑在沥青及沥青混合料改性方面的研究尚不完善, 郑远等^[3]分析了炭黑改性沥青的老化特性; 陈淼等^[4]进行了 SBS/白炭黑复配改性沥青的高温、低温以及感温性能分析. 沥青混合料是一种多相颗粒性材料, 其黏弹性动态响应与沥青路面的车辙、开裂、疲劳等病害密切相关, 因此沥青混合料的黏弹性动态响应越来越受到国内外道路领域研究者的关注^[5]. Little 等^[6]采用单轴蠕变试验数据, 进行了沥青混合料动态响应及永久变形特性分析; Chang 等^[7]建立了热拌沥青混合料黏弹性本构模型, 并进行了微观力学模拟分析; Schwartz 等^[8]进行了沥青混合料黏弹塑性模拟分析; 孙雅珍等^[9]进行了高黏弹沥青砂的黏弹性模型

参数研究; 周志刚等^[10]用黏弹性理论评价了沥青混合料的高温稳定性. 栗培龙等^[11]分析了试验温度、应力水平以及级配等沥青混合料黏弹性影响因素. 在 NCHRP-29^[12] 项目中, 开发了简单性能试验(simple performance test, SPT), 并提出了表征沥青混合料黏弹性的动态模量和相位角等评价参数. 王昊鹏等^[13]讨论了两种高模量改性沥青混合料的动态模量, 并进行了性能预测分析. 刘红等^[14]分析了掺入聚酯纤维的沥青混合料在不同温度及荷载频率下的动态模量.

为了研究炭黑改性沥青混合料的动态响应特性, 本研究采用 SPT 试验, 分别测定不同试验条件下炭黑改性和基质沥青混合料的动态模量和相位角, 根据时温等效原理以及 Sigmoidal 模型, 计算沥青混合料的动态模量移位因子及模型参数, 分别得到了两种沥青混合料的动态模量主曲线和相位角主曲线, 用以分析炭黑改性沥青混合料的黏弹性力学响应.

收稿日期: 2017-12-20; 修订日期: 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008031), 交通运输部基础研究计划项目(2014319812151), 陕西省自然科学基础研究计划项目(2014JQ7242), 中央高校科研业务费项目(300102218405; 300102218513)

作者简介: 栗培龙(1980—), 男, 江苏邳州人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事道路材料与结构方面的研究, E-mail: peilong_li@126.com.

1 试验材料

采用 SK70#基质沥青和废橡胶裂解炭黑制备炭黑改性沥青,并分别拌制 AC-13 基质沥青混合料和炭黑改性沥青混合料,进行 SPT 试验. 两种沥青性能指标和集料级配如表 1 和表 2 所示. 两种沥青混合料动态模量和相位角如表 3、表 4 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,两种沥青混合料的最佳沥青用量均为 4.5%,设计空隙率分别为 3.95% 和 4.18%.

表 1 沥青基本指标
Tab.1 Properties of asphalt binders

试验项目		基质 沥青	炭黑改 性沥青
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/(0.1 mm)		73	59
	软化点/℃	50.7	49.7
延度(15 ℃,5 cm•min ⁻¹)/cm		48	42
	闪点/℃	276	288
针入度指数		-0.682	—
薄膜加热试验 (163 ℃,5 h)	质量损失/%	0.06	0.197
	针入度比/%	90.0	86.8
	残留延度(15 ℃, 5 cm•min ⁻¹)/cm	23	24

表 2 混合料级配
Tab.2 Mixture gradation

矿料级配	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
级配上限	100	100	85	68	50	38	28	20	15	8
级配下限	100	90	68	38	24	15	10	7	5	4
试验级配	100	95.6	72.7	40.4	30	19.4	14.5	10.3	8.1	5.1

表 3 两种沥青混合料动态模量
Tab.3 Dynamic modulus data of mixtures

混合料 种类	温度/℃	加载频率/Hz						MPa
		25	10	5	1	0.5	0.1	
基质沥青 混合料	4.4	16 622	15 889	15 253	13 544	12 545	10 091	
	21.1	10 549	8 961	7 581	5 726	5 003	3 381	
	37.8	3 959	2 923	2 218	1 419	1 155	855	
	54.4	1 098	836	633	494	397	287	
炭黑改性 沥青混合料	4.4	18 811	18 284	17 221	15 704	14 333	12 382	
	21.1	12 596	10 719	9 487	7 563	6 266	4 800	
	37.8	5 250	3 841	2 619	1371	1 037	715	
	54.4	958	776	605	400	336	280	

表 4 两种沥青混合料的相位角
Tab.4 Phase angle data of mixtures

混合料种类	温度/℃	加载频率/ Hz						(°)
		25	10	5	1	0.5	0.1	
基质沥青 混合料	4.4	13.6	15.3	17.2	20.5	22.3	25.2	
	21.1	27.6	29.0	30.7	32.3	33.7	35.1	
	37.8	35.7	37.7	37.2	34.1	33.1	31.2	
	54.4	36.6	34.3	32.4	30.3	28.9	26.2	
炭黑改性 沥青混合料	4.4	10.1	11.7	13.1	15.2	16.8	18.8	
	21.1	21.1	23.0	24.3	26.5	27.9	30.7	
	37.8	31.6	32.7	35.0	33.4	32.2	30.0	
	54.4	36.7	34.4	31.8	29.8	27.8	25.7	

2 试验方法

采用 Troxler 4140 型旋转压实仪,成型 $\phi 150\text{ mm} \times H\text{ 150 mm}$ 的圆柱形试件,再钻取芯样

切割后得到 $\phi 100\text{ mm} \times H\text{ 110 mm}$ 的试件. 采用 SPT 设备,在 50 ~ 150 $\mu\text{ε}$ 下对应的应力水平进行正弦波加载; 试验温度分别为 4.4、21.1、37.8、54.4 ℃; 荷载频率分别为 0.1、0.5、1、5、10、

25 Hz. SPT 试验设备及试件分别如图 1 所示.



图 1 SPT 试验设备及试件

Fig. 1 SPT equipment and samples

3 结果分析及讨论

3.1 动态响应参数分析

沥青混合料是典型的黏弹性材料,动态模量与相位角是表征沥青混合料黏弹性的重要参数,能较好地反映沥青路面的实际受力状况与动态响应^[15].不同试验温度条件下,炭黑改性沥青混合料和基质沥青混合料的动态模量和相位角随加载频率的变化如图 2 和图 3 所示.

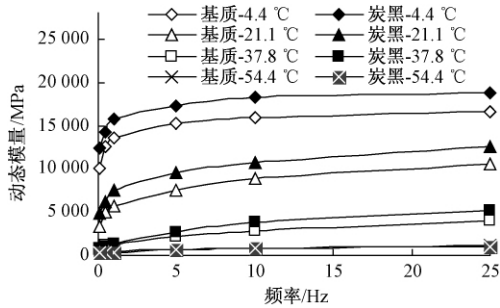


图 2 沥青混合料的动态模量

Fig. 2 Dynamic moduli of mixtures

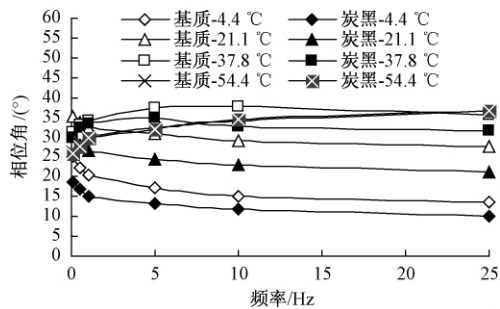


图 3 沥青混合料的相位角

Fig. 3 Phase angles of mixtures

由图 2 可知,随着加载频率的增大,不同温度条件下的炭黑改性和基质沥青混合料的动态模量均不断增大,但在不同频率范围内,其增大幅度存在差异,在较低的频率范围内(0.1 ~ 1 Hz),动态模量急剧增大;而在较高的频率范围内(5 ~ 25 Hz),动态模量增加幅度越来越小.炭黑改性后,相同条件下的动态模量增大,但随着试验温度逐渐升高,炭黑改性混合料与基质混合料的动态

模量之间的差异越来越小,两者在 54.4 °C 时的动态模量几乎没有差异.

由图 3 可以看出,随着加载频率的增大,炭黑改性混合料与基质混合料的相位角的变化趋势基本一致,相同条件下,炭黑改性沥青混合料的相位角小于基质沥青.随着加载频率的增大,在较低温度 4.4 °C 和 21.1 °C 时的相位角逐渐减小,在较高温度 54.4 °C 时的相位角逐渐增大.在中等温度 37.8 °C 时的相位角先增大后减小,但出现极值的频率不同:基质沥青对应的极值频率为 1 Hz,而炭黑改性后,对应的极值频率为 5 Hz.

3.2 动态响应参数主曲线模型及参数

作为黏弹性材料,试验温度和加载频率在很大程度上影响沥青混合料的力学响应,二者具有一定的等效性.由于设备参数和试验条件的限制,难以获取全温度域和频率范围内的沥青混合料响应参数,可以通过时温转换法进行转换绘制主曲线,从而预估某一给定温度条件下的动态响应.

Sigmoidal 模型可以用来描述沥青混合料的动态模量主曲线^[17],采用非线性最小二乘法,将不同条件下的试验数据进行拟合来获得移位因子实现平移,如下式:

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma \lg(f_f)}}, \quad (1)$$

式中: E^* 为动态模量, MPa; δ 为最小动态模量, MPa; α 为动态模量的最大值, MPa; β 、 γ 分别为回归参数,与沥青性质有关.

对于给定的参考温度,将加载频率进行水平移动的幅度称为移位因子,移位因子 $a(T)$ 与缩减频率 f_r 之间的关系:

$$f_r = f \cdot a(T), \quad (2)$$

式中: f_r 为缩减频率, Hz; f 为加载频率, Hz; $a(T)$ 为移位因子.

为了确定动态模量主曲线,移位因子可由下式计算:

$$\lg [a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19.147 \cdot 14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right), \quad (3)$$

式中: ΔE_a 为活化能, J/mol; T_r 和 T 分别为参考温度和试验温度, °C. 在参考温度下, 移位因子 $a(T) = 1$.

缩减频率可用 Arrhenius 方程按下式计算:

$$\lg f_{\gamma} = \lg f - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right),$$

(4)

式中: f_{γ} 为缩减频率,Hz; f 为试验频率,Hz.

进而可得到主曲线方程:

$$\lg(\lg |E^*|) = \delta + \frac{\alpha - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma^* \cdot \left[\lg f - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \right]}}.$$

(5)

参考温度为 21.1 ℃,将不同条件的动态模量数据,采用 Origin 软件对 Sigmoidal 函数进行拟合,得到两种沥青混合料的 ΔE_a 及移位因子如表 5 所示,动态模量主曲线回归参数列于表 6 中.

计算分析过程中参数初始值: $\beta = -1.0, \gamma = -0.5, \delta = 0.5, \Delta E_a = 200\,000$.

表 5 两种沥青混合料的移位因子

Tab. 5 Shift factors of mixtures

混合料种类	转换温度/℃	活化能 ΔE_a /J	移位因子 $\lg[\alpha(T)]$
基质沥青混合料	4.4	216 631	2.314
	21.1	0	0
	37.8	230 132	-2.194
	54.4	221 054	-3.989
炭黑改性沥青混合料	4.4	208 657	2.228
	21.1	0	0
	37.8	231 061	-2.203
	54.4	225 022	-4.060

表 6 动态模量主曲线的回归参数

Tab. 6 Fitting parameters of dynamic modulus master curve

混合料种类	α	β	γ	δ	R^2
基质沥青混合料	4.322 05	2.071 60	-1.109 36	-0.532 70	0.994 70
炭黑改性沥青混合料	4.374 54	2.180 26	-1.156 43	-0.620 96	0.998 65

将试验数据沿着对数频率坐标轴水平移动可以得到动态模量主曲线,从而将加载频率和温度函数的动态模量简化为频率的函数.活化能反映了动态响应参数向主曲线移动时需要克服的能垒,活化能越大则说明曲线移动越困难,与 α 移位因子具有一致性.在低于参照温度时 $\lg[\alpha(T)] > 0$; 高于参照温度时 $\lg[\alpha(T)] < 0$; 等于参照温度时 $\lg[\alpha(T)] = 0$.由表 5 可知,在低于参照温度时,基质沥青混合料的活化能和移位因子高于炭黑改性沥青混合料;而在高于参照温度时,炭黑改性沥青混合料的活化能和移位因子绝对值大于基质沥青混合料.

3.3 动态响应参数主曲线分析

主曲线反映了沥青混合料动态响应与加载频率之间的关系,依据主曲线可以获知沥青混合料

在很宽加载频率范围的力学特性.炭黑改性和基质混合料的动态模量和相位角主曲线分别如图 4 和图 5 所示,动态模量及相位角主曲线对比如图 6 所示.

由图 4 可知,随着加载频率的增大,沥青混合料的动态模量逐渐增大,主曲线呈扁平状的“S”形分布.动态模量随温度的升高呈逐渐减小趋势,可见在较低的温度下,混合料主要表现为弹性,而在较高的温度下混合料的黏性更加显著.由图 5 可以看出,随着加载频率的增大,沥青混合料相位角先增大后减小,但在低频区数据较为分散,相位角主曲线不如动态模量主曲线光滑.随着温度的升高,沥青结合料的黏性越来越显著,相位角逐渐增大;但随着温度继续升高,相位角受矿料骨架的影响较大而又逐渐减小.由此可见,主曲线和移位

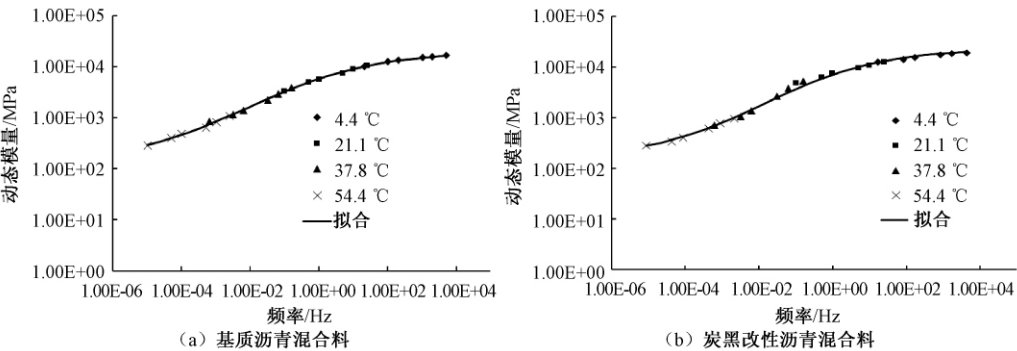


图 4 动态模量主曲线
Fig. 4 Dynamic modulus master curve

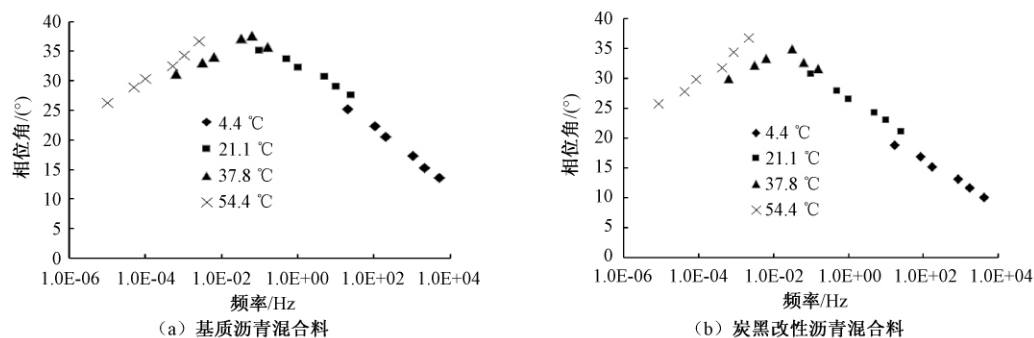


图5 相位角主曲线

Fig. 5 Phase angle master curve

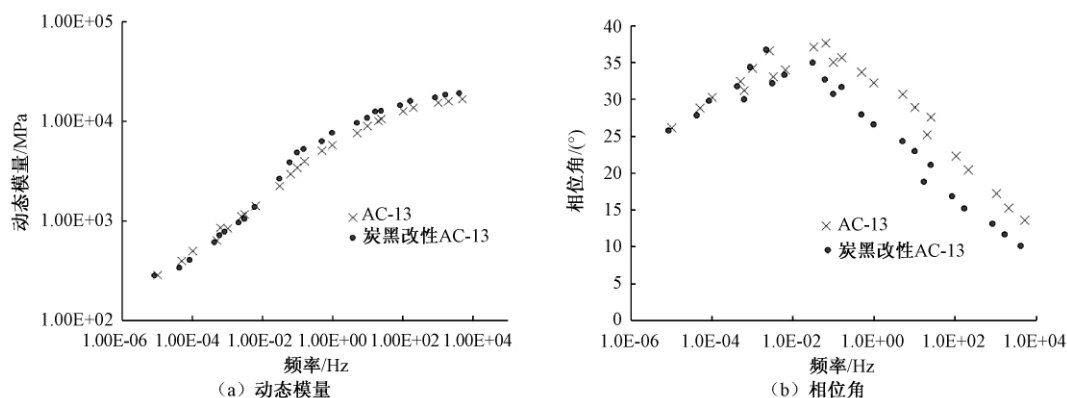


图6 动态模量及相位角主曲线对比

Fig. 6 Comparison of dynamic modulus and phase angle master curves

因子可以用来表征加载频率和试验温度对炭黑改性沥青混合料的黏弹性动态响应。

由图6可以看出,在较高频率范围内,炭黑改性沥青混合料的动态模量稍高于基质沥青混合料,相位角显著低于基质沥青混合料;而在较低频率范围内,两种混合料的动态模量和相位角差异均不显著。如前所述,对于沥青混合料等黏弹性材料而言,加载频率和温度条件具有等效性。因此,结合图2和图3可知,炭黑改性沥青混合料在低于37.8 °C的动态模量更大,具有更好的抗变形能力;随着温度的升高,当温度超过37.8 °C时,两种混合料的黏弹性响应差异不大,即在低频或高温条件下的炭黑改性效果不显著。

4 结论

(1) 炭黑改性沥青混合料与基质沥青混合料的动态模量和相位角变化趋势一致,随着温度的升高,两者的差异越来越小。

(2) 炭黑改性沥青混合料的活化能 ΔE_a 和移位因子 $\lg[\alpha(T)]$ 在低于参照温度时小于基质沥青混合料,而在高于参照温度时大于基质沥青混合料。

(3) 随着加载频率的增大,动态模量主曲线呈“S”形曲线逐渐增大,而相位角主曲线先增大后减小,但不如动态模量主曲线光滑,尤其在低频范围内数据分散。动态模量主曲线和移位因子可以较好地描述加载频率和试验温度对炭黑改性沥青混合料黏弹性响应的影响。

(4) 炭黑改性沥青混合料在低于37.8 °C的动态模量更大,具有更好的抗变形能力;随着温度的升高,当温度超过37.8 °C时,两种混合料的黏弹性响应差异不大,即在低频或高温条件下的炭黑改性效果不显著。

参考文献:

- [1] 郭应臣, 乔占平. 废橡胶制备燃料油和炭黑[J]. 环境污染与防治, 2001, 28(2): 82-83.
- [2] 彭小芹, 肖国良. 废轮胎裂解炭黑的深加工及应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(4): 142-145.
- [3] 郑远, 叶奋. AW、BLE、炭黑改性沥青的老化性能研究[J]. 公路, 2007(2): 127-130.
- [4] 陈森, 陈浩, 王洪涛, 等. SBS/白炭黑复配改性沥青性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(6): 64-66.
- [5] ZHU X Y. Influence of interfacial zone between asphalt mastic and aggregate on the elastic behavior of

- asphalt concrete [J]. Construction and building materials, 2013, 49(6): 797–806.
- [6] 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(1417): 49–57.
- [7] CHANG K G, MEEGODA J N. Micromechanical simulation of hot mix asphalt [J]. Journal of materials in civil engineering, 1997, 12(5): 495–503.
- [8] SCHWARTZ C W, GIBSON N H, SCHAPERY R A, et al. Viscoplasticity modeling of asphalt concrete behavior [C] // Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. New York: ASCE, 2002: 144–159.
- [9] 孙雅珍, 朱传江, 吴刚兵, 等. 高黏弹沥青砂的黏弹性模型参数研究 [J]. 中外公路, 2015, 35(4): 244–247.
- [10] 周志刚, 傅搏峰. 用黏弹性理论评价沥青混合料的高温稳定性 [J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 54–56.
- [11] 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.
- [12] WITCZAK M W, KALOUSH K, PELLINEN T. Simple performance test for superpave mix design [R]. Transportation Research Board, Executive Committee Subcommittee for NCHRP. National Academy Press, Washington D. C., 2002.
- [13] 王昊鹏, 杨军, 施晓强, 等. 高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32(8): 12–17.
- [14] 刘红, 孔永健, 曹东伟. 加入聚酯纤维对沥青混合料动态模量的影响 [J]. 公路交通科技, 2011, 28(8): 25–29.
- [15] 徐志荣, 常艳婷, 陈忠达, 等. 沥青混合料动态模量试验标准研究 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 1–8.

Analysis of Dynamic Response Master Curve of Carbon Black Modified Asphalt Mixture

LI Peilong¹, MA Songsong¹, LI Jiange¹, ZHANG Dongyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road Structure & Material Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Guangzhou, 510507, China)

Abstract: In order to analyze the dynamic response of carbon black modified asphalt mixture (CBMAM), the simple performance test (SPT) was conducted on CBMAM and base asphalt mixture under the different test conditions of test temperature and loading frequency. The change law of dynamic modulus and phase angle for the two mixtures was analyzed. Using the Sigmoidal model, the shift factor of dynamic modulus and model parameters were gained according to the data. The master curves of dynamic modulus and phase angle of asphalt mixture are obtained and analyzed comparatively. The results indicated that the activation energy ΔE_a and the absolute value of shift factor $\lg [T]$ of CBMAM were smaller than those of base asphalt mixture respectively at the temperatures lower than the reference temperature, while they were contrary at the temperatures higher than the reference temperature. The master curve of dynamic modulus went up like "S" curve continuously with an increase in loading frequency. Phase angles of asphalt mixtures go up firstly and then dropped with the increase in frequency. But the master curves of phase angle were not as smooth as those of dynamic modulus especially at high temperatures. The dynamic modulus master curve and shift factor could reflect the effect of loading frequency and temperature on the visco-elastic response of CBMAM. The dynamic modulus of CBMAM was bigger at temperatures lower than 37.8 °C, which has better resistance to deformation. When the temperature increased higher than 37.8 °C, there was no significant difference in the dynamic response of the two mixtures, the modification effect of carbon black for asphalt mixture was no very significant under the conditions of low frequency and high temperature.

Key words: road engineering; carbon black modified asphalt mixture; Simple Performance Test (SPT); dynamic modulus; phase angle

FSAE 方程式赛车车架的设计与轻量化

袁守利,林家辉

(武汉理工大学 汽车工程学院,湖北 武汉 430070)

摘要: 为满足 FSAE(formula student automobile equation) 方程式赛车车架强度和刚度的要求,其安全裕度较大,为充分挖掘车架的轻量化潜力,运用有限元分析软件依次对车架进行了 SIMP 方法的拓扑设计和截面尺寸优化,通过改变模型参数值,同时在网格模型保持不变的情况下,采用尺寸优化技术模拟 3 种实际赛道工况,在保证刚度和强度前提下车架最大变形量相应减少了 7%、7.5%、14.7%,最大应力在 200 MPa 以内,车架质量减少了 32%。最后通过模态与试验分析,优化设计的车架有效避开了与外部激励的耦合效应,8 字绕环测试所用时间减少了 3%。该赛车车架实现了轻量化的目的。

关键词: 方程式赛车;结构设计;有限元分析;轻量化;模态计算

中图分类号: U469.6 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.005

0 引言

FSAE 方程式赛车动态项目主要有直线加速测试、8 字绕环测试、高速壁障测试、耐久赛经济性测试等。要求不违反规则的同时所用时间最少。车架是承载骨架,在满足赛车各工况使用性能的前提下,轻量化技术的开发可以有效缩短所需时间,这是因为赛车整备质量提高 1 kg,赛车跑一圈要多耗 0.03 s;整备质量提高 5 kg 以上,赛车跑完一个赛道要多耗 12 s^[1]。

目前国外赛车车架的轻量化开发主要体现在两方面:一是采用复合材料单体壳;二是桁架钢管轻量化。哈工大是国内参赛院校中最早使用单体壳代替车架的学校,由于国内制作单体壳的设备较少,且费用高昂(为钢管车架 20 倍)^[2],而且一旦碰撞受损无法修复。而桁架钢管车架成本较低、结构简单、容易加工,使得大部分参赛队使用这一形式的车架。

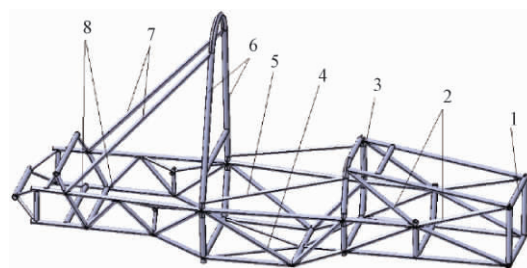
一般赛车车架的开发主要是设计出最初车架后不断对细节处的结构进行改进,对应力集中部位使用加强肋进行强度加强,这样不但增加了时间成本,而且使得车架质量提高。笔者以某校参加 FSAE 油车车架为基础,采用有限元分析,在保证

刚度和安全使用条件下,采用拓扑设计,获取车架最佳的材料分布,然后对钢管进行截面尺寸优化,使得应力分布均匀,由此确定了赛车的新车架,通过模态与试验分析,该车架在降低成本和缩短开发周期的基础上提高了性能。

1 模型的建立

1.1 车架的三维模型

几何模型是进行数值仿真的前提,FSAE 方程式赛车车架的 CATIA 模型如图 1 所示。



1. 前隔板; 2. 前隔板斜撑; 3. 副防滚架; 4. 侧边防撞结构;
5. 肩带安装杆; 6. 主防滚架; 7. 主防滚架斜撑; 8. 发动机安装架

图 1 车架的 CATIA 模型图

Fig. 1 The frame of CATIA model

1.2 有限元模型

有限元原理的理论基础是弹性力学的变分原

收稿日期:2017-06-20; 修订日期:2017-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575410)

作者简介:袁守利(1970—),男,湖北武汉人,武汉理工大学副教授,主要从事汽车 CAE 研究工作,E-mail: ysl0202@163.com.

理^[3],变分原理就是讲弹性力学的基本方程: 偏微分方程的边值问题转换为代数方程求解的一种方法. 对于一个多自由度线性运动系统,其运动微分方程为:

$$[M]\{X''\} + [C]\{X'\} + [K]\{X\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{X''\}$ 、 $\{X'\}$ 、 $\{X\}$ 分别为节点的位移矢量、速度矢量和加速度矢量; $F(t)$ 为随着时间变化的载荷函数.

在模态分析时,设定 $\{F(t)\} = 0$, 并且忽略阻尼 $[C]$ 的影响,则方程变为:

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

其基本形式为:

$$[M] = \varphi \sin \omega t, \quad (3)$$

式中: φ 为自由振动时结构中的点的振幅; ω 为自振角频率.

联立求解式(2)、式(3)得:

$$([K] - \omega^2 [M]) \varphi = 0. \quad (4)$$

由式(4)求得特征值 ω^2 , 由 $\omega = 2\pi f$ 可得结构的固有频率,即为模态频率. 特征值对应的特征向量即为结构的模态振型.

1.3 结构优化模型

优化设计有3要素,即设计变量、目标函数和约束条件^[4]. 设计变量是变量发生改变从而提高性能的一组参数; 目标函数要求最优的设计性能,是关于设计变量的函数; 约束条件是对设计的限制,是对设计变量和其他性能的要求.

优化数学模型可表述如下.

最小尺寸:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

目标函数:

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m;$$

$$h_k(x) \leq 0, k = 1, 2, \dots, m;$$

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U, i = 1, 2, \dots, n,$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是设计变量,如产品的结构尺寸; $f(x)$ 是设计目标,如各种力学性能或者质量; $g(x)$ 和 $h(x)$ 是需要进行约束的设计响应,如对产品工作时的变形和应力水平进行约束.

2 赛车车架拓扑设计

2.1 拓扑设计的前处理

拓扑设计技术是指在给定的设计空间内找到最佳的材料分布,从而在满足各种性能的条件下得到最优设计. 将车架的三维模型导入 Hyper

Mesh 中进行拓扑设计的前处理,主要包括模型的几何清理,设计包络面代替桁架结构,用 2D 网格单体壳表示,如图2所示. 划分网格单元^[5]尺寸为 3 mm,节点共 46 505 个,总单元数为 23 651 个,赋予材料牌号 4130 钢(国内牌号 30CrMo),弹性模量为 205 GPa,泊松比 0.29,密度 78 503 kg/m³,屈服强度 785 MPa. 与包络面连接处为 1D 网格,主要为悬挂连接,此处为非设计区域,如图3为非设计区域的放大图.

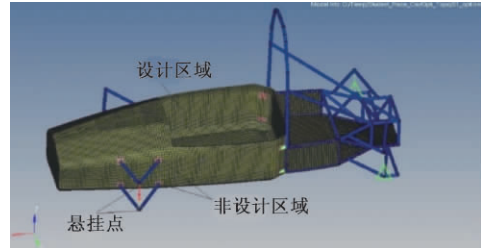


图2 拓扑设计前处理模型

Fig. 2 The processing model before topology design

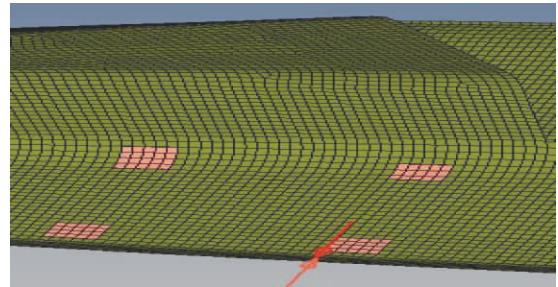


图3 非设计区域放大图

Fig. 3 The enlargement of nondesign area

前处理模型中前部分(车头处)可设计的自由度大,尽可能用多的包络面表示,后部(车尾处)放置发动机和变速箱等可设计的自由度少,用尽可能少的空间包络.

2.2 拓扑设计的数学模型

设计变量: $X = dev(com1)$;

响应类型^[6]: $h(x) = dis$;

$g(x) = vol$;

约束条件: $g(x) \leq 0.3$;

目标函数: $f(x) = \min(h(x))$,

式中: dev 为单元网格密度变化; $com1$ 为可设计区域; dis 为静力学位移; vol 为体积分数,体积分数 = (当前迭代步总体积 - 初始非设计区域体积) / 初始设计区域体积; 约束条件为质量分数上限 30%,即保留材料不能超过选定空间材料的 30%; 目标函数为位移最小化.

2.3 拓扑设计结果分析

在 Hyper Mesh 中选用 optistruct 求解器,在

Analysis 中选 optimization 面板,进入优化设计模块,选定 topology 将以上网格和参数设定完毕后,递交求解得到单元密度云图如图 4 所示。

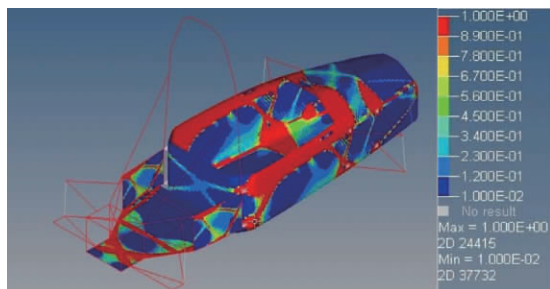


图 4 单元密度云图

Fig. 4 The unit density contours

采用 SIMP 方法(密度法),求解后单元密度为 1(或靠近 1),表示该单元位置处的材料很重要,需要保留;单元密度为 0(或靠近 0),表示该单元处的材料不重要,可以去除,从而达到材料的高效利用。从图 4 可以看出,单元密度接近 1 的区域呈杂乱块状分布,筋条不明显,赛车头部无单元密度接近 1 的区域分布。

将车头部加载荷,考虑碰撞工况,同时考虑到制造可加工性,采用制造工艺约束,通过 MIMDIM 参数施加最少成员和最多成员尺寸约束(最少成员尺寸约束为网格的 3 倍以上;最多成员尺寸约束为最少成员尺寸约束的 2 倍以上),重新递交求解,如图 5 所示。隐藏单元密度小于 0.5 的区域如图 6 所示。

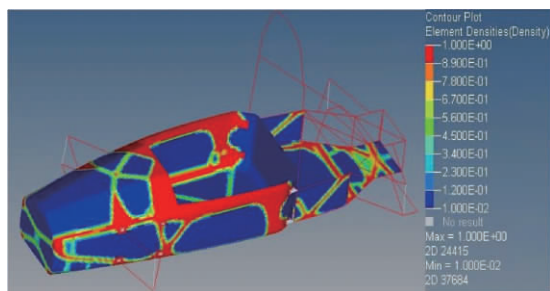


图 5 最少、最多成员尺寸约束的单元密度云图

Fig. 5 The cell density contours of minimum and maximum member size constraints

依据图 5 容易设计出钢管车架结构,对于单元密度接近 1 面积大的区域采用管径大、壁厚的钢管;对于单元密度接近 1 面积小的区域采用管径小、壁薄的钢管。本届 FSAE 方程式赛车车架的结构模型如图 7 所示。

与图 1 比较可以看出,车头处上部采用十字交叉状梁布局,这样更有利于前隔板及其斜撑的稳定性,侧面防撞结构取消了“星”字布局,采用

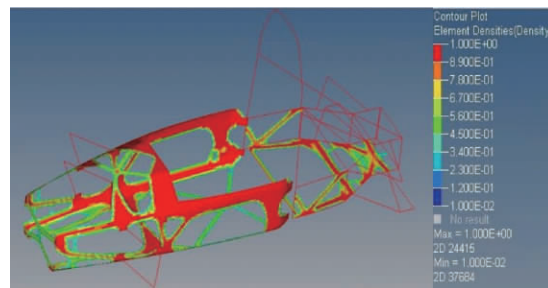


图 6 单元密度大于 0.5 的云图

Fig. 6 The cell density is greater than 0.5 cloud

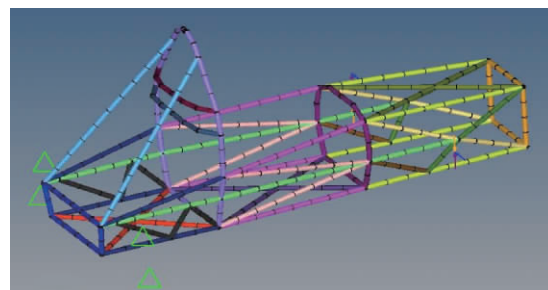


图 7 车架结构模型

Fig. 7 The model of frame structure

折线型结构,使得线条更为流畅,有利于减少空气对车身的阻力,车架后部更为简短,减少了钢材的使用,同时掀背式布局更有利于空气流经车尾时往下卷^[7],提高了行驶的操纵稳定性。

3 新车架的轻量化

3.1 工况的设定

赛车车架结构确定后,只需要确定钢管规格尺寸和参数,在满足赛车实际运行的要求前提下,使新车架轻量化。实际的跑道上赛车受力复杂,为方便运算通常对模型的受力做一些简化。8 字绕环测试时会出现紧急转弯,用 shear(侧向力)模拟赛车 8 字绕环测试。紧急制动、极限加速时,赛车主要受地面支撑力,用 bending(地面支撑力)模拟赛车实际工作中的直线加速测试。耐久性测试主要考验悬架的减振作用,因此在悬架靠近车轮处用 torsion(扭矩)模拟^[8],优化前对车架先进行静力学分析,主要目的是与后期优化后结果进行对比。

在 Hyper Mesh 中选用 radiosss 求解器,在 Analysis 中选择 load step 面板,进入载荷步模块选定 linear static,递交计算后得到 3 种工况下车架的位移云图如图 8 所示,3 种工况下车架的应力云图如图 9 所示。从图 8 和图 9 中可知,torsion 工况下车架的最大位移为 6.294 mm,主要发生在前隔板斜撑和悬挂位置,这会严重影响赛车绕 8 字时的性能^[9],最大应力为 307 MPa(许用应力

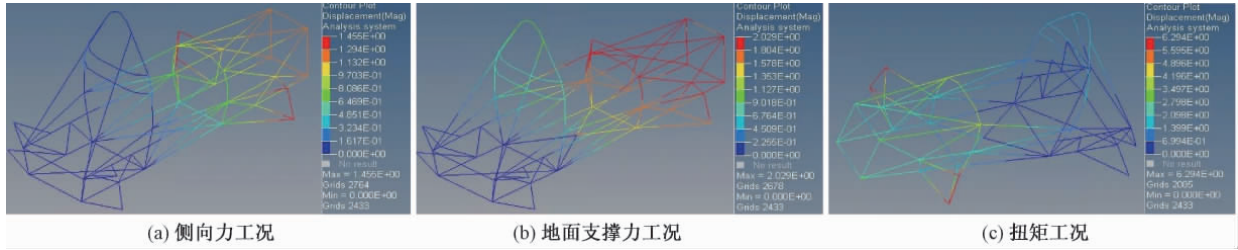


图8 优化前3种工况下车架的位移云图

Fig.8 The frame displacement contours of three conditions without optimization

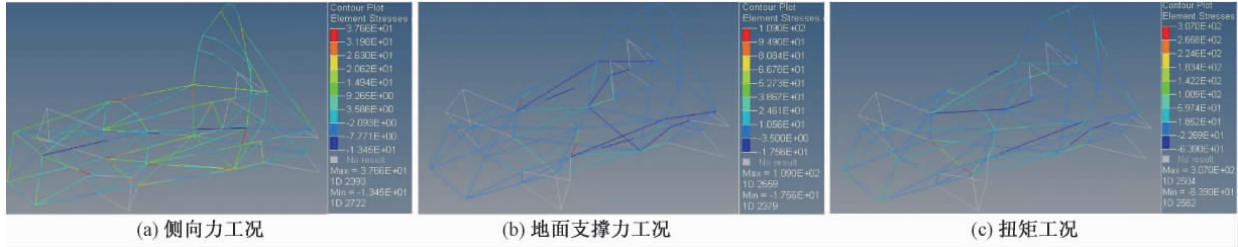


图9 优化前3种工况下车架的应力云图

Fig.9 The frame stress contours of three conditions without optimization

200 MPa), 主要发生在地面第二根横梁处, 这在直线加速测试、高速壁障测试、耐久赛经济性测试中都会影响到赛车的性能。

3.2 尺寸优化的数学模型

设计变量: $X = Dim$,

响应类型: $h(x) = dis$;

$g(x) = mass$,

约束条件: $k(x) \leq 200 \text{ MPa}$;

$h_1(x) \leq 2 \text{ mm}$;

$h_2(x) \leq 2 \text{ mm}$;

$h_3(x) \leq 6 \text{ mm}$,

目标函数: $f(x) = \min(g(x))$ 。

定义设计变量内半径初始值 10.5, 下界为 1, 上界为 14; 外半径初始值 12.5, 下界为 5, 上界为 15, 增加离散变量^[10]进行优化, 在 1 ~ 15 之间每 0.1 mm 增加一次。设计变量公式 $Dim = c_0 + l$, c_0 初始值为 0, 响应类型为质量响应、应力响应、位移响应, 约束类型为应力约束、位移约束, 目标函数为质量最少。前处理模型如图 10 所示。

2.3 尺寸优化结果分析

尺寸优化要保证变形量不增大的同时降低应力值^[11]。在 Hyper Mesh 中选用 optistruct 求解器, 在 Analysis 中选 optimization 面板, 进入优化设计模块, 选定尺寸将以上网格和参数设定完毕后提交求解, 在后处理中会得到上述尺寸优化后的 .PROP 文件, 如图 11 所示, 该文件可为钢管尺寸

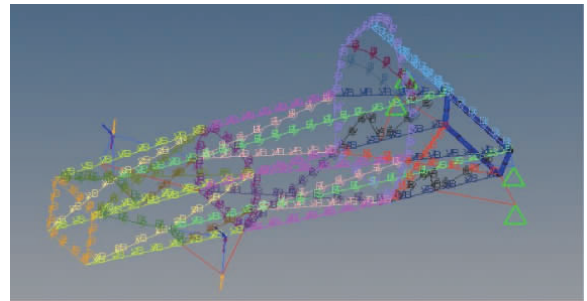


图10 尺寸优化的前处理模型

Fig.10 The processing model of before the size optimization

规格提供参考, 同时得到车架优化过程中的质量变化曲线图, 如图 12 所示。

PROP-TYPE	PROP-ID	ITEM-CODE	PROP-VALUE
PBEAM	101	DIM2	1.180E+01
PBEAM	101	DIM1	1.260E+01
PBEAM	102	DIM2	1.140E+01
PBEAM	102	DIM1	1.200E+01
PBEAM	103	DIM2	1.120E+01
PBEAM	104	DIM2	1.150E+01
PBEAM	105	DIM2	1.190E+01
PBEAM	106	DIM2	1.260E+01
PBEAM	107	DIM2	1.130E+01
PBEAM	108	DIM2	1.150E+01
PBEAM	109	DIM2	1.270E+01
PBEAM	110	DIM2	1.260E+01
PBEAM	111	DIM2	1.360E+01
PBEAM	112	DIM2	1.330E+01
PBEAM	113	DIM2	1.140E+01
PBEAM	114	DIM2	1.140E+01
PBEAM	115	DIM2	1.190E+01
PBEAM	116	DIM2	1.110E+01
PBEAM	117	DIM2	1.110E+01
PBEAM	118	DIM2	1.140E+01
PBEAM	103	DIM1	1.190E+01
PBEAM	104	DIM1	1.190E+01
PBEAM	105	DIM1	1.330E+01
PBEAM	106	DIM1	1.310E+01
PBEAM	107	DIM1	1.140E+01
PBEAM	108	DIM1	1.500E+01
PBEAM	109	DIM1	1.500E+01
PBEAM	110	DIM1	1.420E+01
PBEAM	111	DIM1	1.370E+01
PBEAM	112	DIM1	1.500E+01
PBEAM	113	DIM1	1.150E+01
PBEAM	114	DIM1	1.150E+01
PBEAM	115	DIM1	1.260E+01

图11 尺寸优化后的 .PROP 文件

Fig.11 The .PROP file after the size optimization

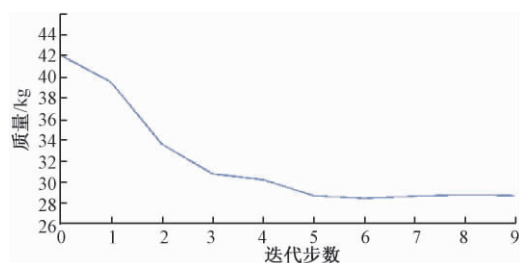


图 12 优化前后质量变化曲线图

Fig. 12 The quality change curve before and after optimization

从图 12 可以看出,随着车架梁截面尺寸的变化,车架质量从 42 kg 逐渐降低,在迭代第 5 步后趋向稳定,达到 29 kg 左右。

优化后 3 种工况下车架模型的位移云图如图 13 所示. 优化后 3 种工况下车架模型的应力云图如图 14 所示。

由尺寸优化后的. PROP 文件结合市场上销售的钢管材料,最终选定车架的梁截面尺寸与优化前的截面对比如表 1 所示,优化前后 3 种工况

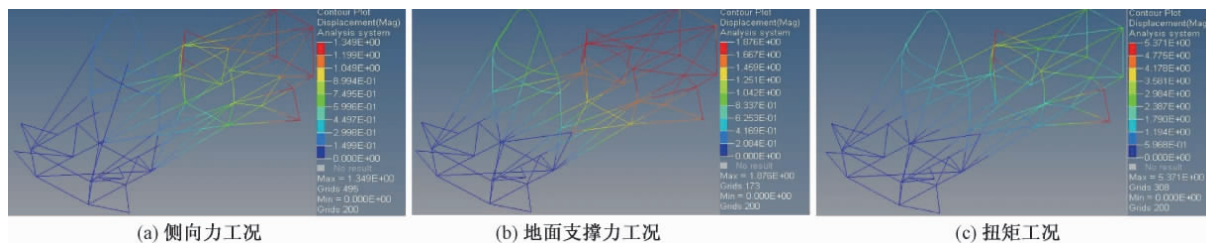


图 13 优化后 3 种工况下车架的位移云图

Fig. 13 The frame displacement contours of three conditions after optimization

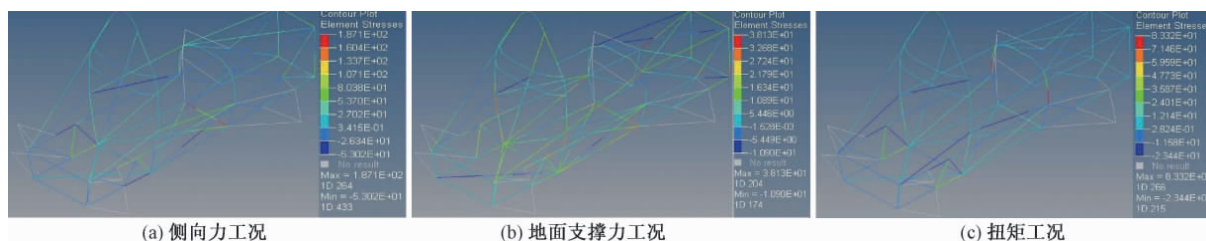


图 14 优化后 3 种工况下车架的应力云图

Fig. 14 The frame stress contours of three conditions after optimization

表 1 优化前后梁截面对比

Tab. 1 Beam section contrast before and after optimizationmm

梁名称	设计变量	原值	最优解
主防滚架	DIM1	25 × 2	25
	DIM2		21
副防滚架	DIM1	30 × 2.5	25
	DIM2		21
侧面防撞结构	DIM1	30 × 2.5	25
	DIM2		21
前隔板	DIM1	25 × 2	20
	DIM2		16
前隔板斜撑	DIM1	25 × 2.5	20
	DIM2		16
主防滚架斜撑	DIM1	25 × 2.5	21
	DIM2		17
其他	DIM1	25 × 2.5	21
	DIM2		17

注: DIM1 为截面外半径; DIM2 为截面内半径。

下数据对比如表 2 所示,优化后 bending 和 torsion 工况下的最大位移减少了 1 mm 左右, shear 工况下最大位移减少了 0.5 mm 左右, bending 工况下的最大应力基本保持不变, shear 和 bending 工况下最大应力均有所减少,均满足许用应力的要求. 从优化前后的质量可以看出车架质量减少了 13.7 kg, 实现了轻量化的目的。

表 2 3 种工况下优化前后数据对比

Tab. 2 Three conditions data comparison before and after optimization

工况	最大位移/mm		最大应力/MPa		质量/kg	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
bending	1.455	1.349	37.66	38.13	42.3	28.6
shear	2.209	1.876	109.00	83.32	42.3	28.6
torsion	6.299	5.371	307.00	187.10	42.3	28.6

4 模态及试验分析

4.1 模态分析

赛车在道路上行驶时,由于路面不平整和车

轮不平衡会使车架产生随机振动^[12],发动机工作会使车架产生周期性受迫振动.当车架的某阶固有频率与激振频率相接近时,就会产生共振的现象,严重的话会对车架造成损坏.为了避免这种情况的发生,对车架进行模态分析就显得尤为必要.确定车架的固有频率和振型,验证其固有频率是否避开上述振源的激励频率.

ABAQUS 被广泛地认为是功能强大的有限元软件之一,可以分析固体力学、结构力学系统,特别是能够处理非常庞大、复杂的问题和模拟高度非线性问题.在 Hyper Mesh 中将上述车架结构模型导出. Inp 文件后,导入 ABAQUS 中,定义线性摄动步后,计算优化后车架的固有频率和振型如表 3 所示.

表 3 6 阶固有频率和振型

Tab.3 The 6 order natural frequency and vibration mode

阶次	频率/Hz	振型描述
7	34.61	扭转振动
8	61.43	横向摆动
9	69.98	弯曲组合
10	78.96	后部摆动
11	93.83	弯曲摆扭
12	151.43	横向摆动

赛车在行驶时车架受到的外部激振源主要有两种:一种是由于路面不平所造成的车轮不平衡激振,在 1~20 Hz 之间;另一种是发动机运转时,工作冲程燃烧爆发压力和活塞往复惯性力引起的简谐激励,该赛车采用发动机为本田 CBR600,在限制进气后的最高转速可达 11 000 r/min,发动机怠速时转速为 2 000 r/min,常用的发动机转速为 6 000~10 000 r/min,频率计算公式:

$$f = \frac{2nz}{60\tau}, \quad (6)$$

式中: z 发动机的缸数; τ 发动机冲程数; n 发动机的转速.

由式(6)计算得发动机怠速频率为 67 Hz,常用的激励频率范围是 200~333 Hz.

车架前 16 阶弹性振动固有频率在 30~150 Hz,避开了由于路面不平所造成的车轮不平衡激振 20 Hz,也低于发动机常用工作频率 200~333 Hz,发动机的怠速频率与固有频率保持在 3 Hz 差值之上,共振现象得到了很大程度上的避免,该赛车车架结构设计合理.

4.2 试验分析

在不更换发动机及其动力传动系统、轮胎、座椅等前提下,最终装配完整的赛车如图 15 所示.

由于 8 字绕环测试所需场地面积小,如图 16 所示,场地容易布置,对赛车横向和侧向加速能力要求较高,通常作为新赛车的性能测试^[13].取同一名赛车手与去年测试成绩对比如图 17 所示.从图中可以看出,同一车手优化前跑 7 次 8 字绕弯测试的平均成绩为 5.49 s,优化后跑 7 次 8 字绕弯平均成绩为 5.30 s,8 字绕弯测试时间节省了 3%.



图 15 完整赛车图

Fig.15 The figure of complete car

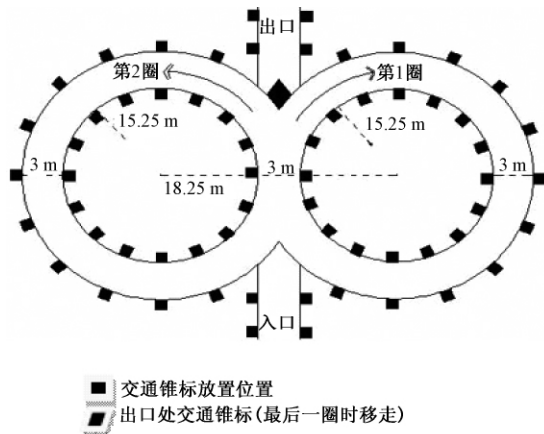


图 16 8 字绕环测试场地

Fig.16 The eight around the ring test site

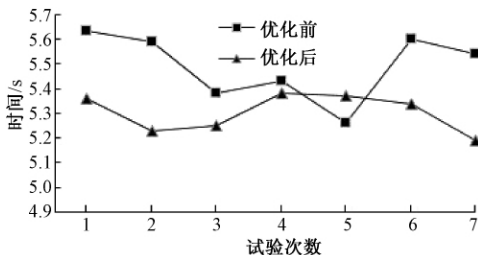


图 17 优化前后测试成绩对比

Fig.17 Test scores before and after optimization

5 结论

结构优化技术是当前 CAE 技术发展的一个热点,笔者运用拓扑设计和尺寸优化设计新车架.在满足安全和使用条件下,优化后的车架质量减少了 32%,通过模态分析技术,避开了由于路面不平所造成的车轮不平衡激振和发动机常用工作激振,使共振现象得到了很大程度上的避免,最后进行 8 字绕环测试,时间节省了 3%,从而实现了车架的轻量化.

参考文献:

- [1] 周永光,阳林,吴发亮,等. FSAE 赛车车架结构优化和轻量化[J]. 农业装备与车辆工程,2012,50(11):37-41.
- [2] 贺晓斌. 大学生方程式赛车车身气动造型的整体优化设计[D]. 太原: 中北大学机械与动力工程学院,2016.
- [3] 谭继锦. 汽车有限元法[M]. 北京: 人民交通出版社,2005.
- [4] 余刚珍. 基于 ANSYS Workbench 的车架结构有限元分析及拓扑优化技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机械电子工程学院,2015.
- [5] 李海峰,吴冀川,刘建波,等. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程,2012,23(3):368-377.
- [6] 张胜兰,郑冬黎,郝琪,等. 基于 HyperWorks 的结构优化设计技术[M]. 北京: 机械工业出版社,2007.
- [7] 潘小卫. 赛车 CFD 仿真及风洞试验研究[D]. 长沙: 湖南大学机械与车辆学院,2009.
- [8] 陆森林,许静超. 基于虚拟样机技术的汽车前悬架优化[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(2):124-128.
- [9] 吴泽玉,王东炜,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.
- [10] 唐先习,徐岳. T 梁横隔板合理截面尺寸数值分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2010,31(1):34-39.
- [11] 郭长城. 轿车车架模态分析与结构优化[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院,2011.
- [12] 李晓雷,俞德孚,孙逢春. 机械振动基础[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社,2012.
- [13] 龚航. FSAE 赛车悬架系统的设计、制造及测试[D]. 昆明: 昆明理工大学交通工程学院,2015.

The Design of FSAE Formula Frame with Light Weight

YUAN Shouli, LIN Jiahui

(School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The safety margin of FSAE(formula student automobile equation) racing car should be large. To meet the requirements of strength and stiffness, fully tap the potential for lightweight frame, This paper optimizeed topology design and section size of car frame in the SIMP method with the finite element analysis software. Considering the mesh of model remains unchanged and simulating three track actual conditions by the size of optimization method, we change the model parameter values, and the corresponding maximum deformation of car's frame decreases by 7%, 7.5%, 14.7% respectively under the certain strength and stiffness of car's frame. When the maximum stress was less than 200 MPa, the quality of the frame was reduced by 32%. Finally, Through the modal analysis and test, optimization design of the frame could effectively avoid the coupling effect and external excitation, the eight around the ring test time could be reduced by 3%. The racing car frame achieveed the purpose of light weight.

Key words: formula car; structural design; finite element analysis; lightweight; modal calculation

文章编号:1671-6833(2018)04-0025-05

氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体 对氢发动机散热影响研究

罗亚萍, 邱兆文

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 采用高导热性材料氧化石墨烯与水和乙二醇基液配比成纳米流体, 研究该纳米流体对氢内燃机散热的影响规律. 对比分析纳米流体的热物性随氧化石墨烯体积分数的变化规律, 并利用 AVL FIRE 软件对氢内燃机冷却水套进行网格划分和三维数值模拟计算, 得到整机冷却水套在冷却液为氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体(乙二醇体积分数为 10%, 氧化石墨烯体积分数分别为 0%、1%、2%、5%) 时的速度分布、热流量变化以及压力损失等信息. 结果表明, 随着氧化石墨烯体积分数的增大, 纳米流体的换热能力不断增强, 冷却水腔总热流量逐渐增大; 然而以氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为冷却介质会引起水套进出口总压降增大, 导致冷却系统水泵功率的增加.

关键词: 氧化石墨烯; 纳米流体; 氢内燃机; 数值模拟; 散热性能

中图分类号: U464

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.004

0 引言

与传统燃料内燃机相比, 氢内燃机以其清洁、高效等优势备受关注^[1], 仅有的排放污染物 NO_x 也通过多种手段予以降低^[2], 然而目前也面临许多技术性问题, 如早燃、爆燃、回火等异常燃烧的现象^[3]. 研制高导热率、换热性能好的冷却介质对提高氢内燃机的工作性能具有十分重要的意义.

近年来, 纳米流体这种新型传热工质由于其较好的物理性能(较低的表面张力、比基液略高的黏度、显著增加的热导率等)、流变性能以及较强的对流换热能力, 受到众多科学家的关注^[4]. Maïga 等^[5]将 Al_2O_3 水纳米流体应用到热管中. 李强等^[6]将 Cu-水纳米流体应用到航天器热控系统中. 基于纳米流体的高导热系数, Choi 等^[7]提出将纳米流体作为车辆热管理的新一代冷却介质. Leong 等^[8]将 Cu-乙二醇纳米流体作为发动机的冷却液, 增强散热器的传热. 郭胜伟等^[9]测定了水基-碳纳米管纳米流体冷却特性曲线, 发现随碳纳米管含量的增加, 纳米流体最大冷却速度逐渐增大. 然而自从石墨烯这一新型材料被发现以来, 由于其优秀的导热性, 导热系数高达

$5\,300\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 优于 Cu、 CuO 、 Al_2O_3 、 ZnO 、SiC、金刚石以及碳纳米管等其他常见纳米粒子^[10-12], 使得国内外大量学者开始探究石墨烯纳米流体. Ghozatloo 等^[13]制备了质量分数为 0.01% ~ 0.05% 的石墨烯-水纳米流体.

石墨烯纳米颗粒的添加大幅提升了基液的导热性能, 石墨烯为层片状结构, 具有更大的比表面积, 对过冷度抑制作用更强^[14], 所以笔者尝试将氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为氢内燃机冷却系统中的传热工质, 并通过数值模拟方法研究该纳米流体对内燃机散热性能的影响, 从而提供一种能够满足更高热负荷内燃机冷却要求的新型换热介质.

1 纳米流体热物性模型的建立

1.1 纳米流体导热系数理论模型

与纯液体相比, 纳米流体的导热性能得到大幅提升, 原因可能为: 一是纳米颗粒的添加改变了液体的固有性质, 使液-液变成液-固两相悬浮液, 改变了纳米流体内部的能量传递方式, 强化了能量的传递效率; 二是在固液界面上, 液体分子的排列比在液体中的排列更加规则, 通过和晶体的热行为类比, 规则结构可以增加导热

收稿日期:2017-06-10; 修订日期:2017-12-21

基金项目:陕西省自然科学基金(2017JM7007); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(310822173702)

通信作者:邱兆文(1975—), 男, 江苏徐州人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事汽车排放控制研究, E-mail: qzw@chd.edu.cn.

率;三是从微观尺度来看,纳米流体中的颗粒受到液体分子的作用力而作无规则运动,形成并促进了纳米流体内部的扰动,加速了纳米流体内部能量的传输。

针对添加纳米粒子改变基液结构这一观点,Maxwell 提出了适用于体积份额非常小的粒子悬浮液的均质理论模型,在此模型中忽略了粒子与粒子、粒子与液体分子之间的相互作用。

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)}, \quad (1)$$

式中: k 表示导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; φ 是纳米颗粒体积分数; n, p, f 分别表示纳米流体、纳米颗粒和基液。

而 Chu 给出了适用于石墨烯纳米流体导热系数的计算模型(Chu Model)^[15],该模型考虑了石墨烯纳米颗粒的长度、厚度、平面度和界面热阻对纳米流体导热系数的影响,其表达式为:

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{3 + 2\eta^{2\varphi} \left[k_f \left(\frac{2R_k}{L} + 13.4\sqrt{t} \right) \right]}{3 - \eta\varphi}, \quad (2)$$

式中: η 为石墨烯纳米颗粒平面度; R_k 为界面热阻; L 为粒子长度; t 为粒子厚度。

1.2 纳米流体比热容、密度、黏度理论模型

针对纳米流体密度的理论模型选择下式作为氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体密度的计算模型:

$$\rho_n = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p. \quad (3)$$

纳米流体的比热容的模型同密度模型原理相同:

$$C_n = \frac{(1 - \varphi)\rho_f C_f + \varphi\rho_p C_p}{\rho_n}. \quad (4)$$

关于黏度模型,当粒子份额浓度超过 0.02 时,Einstein 公式可能会低估纳米流体的黏度,在粒子的体积分数不太高时(小于 0.05),Brinkman^[16]将 Einstein 公式扩展,得到下列计算公式:

$$\mu_n = \mu_f \frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5}}. \quad (5)$$

笔者运用上述物性公式(1)~(5)进行计算,得出不同浓度的氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体(乙二醇体积分数为 10%) 在温度为 363.15 K 时所对应的热物性值,如表 1 所示. 随氧化石墨烯体积分数的增加,纳米流体的密度逐渐增加,比热容不断减小,黏度逐渐增大,热系数逐渐增大,与未添加氧化石墨烯纳米粒子相比,氧

化石墨烯体积分数为 5% 的纳米流体导热系数增加 22.5%,具体变化趋势见图 1。

表 1 氧化石墨烯纳米流体热物性

Tab.1 Thermal properties of graphene oxide nanofluids

$\varphi/\%$	$k_n /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot$ K^{-1})	$\rho_n /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C_n /$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$ K^{-1})	$\mu_n /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot$ s^{-1})
0	0.623	972.9	4.208	3.523×10^{-4}
1	0.642	985.6	4.132	3.611×10^{-4}
2	0.661	998.2	4.058	3.699×10^{-4}
5	0.721	1 036.2	3.847	3.963×10^{-4}
7	0.763	1 061.6	3.715	4.139×10^{-4}

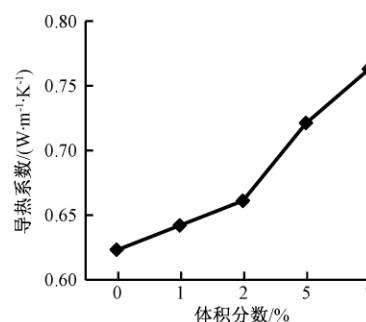


图 1 纳米流体导热系数随氧化石墨烯体积分数变化图

Fig.1 The change for nanofluids' thermal properties with the volume fraction of GO

2 内燃机冷却水套的三维数值模拟

笔者选用单缸 59 kW 柴油机改造的氢发动机进行研究,运用 SolidWorks 和 AVL FIRE 软件对冷却系统进行网格划分和三维数值模拟,分别采用乙二醇体积分数为 10%,氧化石墨烯体积分数为 0、1%、2%、5% 的纳米流体作为传热介质进行仿真计算,分析比较不同浓度的传热介质的流动、传热情况以及对氢内燃机散热性能的影响。

2.1 实体模型的建立

建立如图 2 所示的氢内燃机冷却系统的三维几何模型,其中冷却水腔与气缸盖的几何模型不仅结构尺寸、形位关系准确完整,而且可实现二者的完全耦合.将缸盖划分为 7 个火力面区,如图 2(a)所示,对应水腔内侧表面的 11 个 selections 均取均匀的壁面厚度,厚度值均列在表 2 中。

具体建模过程中,在保证对数值计算结果不产生影响的前提下,可以对结构进行适度简化,但重要位置(如缸盖冷却腔“鼻梁”区)不作任何处理。

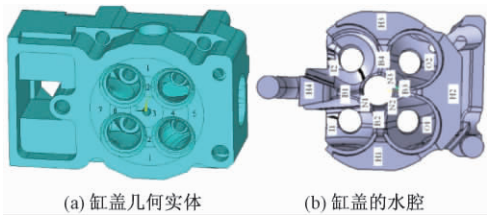


图2 冷却系统三维实体模型

Fig.2 The 3D solid model of cooling system

表2 边界厚度表

Tab.2 Boundary thickness table

区域	厚度/mm	区域	厚度/mm
H1	9.0	N1	26.0
H2	9.0	N2	26.0
H3	9.0	N3	26.0
H4	11.0	O1,O2	4.5
B1	18.0	I1	4.5
B2	16.0	I2	7.5
B3	18.0	外表面	6.0
B4	18.0	气缸缸套	7.0

2.2 计算网格的划分

冷却水套的网格模型采用结构化的六面体网格,且对局部区域(喷油器座、火力面和鼻梁区)进行加密,以提高计算精度.将冷却水腔头部内侧体网格共划分了26个selections,由于缸盖区域温度较高且结构复杂,以及考虑到求解器设置时边界条件的设置需要,在缸盖内表面建立了对应于各个火力面的selections,共16个,见图3.

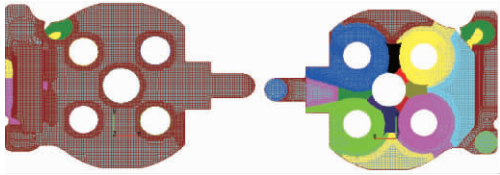


图3 氢内燃机水套网格模型

Fig.3 Water jacket mesh model of hydrogen internal combustion engine

2.3 求解方法与边界条件

均相流模型广泛应用于纳米流体的模拟中且与实验结果对比具有较高的精度^[17],故笔者采用均相流进行数值模拟.在模拟过程中,认为纳米流体在水套内的流动状态是三维不可压缩黏性的湍流运动,在高 Re 数流动区域即湍流充分发展区域,也即冷却水套模型的中心区域,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,而在低 Re 数的贴近壁面的薄层中甚至呈现层流状态,由于黏性作用大于湍流脉动的影响,所以运用标准壁面函数和复合壁面函数来计算,并在求解过程中将壁面与湍流核心区的相应变

量联系起来.压力与速度的耦合求解利用SIMPLE算法处理;设置空间离散化时,压力选用标准方程(stander),其余选用二阶逆风方程进行求解.

以2 000 r/min的转速为计算工况点,计算过程中设定速度(由进口流量1.02 kg/s换算)为入口边界条件,入口温度为363.15 K,出口采用1.12 MPa的压力边界.以缸盖火力面各分区的表面对流传热系数和温度作为第三类热边界条件^[18],见表3.

表3 火力面不同分区的第三类边界条件

Tab.3 Third boundary conditions for different zones of fire surface

缸盖火力面 分区	单缸59 kW柴油机改造的氢发动机	
	换热系数/ ($W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$)	燃气温度/ $^{\circ}C$
1	1 549.5	731
2	1 239.6	731
3	1 033.0	731
4	929.7	731
5	826.4	731
6	774.8	731
7	723.1	731

3 CFD模拟计算及结果分析

3.1 纳米流体速度场分析

图4显示了气缸盖的壁面速度场分布,由于缸盖的形状比较复杂,因此局部位置出现流速过低的情况,气缸盖的顶部靠近进水口的区域流速较高,同时缸盖内侧比外侧流速高.对比分析纳米流体和纯水,水套速度场的整体分布基本不变.

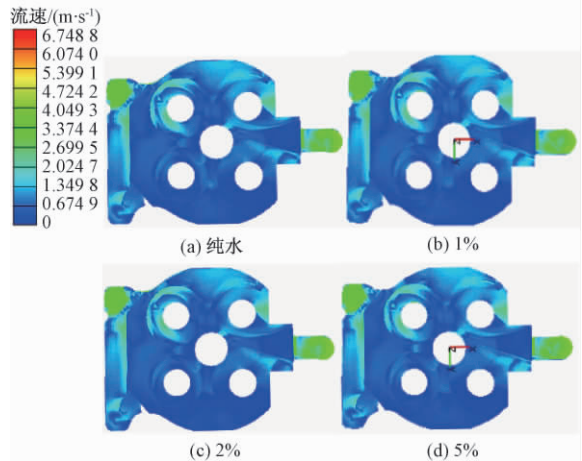


图4 纯水与氧化石墨烯纳米流体气缸盖速度场

Fig.4 Velocity field of cylinder head of water and graphene oxide nanofluids

3.2 纳米流体换热分析

根据下式求解水腔整体热流量,以此探究纳米流体的导热性能:

$$Q = C_n A \rho_n v \Delta T, \quad (6)$$

式中: A 为进口面积, m^2 ; v 为进口流速, m/s ; ΔT 为进出口平均温差.

比较分析氧化石墨烯体积分数为 1%、2%、5% 的纳米流体以及纯水的整体换热总量,从图 5 可以看出,随着氧化石墨烯粒子含量的增加,纳米流体的换热性能随之增强.与传统介质纯水相比,以缸盖为例,体积分数达到 5% 的氧化石墨烯纳米流体的整体热流量为 9.917 kJ/s ,较纯水提高了 12.6%.

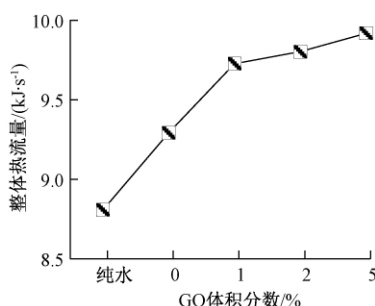


图 5 氧化石墨烯体积分数不同的纳米流体整体热流量比较

Fig. 5 Comparison of overall heat flux of graphene oxide nanofluids with different volume fractions

3.3 纳米流体压力场分析

根据图 6 结果显示,从进口到出口,压力逐渐降低.由于加入了氧化石墨烯纳米粒子,纳米流体的黏度和密度增大.一方面黏度的增加导致流动时的摩擦阻力变大,引起冷却腔进出口间总压降增大;另一方面在进口流量不变的情况下,随着石墨烯纳米流体密度的增大,进口流

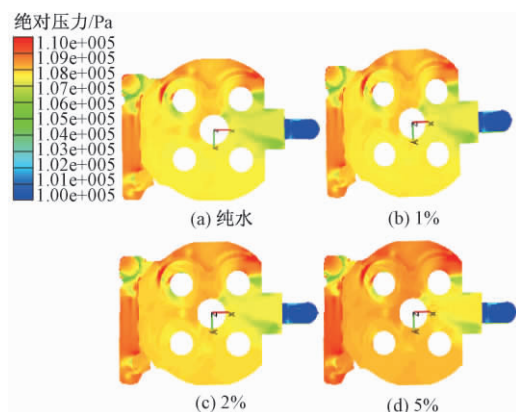


图 6 不同体积分数氧化石墨烯纳米流体压力场分布

Fig. 6 Pressure field distributions of graphene oxide nanofluids with different volume fractions

速不断降低,进出口总压降减小.在综合作用下,压降随着纳米粒子体积分数的增大而增大,结果如图 7 所示.

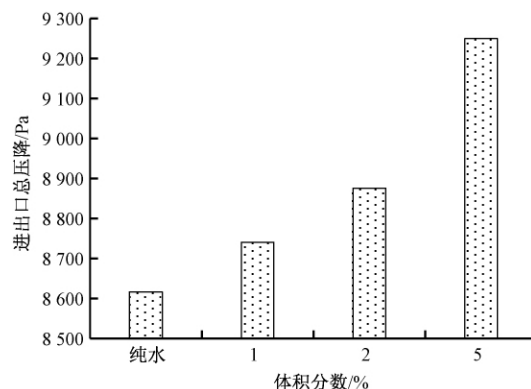


图 7 冷却腔进出口总压降随氧化石墨烯体积分数的变化

Fig. 7 The change of total pressure drop of the cooling chamber with the volume fractions of graphene oxide

传热工质为纯水时,水套进出口的总压降为 8 616 Pa;而以体积分数为 5% 的氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为冷却液时,总压降为 9 250 Pa,较纯水增加了 7.4%.

4 结论

(1) 通过对氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体热物性变化规律的分析,氧化石墨烯的添加可使纳米流体热导率得到大幅提高.

(2) 当介质为水和纳米流体时,水套速度场的整体分布基本不变.

(3) 在进口流速和温度固定的情况下,随着氧化石墨烯体积分数的增大,内燃机的散热性能不断增强,冷却水腔总热流量逐渐增大.

(4) 以氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为冷却介质引起水套进出口总压降增大,导致冷却系统水泵功率和负载的增加.

参考文献:

- [1] 孙柏刚,田华宇,张冬生. 氢内燃机汽车与传统内燃机汽车的经济性比较研究[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(1): 21-27.
- [2] SUBRAMANIAN V, MALLIKARJUNA J M, RAMESH A. Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine[J]. International journal of hydrogen energy, 2007, 32(9): 1159-1173.
- [3] 杨敏敏. 氢内燃机燃烧早燃回火问题[J]. 汽车实用技术, 2017(6): 150-151.

- [4] 崔文政,白敏丽,吕继组,等. 纳米流体应用于内燃机冷却水腔强化传热的导热机理分析[J]. 内燃机学报, 2013, 31(6): 557–563.
- [5] MAÏGA S, CONG T, GALANIS N. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube [J]. Superlattices and microstructures, 2004, 35 (3): 543–557.
- [6] 李强,宣益民. 航天用纳米流体流动与传热特性的实验研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(4): 391–394.
- [7] CHOI C, YOO H S, OH J M. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants [J]. Current applied physics, 2008, 8(6): 710–712.
- [8] LEONG K Y, SAIDUR R, KAZI S N. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator) [J]. Applied thermal engineering, 2010, 30(17): 2685–2692.
- [9] 郭胜伟,曾效舒,黄民富,等. 水基-碳纳米管纳米流体冷却特性的影响因素[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 219–222.
- [10] 叶宗标,郑伟健,太惠玲. 石墨烯-氧化钛复合氨敏感材料的制备与特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 49–52.
- [11] YARMAND H, GHAREHKHANI S, SHIRAZI S F S, et al. Nanofluid based on activated hybrid of biomass carbon/graphene oxide: synthesis, thermo-physical and electrical properties [J]. International communications in heat & mass transfer, 2016, 72: 10–15.
- [12] LI X, ZOU C, LEI X, et al. Stability and enhanced thermal conductivity of ethylene glycol-based SiC nanofluids [J]. International journal of heat & mass transfer, 2015, 89: 613–619.
- [13] GHOZATLOO A, SHARIATY-NIASAR M, RASHIDI A M. Preparation of nanofluids from functionalized graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability [J]. International communication in heat and mass transfer, 2013, 42 (3): 89–94.
- [14] IJAM A, SAIDUR R, GANESAN P, et al. Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid [J]. International journal of heat & mass transfer, 2015, 87: 92–103.
- [15] CHU K, LI W S, TANG F L. Flatness-dependent thermal conductivity of graphene-based composites [J]. Physics letters A, 2013, 377(12): 910–914.
- [16] BRINKMAN H C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions [J]. Journal of chemical physics, 1952, 20(4): 571–571.
- [17] BIANCO V, CHIACCHIO F, MANCA O, et al. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes [J]. Applied thermal engineering, 2009, 29(17): 3632–3642.
- [18] 郭良平,张卫正,王长园,等. 柴油机气缸盖传热规律研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3): 277–282.

Study on the Influence of Graphene Oxide-Water and Glycol Nanofluids on Heat Transfer of Hydrogen Engine

LUO Yaping, QIU Zhaowen

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The graphene oxide (GO) has high thermal conductivity was mixed with water and glycol to form and the influence of the nanofluids on the heat dissipation of hydrogen internal combustion engine was studied. By comparative analysis of the change regularity for nanofluids' thermal properties with the volume fraction of GO, while mesh generation and 3D numerical simulation for the cooling water jacket of hydrogen engine based on AVL Fire software, the information of velocity distribution, heat flux change and pressure loss could be obtained when coolant was GO-water and glycol nanofluids which the volume fraction of ethylene glycol was 10%, the volume fraction of graphene oxide were 0, 1%, 2% and 5%. The results showed that the heat flux gradually increases and heat transfer capability evidently enhanced while the concentration of nanoparticles increased, however it was caused total pressure increased between inlet and outlet in the cooling jacket and power loss of water pump also increased.

Key words: graphene oxide; nanofluid; hydrogen engine; numerical simulation; heat dissipating capability

Fe₃O₄ 磁性壳聚糖微球固定化脂肪酶研究

韩秀丽^{1,2}, 谷鹏举¹, 方书起^{1,2}, 陈俊英^{1,2}

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 生物质炼制技术与装备河南省工程实验室, 河南 郑州 450001)

摘要: 研究了磁性壳聚糖微球固定化脂肪酶, 旨在增加脂肪酶的重复利用率. 利用悬浮交联法制备出粒径为 40~60 μm 的磁性壳聚糖微球, 微球经接枝、叠氮化修饰后用于固定化脂肪酶. 通过响应面法考察反应条件对固定化酶的影响, 得出最优固定条件: 酶浓度 4 mg/mL, 反应时间 8.4 h, 反应温度 39.3 °C, pH 值为 7.0. 结果表明, 最优条件下载体微球实际载酶量为 64.4 mg/g, 与预测值相接近, 证明该方法可以用于固定化脂肪酶.

关键词: 磁性壳聚糖微球; 叠氮化; 脂肪酶

中图分类号: TQ032.41

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.014

0 引言

脂肪酶(lipase) 全称三酰基甘油水解酶, 是一类特殊的酰基水解酶, 可在油水界面处催化酯水解、醇解、酯合成、酯交换等有机反应, 是目前应用最为广泛的一种酶^[1]. 在其反应过程中具有反应条件温和、耗能低、产物质量高、副反应少、对环境无污染等优点, 可用于油脂加工^[2]、乳品制造^[3]、食品添加剂合成^[4] 和生产生物柴油^[5] 等. 然而脂肪酶在应用中的一些问题限制了其使用, 如寿命短、游离酶在有机相中不溶解、回收率低、产物与酶的分离困难、价格昂贵^[6] 等. 为了解决上述问题, 酶的固定化技术应运而生. 壳聚糖是固定化酶的良好材料, 分子中存在着丰富的羟基与氨基使其易于进行化学修饰. 酶固定化方法主要有包埋法、吸附法、交联法和共价法. Aybastier 等^[7] 利用共价法固定化脂肪酶于微孔苯乙烯-二乙烯苯聚戊二醛共聚物载体上, 重复利用 10 批次后仅有 12% 的酶活损失. 磁性纳米颗粒的引入, 使得固定化酶的回收更加简便, Khoobi 等^[8] 通过物理吸附和共价连接固定化脂肪酶于磁性纳米颗粒上, 重复 12 批次后仍具有 80% 的活性. 固定化的酶分子具有一定的游动性, 更易与底物接触, 使酶活性得到提高. 笔者采用叠氮化方法^[9] 对接枝后的磁

性壳聚糖进行修饰, 得到叠氮化壳聚糖微球, 并利用叠氮化磁性壳聚糖微球来固定化脂肪酶, 以催化三丁酸甘油酯水解为催化活性的考察依据, 利用响应面分析法优化固定化脂肪酶的工艺条件. 固定化酶过程示意图如图 1 所示.

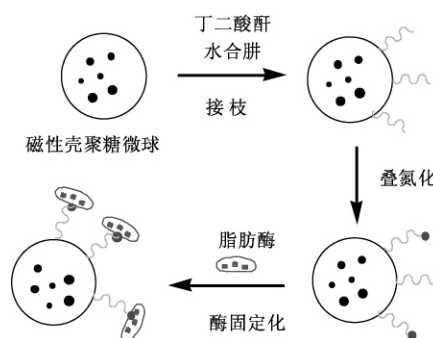


Fig.1 Schematic diagram of immobilized enzyme

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

1.1.1 试剂

壳聚糖, 脱乙酰度 ≥95%, 阿拉丁 C105799; 纳米 Fe₃O₄, 纯度 99.5%, 20 nm, 阿拉丁 I109514; 丁二酸酐, 纯度 99%, 阿拉丁 S104823; 4-二甲氨基吡啶, 纯度 99%, 阿拉丁 D109207; 水合肼 80%, 天津市天力化学试剂有限公司; 猪胰

收稿日期:2017-05-13; 修订日期:2017-09-21

基金项目:河南省科技攻关项目(162102210002); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A530005)

作者简介:韩秀丽(1966—), 女, 河南内黄人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事可再生能源和环境污染治理方面研究,
E-mail: xlhan@zzu.edu.cn.

腺脂肪酶 L3126,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;其他试剂,天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器

分析天平 AL-204,梅特勒-托利多有限公司;离心机 TGL-16C,上海安亭科学仪器厂;恒温振荡箱 HZ-9311K,太仓华利达实验室设备有限公司;粒度分析仪 BT-9300S,丹东百特仪器有限公司;冷冻干燥机 LGJ-48B,北京四环科学仪器厂有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 磁性壳聚糖微球的合成

将 0.6 g 壳聚糖与 0.4 g Fe₃O₄ 溶解于冰乙酸溶液中,超声搅拌。依次将超声后的溶液、导热油和 Span-80 加入到特制锥形瓶中,40 ℃ 在恒温振荡箱中高速振荡 0.5 h。滴加戊二醛进行交联反应 1.5 h,然后滴加 1.0 mol/L 的 NaOH 溶液至有固体颗粒浮现,继续反应 1 h,产物用正己烷和去离子水冲洗^[10-11]。

1.2.2 磁性壳聚糖微球改性

精确称量 0.10 g 的磁性壳聚糖微球加入到溶有 0.6 g 丁二酸酐和 0.5 g 4-二甲基氨基吡啶的吡啶溶液中,45 ℃ 条件下搅拌反应 8 h,结束后用无水乙醇冲洗干净^[12],干燥后,置于 25 mL 甲醇和 12 mL 水合肼的混合液中,50 ℃ 条件下搅拌反应 10 h,反应结束后用 0.1 mol/L 的 NaCl 溶液冲洗干净,再加入到 1 mol/L 的 NaNO₂ 溶液中,反应 1 h 后滴加 0.1 mol/L 的 HCl 溶液,继续反应 0.5 h 用去离子水冲洗^[13]。

1.2.3 脂肪酶的固定化

将改性后的磁性壳聚糖微球置于 0.05 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液配制的脂肪酶溶液中,在不同温度下于恒温振荡箱中反应一段时间。固定化结束后用磷酸盐缓冲溶液冲洗固定化酶微球 3~4 次,在真空冷冻干燥箱中干燥,并在 4 ℃ 条件下保存备用。

1.3 分析方法

1.3.1 载体微球粒径的表征

将制备的磁性壳聚糖微球真空干燥至恒重,取适量于 BT-9300S 激光粒度分析仪中测量其粒径分布。在显微镜下 400 倍放大观察其形貌。

1.3.2 载酶量的检测

将一定量的脂肪酶干粉溶解于 0.5 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液中,在 4 ℃ 条件下搅拌孵化

30 min,再将粗酶液用高速离心机在 8 000 r/min 下离心 10 min,取上清液:酶溶液,采用考马斯亮蓝法^[14]计算载酶量。

1.3.3 酶活性的检测

取定量的酶加入到 10 mL pH 值为 7.0 的磷酸盐缓冲溶液中,滴加 1 mL 的三丁酸甘油酯,在 37.5 ℃ 下震荡反应 10 min,立即加入 10 mL 无水乙醇,再滴加两滴酚酞试剂,充分搅拌后用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液滴定到溶液变为粉红为止,记录下 NaOH 溶液消耗量。做空白实验重复上述步骤,但不加酶。计算出酶活性:

$$U = \frac{0.17 \cdot (V_1 - V_0) \cdot 10^3}{m \cdot 10}, \quad (1)$$

式中: V_1 为滴定结束后 NaOH 消耗量, mL; V_0 为空白对照组 NaOH 的消耗量, mL; m 为固定化的酶质量, mg。

定义:在特定条件下,每分钟内产生 1 μmol 脂肪酸所需的酶量为一个酶活力单位。

2 结果与讨论

2.1 微球粒径表征

通过 BT-9300S 激光粒度测量仪测定磁性壳聚糖微球的粒径分布,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,粒径分布主要集中在 40~60 μm,在其他粒径区域分布的微球数量明显小于此区域。在显微镜下观察到,载体颗粒基本呈球形分布,如图 3 所示。

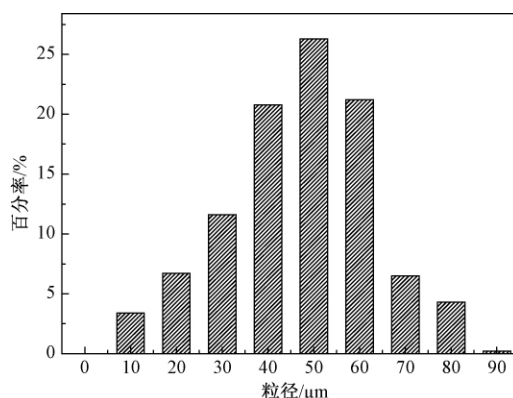


图2 粒径分布图

Fig.2 Distribution of particle size

2.2 响应面实验设计

通过 Design-expert 软件中的 BBD 对实验进行设计,以酶浓度(A)、反应时间(B)、反应温度(C)和 pH 值(D)为考察因素,确定了四因素三水平的 29 个实验组合,以载酶量(Y_1)为响应值,考察酶负载的最优化工艺条件结果见表 1。

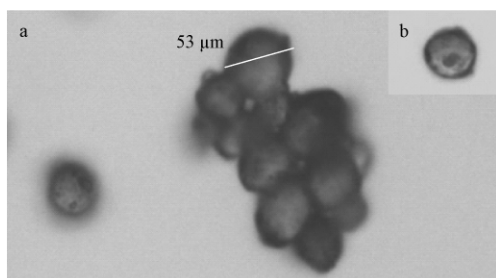


图3 400倍显微镜下载体颗粒形貌

Fig.3 400 times the particle morphology of the microscope

2.3 对载酶量的分析

利用 Design Expert 8.0 软件对响应面设计中的响应值进行分析,得出载酶量与各考察因素之间关系式,其回归方程为:

$$Y_1 = 60.52 + 12.02A + 14.67B + 1.61C + 0.52D + 4.2AB + 1.47AC + 0.25AD - 0.10BC - 0.25BD - 0.20CD - 13.93A^2 - 13.09B^2 - 8.05C^2 - 8.71D^2. \quad (2)$$

对方程(2)求偏导,得出最优的酶固定化工艺条件:酶浓度为 4 mg/mL,反应时间为 8.4 h,反应温度为 39.3 °C, pH 值为 7.0,酶负载量预测值为 68.6 mg/g. 在优化条件下,将磁性壳聚糖微球用于固定化脂肪酶,得到的酶负载量为 64.4 mg/g.

模型的方差分析如表 2 所示, P 值是无显著影响的概率, $P < 0.05$ 视为模型是显著的. 该模型 P 值如图 4 所示. $P < 0.0001$ 表示模型拟合效果非常显著. 从显著程度上分析各因素对载酶量的影响,影响载酶量大小的因素顺序为:反应时间 > 酶浓度 > 反应温度 > pH 值; 两种因素的交互影响立体图从图 4 中也可看出,在交互

表1 响应面试验设计和结果

Tab.1 The design and results of response surface analysis

次数	酶浓度 /(mg· mL ⁻¹)	反应时 间/h	反应温 度/°C	pH 值	载酶量 /(mg· g ⁻¹)
1	-1(1)	-1(1)	0(37.5)	0(7)	12.7
2	1(5)	-1(1)	0(37.5)	0(7)	26.4
3	-1(1)	1(10)	0(37.5)	0(7)	32.8
4	1(5)	1(10)	0(37.5)	0(7)	63.3
5	0(3)	0(5.5)	-1(25)	-1(4)	42.3
6	0(3)	0(5.5)	1(50)	-1(4)	45.3
7	0(3)	0(5.5)	-1(25)	1(10)	43.2
8	0(3)	0(5.5)	1(50)	1(10)	45.4
9	-1(1)	0(5.5)	0(37.5)	-1(4)	23.8
10	1(5)	0(5.5)	0(37.5)	-1(4)	49.2
11	-1(1)	0(5.5)	0(37.5)	1(10)	26.9
12	1(5)	0(5.5)	0(37.5)	1(10)	51.3
13	0(3)	-1(1)	-1(25)	0(7)	22.3
14	0(3)	1(10)	-1(25)	0(7)	53.1
15	0(3)	-1(1)	1(50)	0(7)	25.7
16	0(3)	1(10)	1(50)	0(7)	56.1
17	-1(1)	0(5.5)	-1(25)	0(7)	25.3
18	1(5)	0(5.5)	-1(25)	0(7)	47.5
19	-1(1)	0(5.5)	1(50)	0(7)	26.2
20	1(5)	0(5.5)	1(50)	0(7)	54.3
21	0(3)	-1(1)	0(37.5)	-1(4)	23.8
22	0(3)	1(10)	0(37.5)	-1(4)	53.2
23	0(3)	-1(1)	0(37.5)	1(10)	24.3
24	0(3)	1(10)	0(37.5)	1(10)	52.7
25	0(3)	0(5.5)	0(37.5)	0(7)	58.8
26	0(3)	0(5.5)	0(37.5)	0(7)	61.1
27	0(3)	0(5.5)	0(37.5)	0(7)	61.6
28	0(3)	0(5.5)	0(37.5)	0(7)	60.9
29	0(3)	0(5.5)	0(37.5)	0(7)	60.2

注: 括号内为实际值; 括号前为水平值.

表2 回归模型的方差分析

Tab.2 Analysis of variance for selected factorial model

方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值	显著性
模型	6 628.37	14	473.45	355.53	<0.000 1	非常显著
A	1 735.21	1	1 735.00	1 303.00	<0.000 1	
B	2 581.33	1	2 581.33	1 938.37	<0.000 1	
C	31.04	1	31.04	23.31	0.000 3	
D	3.20	1	3.20	2.41	0.143 2	
AB	70.56	1	70.56	52.98	<0.000 1	
AC	8.70	1	8.70	6.53	0.022 8	
AD	0.25	1	0.25	0.19	0.671 4	
BC	0.04	1	0.04	0.03	0.864 9	
BD	0.25	1	0.25	0.19	0.671 4	
CD	0.16	1	0.16	0.12	0.734 0	
失拟项	13.94	10	1.39	1.18	0.472 0	不显著
残差	18.64	14	1.33	—	—	

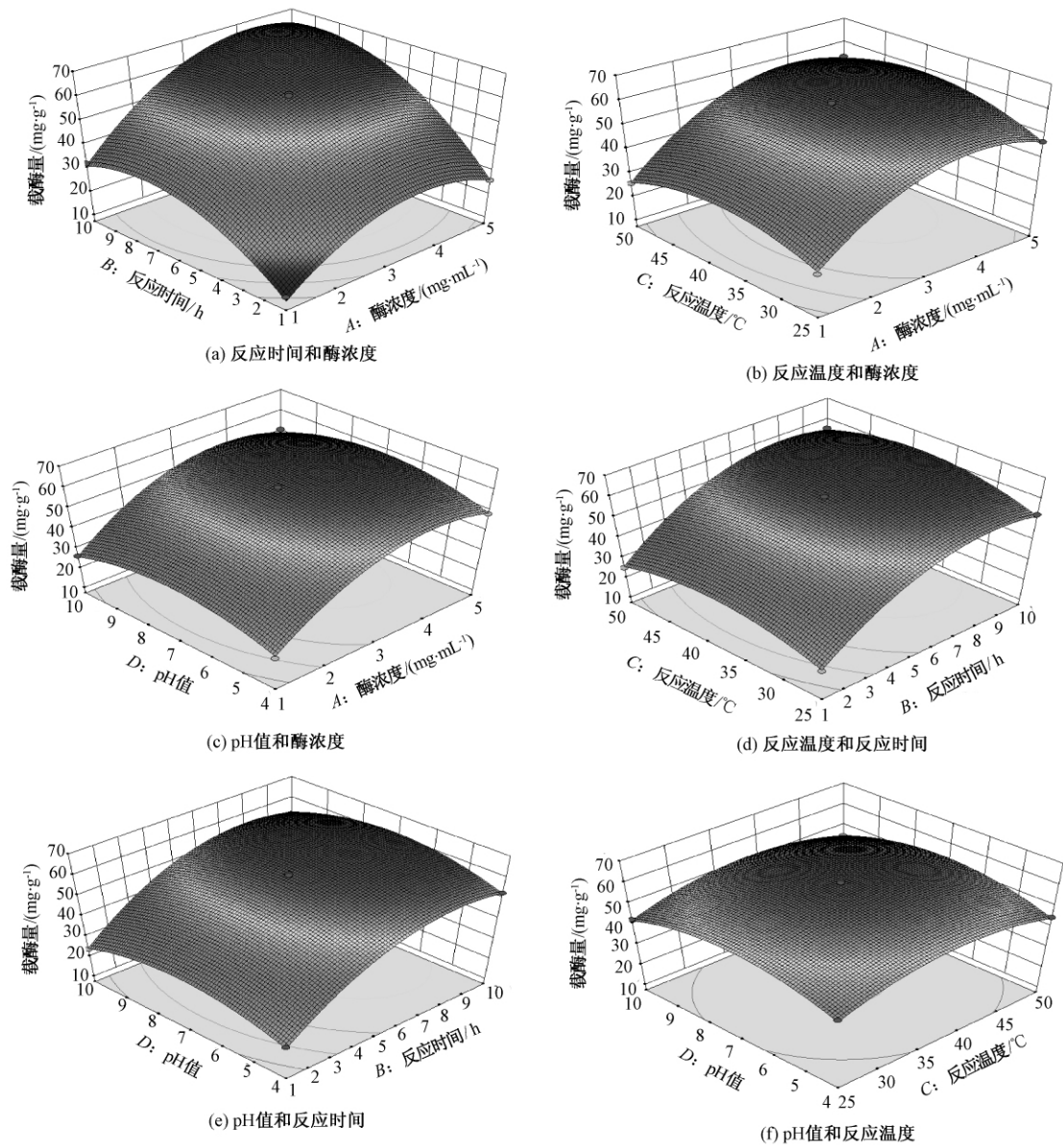


图 4 交互作用的响应面立体图

Fig. 4 Response surface (3D) and contour plots of operating factors

项中酶浓度(*A*)和反应时间(*B*)、酶浓度(*A*)和反应温度(*C*)对酶负载量影响的交互作用较为明显. 回归模型的可信度也可用复相关系数检验拟合程度,如表 3 中模型的复相关系数为 0.997 2,表明模型与实验效果具有较好的相关性;变异系数为 2.7%,表明实验操作具有较高的可靠性.

表 3 模型可信度分析结果

Tab. 3 The analysis result of model credibility	
参数	数值
平均数	42. 4
复相关系数 R^2	0. 997 2
校正后的 R^2	0. 994 4
变异系数/%	2. 7
信噪比	64. 3

2. 4 交互作用分析

酶浓度与其他 3 种因素相比,是影响酶负载量的最重要因素,从表 2 可以看出,酶浓度与反应时间的交互影响 F 值为 52. 98,酶浓度与反应温度的交互影响 F 值为 6. 53,与其他几种因素的 F 值相比较都较大,两者 P 值分别为: < 0. 000 1、0. 022 8,说明酶浓度与反应时间和反应温度对结果的交互影响较显著.

从图 4(a)可看出,当酶浓度一定时,酶的负载量随着反应时间的延长而持续增大. 反应时间一定时,脂肪酶固定量随着脂肪酶浓度增加而快速增加,而当脂肪酶初始浓度大于 3. 3 mg/mL 时,脂肪酶固定量随脂肪酶浓度增加而缓慢增加. 这主要与载体表面能和脂肪酶结合的活性基团数

量有关. 当脂肪酶浓度低于 3.3 mg/mL 时, 脂肪酶的量少于载体表面的活性基团, 因此酶的负载量随着浓度的增大而迅速增大; 当脂肪酶浓度高于 3.3 mg/mL 时, 脂肪酶的量高于载体表面的活性基团的量, 使得载酶量趋于饱和.

从图 4(b) 中可看出, 当酶浓度一定时, 反应温度对酶负载的影响并不大, 只是在很小的范围内先增大后减小, 这是因为随着反应温度的升高, 减少了酶扩散的限制作用, 使酶分子能够更快地与载体发生作用, 加快固定进程. 当反应温度一定时, 载酶量随着酶浓度的增大先增大后减小.

2.5 重复性检测

按照得到的最优化条件酶浓度 4 mg/mL, 反应时间 8.4 h, 反应温度 39.3 °C, pH 值为 7.0, 对制备出的叠氮化磁性壳聚糖进行 5 次脂肪酶固定化重复实验, 测其载酶量平均值为 64.4 mg/mL, 与理论预测值相接近, 说明该模型可用于固定化酶实验. 对制得的固定化脂肪酶进行重复性实验, 即重复测定酶活实验(按照 1.3.3 中酶活测定方法), 反应完成后采用外加磁场的方法将固定化酶吸附到反应容器底部, 与反应液分离后再加入乙醇溶液测定酶活, 并以第一次测定的酶活作为初始酶活(100%). 固定化脂肪酶与反应液分离后用磷酸盐缓冲溶液冲洗 3 次, 再进行重复测定. 实验测得重复 5 次后酶活性为初始活性的 75% 左右, 如图 5 所示.

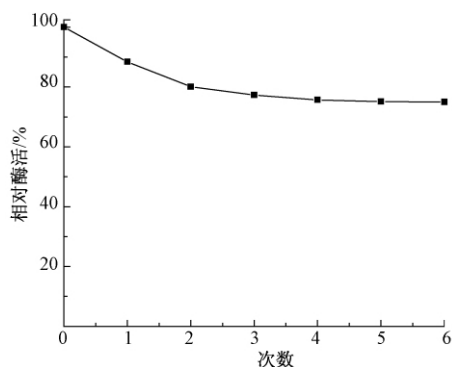


图 5 固定化脂肪酶重复性检测

Fig. 5 Repeatability test of immobilized lipase

3 结论

(1) 合成了具有磁性的壳聚糖微球并对微球进行化学修饰, 引入叠氮基团交联脂肪酶, 制备出回收简便的磁性壳聚糖微球固定化脂肪酶.

(2) 利用响应面分析法对实验条件进行优化, 得出最优化的酶负载工艺条件, 为脂肪酶的固定化研究找到一条新路径.

参考文献:

- [1] 曹茜, 冯凤琴. 微生物脂肪酶的研究进展及其在食品中的应用 [J]. 中国食品学报, 2013, 13(10): 136-143.
- [2] LIU T, ZHAO Y, WANG X, et al. A novel oriented immobilized lipase on magnetic nanoparticles in reverse micelles system and its application in the enrichment of polyunsaturated fatty acids [J]. Bioresource technology, 2013, 132(7): 99-102.
- [3] 薛海晓. 脂肪酶与脂肪酸对羊乳膻味影响的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院农产品加工研究所, 2014.
- [4] 戴清源, 朱秀灵. 非水相中脂肪酶催化合成糖酯类食品添加剂的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(10): 385-389.
- [5] BABAKI M, YOUSEFI M, HABIBI Z, et al. Enzymatic production of biodiesel using lipases immobilized on silica nanoparticles as highly reusable biocatalysts: effect of water, t-butanol and blue silica gel contents [J]. Renewable energy, 2016, 91: 196-206.
- [6] POWELL L W. Developments in immobilized enzyme technology [J]. Biotechnol and genetic engineering review, 1984, 2(1): 409.
- [7] AYBASTIER Ö, DEMIR C. Optimization of immobilization conditions of thermomyces lanuginosus lipase on styrenedivinylbenzene copolymer using response surface methodology [J]. Journal of molecular catalysis B: Enzymatic, 2010, 63(3/4): 170-178.
- [8] KHOABI M, MOTEVALIZADEHS F, ASADGOL Z, et al. Polyethyleneiminemodified superparamagnetic Fe₃O₄ nanoparticles for lipase immobilization: characterization and application [J]. Materials chemistry and physics, 2015, 15(1): 77-86.
- [9] HICKE H G, BOHME P, BECKER M, et al. Immobilization of enzymes onto modified polyacrylonitrile membranes: Application of the acyl azide method [J]. Journal of applied polymer science, 1996, 60(8): 1147-1161.
- [10] 覃晓. 磁性壳聚糖微球的制备及其对血管紧张素转化酶抑制肽的吸附研究 [D]. 南宁: 广西大学化学化工学院, 2014.
- [11] 周敬豪. 磁性壳聚糖微球的制备及其分离降血压肽的研究 [D]. 南宁: 广西大学化学化工学院, 2013.
- [12] 张猛. 载药栓塞微球的制备及控释性能研究 [D]. 无锡: 江南大学化学与材料工程学院, 2014.
- [13] 王书香, 武金霞, 张迎贺, 等. 功能基化聚丙烯酰胺固定化青霉素酰化酶 [J]. 功能高分子学报, 2000, 13(4): 389-393.
- [14] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing

the principle of protein-dye binding [J]. Analytical

biochemistry, 1976, 25 (1): 248 - 254.

Study on Immobilization of Lipase with Fe_3O_4 Magnetic Chitosan Microspheres

HAN Xiuli^{1,2}, GU Pengju¹, FANG Shuqi^{1,2}, CHEN Junying^{1,2}

(1. School of Chemical And Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Biomass Refining Technology and Equipment Engineering Laboratory of Henan Province Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to increase the utilization rate of lipase, the immobilization of lipase by azidation magnetic chitosan was investigated. The magnetic chitosan microspheres with particle size of 40 ~ 60 μm were prepared by suspension crosslinking method. The microspheres were modified by grafting and azide. Response surface methodology was used to investigate the effect of reaction conditions on the immobilized enzyme, and the optimum conditions for lipase immobilization were concentration of enzyme 4 mg/mL, reaction time 8.4 h, reaction temperature 39.3 $^{\circ}\text{C}$ and the pH 7.0. In the optimum conditions, the immobilized enzyme amount of magnetic chitosan microspheres was 64.4 mg/g, with the actual value showing a good fit to the predicted value. The results suggested that this method could be used to immobilized lipase.

Key words: magnetic chitosan microsphere; azidation; lipase

(上接第11页)

Study on Stress of Overhead Steel Core Aluminum Wire Strand Considering the Effect of Temperature Field

ZHANG Meng, ZHANG Yuying, ZHAO Guifeng, XIAO Yu

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

Abstract: An accurate understanding of the stress distribution of each layer of ACSR in the temperature field can provide theoretical basis for the safety design and fatigue analysis of overhead conductors. Based on the properties of ACSR materials and its collaborative deformation characteristics, the relationship between stress and temperature of wire strands is studied by theoretical analysis and finite element simulation. And the effects of average temperature and radial temperature difference on the stress of outermost aluminum strands were analyzed. The results showed that when the radial temperature difference was not considered, the stress of aluminum strand decreased with the increase of temperature. While the stress of steel core increases with the increase of temperature; when the radial temperature difference was considered, the outer aluminum strand stress increased with the increase of temperature difference, and steel core aluminum strand internal stress decreased with the increase of temperature difference. When the temperature reached 20 $^{\circ}\text{C}$, the outer layer of aluminum stress increased about 49%.

Key words: steel core aluminum wire; finite element; temperature field; radial temperature difference; layered stress

零价铁对上流式固定床中生物氧化三价砷的影响

万俊锋,蔡利芳,张玉聪,王 岩

(郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001)

摘 要: 研究了零价铁(ZVI)的存在对生物氧化及去除水体中三价砷(As^{III})的可能影响.将石英砂及负载有零价铁的石英砂分别作为载体材料填充到两个平行的上流式固定床反应器(R1和R2)中并接种驯化微生物.在整个试验期间,通过改变不同水力停留时间 t_{HR} 来研究微生物氧化 As^{III} 的规律.结果表明,上流式固定床反应器的底层生物氧化 As^{III} 的能力最高;当 t_{HR} 较高时,R1和R2对 As^{III} 的氧化效率均能达到100%;在 t_{HR} 缩短至40 min时,R2比R1氧化效率高.ZVI的存在更有利于生物氧化 As^{III} .

关键词: 地下水;亚砷酸盐;生物氧化;零价铁;水力停留时间

中图分类号: X523

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.017

0 引言

众所周知,砷(As)作为一种致癌物往往由于自然地质作用或人为活动导致地下水砷污染.世界上一些大型地下含水层被证实砷浓度已达到“mg/L”级别,其中在中国、越南、智利、罗马尼亚、墨西哥、印度和美国等许多地区尤为突出^[1].我国地下水中砷污染状况不容乐观,卫生部数据显示,我国暴露于50 $\mu\text{g/L}$ 高砷地下水的人口约为185万^[2].长期暴露于砷环境下可能导致癌症、呼吸道疾病等其他严重疾病^[3].世界卫生组织将饮用水砷标准限定为10 $\mu\text{g/L}$.因此,研究治理含砷地下水和提高处理效率具有重要的实际意义.目前,常用的砷污染治理方法有吸附法^[4]、生物修复技术^[5]、离子交换技术^[6]和膜过滤^[7].其中,生物修复技术是较为经济、环境友好的方法.由于地下水中砷的主要存在形式是 As^{III} , As^{III} 的毒性约为五价砷(As^{V})的60倍^[8],而且 As^{V} 在水体中的存在形式为 H_2AsO_4^- 和 HAsO_4^{2-} ,比不带电荷的 As^{III} (H_3AsO_3^0)更容易被吸附去除^[9].因此,氧化地下水中 As^{III} 是去除砷污染的关键步骤.相比化学氧化,微生物氧化 As^{III} 不会产生二次污染物^[3],同时,微生物氧化 As^{III} 处理成本低.很多细菌(统称为三价砷氧化菌AsOB)能够利用 As^{III} 作为电子

供体进行氧化还原反应,从而将 As^{III} 氧化为 As^{V} .在这些AsOB中,自养型AsOB能够从 As^{III} 氧化过程中获得能量,实现将 CO_2 转化成细胞所需的有机碳源进行生长^[10].

近年来,很多研究利用零价铁(ZVI)来去除废水中的砷^[11-12].目前认为在厌氧条件下,ZVI主要通过沉淀作用去除砷;而在好氧条件下,砷则被ZVI及其生成铁的氧化产物表面吸附或共沉淀作用去除^[11].也有研究表明,ZVI在对 As^{III} 的去除过程中可能同时包含氧化和吸附两个作用,从而影响砷的去除效率^[13].因此,本研究重点考察ZVI存在对生物氧化及去除 As^{III} 的可能影响.选择石英砂及包裹有ZVI的石英砂分别作为载体材料填充在两个固定床反应器中,接种实验室富集的AsOB聚生体,长期运行过程中改变不同水力停留时间 t_{HR} 研究微生物氧化 As^{III} 规律.

1 材料和方法

1.1 实验装置

如图1所示,实验装置为R1和R2两个反应器,反应器直径为50 mm,高度为600 mm.R1用1 335 g石英砂(直径为4 mm \pm 0.5 mm)填充,R2用1 322 g石英砂均匀包裹上质量比为1%的ZVI

收稿日期:2017-03-10;修订日期:2017-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21107100)

作者简介:万俊锋(1977—),男,河南郑州人,郑州大学副教授,博士,主要从事水处理技术与固废资源化等研究,E-mail: wanjunfeng@zzu.edu.cn.

填充,填充高度均为 450 mm. 反应器搭建完成后在密闭反应器循环挂膜 3 d.

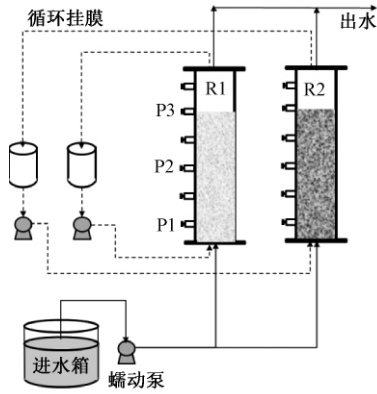


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup pilot

1.2 水力学特性

反应器运行前测定水力学特性. 测量反应器总体积 V , 填充支撑材料石英砂后进满水, 然后将反应器中水重力排出, 其中可被“排出”液体体积记为 $V_{\text{排}}$; 被“保留”在反应器内部的液体体积记为 $V_{\text{留}}$. 反应器总体积除去“排出”液体和“保留”液体即为填料所占体积, 水力停留时间 t_{HR} :

$$t_{\text{HR}} = V_{\text{排}} / Q, \quad (1)$$

式中: Q 为流速.

通过研究反应器的停留时间分布 (RTD) 确定反应器中流体力学特征^[14]. 在某个时间点 t_0 将反应器进水由去离子水改变为浓度为 5 g/L 的示踪剂 (NaCl), 在线记录反应器进口和出口处的电导率 $C_{\text{进}}$ 和 $C_{\text{出}}$ ($\mu\text{s}/\text{cm}$), 并计算统一数值 $F(t)$ ^[15]:

$$F(t) = \frac{C_{\text{出}}}{C_{\text{进}}}. \quad (2)$$

1.3 AsOB 的接种与富集

自养三价砷氧化菌聚生体 (AsOB) 接种自实验室培养的污泥, 其在序批式活性污泥反应器 (SBR) 中连续培养 3 a. 取 SBR 中 20 mL 上清液加入 300 mL 含 10 mg/L As^{III} 的浓缩液. 富集 5 d 后将该混合液泵入生物固定床中, 并以 15.2 mL/min 的流速在室温下循环挂膜 72 h.

1.4 进水水质与运行条件

实验所用进水根据典型砷污染地下水水质组成 (见表 1) 制备合成地下水, 并且添加少量营养物质用于微生物的生长^[15]. 此外, 本实验中, NaAsO_2 作为添加 As^{III} (10 mg/L) 的唯一来源.

反应器经 72 h 接种后开始运行. 通过改变蠕动泵的流速调整 t_{HR} , 将实验分为 4 个阶段. 其中

阶段 1: 0 ~ 17 d, t_{HR} 为 6 h; 阶段 2: 18 ~ 23 d, t_{HR} 为 3 h; 阶段 3: 24 ~ 34 d, t_{HR} 为 1 h; 阶段 4: 35 ~ 42 d, t_{HR} 为 0.67 h.

表 1 进水水质的化学组成

Tab.1 Chemical characteristics of the synthetic water ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	PO_4^{3-}	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-
2	1.2	8.5	11.7	3.8	12.2	7.1	18.6

1.5 批次实验

在反应器运行 42 d 后, 停止系统运行并且在重力作用下将水排出, 仔细收集每个反应器内部不同高度支撑材料与生物膜. 分别收集位于反应器底部 0 ~ 5 cm (S1), 10 ~ 20 cm (S2), 30 ~ 40 cm (S3) 的材料样品, 将湿体积 30 mL 样品清洗一次 (洗掉材料表面的 As) 后置于具有 100 mL 合成地下水 (10 mg/L 的 As^{III}) 的无菌瓶中. 最后, 将样品在 140 r/min 室温 (20 °C) 下置于振荡培养箱 (HDL apparatus、HZQ-F160) 中振荡. 分别在 20、40、60、90、120、180、210、240、300 min 时取样分析砷形态及浓度.

1.6 样品保存与测试方法

从进水口和沿反应器数值方向的 3 个点 (P1、P2、P3) 收集水样. 为了保存 As 的形态, 所有样品用 0.45 μm 滤膜过滤, 用体积分数为 1% 的 HCl 溶液酸化并在 4 °C 冰箱中保存. As^{III} 和 As^{V} 的监测采用高效液相-原子荧光光谱法联用 (HPLC-UV-HGAAS、SA520-PF52), 总 As 采用原子荧光光谱法 (AFS、PF52) 分析测定.

2 结果与讨论

2.1 反应器的水力特征

为了确定生物固定床反应器的水力特性, 本研究测定了反应器中填料、液体所占比例及不同流速下的水力分布. 如图 2(a) 所示, 支撑介质石英砂所占总体积的 30%, $V_{\text{留}}$ 所占比例为 11%. 保留液体 $V_{\text{留}}$ 主要是附着在石英砂表面形成的水膜^[16], 这为自养菌的生长提供相对稳定的有利环境.

图 2(b) 是在 5 个流速下对于生物固定床反应器随时间变化的 $F(t)$ 结果, $F(t)$ 曲线的特点是在某一时间段数值快速变化. 这个结果表明对于被测流速, 反应器内流动接近于活塞流, 不同于混合流在反应器内迅速混匀的特性, 即液体进入反应器后慢慢推进, 由下至上经过固定床, 随着流速的增大, 这个特征并未发生明显变化.

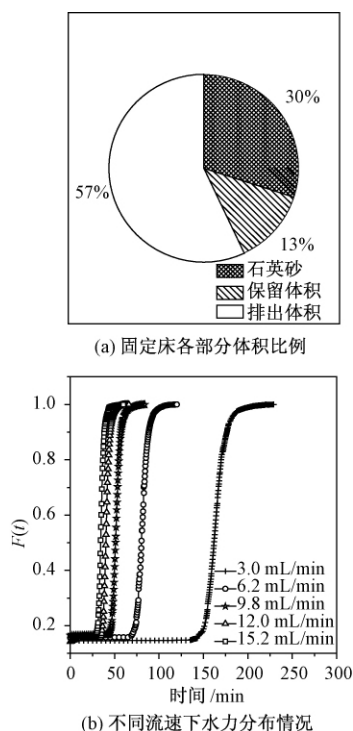


图2 固定床反应器中水力特性

Fig.2 Characterization of hydrodynamic conditions in fixed-bed reactor

2.2 长期运行中反应器对 As^{III} 的氧化与吸附

长期运行中反应器对 As^{III} 的氧化与吸附情况如图3所示。

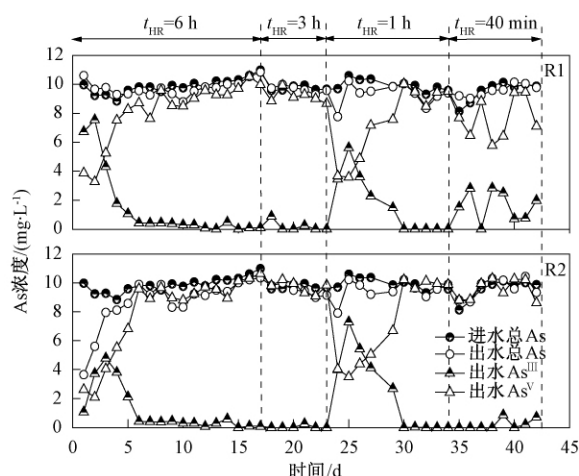


图3 R1和R2反应器中三价砷的氧化及去除运行结果
Fig.3 Evolution of As^{III} speciation and removal in R1 and R2

反应器运行期间进水 As^{III} 保持在 10 mg/L. 第1阶段,前3 d 反应器 R2 中观察到总砷明显下降,但在之后的运行过程中,总砷几乎无明显变化. 监测发现在反应器 R1 的出口中, As^{III} 的浓度在第2 d 达到 7.6 mg/L,随后迅速降低,最后在第6 d 完全氧化;反应器 R2 的出水中, As^{III} 的浓度在

第3 d 达到 4.8 mg/L,最后在第6 d 达到完全氧化. 第18 d, t_{HR} 从 6 h 降低到 3 h 时,几乎 100% 的 As^{III} 被氧化. 第3阶段, t_{HR} 在第24 d 缩短至 1 h,在第25 d, R1 和 R2 出口处 As^{III} 浓度分别升高至 5.6 和 7.3 mg/L,在第30 d 出口处的 As^{III} 逐渐降至为零,这一阶段表明,随着 t_{HR} 急剧降低,有铁存在的条件下对微生物的氧化并无明显促进作用. 阶段4 即第34 d,改变 t_{HR} 为 40 min, R1 出口处 As^{III} 浓度在 0.7 ~ 2.8 mg/L 之间波动,在前人的研究中观察到类似结果^[14]. 而在 R2 中,即使在较短 t_{HR} 时, As^{III} 也能完全氧化,这可能是由于微生物结合 ZVI 化学氧化有利于氧化的进行^[17].

一方面,底物(如 As^{III} 、氮和磷等)的体积负荷随 t_{HR} 的降低而相应升高,这可以促进固定床反应器中微生物生长^[18];另一方面, t_{HR} 的降低会使反应器中水流的剪切力增大,微生物接触到的毒性升高,填料表面的部分生物膜可能被冲走^[19].

2.3 反应器中各水平层对 As^{III} 的氧化情况

在反应器入口处取 As^{III} 样监测,在3个不同高度的出口处取 As^{V} 采样测定. 在整个反应器中和不同层(P1 为 5 cm; P2 为 25 cm; P3 为 45 cm)中 As^{V} 的浓度变化情况如图4中所示。

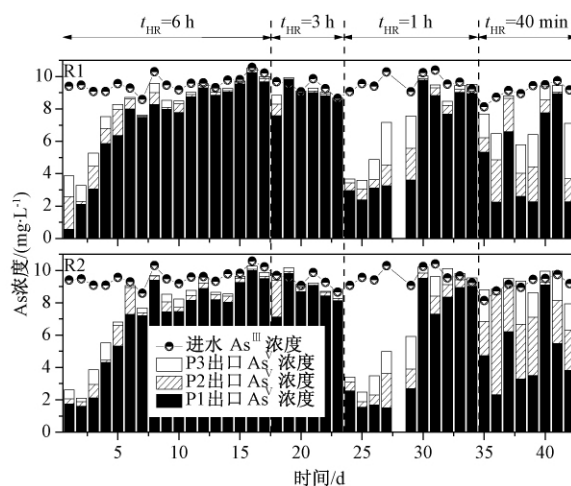


图4 生物膜固定床反应器中不同高度出口处的五价砷
Fig.4 As^{V} at different level outlet in biofilm fixed-bed reactors

在两个反应器中各层对氧化 As^{III} 的贡献不均匀,并且在整个反应器运行期间,大部分的 As^{III} 在第1层(入口 ~ P1)中被氧化. 在阶段1($t_{\text{HR}} = 6$ h),在 R1 和 R2 的各层中氧化的 As^{III} 相当,因为 AsOB 通过循环接种的方式被均匀地固定在反应器各个水平层,而底层接触到的 As^{III} 的浓度最高,所以在最底层 AsOB 的生长最快,大量的 As^{III}

在第1层内被氧化. 当 t_{HR} 从 6 h 降低到 3 h 时没有观察到明显的变化. 然而, 当 t_{HR} 从 3 h 降低至 1 h 时, R1 和 R2 中仅有 47% 和 44% 的 As^{III} 被氧化, 直到第 30 d, 第 1 层又能将 As^{III} 完全氧化. 在阶段 4 中, 反应器 R1 和 R2 中观察到各层对 As^{III} 氧化的贡献有显著差异: R1 中第 1、2、3 层所氧化的 As^{III} 占进水的比例分别为 52%、16%、16%, R2 中分别为 52%、33%、15%. 与其他较高水平层相比, 在固定床的底部显然具有更高的氧化水平^[20].

2.4 动力学试验

42 d 后, 停止反应器运行. 将上流式固定床反应器 R2 中的填料按照 3 个不同水平高度取出. 如图 5 所示, 通过动力学试验研究不同水平层的填料对 As^{III} 的氧化与去除规律.

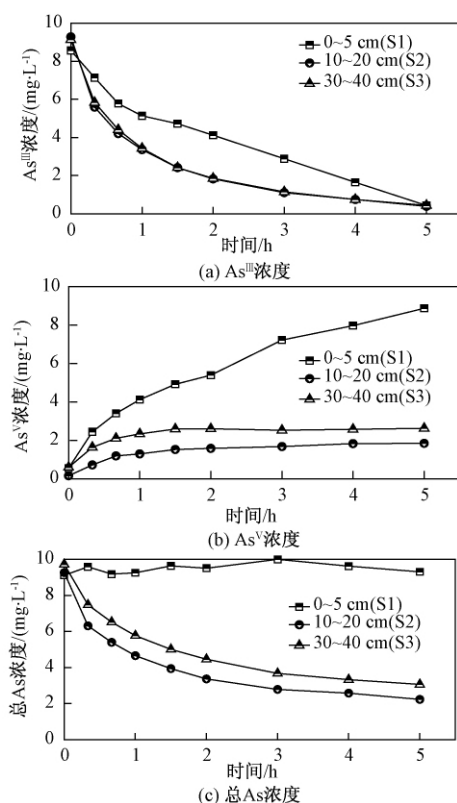


图5 R2 生物膜固定床中不同水平层收集填料批次试验中不同形态砷浓度变化

Fig.5 Arsenic monitoring in batch tests conducted with sand support collected at different levels of R2

从图 5(c) 观察到, R2 的不同水平层填料动力学试验中 S1 层总砷不变, S2、S3 总砷下降是由铁氧化物吸附或共沉淀对砷去除的结果. 图 5(a) 中 S1 层 As^{III} 呈线性下降, 是由于 $AsOB$ 对其氧化转化为 As^V , 而 S2、S3 中 As^{III} 的下降是 $AsOB$ 氧化和 ZVI 吸附的共同结果. 动力学试验结果证明 ZVI 存在对 As^{III} 生物氧化和总砷去除有重要

作用.

3 结论

(1) 本试验中上流式固定床反应器内流体特征为活塞流.

(2) 在 t_{HR} 为 6、3、1 h 时接种实验室培养 $AsOB$ 的固定床反应器完全氧化 10 mg/L 的 As^{III} ; t_{HR} 为 40 min 时, R2 仍能完全氧化 As^{III} , 氧化效率高于 R1 的 84%. 反应器内填料氧化能力由下向上轴向依次减小.

(3) 在较高 t_{HR} 时, ZVI 对微生物氧化并无明显促进; 在较低 t_{HR} 时, ZVI 有益于上流式固定床反应器中微生物膜的稳定.

参考文献:

- [1] 罗婷, 景传勇. 地下水砷污染形成机制研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(1): 77-83.
- [2] HE J, CHARLET L. A review of arsenic presence in China drinking water [J]. Journal of hydrology, 2013, 492(10): 79-88.
- [3] SINGH R, SINGH S, PARIHAR P, et al. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2015, 112: 247-270.
- [4] SUN W J, SIERRA-ALVARZ R, MILNER L, et al. Arsenite and ferrous iron oxidation linked to chemolithotrophic denitrification for the immobilization of arsenic in anoxic environments [J]. Environmental science and technology, 2009, 43(17): 6585-6591.
- [5] 王岩, 刘奉滨, 郎龙麒, 等. 三价砷对 SBRs 反应系统中活性污泥的影响研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(5): 109-112.
- [6] 王鸣涛, 李腾, 朱迟, 等. MIE-X-DOC 离子交换树脂的饮用水除砷研究 [J]. 化学与生物工程, 2012, 29(3): 71-74.
- [7] NGUYEN C M, BANG S, CHO J, et al. Performance and mechanism of arsenic removal from water by a nanofiltration membrane [J]. Desalination, 2009, 245(1): 82-94.
- [8] 赵雅光, 万俊峰, 刘奉滨, 等. 零价铁(ZVI)治理水体砷污染研究进展 [J]. 环境化学, 2013, 66(10): 1943-1949.
- [9] MANNING B A, FENDORF S E, BOSTICK B, et al. Arsenic(III) oxidation and arsenic(V) adsorption reactions on synthetic birnessite [J]. Environmental science and technology, 2002, 36(5): 976-981.
- [10] 洪斌. 微生物对砷的地球化学行为的影响: 暨地下水砷污染机制的最新研究进展 [J]. 地球科学进

- 展, 2006, 21(1): 77–82.
- [11] SUN H, WANG L, ZHANG R, et al. Treatment of groundwater polluted by arsenic compounds by zero valent iron [J]. Journal of hazard mater, 2006, 129 (1/3): 297–303.
- [12] BITERNA M, ANTONOGLU L, LAZOU E, et al. Arsenite removal from waters by zero valent iron: batch and column tests [J]. Chemosphere, 2010, 78(1): 7–12.
- [13] LEUPIN O X, HUG S J, BADRUZZAMAN A B M. Arsenic removal from bangladesh tube well water with filter columns containing zerovalent iron filings and sand [J]. Environmental science and technology, 2005, 39(20): 8032–8037.
- [14] WAN J, KLEIN J, SIMON S, et al. As^{III} oxidation by thiomonas arsenivorans in up-flow fixed-bed reactors coupled to as sequestration onto zero-valent iron-coated sand [J]. Water research, 2010, 44 (17): 5098–5108.
- [15] MICHON J, DAGOT C, DELUCHAT V, et al. As (III) biological oxidation by CAsO1 consortium in fixed-bed reactors [J]. Process biochemistry, 2010, 45(2): 171–178.
- [16] KOKUSHO T. Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread [J]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering, 1999, 125 (10): 817–826.
- [17] LIEN H L, WILKIN R T. High-level arsenite removal from groundwater by zero-valent iron [J]. Chemosphere, 2005, 59(3): 377–386.
- [18] LI H, ZENG X C, HE Z, et al. Long-term performance of rapid oxidation of arsenite in simulated groundwater using a population of arsenite-oxidizing microorganisms in a bioreactor [J]. Water research, 2016, 101: 393–401.
- [19] DASTIDAR A, WANG Y T. Modeling arsenite oxidation by chemoautotrophic thiomonas arsenivorans strain b6 in a packed-bed bioreactor [J]. Science total environmental, 2012, 432: 113–121.
- [20] SUN W J, ALVAREZ R S, FIELD J A. The role of denitrification on arsenite oxidation and arsenic mobility in an anoxic sediment column model with activated alumina [J]. Biotechnology and bioengineering, 2010, 107(5): 786–794.

Effect of ZVI on Microbial Oxidation of As^{III} in Up-flow Fixed Bed

WAN Junfeng, CAI Lifang, ZHANG Yucong, WANG Yan

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

Abstract: The possible effects of microbial oxidation and removal of As^{III} in the presence of zero valent iron (ZVI) were studied. Quartz sand and that loaded with ZVI were filled into two up-flow fixed-bed reactors (R1 and R2) as support materials and microorganisms were inoculated and domesticated. The regularity of microbial oxidation of As^{III} was studied with varied hydraulic retention time t_{HR} . The results showed that we could get the highest capacity of microbial oxidation at the bottom of the reactors. At higher t_{HR} , almost 100% of As^{III} was oxidized in R1 and R2. When t_{HR} was changed to 0.67 h, R2 exhibited higher oxidation performance than R1. The presence of ZVI was more favorable for microbial oxidation of As^{III}.

Key words: groundwater; arsenite; microbial oxidation; zero valent iron; hydraulic retention time

基于 CFD 的电动汽车驱动电机冷却流道对比研究

沈超¹,余鹏¹,杨建中¹,张东伟²,魏新利²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 根据电动汽车驱动电机的冷却特点,提出了一种新型冷却结构:周向多螺旋结构,建立了机壳内部流体的流动与换热三维数值模型,应用 CFD 技术对机壳在不同水冷方案下的流场和温度场进行耦合计算。计算结果显示,周向“Z”字形流道结构的均温性和冷却效果良好,但压力损失较大,适用于电动汽车 135 kW 驱动电机在进口水温为 65 ℃ 条件下的冷却,其最佳冷却水流量为 9.8 L/min;周向多螺旋结构流道压阻小,可考虑用于更大功率密度的电机冷却。该研究为小体积、高功率密度的电机冷却设计及优化提供理论基础。

关键词: 电机冷却; CFD; 数值模拟

中图分类号: TM301.4

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.003

0 前言

驱动电机作为电动汽车的核心动力输出构件,具有体积小、功率大、转速高等特点,但发热量大、散热面积小、冷却水温高,将导致电机的温升增加,给高功率密度电机的运行可靠性和使用寿命带来巨大威胁^[1-3]。因此,选择合适的冷却方案,对于该驱动电机的安全稳定运行具有重大意义。目前,电机冷却根据冷却介质的不同分为风冷和液冷等。风冷方式多用于功率密度不大的电机;液冷方式冷却能力强,能够较好地解决高功率密度电机的散热问题,而水取材方便,成本低廉。

目前,国内外一些学者对电机的冷却方式进行了研究并取得了相关成果。王晓远等^[3]利用计算流体力学(CFD)和热场比较轴向型、周向型、螺旋型3种水冷方式,结合冷却效果、水泵功率及工艺等多方面综合比较并选择最优水路结构:螺旋型水路,应用此水路作为85 kW高功率密度电机的机壳内部水冷方式,并采用样机进行试验验证了CFD流固耦合仿真的可行性。Lu等^[4]建立热网络模型和有限元模型研究了永磁

直线电机在水冷条件下的温度特性,发现采用水冷系统可大大降低电机温升从而提高永磁直线电机的推力密度。Pechanek等^[5]应用CFD技术分析轴向结构和圆周结构两种水道结构对于电动汽车用电机的冷却效果,研究表明相同条件下轴向结构的冷却水温升较小,但压力损失却是圆周结构的6倍。Ye等^[6]对比分析4种流道结构:圆周结构、螺旋结构、半螺旋结构、轴向结构,综合考虑流阻大小和冷却效率的影响,发现圆周结构更适用于水冷驱动电机的冷却。程树康等^[7]分析了风冷、水冷周向螺旋槽道和轴向槽道结构及不同冷却介质对4 kW微型电动车用感应电机温升的影响,发现风冷结构电机各部位温升明显高于水冷结构,水冷结构更适用于微型电动车电机的冷却,周向螺旋槽水路结构电机温升稍低于轴向槽道结构,但温升相差不大。从现有研究来看,目前专家学者对于常规电机和功率密度较大的电机的冷却研究已较为成熟,但对于小体积、大功率密度以及冷却条件恶劣的电动汽车驱动电机的冷却少有研究,且研究方法多采用数值模拟方法。相较于理论分析和物理试验研究,数值模拟成本低、可信度高,对于复杂工况下产品的设计更具有指导

收稿日期:2017-04-31; 修订日期:2017-06-21

基金项目:河南省科技攻关项目(082102280010; 152102210035); 郑州大学优秀青年发展基金(1421322060); 河南省科技厅基础与前沿研究计划项目(152300410042)

作者简介:沈超(1980—),男,河南商丘人,郑州大学副教授,博士,主要从事微通道换热器及强化换热的研究, E-mail: shenchao@zzu.edu.cn.

意义^[8].

笔者针对电动汽车 135 kW 驱动电机在冷却水进口温度为 65 ℃ 条件下的散热问题,提出了一种新型冷却结构:周向多螺旋结构,为小体积、高功率密度的电机冷却设计及优化提供理论基础.

1 数值模型

1.1 电机机壳模型

驱动电机额定功率为 135 kW,转速为 10 000 r/min,整机质量小于 10 kg,功率密度大于 13.5 kW/kg,目前国内学者研究的水冷高功率密度电机的功率密度大多在 3 kW/kg 以内^[9-11]. 该电机由外部机壳,定子、转子等部件构成,为了简化分析,忽略定子、转子等部件的影响,重点分析水道结构对机壳内壁面温升的影响,机壳结构和尺寸如图 1 所示,中间部分即阴影区域为转子所在区域. 目前国内生产和使用的电机以 Y 系列为主,占据市场 90% 以上的份额,其效率平均值为 87.3%,YX3 高效电机的效率平均值为 90.3%,YE3 超高效电机的效率平均值为 91.7%,高效和超高效电机在市场上占有率不足 3%^[12-13]. 该电动汽车驱动电机属于高效电机,电机效率取 90%,因此转子散热量取驱动电机功率的 10%,即为 13.5 kW.

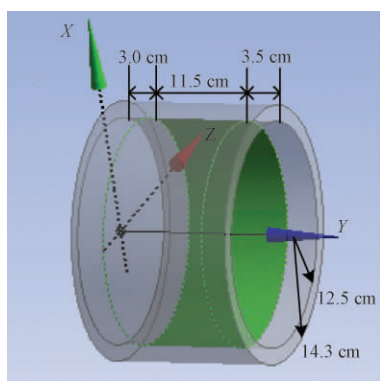


图 1 驱动电机机壳模型

Fig. 1 The model of drive motor shell

1.2 冷却水流道模型及网格处理

根据机壳模型参数,建立带有冷却流道的机壳三维模型,如图 2 所示. 图 2(a) 为双通道周向“Z”字形结构,单个通道尺寸为 10 mm × 8 mm,为减小流动阻力,对矩形通道边角进行圆角处理,圆角半径为 1 mm. 为降低加工成本,机壳采用铝板冲孔卷焊而成,进水口和出水口附近为焊接板. 图 2(b) 为周向多螺旋结构,机壳两端设有宽为 20 mm、深为 10 mm 的分水槽和集水槽,两者之间

有沿柱面斜向扫掠的 10 mm × 1 mm 通道,此流道为同程式结构. 流道进水口和出水口内径均为 12 mm.

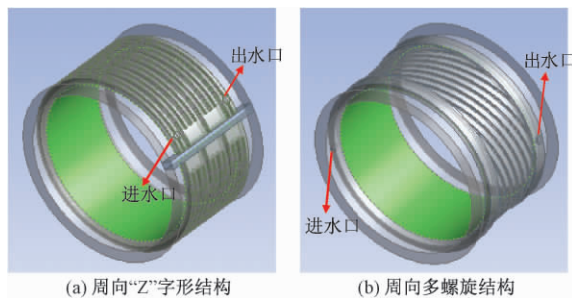


图 2 带有流道的机壳模型

Fig. 2 The model of motor shell with flow channel

利用 ANSYS Workbench 中的 Mesh 网格划分技术对两种不同结构的机壳模型分别进行网格划分,网格采用以四面体为主的结构,为了增加计算精度,在接近流道的内壁面处基于平滑过渡的形式划分了 5 层边界层网格. 根据冷却流道的最小尺寸确定最小网格尺寸为 1 mm,通过改变最大面网格尺寸获得了网格单元数不同的网格以验证网格的独立性. 将划分好的网格导入 ANSYS Fluent 进行计算,在现有研究中,能量方程的残差小于 10^{-6} ,连续性方程、速度分量、 k 和 ε 的残差均小于 10^{-3} ,即可认为计算收敛. 在冷却水流量为 10 L/min 时,网格独立性考核结果如表 1 所示. 随着网格单元数的增加,出口平均水温、内壁面最高温度、进出口压差的偏差均逐渐减小,但同时考虑到网格单元数的增加会导致计算量的增加,因此,经过综合考虑,选择进行数值计算的网格模型为双通道周向“Z”字形结构机壳模型,其网格单元数为 12 902 737,周向多螺旋结构机壳模型网格单元数为 10 821 635.

1.3 边界条件

热流密度:

$$q = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

式中: P 为电机发热功率, W; A 为散热面积, m^2 .

为了简化计算,转子散热量视为均布在转子所在区域,散热量为 13.5 kW,散热面积为直径 250 mm、宽 115 mm 的圆周面,其热流密度为 $149\,543\text{ W/m}^2$.

冷却水量:

$$m = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

式中: Q 为电机运行时单位时间内的散热量, W;

表1 网格独立性考核结果
Tab.1 Grid-independence results

流道结构	最大面网格尺寸/ mm	网格单元数	出口平均水温/ ℃	内壁面最高温度/ ℃	进出口压差/ Pa
周向“Z”字形结构	22	10 117 462	85.84	98.47	18 612.14
	20	12 902 737	84.69	99.30	18 420.81
	18	14 012 731	84.65	99.34	18 411.79
周向多螺旋结构	22	7 871 329	85.12	109.28	3 543.21
	20	10 821 635	84.75	111.16	3 481.16
	18	12 184 359	84.71	111.14	3 478.87

C_p 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; Δt 为冷却水的进出口温差, $^{\circ}\text{C}$, 这里取 20°C 。

利用上式可计算出冷却水量为 $9.6\text{ L}/\text{min}$, 本研究取 $10\text{ L}/\text{min}$ 。

为了达到较佳的冷却效果, 应使冷却水的流动状态为湍流, 则表征流体流动状态的无量纲参数雷诺数应满足 $Re > 2\,320$ [14]。

$$Re = \frac{\rho U d}{\eta}, \quad (3)$$

式中: U 为流体速度, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; d 为等效水力直径, 对于圆形管道, 其值为圆管内部直径, m ; η 为定性温度下水的动力黏度, $10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

应用 NIST REFPROP 软件可得到水在 65°C 条件下的参数如表 2 所示, 进水口为直径 12 mm 的圆管, 则流态为湍流时的临界流速为 $0.085\text{ m}/\text{s}$ 。标准 $k-\epsilon$ 模型是被广为使用的求解湍流问题的模型, 因此笔者选取该模型进行求解。

表2 水在 65°C 时的物性参数

Tab.2 Physical properties of water at 65°C

温度 $t/$ $^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $C_p/$ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	动力黏度 $\eta/$ $(10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s})$
65	980.5	4.187 3	0.432 9

进口流速:

$$v = \frac{q}{A}, \quad (4)$$

式中: q 为体积流量, m^3/s ; A 为进口截面积, m^2 。

进口为速度进口边界条件, 进口截面为直径 12 mm 的圆, 则进口流速为 $1.474\text{ m}/\text{s}$ ($> 0.085\text{ m}/\text{s}$), 进口温度为 65°C ; 出口为压力出口边界条件, 模拟过程中不考虑机壳与外界之间的热交换。产品要求机壳内壁面最高温度不超过 100°C 。

3 结果与分析

通过计算得到体积流量为 $10\text{ L}/\text{min}$ 时, 两种流道结构机壳内冷却水的温度分布如图 3 所示。

周向“Z”字形结构机壳内的水温在轴向上呈梯度分布, 其径向温度变化不大。周向多螺旋结构流道机壳内的水温在底部的分水槽内出现局部高温, 均温性较差。两者水温在水的流动方向上均呈上升趋势。

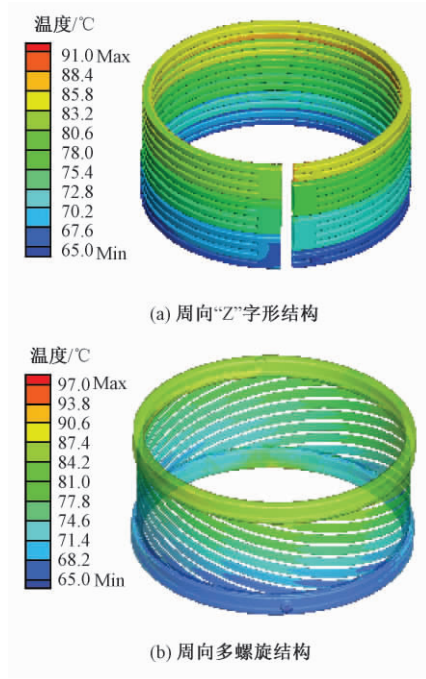


图3 机壳流道内冷却水的温度分布

Fig.3 Temperature distribution of cooling water in the channels of the motor shell

两种流道结构机壳内壁面的温度分布如图 4 所示。周向“Z”字形结构水温随着水的流程增加而升高, 最高温度出现在末端拐角处。其径向温差较小, 虽然在轴向上存在一定的温度梯度, 但其水路平滑, 接触面积较大, 整体冷却效果较好, 温度分布较为理想。周向多螺旋结构流道机壳虽然流程较短, 但在分水槽部分存在较大温差, 导致分水槽和集水槽地区出现局部高温, 整个机壳内壁面温度分布不均。

两种流道结构机壳内流道的压力分布如图 5 所示。周向“Z”字形结构存在较多拐角, 压力损失

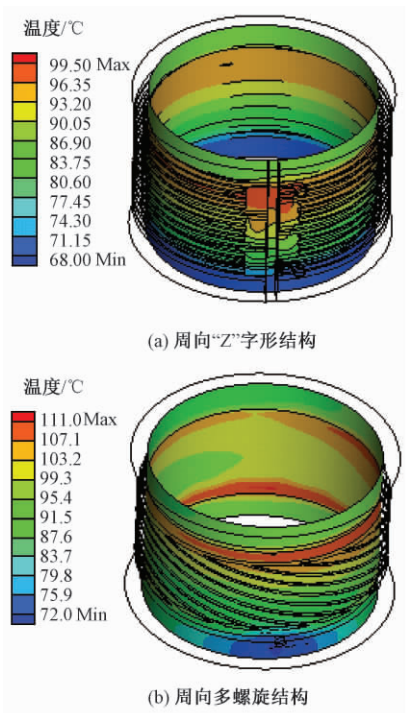


图4 机壳内壁面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution on the inner wall of the motor shell

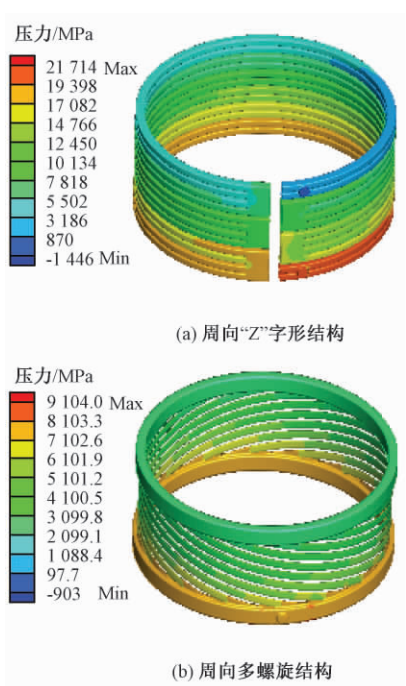


图5 机壳内渠道压力分布图

Fig. 5 Pressure distribution in the channels of the motor shell

较大,容易形成漩涡造成水流状态不稳定,而周向多螺旋结构为同程式结构,压力损失较小.两种结构在轴向上均存在较大的压力梯度,且压力损失随水的流程增加而增大.

利用 Fluent 数据处理技术可得到周向“Z”字形结构流道的总换热面积为 5.24 m^2 ,而周向多螺旋结构流道的总换热面积仅为 1.21 m^2 ,若增大周向多螺旋结构流道尺寸,虽可进一步降低压力损失,但也会造成入口效应的增强,不利于水在流道内的均匀分布.因此,周向“Z”字形流道结构更适于该驱动电机的冷却.

改变冷却水进口流量,两种流道结构的进出口压差与进口流量的关系如图6所示,随着进口流量的增加,周向“Z”字形流道压力损失量急剧增加,而周向多螺旋结构压力损失增长相对平缓且压力损失较小.由此可见,虽然周向“Z”字形流道结构冷却效果较好,但对于同样大小、同种结构的电机,增大电机的功率势必会造成压力损失的增大,相应带来水泵的驱动功率大幅度提高且电机机壳也需增厚,从而增加运行成本和结构设计的难度.而多螺旋流道结构虽然冷却效果相对较差,但压力损失较小,即使增大进口流量也不会带来太大的压力损失,对机壳抗压能力要求也不高,因此对于同样大小、同种结构的电机增大驱动功率的时候具有更强的适应性.

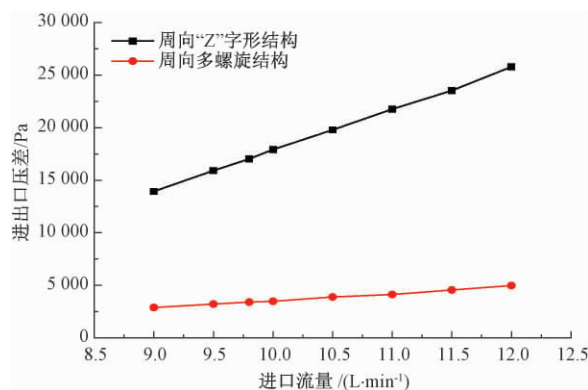


图6 进出口压差与进口流量关系

Fig. 6 Pressure difference between inlet and outlet Vs the inlet flow

图7给出了周向“Z”字形流道结构机壳的温度与进口流量的关系.从图中可以看出,出水口平均水温、内壁面最高温度和平均温度均随进口流量的增加而降低,当进口流量为 9.8 L/min 时,出水口平均水温不超过 85°C ,内壁面最高温度不超过 100°C ,此时既能达到冷却要求又使冷却水用量较少.电机处于热平衡状态时,出水口平均水温均在 85°C 左右,温升变化范围在 $13 \sim 22^\circ\text{C}$ 之间,与计算时选用的冷却水的进出口温差 20°C 相差不大,说明数值模拟结果与实际情况相接近.当进水口冷却水量最大为 12 L/min 时,电机出口水温

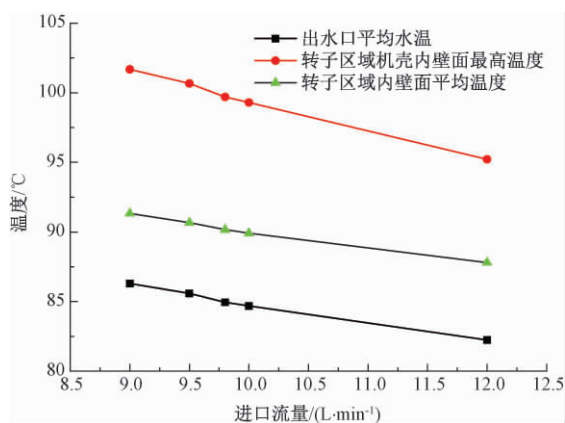


图7 温度与进口流量关系

Fig. 7 Temperature Vs the inlet flow

温升最小为 13 °C, 冷却效果最好, 但压力损失也最大, 同样也会带来密封困难、加工成本增加等问题。

综上所述, 周向“Z”字形流道对于小体积大功率电机在冷却水温较高时的冷却具有良好效果, 周向多螺旋结构流道虽然对于该大功率密度电机的冷却效果较差, 但压力损失较小, 可考虑用于功率密度更大的电机的冷却。

4 结论

(1) 周向“Z”字形流道结构水温在轴向上呈梯度分布, 径向上水温变化不大, 内壁面温度分布较为均匀, 冷却效果较好, 但压力损失较大; 周向多螺旋结构流道在分水槽和集水槽部位出现局部高温, 均温性和冷却效果较差, 但压力损失较小。对于电动汽车 135 kW 驱动电机, 可采用周向“Z”字形流道结构进行冷却, 9.8 L/min 为最佳冷却水流量。

(2) 周向“Z”字形流道对于小体积大功率电机在冷却水温较高时的冷却具有良好效果, 周向多螺旋结构流道虽然对于该电机的冷却效果较差, 但其压阻小, 可考虑用于更大功率密度的电机的冷却。该研究为小体积、高功率密度的电机冷却设计及优化提供理论基础。

参考文献:

[1] 王晓远, 高鹏, 赵玉双. 电动汽车用高功率密度电

机关键技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 53-59.

[2] 李立毅, 张江鹏, 闫海媛, 等. 高功率密度电机三维温度场计算及导热优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3642-3650.

[3] 王晓远, 杜静娟. 应用 CFD 流固耦合热分析车用高功率密度电机的水冷系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 30-38.

[4] LU Q, ZHANG X, CHEN Y, et al. Modeling and investigation of thermal characteristics of a water-cooled permanent-magnet linear motor[J]. IEEE transactions on industry applications, 2015, 51(3): 2086-2096.

[5] PECHANEK R, BOUZEK L. Analyzing of two types water cooling electric motors using computational fluid dynamics[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Novi Sad: IEEE, 2012: 4-6.

[6] YE Z N, LUO W D, ZHANG W M, et al. Simulative analysis of traction motor cooling system based on cfd[C]//International Conference on Electric Information and Control Engineering. Wuhan: IEEE, 2011: 746-749.

[7] 程树康, 李翠萍, 柴凤. 不同冷却结构的微型电动车用感应电机三维稳态温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 82-90.

[8] 梅丽芳, 陈由海, 严东兵, 等. 激光焊接熔池特性的三维数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 85-89.

[9] 刘云飞. 电动汽车用高功率密度电机散热分析[D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2014.

[10] 温典. 高功率密度纯电动汽车用永磁同步电机的研究[D]. 北京: 北京交通大学电气工程学院, 2013.

[11] 沈启平. 车用高功率密度永磁同步电机的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 2012.

[12] 李超, 谷佳琪, 苏雅, 等. 高效电机的节能经济分析及应用[J]. 能源与节能, 2015(1): 78-80.

[13] 王爱华. 世界主要国家的高效电机及其标准[J]. 电机技术, 2013(4): 40-43.

[14] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

(下转第 69 页)

文章编号:1671-6833(2018)04-0046-05

反应时间和碳磷比对单级好氧除磷的影响

彭赵旭, 韩 微, 彭志远, 雷志超, 陈 干

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了研究单级好氧除磷工艺的影响因素, 采用序批式间歇反应器(SBR), 通过设定不同的反应时间和进水碳磷比(质量比), 考察了单级好氧过程中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度、聚- β -羟基丁酸盐(PHB)以及 DO、ORP 等参数的变化. 结果表明, 在 DO 浓度低于 0.6 mg/L 的单级好氧系统中, 存在着稳定的生物除磷现象. 进水末期污泥中的 PHB 含量与放磷量近似成正比, 且适当地缩短反应时间有助于强化除磷效果. 碳磷比与除磷的关系比较复杂, 当 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度恒定时, 增加碳磷比可显著强化放磷和吸磷过程; 当碳源浓度恒定时, 增加碳磷比对强化除磷的作用有限. ORP 的变化趋势能够清楚地指示除磷的过程, 当 ORP 小于 -150 mV 时, 系统会发生显著的磷释放. 在低溶解氧环境下, 传质受限产生的厌氧微环境是发生单级好氧生物除磷的重要原因.

关键词: 生物除磷; 单级好氧; 碳磷比; 低溶解氧; ORP

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.007

0 引言

传统理论认为生物除磷需要在交替的厌氧、好氧环境中进行. 厌氧时聚磷菌(PAOs)吸收挥发性脂肪酸(VFAs)合成聚- β -羟基丁酸盐(PHB), 同时水解体内多聚磷酸盐放磷; 好氧时, PAOs 氧化 PHB 合成糖原, 同时吸磷生成多聚磷酸盐. 由于吸磷量远大于放磷量, 因此通过排放剩余污泥可以实现除磷^[1]. 近年来, 很多研究发现单级好氧条件下也能够实现生物除磷^[2]. 杨帆等^[3]指出其主要原因是微生物对储能物质的消耗和存贮过程与传统途径存在差异. Wang 等^[4]发现单级好氧运行时糖原能够代替 PHB 为吸磷过程提供能量, 但是目前还没有单级好氧生物除磷实际应用的案例^[5]. 如果能够实现, 再结合好氧环境下的同步硝化反硝化等技术, 势必会开发出新型的生物脱氮除磷工艺. 笔者通过考察好氧时间和碳磷比这两个主要参数对单级好氧除磷工艺的影响, 旨在为其实际应用提供理论支持与技术指导.

1 材料与方法

1.1 试验用水来源和水质

试验采用人工配水, 理论上认为微生物体内的碳磷比为 100:1. 为了强化除磷, 配水时加入了更多的磷. 具体配方为每升水中添加 0.33 ~ 1.32 g $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 0.17 g NH_4Cl , 0.02 ~ 0.04 g KH_2PO_4 , 0.38 g NaHCO_3 , 0.04 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.08 g MgSO_4 和 0.3 mL 营养液^[6]. 主要水质成分及其浓度如表 1 所示.

表 1 废水水质

Tab. 1 Water quality of wastewater

水质参数	COD	BOD ₅	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	碱度 (CaCO_3 计)
浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	163 ~ 654	105 ~ 420	43.7	4.3 ~ 8.6	400

1.2 试验装置和方法

SBR 反应器上部为圆柱形, 下部为圆锥体, 总有效容积 12 L. 每周期由进水(3 L, 进水时曝气)、曝气、沉淀、滗水和闲置组成. 曝气末段排放

收稿日期:2017-03-10; 修订日期:2017-05-20

基金项目:高等学校重点科研项目(17A560029)

作者简介:彭赵旭(1983—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事污水脱氮除磷新技术研究, E-mail: pengzhaoxu1983@163.com.

一定体积的泥水混合液来控制污泥浓度. 采用 7 个 SBR 反应器进行试验, 通过调节反应时间和碳磷比来考察单级好氧除磷过程的变化, 具体方式见表 2, 其中 BOD_5 表示 5 d 生化需氧量. 用 SBR1、SBR2 和 SBR3 来研究反应时间的影响; 用

SBR3、SBR4、SBR5、SBR1、SBR6、SBR7 分别研究 $PO_4^{3-}-P$ 浓度恒定和碳源浓度恒定时碳磷比的影响. 种泥取自哈尔滨文昌污水处理厂 (AO 工艺), 均分到 7 个反应器中进行驯化, 待性能稳定后开始试验. 温度由加热棒控制在 $(21 \pm 1) ^\circ C$.

表 2 不同试验阶段的运行方式
Tab.2 Operation model under different experimental stages

反应器	进水时间/ h	好氧时间/ h	沉淀时间/ h	滗水时间/ h	闲置时间/ h	BOD_5 / ($mg \cdot L^{-1}$)	$PO_4^{3-}-P$ 的浓度 / ($mg \cdot L^{-1}$)	碳磷比
SBR1	0.5	3.5	1.0	0.5	0.5	210	4.3	48.8
SBR2	0.5	3.0	1.0	0.5	1.0	210	4.3	48.8
SBR3	0.5	2.5	1.0	0.5	1.5	210	4.3	48.8
SBR4	0.5	2.5	1.0	0.5	1.5	420	4.3	96.6
SBR5	0.5	2.5	1.0	0.5	1.5	105	4.3	24.4
SBR6	0.5	3.5	1.0	0.5	0.5	210	6.4	32.8
SBR7	0.5	3.5	1.0	0.5	0.5	210	8.6	24.4

1.3 检测分析项目

COD、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、 $PO_4^{3-}-P$ 、SV、SVI 和 MLSS 等均采用国家标准方法测定^[7]. DO(溶解氧)、pH 值和 ORP(氧化还原电位) 用 WTW 340i 溶解氧仪在线检测. PHB 采用气相色谱法, 具体操作过程见 Wang 等^[4] 介绍的方法. 微生物相采用 OLYMPUS BX51 型光学显微镜观察.

2 结果与讨论

2.1 反应时间对单级好氧除磷的影响

改变反应时间主要影响活性污泥中的微生物种类, 而改变碳磷比主要影响好氧除磷的代谢途径, 因此本研究仅考察当碳磷比为 48.8 时反应时间对好氧除磷的影响. 在进水末 SBR1、SBR2、SBR3 中的磷浓度分别为 13.81、14.88、15.97 mg/L ; 在好氧末段, SBR1、SBR2、SBR3 中磷浓度分别为 2.56、0.37、0.57 mg/L , 且除磷性能随反应时间减小而略有增强(图 1 所示). 其主要原因是污泥龄不同, 3 组反应器的 SRT 分别为 10.00、8.75、7.50 d, 较小的 SRT 更有助于 PAOs 的富集, 提高除磷效率.

虽然是单级好氧运行, 但是每周期初期均发生了明显的放磷现象. 这是因为在电子受体与电子供体共同存在时, 部分 PAOs 可以直接从氧化 COD 的过程中获得能量^[8], 以保证放磷的进行. 另外在进水阶段碳源浓度较高, PAOs 吸收乙酸合成 PHB 的过程也会伴随着放磷. 进水末期 SBR1、SBR2、SBR3 中平均每克 MLVSS 中含有 7.88、9.51、10.16 mg 的 PHB.

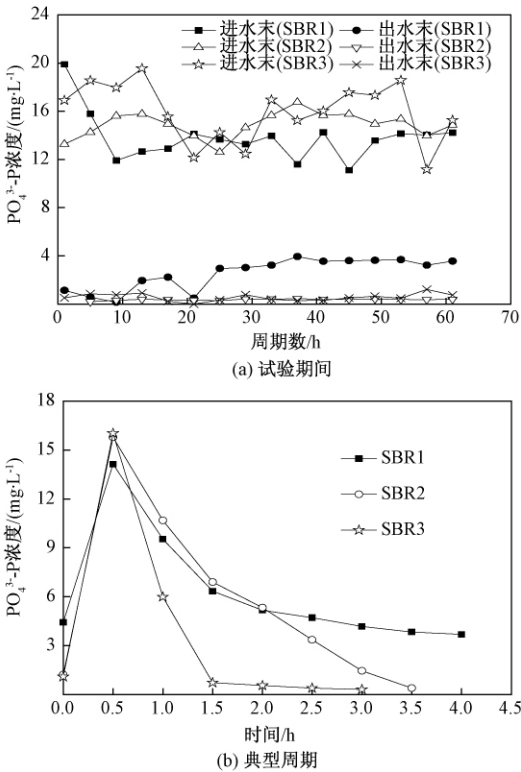


图 1 反应时间对单级好氧除磷的影响
Fig.1 Impacts of reaction time on single-stage aerobic phosphorus removal process

PHB 的产生常伴随着微生物的进食和饥饿, 该过程是微生物强化碳源贮存作用的体现^[9]. 除 PAOs 之外, Microthrix parvicella 和 Nostocoida limicola II 等常见于污泥膨胀和污泥泡沫中的菌, 也有强大的有机物贮存能力^[9]. 这些丝状菌都非常适应好氧环境, 因此污泥沉降性均出现了恶化.

生物除磷中吸收单位乙酸所释放的磷取决于

混合液 pH 值、PAOs 体内多聚磷酸盐含量、糖原含量等许多因素^[1]. 本试验 SBR1、SBR2、SBR3 吸磷/放磷的平均比值分别为 1.07、1.12、1.11, 而一般厌氧/好氧除磷系统中该值可达 2.0^[10]. 这是因为与合成 PHB 相比, 合成糖原需要降解的多聚磷酸盐较少. 在单级好氧条件下, 乙酸主要用于糖原等细胞内化合物的合成, 故影响了吸磷表现^[10].

2.2 碳磷比对单级好氧除磷的影响

2.2.1 磷浓度恒定

在磷浓度恒定时, 通过改变碳源控制 SBR4、SBR3、SBR5 的进水碳磷比分别为 96.6、48.8、24.4, 除磷性能随碳磷比的增加显著增强(图2所示). 进水末期 SBR4、SBR3、SBR5 中平均每克 MLVSS 中含有 22.09、10.16、6.34 mg 的 PHB, 对应的放磷量为 436.06、169.23、94.56 mg, 两者近似成正比. 进一步分析发现, 停止进水后放磷迅速减弱, 吸磷逐渐增强, 且吸磷主要是在 PHB 含量较充足的情况下进行的, 在好氧末期 PHB 含量已很有限, 吸磷过程趋于停滞.

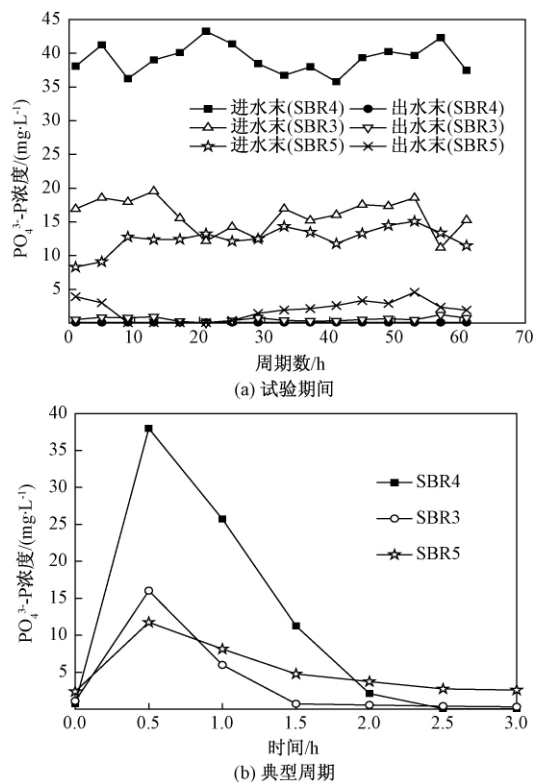


图2 碳磷比对单级好氧除磷的影响(磷浓度恒定)

Fig.2 Impacts of C to P ratio on single-stage aerobic phosphorus removal process (phosphorus concentration constant)

细胞中的碳磷比在 100 左右, SBR4 的进水碳磷比高达 96.6, 其磷主要是通过同化作用去除

的. 而 SBR5 的进水碳磷比仅为 24.4, 虽然生物除磷现象较弱, 但是磷主要是通过 PAOs 的过量吸收去除的. 其原因是低碳磷的条件有助于 PAOs 在和聚糖菌(GAOs)的竞争中获得优势^[11-12]. SBR4、SBR3 和 SBR5 中好氧吸磷/放磷比分别为 1.04、1.11 和 1.16, 比值越大说明 PAOs 在除磷中所起的作用越大, 也验证了上述规律.

2.2.2 BOD₅ 浓度恒定

BOD₅ 浓度恒定, 通过改变磷控制 SBR1、SBR6、SBR7 的进水碳磷比, 碳磷比分别为 48.8、32.8 和 24.4, 除磷性能随碳磷比的减小未出现明显变化, 出水都有不同程度的磷剩余(图3所示).

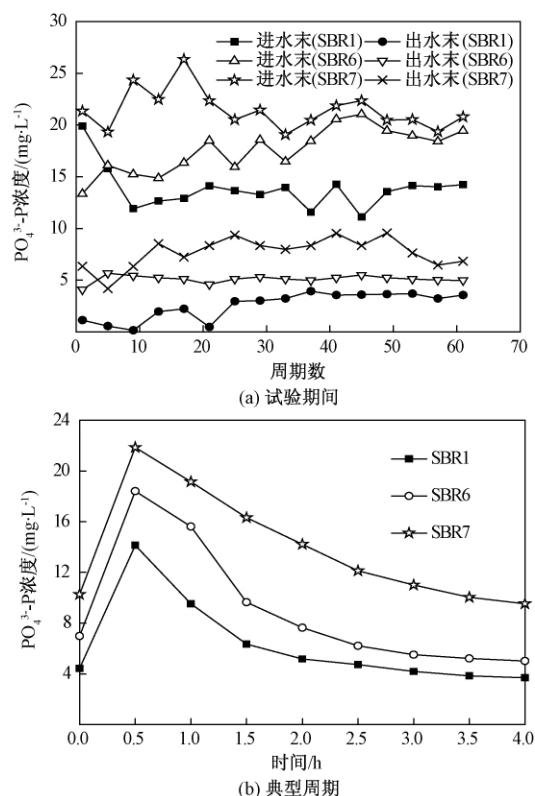


图3 碳磷比对单级好氧除磷的影响(BOD₅ 浓度恒定)

Fig.3 Impacts of C to P ratio on single-stage aerobic phosphorus removal process (BOD₅ concentration constant)

原水碳源一部分经过活性污泥吸附、氧化而被降解. 在单个周期内, COD 浓度随时间均保持在 40 mg/L 左右, 无明显波动. 另一部分碳源被吸收合成 PHB 等内碳源, 进水末期平均每克 MLVSS 中含有 7.88、8.23、8.14 mg 的 PHB. 可见当碳源相同时, 碳磷比对碳源的利用途径影响不大^[13]. 本阶段试验通过稳定碳源浓度, 改变磷浓度来调节碳磷比, 与第二阶段调节碳磷比的方式不同, 除磷性能几乎未受任何影响. SBR1、SBR6、SBR7 中好氧吸磷/放磷的比值分别为 1.07、1.15、1.12. 相比改变磷浓度, 改变碳源对除磷的影响更大.

2.3 单级好氧除磷的原因

本试验各单级好氧系统都出现了生物除磷迹象,且在 SRT 小于 7.5 d,碳磷比大于 24.4 时还近似实现了完全去除。深入分析每周期在线参数的变化,发现存在一些共性规律,DO 和 ORP 的变化如图 4 所示。从图 4 中可见,平均 DO 浓度均在小于 0.6 mg/L 的低水平。受传质阻力的影响,氧在向活性污泥内部扩散时会受到强烈抑制,从而在絮体内部形成厌氧微环境^[14]。

ORP 能够反映混合液的氧化还原状态,在生物除磷系统中,还与除磷进程关系密切。一般来说,放磷过程伴随着 ORP 下降,吸磷过程伴随着 ORP 上升。有研究发现当 ORP 值在 $-80 \sim -150$ mV 时,会发生明显的磷释放^[15]。结合图 2 (b)、图 3 (b) 与图 4 (b) 分析可见,本试验每周期的 ORP 数值也呈现出先下降后上升的趋势。在进水阶段 ORP 一直处于下降状态,至进水末期均低于 -150 mV,且都发生了显著放磷。进水结束后随着好氧反应的进行,ORP 逐渐升高,至好氧末期都超过了 0 mV。但是 ORP 数值与吸磷过程的进展程度之间并无明显关系,因为 ORP 主要反映的是环境的氧化还原状态,而吸磷的过程除了需要有电子受体之外,还与 PAOs 体内的 PHB 含量、糖原含量等因素有关。

本试验的 DO 浓度已经控制在很低水平,通过进一步降低 DO 浓度来强化单级好氧除磷已很有限。一般来说,进水方式会对活性污泥贮存有机物的过程产生显著影响,进水时间越短越有助于强化贮存作用,而强化贮存作用会促进合成 PHB,进而影响以乙酸为底物生物除磷系统的性能。本试验进水采用一段式连续进水,进水时间集中但是强度有限。若在适当提高进水强度的情况下采用多段式进水,很可能是合理利用碳源强化单级好氧除磷的有效方法,这还需要进一步的研究。

3 结论

(1) 在 DO 浓度低于 0.6 mg/L 的单级好氧系统中,存在着显著的生物除磷,且在 SRT 小于 7.5 d,碳磷比大于 24.4 的情况下还近似实现了完全除磷。

(2) 在好氧段无过度曝气的情况下,缩短曝气时间有助于小幅度地强化生物除磷。进水末期活性污泥中的 PHB 含量与进水时的放磷量近似成正比。

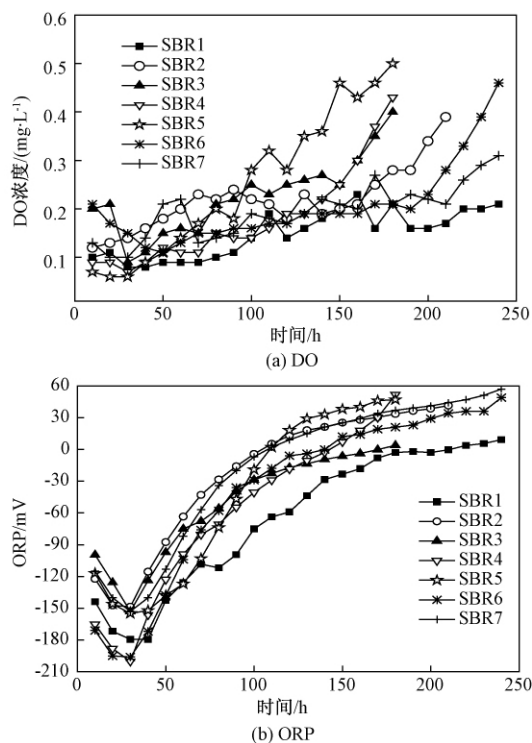


图4 典型周期中 DO 和 ORP 的变化

Fig. 4 Variations of DO and ORP in a representative cycle

(3) 碳源浓度是影响生物除磷的重要因素。当磷浓度恒定时,增加进水碳磷比能够显著强化生物除磷效果;当碳源浓度恒定时,增加进水碳磷比对除磷效果影响有限。

(4) 在以乙酸做唯一有机底物的情况下,低溶解氧环境中传质受限产生的厌氧微环境是导致单级好氧生物除磷发生的重要原因。

参考文献:

- [1] MINO T, VAN LOOSDRECHT M C M, HEIJNEN J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process [J]. Water research, 1998, 32 (11): 3193-3207.
- [2] 陈滢,彭永臻,杨向平,等. 低溶解氧 SBR 除磷工艺研究 [J]. 中国给水排水, 2004, 20 (8): 40-42.
- [3] 杨帆,王冬波,李小明,等. 单级好氧除磷工艺与厌氧/好氧除磷工艺的对比研究 [J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3379-3385.
- [4] WANG D B, LI X M, YANG Q, et al. The probable metabolic relation between phosphate uptake and energy storages formations under single-stage oxic condition [J]. Bioresource technology, 2009, 100 (17): 4005-4011.
- [5] 杨帆. 单级好氧除磷工艺与 A/O 除磷工艺的对比研究 [D]. 长沙: 湖南大学环境科学与工程学院, 2012.

- [6] 彭赵旭,彭澄瑶,何争光,等. 污泥龄对低氧丝状菌活性污泥微膨胀系统的影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 245–251.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [8] WACHTMEISTER A, KUBA T, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. Water research, 1997, 31(3): 471–478.
- [9] MADONI P, DAVOLI D, GIBIN G. Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated-sludge plants in Italy [J]. Water research, 2000, 34(6): 1767–1772.
- [10] HESSELMANN R P X, VON RUMMEL R, RESNICK S M, et al. Anaerobic metabolism of bacteria performing enhanced biological phosphate removal [J]. Water research, 2000, 34(11): 3487–3494.
- [11] 王榕,成鹏飞,张建,等. 碳磷比对 SND 过程污染物去除及 N_2O 释放的影响 [J]. 中国环境科学, 2014, 32(2): 378–382.
- [12] WINKLER M K H, BASSIN J P, KLEEREBEZEM R, et al. Selective sludge removal in a segregated aerobic granular biomass system as a strategy to control PAO-GAO competition at high temperatures [J]. Water research, 2011, 45(11): 3291–3299.
- [13] 史静,吕锡武,朱光灿,等. 进水碳磷比对连续流反硝化除磷工艺脱氮除磷效果的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 94–98.
- [14] LV J H, YUAN L J, CHEN X, et al. Phosphorus metabolism and population dynamics in a biological phosphate-removal system with simultaneous anaerobic phosphate stripping [J]. Chemosphere, 2014, 117(1): 715–721.
- [15] 唐玉朝,伍昌年,杨慧,等. 改良氧化沟活性污泥 ORP 的调控及对磷吸收/释放的影响 [J]. 工业水处理, 2012, 32(3): 19–22.

Impacts of Reaction Time and C to P Ratio on Single Aerobic Phosphorus Removal System

PENG-ZHAO Xu, HAN Wei, PENG Zhiyuan, LEI Zhichao, CHEN Gan

(College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to investigate the impact factors of single aerobic phosphorus removal process, sequencing batch reactor (SBR) was applied. Through altering reaction time and influent C/P, variations of PO_4^{3-} -P concentration, poly- β -hydroxybutyrate (PHB), parameters such as DO and ORP were investigated. The results showed that, when DO was below $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, stable biological phosphorus removal was existed in single aerobic system. The sludge PHB content at the end of feeding period was in proportion to the released phosphorus content, and decrease reaction time properly was helpful to enhance the phosphorus removal effect. The relation between C to P ratio and phosphorus removal was complex, when PO_4^{3-} -P concentration was constant, increase C to P ratio could enhance the processes of phosphorus release and uptake significantly; when carbon source concentration was constant, the effect of increase C to P ratio was limited. The variation tendency of ORP could distinctly indicate the phosphorus removal progress, when ORP was below -150 mV , significantly phosphorus release would happen. Under low DO condition, the micro-anaerobic environment caused by mass transfer resistance was the key reason for the take place of single biological phosphorus removal.

Key words: biological phosphorus removal; single aerobic; carbon to phosphorus ratio; low dissolved oxygen; ORP

基于隐马尔科夫模型的石油钻井事故预警方法

朱晓东¹,袁坤杰¹,王艳玲²

(1. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 信息工程学院,河南 郑州 450001)

摘要: 为了实时准确地对石油钻井过程中发生的事故进行预警,构造出一种基于连续隐马尔科夫模型(CHMM)的预警方法. 利用参数的长短期均值构造出反映原始参数趋势变化的特征量,用特征向量建立CHMM模型,通过历史数据训练CHMM模型,经前向算法得出匹配概率,并利用统计方法来确定预警系统的阈值,对于每一种钻井故障,给出了综合几个参数的预警结果判断策略. 实验证明CHMM预警模型能够更加及时有效地对钻井异常情况做出预警.

关键词: 隐马尔科夫模型; 趋势特征量提取; 钻井事故; 预警系统

中图分类号: TP29

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.011

0 引言

钻井技术是石油行业进行勘探生产的关键技术,由于专业性强、投资高、隐蔽性强等特点,钻井过程中的生产事故往往会造成经济、社会等方面的极大损失. 为此,利用大量的钻井录井数据进行事故诊断及预警得到了广泛重视^[1-2]. 神经网络、模糊系统以及数据挖掘技术都已在石油钻井事故诊断中得到了应用,提出了不同的预警模型. 在这些研究中,石油钻井过程参数的异常特征是进行预警的关键.

对石油钻井过程参数异常特征的分析,目前研究得还不够深入. 例如,文献[3]中直接使用参数滤波值及均值作为特征量,没有考虑石油钻井过程中参数变化的特点,首先是参数基准值会随着钻进深度的增加而发生变化,由此造成基于参数数值的特征量无法正常使用;其次,事故的发生和发展是一个动态变化过程,需要参数前后之间以及不同参数之间的综合判断^[4]. 针对石油钻井过程中的这些特点与要求,笔者提出了一种能够反映钻井参数趋势性变化的特征量,其具有不受参数基准值变化影响的特点;通过多个参数之间的综合判断,利用隐马尔科夫(hidden markov model, HMM)理论^[5-6]给出石油钻井过程中异常

情况的可能性,为钻井事故的判断、预警提供技术支持.

1 趋势特征量的提取算法

石油钻井过程大部分是钻进过程,在这期间发生的井涌、井漏、卡钻、堵水眼、水眼掉落等异常情况都可以通过参数的变化趋势来反映. 同时,由于不同地质条件的钻井,甚至是同一口钻井的不同深度,钻井工程参数的正常基准值也会随之相应发生变化. 比如立管压力测量值通常会由开始时的12 MPa左右增加到18 MPa,因此趋势特征量的构造必须消除基准值的影响. 趋势特征变化虽然可以通过参数的变化率来反映,但由于钻井过程中随机干扰的存在,无论是变化率区间选取还是参数滤波方法的实现都有一定的困难,因此,笔者采用另一种思路来构造趋势特征量,使之能够满足事故预警的要求.

钻井参数是一个典型的非平稳时间序列^[7],在不同的时间周期上既有随机变化过程也有一定的趋势变化,从长时间段上看其具有一种变化趋势,在短时间段上又具有随机波动性^[8-9]. 实际录井系统的采样周期为1 s,根据石油钻井过程中录井采样频率以及事故预警的时间要求,需要建立两个时间体系才能更好地反映参数的变化趋

收稿日期:2017-10-09; 修订日期:2017-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473266); 河南省产学研合作项目(142107000047)

作者简介:朱晓东(1970—),男,河南安阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事智能控制、数据挖掘等方面的研究,
E-mail: zhu_xd@zzu.edu.cn.

势^[10]. 经过试验确定短期时间窗口长度(标记为 ST) 为 60 s, 长期时间窗口(标记为 LT) 为 300 s, 能够得到较好的分析结果.

1.1 相关概念及定义

定义 1 长短期均值: 当前点前 ST 秒时间窗口内的数据均值作为该点的短期时间窗口均值, 称之为短期均值(标记为 STM), 当前点前 LT 秒时间窗口内的数据均值作为该点的长期时间窗口均值, 称之为长期均值(标记为 LTM).

$$STM(j) = \frac{1}{ST} \sum_{i=j-ST}^{j-1} x_i; \quad (1)$$

$$LTM(j) = \frac{1}{LT} \sum_{i=j-LT}^{j-1} x_i, \quad (2)$$

式中: $STM(j)$ 为当前点的短期均值; $LTM(j)$ 为当前点的长期均值; x_i 为当前点前 ST 或者 LT 时间段内的数据值.

定义 2 长短期均值差: 即长期均值与短期均值的差值, 标记为 DM .

$$DM(j) = STM(j) - LTM(j), \quad (3)$$

式中: $DM(j)$ 为当前点的长短期均值差.

长短期均值差属于数据的相对值, 笔者所取的短期窗口 ST 长度大于变量随机波动的周期, 由此, 当变量趋势向上时, 短期均值始终会大于长期均值, 而当变量趋势向下时, 则短期均值会始终小于长期均值, 因此可以利用变量数据的长短期均值差来表征变量的变化趋势. 变量的长短期均值差基本上在零轴上下变化. 当均值差持续大于零时, 说明变量为增大趋势; 当均值差持续小于零时, 说明变量为下降趋势. 为表征趋势变化的大小, 还需要对长短期均值差做进一步处理.

定义 3 长短期均值差的动态和: 将当前点前长短期均值差连续大于零或小于零的部分分别累加, 作为长短期均值差的动态和(标记为 DM_s). 若当前点与前一点的 DM 同时大于零或者同时小于零, 则该点的 DM_s 等于前一点的 DM_s 加上该点的 DM ; 若当前点的 DM 和前一点的 DM 符号不同或者当前点的 DM 为零, 则该点的 DM_s 就是该点的 DM . DM_s 通过一个特定的数来表示数据变化的趋势, 并且屏蔽了参数基准值的影响.

$$DM_s(j) = \begin{cases} DM(j) + DM_s(j-1), & DM(j) \cdot DM(j-1) > 0; \\ DM(j), & \text{else.} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $DM_s(j)$ 为当前点的长短期均值差的动态和.

定义 4 长短期均值差的动态均值: 对定义 2 中的长短期均值差求取当前时刻点前 ST 秒的均值作为长短期均值差的动态均值, 标记为 DM_m .

$$DM_m(j) = \frac{1}{ST} \sum_{i=j-ST}^j DM(i), \quad (5)$$

式中: $DM_m(j)$ 为当前点的长短期均值差的动态均值.

将长短期均值差的动态均值与动态和相乘, 以反映长短期均值差动态和随变量的变化趋势, 从而得到所需要的趋势特征量.

定义 5 趋势特征量(标记为 DMN):

$$DMN(j) = DM_m(j) \cdot |DM_s(j)|, \quad (6)$$

式中: $DMN(j)$ 为当前点的趋势特征量.

该趋势特征量能够反映变量变化趋势的特征, 且与变量的绝对数值大小无关.

定义 6 对 DMN 求均值和方差得到本文使用的另外两个特征量: DMN_m 和 DMN_d ,

$$DMN_m(j) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j DMN(i); \quad (7)$$

$$DMN_d(j) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (DMN(i) - DMN_m(j))^2, \quad (8)$$

式中: $DMN_m(j)$ 和 $DMN_d(j)$ 分别为当前点的特征量均值和方差.

以钻井过程中的总池体积变量为例, 上述定义的相关概念图形如图 1~4 所示.

由图 3~4 可知: DM_s 和 DMN 能够反映出参数的变化趋势并且不受参数基准值的影响, 因此笔者利用 DM_s 以及由 DMN 计算得到的 DMN_m 、 DMN_d 3 个特征量组成特征向量用以代替原钻井参数进行事故预警.

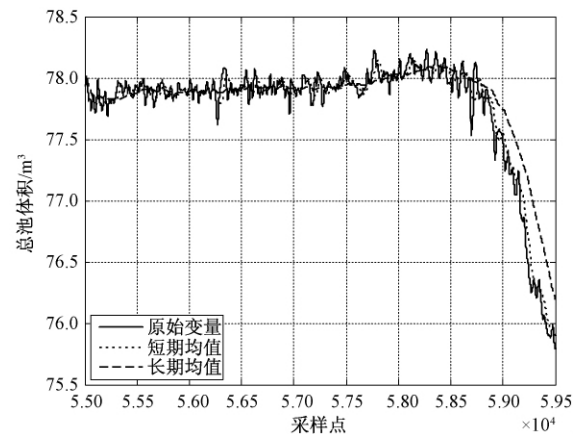


图 1 总池体积参数及其长短期均值

Fig. 1 Total pool volume parameters and its long and short period average

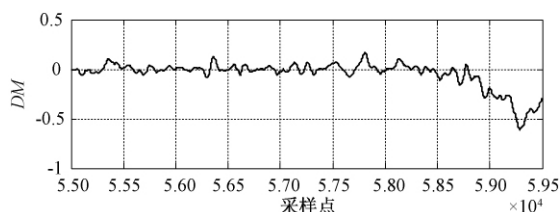


图2 长短期均值差

Fig. 2 Long and short period average deviation

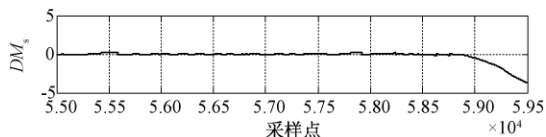


图3 长短期均值差的动态和

Fig. 3 Dynamic sum of long and short period average deviation

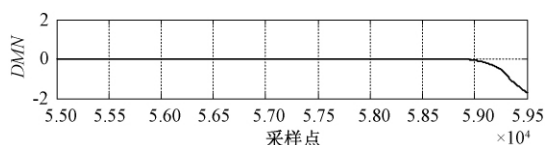


图4 趋势特征量

Fig. 4 Trends characteristic

2 隐马尔科夫模型算法及原理

HMM 是一种动态模式识别工具,能够对一个时间跨度上的信息进行统计建模和分类^[11-14].而传统的故障诊断方法停留在静态观测的基础上,比如取某时刻的幅值谱进行比较分析,这往往忽略了故障发生前后的上下文信息,未能揭示系统潜在状态所发生的变化特征,因而也难于对故障的发展做出预测.在钻井事故预警中反映事故的是参数在一段时间上的变化趋势,因此隐马尔科夫模型更适用于钻井过程的事事故预警.

2.1 连续性隐马尔科夫模型的基本参数

CHMM 可以记为 $\lambda = (\pi, A, C, \mu, U)$, 其中 π 为初始状态分布, A 为状态转移矩阵, C 为混合权重, μ 为均值矢量矩阵, U 为协方差矩阵.

随着 HMM 不断发展,逐渐形成 3 大经典算法:①前向-后向算法解决评估问题;②Viterbi 算法用来解决解码问题;③Baum-Welch 算法解决学习问题^[15].

笔者利用 Baum-Welch 算法对 CHMM 进行训练,利用前向-后向算法计算出已知信号与已知模型的匹配概率.

3 基于趋势特征量与 CHMM 的预警模型

3.1 预警模型

在对上述内容进行分析的基础上,笔者提出

了一种基于趋势特征量与 CHMM 的预警模型.

针对单个钻井参数是否有异常的预警模型主要分为几个部分:①信号的采集及特征提取;②将异常信号的特征向量输入 CHMM 模型进行训练得到模型库;③将大量已知信号(包括异常与正常)的趋势特征向量输入已训练过的 CHMM 模型中,利用前向-后向算法输出已知信号与该模型库的匹配概率;④利用统计方法来确定匹配概率预警的阈值;⑤以未知信号与模型库的匹配概率是否超过阈值来进行预警.具体流程图如图 5 所示.

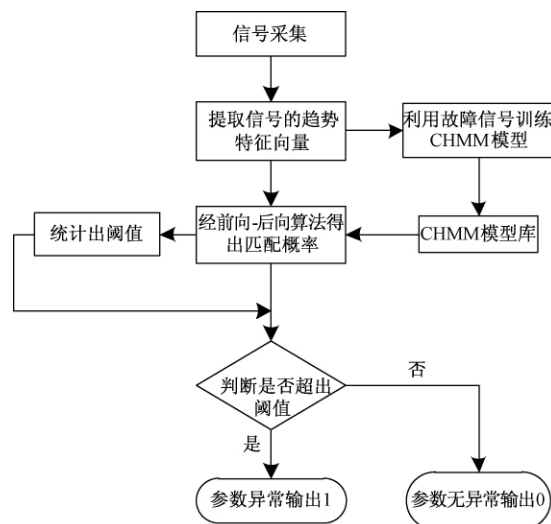


图5 单个钻井参数的预警模型

Fig. 5 A single drilling parameters of early warning model

以上是判断单个钻井参数是否异常的预警模型,但是当钻井系统每种事故发生时都会有多个参数异常,所以要判断钻井系统事故发生的可能性就需要对几个单参数预警模型的结果进行综合判断.

3.2 事故的综合判断

以井漏事故为例,由专家经验和现场数据分析可知:判断井漏的主要参数是总池体积、出口流量、立管压力的异常变化.因此要针对每一个参数训练一个预警模型,然后利用一定的判断规则来综合判断 3 个参数的阈值.

将现场采集的异常信号进行特征提取后输入 CHMM 模型进行训练,以总池体积参数为例,图 6 为一组训练所用的异常数据,图 7 为提取的趋势特征量示意图.

利用 Baum-Welch 算法^[15]对 CHMM 模型进行训练,训练后 CHMM 模型各参数值如下.

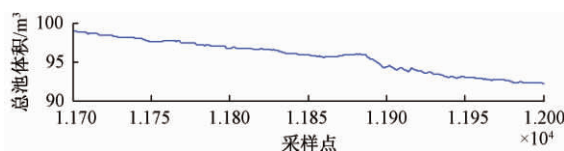


图6 原始故障参数值

Fig. 6 Original fault parameter value

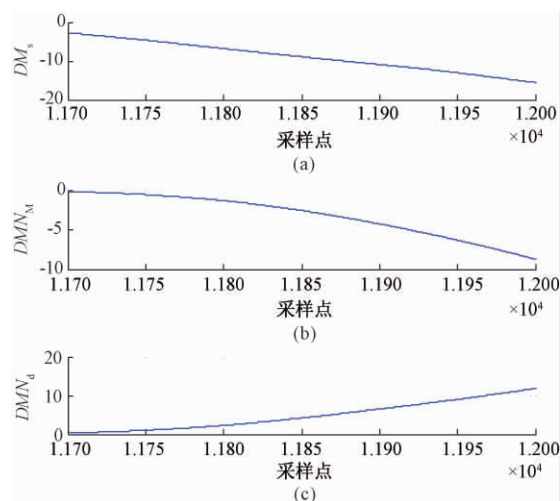


图7 提取出的特征量

Fig. 7 The extracted feature quantity

$$A = \begin{bmatrix} 0.765 & 0.106 & 0.061 & 0.077 \\ 0.132 & 0.648 & 0.171 & 0.049 \\ 0.054 & 0.052 & 0.826 & 0.068 \\ 0.167 & 0.094 & 0.158 & 0.581 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.272 & 0.408 & 0.319 \\ 0.443 & 0.336 & 0.219 \\ 0.161 & 0.513 & 0.325 \\ 0.432 & 0.378 & 0.188 \end{bmatrix};$$

 $\mu =$

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.739 \\ -0.229 \\ -0.462 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -2.488 \\ -1.825 \\ -1.266 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -2.493 \\ -2.088 \\ -1.682 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1.425 \\ -2.181 \\ -2.862 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -0.541 \\ -0.092 \\ -0.311 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1.748 \\ -1.368 \\ -0.975 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1.538 \\ -1.011 \\ -0.491 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0.205 \\ -0.863 \\ -1.440 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.202 \\ 0.065 \\ 0.133 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.617 \\ 0.483 \\ 0.315 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.551 \\ 0.338 \\ 0.304 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.401 \\ 0.291 \\ 0.433 \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

判断井漏事故还需要使用出口流量和立管压力,其预警模型训练方法与总池体积的训练方法相同。

现场收集到井漏事故数据 33 组,其中 3 个参数的异常变化情况如表 1 所示。

表1 井漏事故发生时各个参数异常情况统计

Tab. 1 Various parameters abnormal situation statistics at the time of the lost circulation accident

钻井参数异常情况	数目	所占井漏事故总数目的比例/%
所有井漏事故数据	33	100.0
总池体积出现异常	33	69.6
出口流量出现异常	23	39.3
立管压力出现异常	13	39.3
立管压力和出口流量都无异常	8	24.2

运用上述预警模型,分别计算统计出总池体积、出口流量和立管压力的匹配概率阈值,由于匹配概率一般比较小,为了防止结果下溢可对匹配概率取对数。经过大量试验统计出总池体积阈值 $\mu_1 = -500$,出口流量阈值 $\mu_2 = -500$,立管压力阈值 $\mu_3 = -2500$ 。

井漏事故综合判断的规则为:将总池体积作为主判参数,出口流量与立管压力作为次判参数。当出口流量或者立管压力有异常时,可以把主判参数的阈值降低,既加大了异常判断的概率也使判断的异常时间点提前了。

为了使最终的判别结果更有利于工程人员分析判断,将判断结果以概率形式表示,当概率值在 0.5 以上时发出预警,并且概率值越大发生事故的可能性也就越大。由上文统计结果知,总池体积阈值 $\mu_1 = -500$,当出口流量或者立管压力有异常时可以把阈值下探到 -1500 ,有利于事故的判断,具体的判断规则如下:

(1) 总池体积的对数匹配概率为 c_1 ,当 $c_1 > -500$ 时,已经超过总池体积异常的阈值,需要发出预警。因此,当匹配概率在 $-500 \sim 0$ 的范围内应使最终结果 P 的范围为 $0.5 \sim 1$,计算概率时基准值取 1 000。

$$P = [c_1 - (-1000)] / 1000. \quad (9)$$

(2) 当 $-1500 < c_1 \leq -500$ 时,最终的判别结果需要结合出口流量的匹配概率 c_2 与立管压力的匹配概率 c_3 ,这时令总池体积输出概率 $P_1 = 0.5$ 。

对于出口流量输出概率 P_2 ,当 $c_2 \leq \mu_2$, $P_2 = 0$; 当 $c_2 > \mu_2$,要保证匹配概率 c_2 在 $-500 \sim 0$ 的范围内时出口流量输出概率 P_2 的范围为 $0 \sim 1$,计算概率时基准值取阈值 500。

$$P_2 = (c_2 - \mu_2) / 500. \quad (10)$$

对于立管压力输出概率 P_3 ,当 $c_3 \leq \mu_3$, $P_3 = 0$; 当 $c_3 > \mu_3$,要保证匹配概率 c_3 在 $-2500 \sim 0$ 的范围内时立管压力输出概率 P_3 的范围为 $0 \sim 1$,计

算概率时基准值取阈值 2 500.

$$P_3 = (c_3 - \mu_3) / 2\,500. \quad (11)$$

最终输出概率:

$$P = P_1 + 0.25 \cdot P_2 + 0.25 \cdot P_3. \quad (12)$$

(3) 当 $-2\,500 \leq c_1 \leq -1\,500$ 时, 参数有异常趋势, 但是明显达不到预警标准, 所以最终输出的结果要保证在 0.5 以下, 因此当匹配概率 c_1 在 $-2\,500 \sim -1\,500$ 的范围内时最终输出概率 P

的范围为 $0 \sim 0.5$, 计算概率时基准值取 2 000.

$$P = [c_1 - (-2\,500)] / 2\,000. \quad (13)$$

(4) 当 $c_1 < -2\,500$ 时, 参数没有异常趋势, 所以使最终输出结果为 $P = 0$.

具体判断流程如图 8 所示, 最终判别结果 P 为一个概率值, 当概率值达到 0.5 以上时进行预警, 当 P 在 0.5 以下时, 说明参数有异常趋势但是不太明显, P 值越大说明异常趋势越明显.

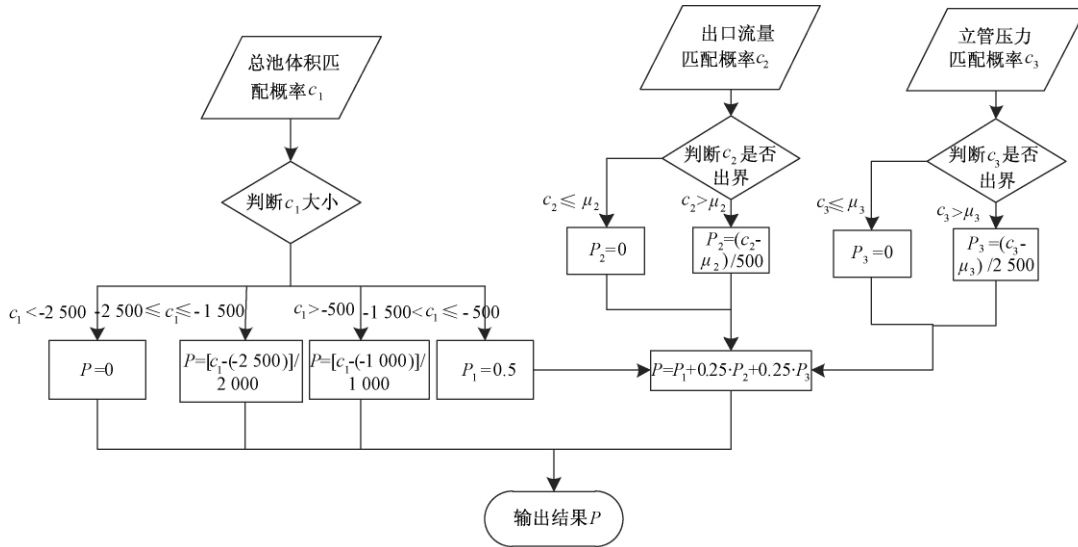


图8 综合判断流程图

Fig.8 The flow chart of comprehensive judgment

4 试验分析

试验以井漏事故分析为例, 验证预警模型的有效性.

图9所示为总池体积、出口流量、立管压力的原始数据, 对这些参数分别进行趋势特征量的提取, 并作为隐马尔科夫预警模型的输入量, 模型输出的匹配概率如图10~12所示. 由图10可知到达总池体积阈值 $\mu_1 = -500$ 的点为第8 510个采样点, 总池体积匹配概率在 $-1\,500 \sim -500$ 范围内的采样点范围为8 323~8 510, 此时需要结合出口流量及立管压力的匹配概率进行预警, 而总池体积匹配概率在 $-1\,500$ 以下的采样点虽然有小幅度的异常趋势, 但是达不到预警标准.

由图10可知若预警模型只利用总池体积一个参数进行预警, 预警的阈值 $\mu_1 = -500$, 对应的预警时刻点为第8 510个采样点. 总池体积与出口流量及立管压力结合后的综合判断结果如图13所示, 由图13可知, 若利用3个参数进行综合判断的预警点为第8 320个采样点, 而当时现场人工发现异常的时刻为采样点8 380, 综合判断的

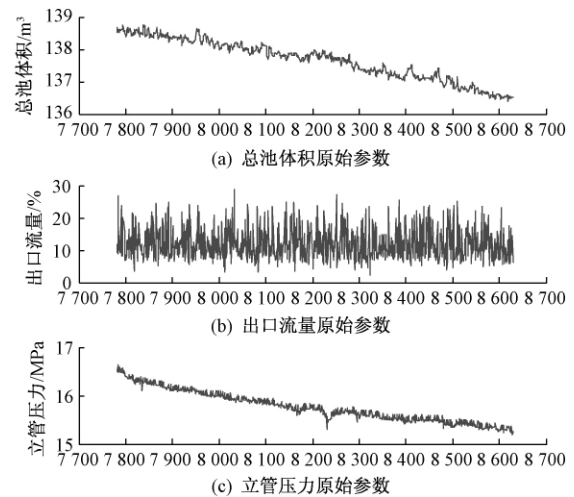


图9 与井漏事故相关的原始参数

Fig.9 Original parameters related to well leaked accident

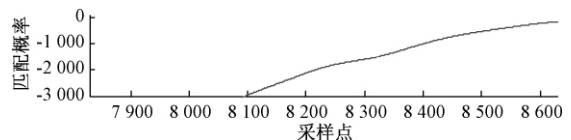


图10 总池体积的匹配概率曲线

Fig.10 The matching probability curve of total pool volume

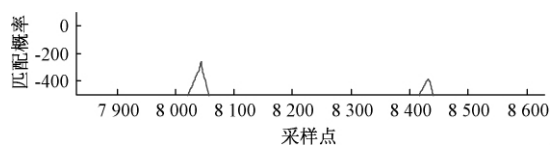


图 11 出口流量的匹配概率曲线

Fig. 11 The matching probability curve of outlet

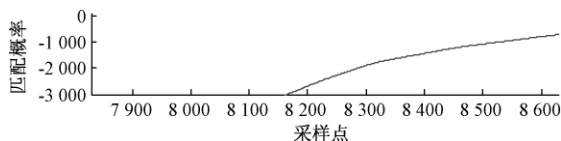


图 12 立管压力的匹配概率曲线

Fig. 12 The matching probability curve of standpipe pressure

预警时刻比现场人工发现异常的时间提早了 60 s,比单个参数的预警时间早了 190 s. 因此,将 3 个参数的预警模型相结合进行判断,当出口流量或者立管压力有异常时,比单独一个参数的预警模型的预警时间更早更准确.

利用更多的数据对模型进行验证,结果如表 4 所示. 同时作为对比,采用文献[16]中的神经网络诊断模型与本文隐马尔科夫预警模型进行比

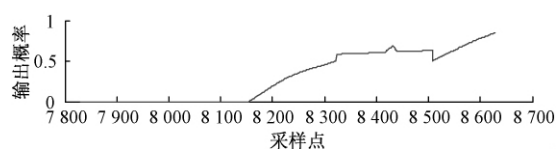


图 13 三个参数综合判别结果

Fig. 13 Three parameters comprehensive judging results

较. 训练神经网络模型同时需要井漏故障数据和正常数据,所用井漏故障数据与训练 CHMM 模型所用故障数据相同,而所用的正常数据为故障数据发生故障前的正常段数据. 为了训练出更好的神经网络模型,利用选取的训练数据重复进行 10 次训练,统计出拟合误差最小的模型作为最终的神经网络模型.

对比验证所用数据为现场采集的 3 组试验数据,每组包含若干段井漏事故数据及若干段正常数据,每段数据包含几百到几千个采样点不等,分别对隐马尔科夫预警模型及神经网络模型的误报率及漏报率进行统计,结果如表 4 所示. 其中神经网络模型对每组数据都进行了 20 次测试,表中给出的是统计的平均结果.

表 4 试验结果

Tab. 4 Test results

	事故数 据段数	正常数 据段数	隐马尔科夫预警模型				神经网络诊断模型测试平均结果			
			事故漏报 警段数	漏报 率/%	正常数据 误报段数	误报 率/%	事故漏报警 平均段数	漏报 率/%	误报警 平均段数	误报 率/%
第 1 组	22	46	1	4.5	3	6.5	1.85	8.4	4.60	10.0
第 2 组	27	50	1	3.7	4	8.0	1.30	4.8	5.55	11.1
第 3 组	26	60	0	0.0	6	10.0	1.65	6.3	4.55	7.6
平均漏报率 和误报率				2.7		8.3		6.4		9.4

由试验结果可知,隐马尔科夫预警模型比现有文献中神经网络诊断模型的预警准确率有一定程度的提升. 通常漏报率与误报率是负相关的,降低漏报率的同时误报率会有一定的提高,在实际应用中的企业更关注漏报率指标. 本算法对钻井原始参数进行特征提取屏蔽了基准值的影响,因此适用性较神经网络模型更广泛,能够为钻井事故的判断、预警提供技术支持,对于预防和控制钻井事故,最大限度地减少损失具有重要意义.

5 结论

为提高石油钻井过程中对异常事故预警的准确性和及时性,笔者构造了长短期均值差的动态和(DM_s)、趋势特征量的均值(DMN_m)及方差(DMN_d) 3 个特征量,并基于特征量构造出了基

于隐马尔科夫模型的预警模型. 利用构造的特征量作为预警模型的输入信息,通过训练 CHMM 模型,得到实际数据与模型输出的匹配率,利用总池体积、出口流量和立管压力的匹配概率的综合判断规则给出钻井工程井漏事故预警信息. 通过实际数据测试,证明该模型能够及时有效地对钻井工程异常做出预警,提高了预警的准确性和及时性,能够有效避免工程事故的扩大.

参考文献:

- [1] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [2] 王建彬. 石油钻井工程事故的预警技术研究[D]. 北京: 中国地质大学工程技术学院, 2013.
- [3] 李新, 王国瓦, 陈慧, 等. 工程录井预警系统在塔里

- 木油田的应用研究[J]. 录井工程, 2011, 22(4): 67-71.
- [4] 刘文龙, 张宏. 基于录井数据的钻井事故预警理论[J]. 价值工程, 2012(31): 44-45.
- [5] GE N, NAKAJIMA S, PANTEL M. Online diagnosis of accidental faults for real-time embedded systems using a hidden markov model[J]. Simulation, 2015, 91(10): 851-868.
- [6] CARTELLA F, SAHLI H. Online adaptive bearings condition assessment using continuous hidden markov models[J]. Advances in mechanical engineering, 2014, 7(2): 758-782.
- [7] 王洪明, 郝旺身, 韩捷. 基于 LMD 和样本熵的齿轮故障特征提取方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 44-48.
- [8] 苏卫星, 朱云龙, 胡琨元, 等. 基于模型的过程工业时间序列异常值检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2080-2087.
- [9] RATANAMAHATANA C A, LIN J, GUNOPULOS D. Mining time series data[J]. Data mining and knowledge discovery handbook, 2009, 56(4): 1069-1103.
- [10] 李晓光, 宋宝燕, 张昕. 基于滑动多窗口的时间序列流趋势变化检测[J]. 电子学报, 2010, 38(2): 321-326.
- [11] 夏丽莎. 基于隐马尔科夫模型的故障诊断及相关算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学自动化学院, 2014.
- [12] 孟宗, 闫晓丽, 王亚超. 基于 LMD 和 HMM 的旋转机械故障诊断[J]. 中国机械工程, 2014, 25(21): 2942-2951.
- [13] 苗强, VILIAM M. 基于隐马尔科夫模型的故障诊断系统研究[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 641-646.
- [14] 卓东风, 原媛. 小波包变换和隐马尔科夫模型(HMM)在液压系统故障预测中的应用[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2013, 36(3): 357-362.
- [15] 谢锦辉. 隐 Markov 模型(HMM)及其在语音处理中的应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
- [16] 王江萍, 孟祥芹, 鲍泽富. 应用神经网络技术诊断钻井事故[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(2): 99-102.

An Accident Prewarning Method of Oil Drilling Based on Hidden Markov Model

ZHU Xiaodong¹, YUAN Kunjie¹, WANG Yanling²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to predict the accidents of oil drilling process in real time and accurately, an early warning method based on the Continuous Hidden Markov Model(CHMM) was constructed. The parameters of average value in long-time and short-time were utilized to construct the characteristic variables which could reflect the changing trend of the original parameters. The CHMM model was established based on the characteristic variables and was trained by the historical data. Then the matching probability was calculated by the forward algorithm and the threshold of the warning system was determined by the statistical method. For each kind of drilling faults, the strategy for judging the warning results based on multiple parameters was designed. The results of experiment proved that the CHMM warning model could predict the drilling accidents more promptly and effectively.

Key words: Hidden Markov Model; trends characteristic; drilling accidents; prewarning system

基于特征值的单机无穷大电力系统随机稳定性分析

张 振, 刘艳红

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 考虑系统参数与随机扰动强度以及两者之间的约束关系, 分析了随机扰动下单机无穷大电力系统的稳定性. 根据系统系数矩阵特征值的3种不同情况, 讨论了随机系统均值稳定和均方稳定性, 证明了如果无随机扰动电力系统渐近稳定, 则在随机小扰动下系统均值稳定和均方稳定, 并给出了系统均值均方差的界与随机扰动强度及系统参数之间的关系式. 最后, 对随机扰动作用下的单机无穷大电力系统进行仿真分析, 验证了结论的正确性.

关键词: 随机扰动; 单机无穷大电力系统; 矩阵特征值; 均值稳定; 均方稳定

中图分类号: TM712

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.001

0 引言

电力系统的短路故障和控制等是研究人员长期关注的研究课题^[1-2]. 电力系统在运行过程中不可避免地受到负荷波动、控制回路噪声、电网谐波、随机故障等随机扰动的影响. 随着现代电力网络规模不断扩大, 新能源发电与并网以及电动汽车的使用, 使得电力系统受到的不确定随机扰动进一步增加, 对系统稳定性和电能质量造成的影响不容忽视^[3-5].

电力系统中的随机因素可概括为3类: ①外部随机扰动; ②系统初值的随机性; ③系统参数的随机性. 文献[6-7]考虑外部随机扰动下系统建模与稳定分析, 针对随机扰动下的电力系统的稳定性分析问题, 建立了系统的随机动态模型, 结合随机系统 p 阶矩稳定性理论, 通过求解显示解分析了系统的均值稳定、均方稳定性. 多机电力系统的随机小扰动稳定性问题与单机系统类似, 但要考虑系统之间的相互影响^[8-9]. 基于电力系统动态模型对电力系统小扰动概率稳定性分析, 可以得到随机扰动下系统关键特征根位于左半平面的概率^[10-11]. 但上述研究结果均未给出随机扰动与无扰动系统稳定性之间的定量关系, 无法准确估计在给定随机扰动强度条件下系统响应的均

值均方差的界, 也没有讨论扰动强度和系统参数对均值均方差界的影响.

笔者研究了随机扰动下单机无穷大电力系统的随机稳定性. 首先建立了单机无穷大系统的随机动态模型, 采用随机微分理论^[12]和矩阵论^[13]相关知识给出了系统均值均方稳定的条件, 分析了系统均值均方差的界与随机扰动强度之间的关系, 并讨论了系统矩阵特征值和系统参数对系统均值和均方差的界的影响, 最后, 通过对随机扰动下的电力系统进行仿真分析, 验证了所得结论的正确性.

1 电力系统随机动态模型

图1所示为单机无穷大系统.

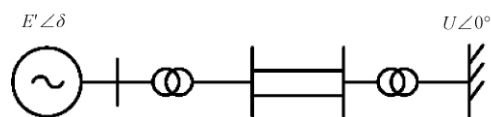


图1 单机无穷大系统

Fig.1 Single machine infinite bus system

无随机扰动下系统的动态模型表示为^[14]:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0; \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{M}(\omega - \omega_0) - \frac{P_m}{M} + \frac{P_e}{M}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为阻尼系数; M 为惯性时间常数; δ 为发电

收稿日期:2017-10-15; 修订日期:2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473265; 61603345), 河南省自然科学基金资助项目(162300410260), 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(17IRTSTHN013)

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

机功角; ω 为转子角速度; ω_0 为同步角速度; P_m 为发电机输入机械功率; P_e 为发电机输出的电磁功率, 且

$$P_m = \frac{E' U \sin \delta_0}{X_\Sigma}; \quad (2)$$

$$P_e = \frac{E' U \sin \delta}{X_\Sigma}, \quad (3)$$

式中: E' 为发电机内电势; U 为无穷大母线电压; X_Σ 表示总电抗, δ_0 为系统平衡状态对应的功角。

考虑新能源发电、电动汽车等对电力系统所产生的随机扰动, 并将其近似看作高斯过程^[7], 电力系统的随机动态模型表示为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0; \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{M}(\omega - \omega_0) - \frac{P_m}{M} + \frac{P_e}{M} + \frac{\sigma}{M}W(t), \end{cases} \quad (4)$$

式中: $W(t)$ 为高斯过程; σ 为随机扰动强度。

将系统在平衡点处线性化, 并注意到:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega; \\ \Delta \dot{\omega} = -\frac{E' U \cos \delta_0 \Delta \delta}{M X_\Sigma} - \frac{D}{M} \Delta \omega + \frac{\sigma}{M} W(t). \end{cases} \quad (5)$$

电力系统动态模型可表示为下面标准随机系统:

$$dx(t) = Ax(t)dt + A'dB(t), \quad (6)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a & b \end{bmatrix}$, $a = -\frac{E' U}{M X_\Sigma} \cos \delta_0$, $b = -\frac{D}{M}$;

$$A' = \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma \\ M \end{bmatrix}; x(t) = [\Delta \delta, \Delta \omega]^T.$$

2 随机电力系统均值均方稳定性

本节讨论电力系统的均值和均方稳定性, 并建立系统均值和均方差的界与随机扰动强度及系统参数之间的关系。

定义 1: 对于系统(6), 若其解过程 $x(t)$ 满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|x(t)\|_2^p < \varepsilon, \quad (7)$$

式中: ε 是正常数, 则系统是 p 阶矩稳定; 特殊的, p 等于 1、2 时, 称系统是均值、均方稳定; 当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, 称系统是 p 阶矩渐近稳定。

下面首先基于矩阵 A 的特征值, 对 $\|e^A\|_2$ 进行分析; 令 $|\lambda I - A| = 0$, 得 $\lambda_{1,2}(A) = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 4a}}{2}$, I 为单位向量; 因为 $b^2 + 4a$ 的不确定性, 将矩阵 A 的特征方程的根分为 3 类: ①重根; ②无重根为实数; ③无重根为复数。假设特征值实部均为负, 有如下结论。

定理 1: 若矩阵 A 的特征方程的根为重根, 则

$$\|e^A\| \leq 1.618 \gamma_1 e^{\frac{b}{2}}; \quad (8)$$

若矩阵 A 的特征方程无重根且为实数, 则

$$\|e^A\| \leq 2\gamma_2 e^{(b + \sqrt{b^2 + 4a})/2}; \quad (9)$$

若矩阵 A 的特征方程无重根且为复数, 则

$$\|e^A\| \leq 2\gamma_3 \cos\left(\frac{\sqrt{-(b^2 + 4a)}}{2}\right) e^{\frac{b}{2}}, \quad (10)$$

式中: $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 是关于 a, b 的量。

证明: (1) 若矩阵 A 的特征方程的根为重根,

则有 $\lambda_{1,2}(A) = \frac{b}{2} < 0$ 。 A 相似于约旦矩阵 R , 即

$$R = \begin{bmatrix} \frac{b}{2} & 1 \\ 0 & \frac{b}{2} \end{bmatrix} = \frac{b}{2}I + H, H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, H^2 = 0.$$

由函数 $f(x)$ 在 λ_i 处可展开表示为:

$$\begin{aligned} f(x) &= f(\lambda_i) + f'(\lambda_i)(x - \lambda_i) + \frac{1}{2!}f''(\lambda_i) \cdot \\ &(x - \lambda_i)^2 + \cdots + \frac{1}{n!}f^{(n)}(\lambda_i)(x - \lambda_i)^n + \cdots, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $i = 1, 2$ 。将 R 代入上式得:

$$f(R) = f\left(\frac{b}{2}\right)I + f'\left(\frac{b}{2}\right)H. \quad (12)$$

令 $f(x) = e^x$, 有

$$e^R = e^{\frac{b}{2}} \left[I + H + \frac{1}{2!}H^2 + \cdots \right] = e^{\frac{b}{2}} B, \quad (13)$$

其中, $B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 且 $A \sim R$, 即存在可逆矩阵 Q

使得 $A = QRQ^{-1}$ 。令 $\gamma_1 = \|Q\|_2 \|Q^{-1}\|_2$, 由 $\|B\|_2 = 1.618$, 有

$$\begin{aligned} \|e^A\|_2 &= \|Qe^RQ^{-1}\|_2 \leq \\ &\|Q\|_2 \|Q^{-1}\|_2 \|e^R\|_2 = \\ &\|Q\|_2 \|Q^{-1}\|_2 \|B\|_2 e^{\frac{b}{2}} = 1.618 \gamma_1 e^{\frac{b}{2}}. \end{aligned}$$

(2) 若矩阵 A 的特征方程无重根且为实数, 有

$$\lambda_{1,2}(A) = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 4a}}{2} < 0.$$

同理, 存在可逆矩阵 Q_1 满足 $A = Q_1 R_1 Q_1^{-1}$, 即

$$\begin{aligned} R_1 &= \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{12} \end{bmatrix}, R_{1i} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 4a}}{2}, \\ &(i = 1, 2), H = 0. \end{aligned}$$

将 R_{1i} 带入 $f(x)$, 令 $f(x) = e^x$, 整理得:

$$e^{R_{1i}} = e^{\lambda_i(A)}. \quad (14)$$

取 $\gamma_2 = \|Q_1\|_2 \|Q_1^{-1}\|_2$, 有

$$\|e^A\|_2 = \|\mathbf{Q}_1 e^{R_{1i}} \mathbf{Q}_1^{-1}\|_2 \leq$$

$$\|\mathbf{Q}_1\|_2 \|\mathbf{Q}_1^{-1}\|_2 \|e^{R_{1i}}\|_2 =$$

$$\|\mathbf{Q}_1\|_2 \|\mathbf{Q}_1^{-1}\|_2 [e^{\lambda_1(A)} + e^{\lambda_2(A)}] \leq 2\gamma_2 e^{\frac{b+\sqrt{b^2+4a}}{2}}.$$

(3) 若矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为复数, 即:

$$\lambda_{1,2}(\mathbf{A}) = \frac{b \pm j \sqrt{-(b^2 + 4a)}}{2}, \left(\frac{b}{2} < 0\right)$$

$$\text{则有 } \gamma_3 = \|\mathbf{Q}_2\|_2 \|\mathbf{Q}_2^{-1}\|_2,$$

$$\|e^A\|_2 = \|\mathbf{Q}_2 e^{R_2} \mathbf{Q}_2^{-1}\|_2 \leq$$

$$\|\mathbf{Q}_2\|_2 \|\mathbf{Q}_2^{-1}\|_2 \|e^{R_2}\|_2 =$$

$$\|\mathbf{Q}_2\|_2 \|\mathbf{Q}_2^{-1}\|_2 \left[e^{\frac{b+j\sqrt{-(b^2+4a)}}{2}} + e^{\frac{b-j\sqrt{-(b^2+4a)}}{2}} \right] =$$

$$\|\mathbf{Q}_2\|_2 \|\mathbf{Q}_2^{-1}\|_2 e^{\frac{b}{2}} \left[\cos \frac{\sqrt{-(b^2+4a)}}{2} + \right.$$

$$\left. j \sin \frac{\sqrt{-(b^2+4a)}}{2} + \cos \frac{-\sqrt{-(b^2+4a)}}{2} + \right.$$

$$\left. j \sin \frac{-\sqrt{-(b^2+4a)}}{2} \right] =$$

$$2\gamma_3 \cos \frac{\sqrt{-(b^2+4a)}}{2} e^{\frac{b}{2}}.$$

定理 2: 对随机电力系统 (6), 若 $\operatorname{Re}\{\lambda_{1,2}(\mathbf{A})\} < 0$, 那么系统是均值稳定的, 且满足:

(i) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程有重根, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|\mathbf{x}(t)\|_2 \leq \frac{1.618 \gamma_1 \sigma}{M \sqrt{-b}}. \quad (15)$$

(ii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为实数, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|\mathbf{x}(t)\|_2 \leq \frac{2\gamma_2 \sigma}{M \sqrt{-b - \sqrt{b^2 + 4a}}}. \quad (16)$$

(iii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为负数, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|\mathbf{x}(t)\|_2 \leq \frac{2\gamma_3 \sigma}{M \sqrt{-b}} \cos \left(\frac{\sqrt{-(b^2 + 4a)}}{2} \right). \quad (17)$$

证明: 对于系统 (6) 的解的显式表达式为:

$$\mathbf{x}(t) = e^{At} \mathbf{x}_0 + \int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s). \quad (18)$$

有

$$E[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)] = E[(e^{At} \mathbf{x}_0)^T e^{At} \mathbf{x}_0] +$$

$$E[(e^{At} \mathbf{x}_0)^T \int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s)] +$$

$$E\left[\left(\int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s)\right)^T e^{At} \mathbf{x}_0\right] +$$

$$E\left[\left(\int_0^t \mathbf{A}^T e^{A^T(t-s)} dB(s)\right) \int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s)\right]. \quad (19)$$

非随机变量的期望等于本身, 有

$$E[(e^{At} \mathbf{x}_0)^T e^{At} \mathbf{x}_0] = \|e^{At} \mathbf{x}_0\|_2^2. \quad (20)$$

根据维纳性质, 有

$$E[(e^{At} \mathbf{x}_0)^T \int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s)] = 0. \quad (21)$$

$$E\left[\left(\int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s)\right)^T e^{At} \mathbf{x}_0\right] = 0. \quad (22)$$

对式 (19) 等号右边第四项根据维纳过程的随机积分性质, 有

$$\begin{aligned} E\left[\left(\int_0^t \mathbf{A}^T e^{A^T(t-s)} dB(s)\right) \int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s)\right] = \\ E\left[\int_0^t \mathbf{A}^T e^{A^T(t-s)} dB(s) \int_0^t e^{A(t-s)} \mathbf{A}' dB(s)\right] = \\ \int_0^t \mathbf{A}^T e^{A^T(t-s)} e^{A(t-s)} \mathbf{A}' ds = \\ \int_0^t \|e^{A(t-s)} \mathbf{A}'\|_2^2 ds. \end{aligned} \quad (23)$$

把式 (20) ~ (23) 带入式 (19) 得

$$E[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)] = \|e^{At} \mathbf{x}_0\|_2^2 + \int_0^t \|e^{A(t-s)} \mathbf{A}'\|_2^2 ds. \quad (24)$$

(i) 若矩阵 \mathbf{A} 的特征方程有重根, 有

$$\|e^{At} \mathbf{x}_0\|_2^2 \leq \|e^{At}\|_2^2 \|\mathbf{x}_0\|_2^2 \leq$$

$$1.618^2 \gamma_1^2 e^{bt} \|\mathbf{x}_0\|_2^2;$$

$$\int_0^t \|e^{A(t-s)} \mathbf{A}'\|_2^2 ds \leq \int_0^t \|e^{A(t-s)}\|_2^2 \|\mathbf{A}'\|_2^2 ds \leq$$

$$1.618^2 \gamma_1^2 \frac{\sigma^2}{M^2} \int_0^t e^{b(t-s)} ds = \frac{1.618^2 \gamma_1^2 \sigma^2}{-bM^2} (1 - e^{bt}),$$

有

$$\begin{aligned} E[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)] &\leq 1.618^2 \gamma_1^2 e^{bt} \|\mathbf{x}_0\|_2^2 + \\ &\frac{1.618^2 \gamma_1^2 \sigma^2}{-bM^2} (1 - e^{bt}), \end{aligned}$$

故

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)] \leq \frac{1.618^2 \gamma_1^2 \sigma^2}{-bM^2}. \quad (25)$$

根据 Cauchy-Schwarz 不等式

$$(E \|\mathbf{x}(t)\|_2)^2 \leq E \|\mathbf{x}(t)\|_2^2 = E[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)],$$

则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|\mathbf{x}(t)\|_2 \leq \frac{1.618 \gamma_1 \sigma}{M \sqrt{-b}}. \quad (26)$$

(ii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为实数, 同理可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|\mathbf{x}(t)\|_2 \leq \frac{2\gamma_2 \sigma}{M \sqrt{-b - \sqrt{b^2 + 4a}}}. \quad (27)$$

(iii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为实数, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|\mathbf{x}(t)\|_2 \leq \frac{2\gamma_3 \sigma}{M \sqrt{-b}} \cos \left(\frac{\sqrt{-(b^2 + 4a)}}{2} \right). \quad (28)$$

综上,存在

$$\varepsilon_1 > \left\{ \frac{1.618 \gamma_1 \sigma}{M \sqrt{-b}}, \frac{2\gamma_2 \sigma}{M \sqrt{-b - \sqrt{b^2 + 4a}}}, \frac{2\gamma_3 \sigma}{M \sqrt{-b}} \right\}$$

满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2 < \varepsilon_1, \quad (29)$$

则系统(6)是均值稳定的。

定理3: 对随机电力系统(6), 若 $\text{Re}\{\lambda_{1,2}(\mathbf{A})\} < 0$, 那么系统是均方稳定的, 且满足:

(i) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程有重根, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 \leq \frac{2.618 \gamma_1^2 \sigma^2}{-bM^2}. \quad (30)$$

(ii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为实数, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 \leq \frac{4\gamma_2^2 \sigma^2}{-(b + \sqrt{b^2 + 4a})M^2}. \quad (31)$$

(iii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为负数, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 \leq \frac{4\gamma_3^2 \sigma^2}{-bM^2} \cos^2 \left(\frac{\sqrt{-(b^2 + 4a)}}{2} \right). \quad (32)$$

证明: 由定理1知

$$(E \| \mathbf{x}(t) \|_2)^2 \leq E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 = E [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)].$$

(i) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程有重根, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} E [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)] \leq \frac{2.618 \gamma_1^2 \sigma^2}{-bM^2}.$$

(ii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为实数, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} E [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t)] \leq \frac{4\gamma_2^2 \sigma^2}{-(b + \sqrt{b^2 + 4a})M^2}.$$

(iii) 矩阵 \mathbf{A} 的特征方程无重根且为负数, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 \leq \frac{4\gamma_3^2 \sigma^2}{-bM^2} \cos^2 \left(\frac{\sqrt{-(b^2 + 4a)}}{2} \right),$$

取 $\varepsilon_2 = \varepsilon_1^2$, 满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \| \mathbf{x}(t) \|_2^2 < \varepsilon_2, \quad (33)$$

则系统(6)是均方稳定的。

注1: 定理2所得结果可推广到 n 维随机电力系统。具体地, 将 n 维随机电力系统化为方程(6)所示标准随机动态系统形式, 由定理2的证明过程知方程(24)仍成立。进一步, 根据矩阵特征值分析方法得到 $\| \mathbf{e}^A \|_2$ 以及 $\| \mathbf{A}' \|_2$ 的表达式, 并根据矩阵 \mathbf{A} 特征值的不同取值情况得到方程(24)的不同表达式, 与定理2类似可判断系统的均值均方稳定性。

3 仿真算例

本节对图1所示单机无穷大电力系统在不同

随机扰动下的稳定性进行仿真分析。仿真中选取的参数如下: 升压变压器电抗 $x_{T1} = 0.138$ p. u., 降压变压器电抗 $x_{T2} = 0.122$ p. u., 发电机暂态电抗 $x'_d = 0.295$ p. u., 阻尼系数 $D = 2.0$ p. u., 内电势 $E' = 1.41$ p. u., 无穷大母线电压 $U = 1.0$ p. u., 总电抗 $X_s = 0.8$ p. u., 负荷有功功率和无功功率分别为 $P_0 = 1.0$ p. u., $Q_0 = 0.2$ p. u.。系统初始状态 $\omega_0 = 1$, $\delta_0 = 34.46^\circ$; 电压基准值 $U_{B(220)} = 209$ kV, 功率基准值 $S_B = 220$ MVA。

系统的系数矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.0005669 & -0.0007783 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{1,2}(\mathbf{A}) = -0.0004 \pm 0.0238j;$$

$$\mathbf{R}_2 =$$

$$\begin{bmatrix} -0.0004 + 0.0238j & 0 \\ 0 & -0.0004 - 0.0238j \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_2 =$$

$$\begin{bmatrix} 0.9997 & 0.9997 \\ -0.0004 + 0.0238j & -0.0004 - 0.0238j \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_2^{-1} = \begin{bmatrix} 0.5002 - 0.0084j & -21.0084j \\ 0.5002 + 0.0084j & 21.0084j \end{bmatrix};$$

$$\gamma_3 = \| \mathbf{Q}_2 \| \| \mathbf{Q}_2^{-1} \| = 42.00456.$$

综上知 $\text{Re}\{\lambda_{1,2}(\mathbf{A})\} < 0$, 则系统(6)在无扰动下是局部渐近稳定, 在随机小扰动下是均值、均方稳定。

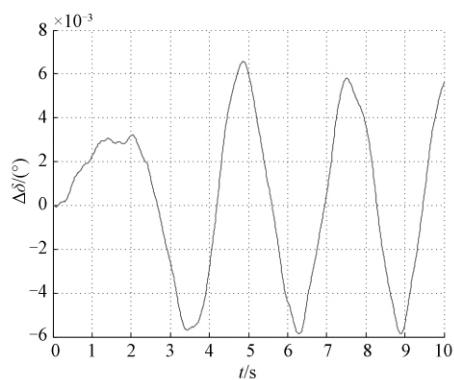
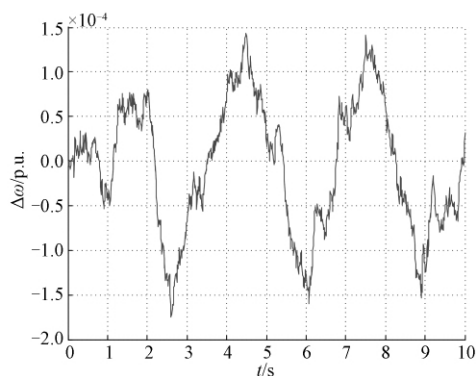
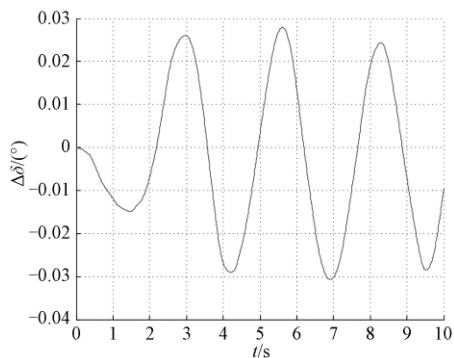
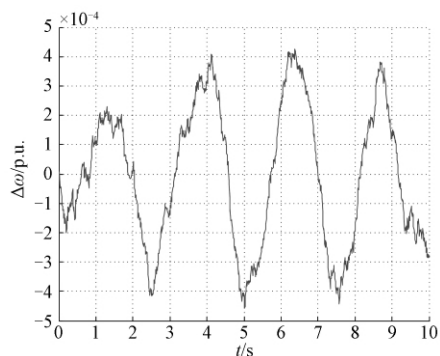
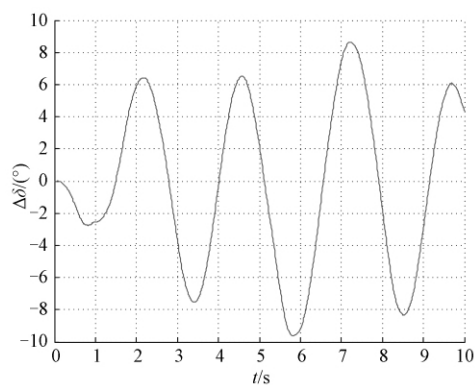
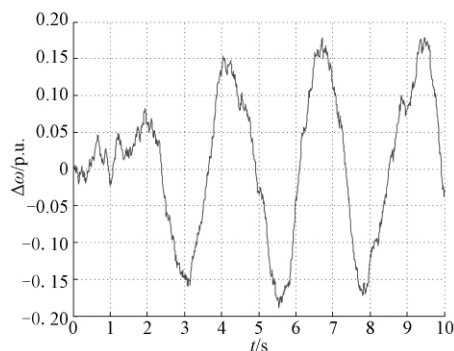
下面对不同随机扰动强度作用下系统的稳定性进行仿真。系统状态均值和均方差的界如表1所示, 显然随着 σ 的增加, 系统均值和均方差的上界也增加。不同扰动强度下的仿真结果如图2~7所示。

表1 均值均方差的界

Tab.1 The bounds of mean and mean square error

随机扰动 强度 σ	均值均方差的界	
	$\lim_{t \rightarrow \infty} E \ \mathbf{x}(t) \ _2$	$\lim_{t \rightarrow \infty} E \ \mathbf{x}(t) \ _2^2$
0.02	0.02344	0.00055
0.04	0.04687	0.00220
1.50	1.75768	3.08947

从图2~5可以看出, 当取 $\sigma = 0.02$, $\sigma = 0.04$, 即系统在较小随机扰动作用下, 功角及角速度变化量很小, 能够稳定运行在扰动前的平衡状态, 但图4中系统功角的变化峰值较图2有比较明显的增大, 图5所示角速度变化量较图3也有明显的增大, 表明随着随机扰动强度的增大, 系统状态的波动增加。由仿真结果图6和图7可知,

图2 $\sigma=0.02$ 时的 $\Delta\delta$ 响应曲线Fig. 2 Response of $\Delta\delta$ with $\sigma=0.02$ 图3 $\sigma=0.02$ 时的 $\Delta\omega$ 响应曲线Fig. 3 Response of $\Delta\omega$ with $\sigma=0.02$ 图4 $\sigma=0.04$ 时的 $\Delta\delta$ 响应曲线Fig. 4 Response of $\Delta\delta$ with $\sigma=0.04$ 图5 $\sigma=0.04$ 时的 $\Delta\omega$ 响应曲线Fig. 5 Response of $\Delta\omega$ with $\sigma=0.04$ 图6 $\sigma=1.50$ 时的 $\Delta\delta$ 响应曲线Fig. 6 Response of $\Delta\delta$ with $\sigma=1.50$ 图7 $\sigma=1.50$ 时的 $\Delta\omega$ 响应曲线Fig. 7 Response of $\Delta\omega$ with $\sigma=1.50$

当 $\sigma = 1.50$, 即在较大随机扰动作用下, 系统功角、角速度的波动明显增大, 扰动后系统运行点无法稳定在扰动前的平衡状态, 系统失稳。

4 结论

笔者对高斯随机小扰动下电力系统的稳定性进行分析. 建立了系统的高斯随机小扰动随机动态模型, 研究了电力系统随机小扰动稳定性, 给出了系统的均值均方稳定性的条件, 通过对系统矩阵特征值的 3 种不同情况进行分析, 给出了系统均值均方差的界与随机扰动强度以及系统参数之间的关系, 并在不同随机扰动强度下对系统进行仿真分析. 研究表明: 随机小扰动不会影响系统的稳定性, 但会影响系统均值均方差的界; 大扰动不仅会影响系统均值均方差的界, 而且会造成系统不稳定. 笔者所提出的分析方法同样适用于高阶随机电力系统的小扰动稳定性分析, 且能够准确估计随机扰动和系统参数对系统状态稳定性的影响。

参考文献:

- [1] 齐歌, 白左霞, 刘宪林, 等. 双三项永磁同步电动机一相绕组短路故障性能分析 [J]. 郑州大学学报

- (工学版), 2015, 36(1): 24–27.
- [2] 刘艳红, 赵景隆. 混永磁直驱风力发电系统最大风能捕获滑模控制 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 1–5.
- [3] 谷玉宝, 宋墩文, 李月乔, 等. 风电并网对电力系统小干扰稳定性的影响综述 [J]. 智能电网, 2016, 4(2): 157–165.
- [4] 彭云建, 邓飞其. 电力系统随机稳定性分析与控制问题综述 [J]. 电工电能新技术, 2007, 26(3): 52–58.
- [5] CHEN L C, ZHU W Q. First passage failure of dynamical power systems under random perturbations [J]. Sci China Tech Sci, 2010, 53(9): 2495–2500.
- [6] YUAN B, ZHOU M, LI G Y, et al. Stochastic small-signal stability of power systems with wind power generation [J]. IEEE transaction on power systems, 2015, 30(4): 1680–1689.
- [7] ZHANG J Y, JU P, YU Y P, et al. Responses and stability of power system under small Gauss type random excitation [J]. Sci China Tech Sci, 2012, 55(7): 1873–1880.
- [8] 许文碧, 王杰. 非线性电力系统随机小干扰稳定性分析 [J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2735–2740.
- [9] 王芮, 王杰, 弥潇. 计及随机小扰动影响下的多机系统稳定性分析 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 164–170.
- [10] 杜文娟, 卜思齐, 王海风. 考虑并网风电随机波动的电力系统小干扰概率稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(S1): 7–11.
- [11] 边晓燕, 耿艳, 李学武, 等. 风电并网系统小干扰概率稳定性分析与改善 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 1–7.
- [12] 徐仲, 张凯院, 陆全, 等. 矩阵论简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [13] MAO X R. Stochastic differential equations and applications [M]. UK: Horwood Press, 2007.
- [14] 韩祯祥. 电力系统分析 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2013.

Stochastic Small Signal Stability of Single Machine Infinite Bus Power Systems Based on Matrix Eigenvalue Analysis

ZHANG Zhen, LIU Yanhong

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

Abstract: The stochastic small signal stability of single machine infinite bus power systems was investigated with consideration of the relationship between the system parameters and the stochastic disturbance in this paper. Firstly, according to the three different characteristics of the eigenvalues of the system coefficient matrix, the mean stability and mean square stability were discussed. It was shown that if the power system was asymptotically stable under no stochastic disturbance, Its mean stable and mean were square stable under small stochastic disturbance. The function of the bound of mean and mean square value with respect to the variance and random perturbation relation between stochastic intensity and system parameters was given. Finally, the power system was simulated under different stochastic intensity and the correctness of the proposed results was verified.

Key words: stochastic disturbance ; single machine infinite bus power system; eigenvalues; mean stability; mean square stability

基于 DRNN 网络的轮式机器人鲁棒 H_∞ 控制

彭金柱, 卞英楠, 周树亮

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对非完整约束的两轮移动机器人系统中存在建模误差及外扰的情形, 提出了一种结合对角递归神经网络和非线性 H_∞ 方法的控制策略. 利用对角递归神经网络逼近建模不确定的非线性项, H_∞ 控制则用来实现期望的鲁棒跟踪性能. 基于 Lyapunov 稳定性理论, 整个系统跟踪误差闭环有界. 此外, 在外界干扰仅仅积分有界的情形下, 系统仍能满足具体的鲁棒跟踪性能. 最后, 对于相同外扰及不确定性下的移动机器人, 将其与控制力矩法进行对比, 仿真结果表明, 所提方法是有效的.

关键词: 对角递归神经网络; 控制力矩法; H_∞ 控制; 不确定性; Lyapunov 稳定性

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.016

0 引言

在轮式机器人系统的轨迹跟踪控制中, 对系统中非线性不确定性的处理, 提出了诸如 PID^[1]、自适应、鲁棒控制^[2-3]、滑模控制^[4] 等不同的单一方法. 但是, 单一的控制策略无法取得理想的结果. 因此, 近年来, 国内外学者开始提出混合控制的方案. 例如, 在不校准摄像机视觉参数的前提下, 孙妍等^[5] 利用视觉反馈信息并结合模糊控制的方法对移动机器人线速度和角速度进行控制, 仿真结果证明了该方法的有效性. Spandan 等^[6] 构思了一种将滑模控制与延时控制相结合的方法, 将二者取长补短, 最后基于仿真与单一的滑模控制对比, 显示了不错的效果. 为了使误差在有限时间内收敛, 张扬名等^[7] 先采用有限时间控制方法, 设计连续状态反馈角速度的控制律, 在前向角误差趋于零时, 结合反演设计的滑模控制技术, 给出平面坐标跟踪误差线速度的控制律并取得不错的跟踪效果. 基于切换灰色预测的方法, Wong 等^[8] 设计了模糊跟踪系统. 在处理不确定环境下的机器人应用上具有不错的灵活性. 为了减弱滑模控制的抖振, Yi^[9] 将情感学习算法与滑模控制算法结合, 同模糊滑模控制及一般滑模控制对比,

验证了所提算法的优良性. 考虑到机器人位置难以测量, Wang 等^[10] 将视觉监督系统与自适应算法相结合, 设计了一种能满足机器人实时轨迹跟踪的控制器. 考虑机器人速度不可测量的情形, Shojaei 等^[11] 利用动态表面控制方法减少了设计的复杂性, 同时结合状态观测器, 针对存在建模不确定性的机器人系统提出了新的控制规律. 针对包含参数和非参数不确定性下的非完整机器人系统, 一种鲁棒自适应时变控制方法被 Shojaei 等^[12] 设计出来.

虽然上述研究取得了不错的跟踪效果, 但都要求系统的惯性矩阵、重力矩阵以及哥氏力矩阵的精确模型全部已知, 或者至少知道其中两个. 而笔者所提的混合控制策略仅仅需要知道系统的精确惯性矩阵. 当考虑外界干扰存在的情况下, Hwang 等^[13] 提出了一种最优 H_∞ 控制并取得较好的效果. 考虑外扰是有上界的情形, Khalaji 等^[14] 结合了鲁棒控制与自适应控制设计了新的控制器, 与反馈线性化动态控制器对比, 取得了更好的效果.

彭金柱等^[15] 设计了一种结合递归模糊神经网络和鲁棒 H_∞ 控制的方法, 并将其用于完整约束的机械臂跟踪控制. 借鉴该设计思想, 笔者提出了一

收稿日期:2017-06-12; 修订日期:2017-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61773351); 河南省青年骨干教师训练计划资助项目(2017GGJS004); 河南省自然科学基金资助项目(162300410260); 郑州大学优秀青年教师发展基金资助项目(1521319025)

作者简介: 彭金柱(1980—), 男, 河南信阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事智能机器人导航、鲁棒控制研究, E-mail: jzpeng@zzu.edu.cn.

种将对角递归神经网络(DRNN)和鲁棒 H_∞ 控制相结合的方法,并将其应用于非完整约束的轮式移动机器人轨迹跟踪控制.在系统仅仅满足惯性矩阵是标称的而其他标称矩阵未知的情形下,利用DRNN神经网络逼近系统的非线性项.而且,鲁棒 H_∞ 控制方法能够保证系统在外界扰动仅仅积分有界的情形下仍能满足特定的跟踪性能.基于Lyapunov稳定性理论证明了所设计的控制系统闭环稳定.此外,与上述文献中基于小车的动力学研究不同,笔者从小车的左右轮转角考虑.

1 对角递归神经网络

递归神经网络(RNN)的最大特点是网络中有一个或多个反馈回路,这使得网络具有良好的动态性能.笔者采用的对角递归神经网络(DRNN)是将ELMAN网络的反馈层和隐含层简化为对角阵形式,因而网络结构得到极大简化,同时提高了网络实时性,加快了学习速度,更有利于系统在线学习,它的基本结构如图1所示.由图1可知,这是一个 m 维输入 n 维输出的DRNN网络,它的输入/输出向量的动态映射关系为:

$$\begin{cases} h_j(t) = g(s_j(t)); \\ s_j(t) = w_j^1 h_j(t-1) + \sum w_{mj}^1 x_m(t); \\ y_n(t) = \sum w_{jn}^2 h_j(t), \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_m(t)$ 是网络的第 m 个输入; $s_j(t)$ 是隐含层第 j 个神经元的输入; $h_j(t)$ 是输出层第 j 个神经元的输出; $y_n(t)$ 是输出层第 n 个神经元的输出.令 \mathbf{W}^1 、 \mathbf{W}^h 及 \mathbf{W} 分别代表输入层、隐含层及输出层的连接权值矩阵.并将 \mathbf{W}^1 、 \mathbf{W}^h 矩阵元素全部设为1,即输入层与隐含层的连接权重全部取为1,反馈层的权重也全部取为1.网络隐含层的激活函数取 Sigmoid 函数以及平移后的 Sigmoid 函数,输出层函数为线性函数.设 $\mathbf{H}(\cdot) = [h_1(t), h_2(t), \dots, h_m(t)]^T$, $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, 则 DRNN 神经网络的输出可以表示为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}^T \mathbf{H}(\cdot), \quad (2)$$

$$\text{其中, } \mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{j1} & \cdots & w_{jn} \end{bmatrix}.$$

2 非完整约束移动机器人系统

对于一个两轮非完整约束移动机器人系统,考虑外扰的情况下,它的动力学方程:

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{V}} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{V} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\boldsymbol{\tau}}_d = \bar{\boldsymbol{\tau}}, \quad (3)$$

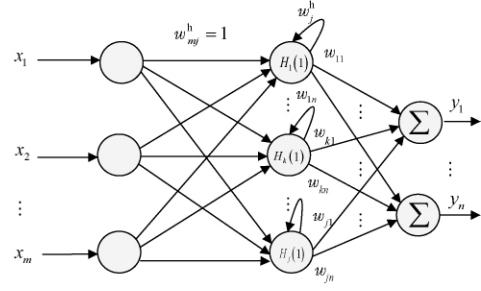


图1 DRNN神经网络

Fig.1 DRNN neural network

其中, $\mathbf{V} = [v, \omega]^T$, v 为小车速度, ω 为小车转向的角速度. 为了将小车左右轮转角作为研究角度, 由文献[16], 引入变换矩阵:

$$\mathbf{V} = \mathbf{N} \dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{N} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2R} & -\frac{r}{2R} \end{bmatrix}; \dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix}.$$

其中, r 和 R 分别代表小车的轮半径和两轮间距的一半; ω_r 和 ω_l 则分代表右轮与左轮的角速度. 将式(4)代入式(3), 同时 $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{N}$, $\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{N}$, 得到:

$$\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \dot{\boldsymbol{\theta}} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\boldsymbol{\tau}}_d = \bar{\boldsymbol{\tau}}. \quad (5)$$

由于受到测量误差、环境和负重变化等因素的影响, 机器人动态模型式(5)中的参数 $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})$ 、 $\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ 是难以精确获得的. 因而笔者假设它们可以分解为标称部分 $\hat{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q})$ 、 $\hat{\mathbf{C}}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{q})$ 和不确定部分 $\Delta \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})$ 、 $\Delta \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\Delta \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$, 且存在如下关系:

$$\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \hat{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q}) + \Delta \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q});$$

$$\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \hat{\mathbf{C}}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}); \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{q}) + \Delta \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}),$$

如果不考虑系统建模误差及外扰的存在, 根据控制力矩法(CTC方法), 可以设计如下控制律:

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\tau}} = & \hat{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q}) (\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}) + \\ & \hat{\mathbf{C}}_0(\mathbf{q}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \dot{\boldsymbol{\theta}} + \bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{q}), \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{e} = [e_r \ e_l]^T = \boldsymbol{\theta}_d - \boldsymbol{\theta}$, 代表轮子转角误差, $\boldsymbol{\theta}_d$ 代表期望的转角, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_r \ \theta_l]^T$ 代表轮子转角, θ_r 代表右轮转角, θ_l 代表左轮转角; \mathbf{K}_p 、 \mathbf{K}_v 为增益矩阵; $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d$ 代表期望角加速度. 将式(7)带入式(5), 化简后得:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0. \quad (8)$$

选择合适的 K_v, K_p 即可保证系统闭环稳定, 然而实际系统不可能精确建模和忽视外扰的存在, 因此有,

$$\hat{M}_0(q) \ddot{\theta} + T(x_e) + \bar{\tau}_d = \bar{\tau}, \quad (9)$$

式中: $T(x_e) = \Delta \hat{M}(q) \ddot{\theta} + \hat{C}(q, \dot{q}) \dot{\theta} + \hat{G}(q)$ 为系统的非线性项, 接下来将用 DRNN 神经网络来逼近.

3 基于 DRNN 神经网络的鲁棒控制器

假设移动机器人系统中, 只有惯性矩阵的标称模型已知, 而其他部分则未知. 然后, 利用 DRNN 神经网络快速逼近能力来逼近 $T(x_e)$, 即

$$T(x_e) = W^* H(\cdot) + \varepsilon, \quad (10)$$

式中: W^* 表示最优值矩阵; $H(\cdot)$ 表示 DRNN 神经网络的隐层输出; ε 表示网络的逼近误差项. 假设存在 Ω_W 并满足 $\Omega_W = \{W \in \mathbf{R}^{m \times n} : \|W\| \leq M_W\}$, 且最优网络权值 W^* 能落在紧集 Ω_W 中, 可表示为 $W^* = \operatorname{argmin}\{\sup |T(x_e) - W^T H(\cdot)|\}$. 针对移动机器人系统, 现设计如下控制器:

$$\bar{\tau} = \hat{M}_0(q) (\ddot{\theta}_d + K_v \dot{e} + K_p e) + W^T H(\cdot) + u, \quad (11)$$

其中, u 为鲁棒控制项, 用来补偿系统的外部扰动及神经网络逼近存在的误差. 将式(10)、(11)代入式(5), 化简后得,

$$\hat{M}_0(q) (\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) = \varepsilon - u + \tilde{W}^T H(\cdot) + \bar{\tau}_d. \quad (12)$$

其中, $\tilde{W} = W^* - W$ 为 DRNN 神经网络的权值误差. 定义状态变量 $x = [x_1^T \ x_2^T]^T = [e^T \ \dot{e}^T]^T$, 则有

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -K_v x_2 - K_p x_1 + \hat{M}_0^{-1}(q) (\varepsilon - u + \tilde{W}^T H(\cdot) + \bar{\tau}_d). \end{cases} \quad (13)$$

系统的状态空间方程为:

$$\dot{x} = Ax + B\hat{M}_0^{-1}(q) (\tilde{W}^T H(\cdot) + \varepsilon + \bar{\tau}_d - u), \quad (14)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} 0 & I_{n \times n} \\ -K_p & -K_v \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}.$$

假设 1 如果把 DRNN 神经网络的逼近误差当作系统外扰的一部分, 即有系统总外扰 $\delta = \hat{M}_0^{-1}(q) (\varepsilon + \bar{\tau}_d)$, 且 $\delta \in L_2[0, \infty)$. 这里假设存在正常数 D_δ , 使得 $\int_0^\infty \|\delta(t)\|^2 dt \leq D_\delta$.

定理 1 对于机器人系统式(5), 若满足假设 1, 且存在正定对称矩阵 $P = P^T > 0$, 满足如下 Riccati 方程

$$PA + A^T P + PB \left(\frac{1}{\gamma^2} I_{n \times n} - 2R^{-1} \right) B^T P = -Q, \quad (15)$$

式中: $R = R^T > 0$ 为 H_∞ 控制增益; $Q = Q^T > 0$ 为正定对称矩阵; $I_{n \times n}$ 为单位矩阵; $\gamma > 0$ 为干扰抑制指标. 对于式(12), 令

$$u = \hat{M}_0(q) R^{-1} B^T P x. \quad (16)$$

DRNN 神经网络参数的自适应学习算法为:

$$\dot{\tilde{W}} = \Gamma^{-1} H(\cdot) x^T P B \hat{M}_0^{-1}(q). \quad (17)$$

其中, Γ 为正定对角增益矩阵. 那么系统可以满足如下两个目标: ① 所设计的鲁棒混合控制系统中的状态变量一致有界. ② 系统能够满足如下 H_∞ 跟踪性能:

$$\int_0^T \|x(t)\|_Q^2 dt \leq \alpha + \gamma^2 \int_0^T \|\delta(t)\|_Q^2 dt, \quad (18)$$

其中, $\alpha = x^T(0) P x(0) + \operatorname{tr}(\tilde{W}^T(0) \Gamma \tilde{W}(0))$, $x(0)$ 和 $\tilde{W}(0)$ 则分别代表了系统状态向量 $x(t)$ 的初始值以及 DRNN 神经网络权值误差 $\tilde{W}(t)$ 的初始值.

证明 选取如下 Lyapunov 函数,

$$L = \frac{1}{2} x^T P x + \frac{1}{2} \operatorname{tr}(\tilde{W}^T \Gamma \tilde{W}). \quad (19)$$

对上式两边进行微分, 并将式(14)代入后得

$$\begin{aligned} \dot{L} &= \frac{1}{2} \dot{x}^T P x + \frac{1}{2} x^T P \dot{x} + \operatorname{tr}(\tilde{W}^T \Gamma \dot{\tilde{W}}) = \\ &= \frac{1}{2} [Ax + B\hat{M}_0^{-1}(q) (\tilde{W}^T H(\cdot) - u + \varepsilon + \bar{\tau}_d)]^T P x + \\ &= \frac{1}{2} x^T P [Ax + B\hat{M}_0^{-1}(q) (\tilde{W}^T H(\cdot) - u + \varepsilon + \bar{\tau}_d)] + \\ &= \operatorname{tr}(\tilde{W}^T \Gamma \dot{\tilde{W}}). \end{aligned} \quad (20)$$

根据假设 1, 将式(16)、(17)代入式(20), 并考虑

$\dot{\tilde{W}} = -\dot{\tilde{W}}$, 则

$$\begin{aligned} \dot{L} &= \frac{1}{2} x^T (PA + A^T P) x - x^T P B R^{-1} B^T P x + x^T P B \delta = \\ &= \frac{1}{2} x^T \left(PA + A^T P + PB \left(\frac{I_{n \times n}}{\gamma^2} - 2R^{-1} \right) B^T P \right) x - \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma} B^T P x - \gamma \delta \right)^T \left(\frac{1}{\gamma} B^T P x - \gamma \delta \right) + \frac{1}{2} \gamma^2 \delta^T \delta \leq \\ &= -\frac{1}{2} x^T Q x + \frac{1}{2} \gamma^2 \delta^T \delta. \end{aligned} \quad (21)$$

对上式两边从 $t = 0$ 到 $t = T$ 积分得

$$L(x(T), \tilde{W}(T)) - L(x(0), \tilde{W}(0)) \leq$$

$$-\frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) dt + \frac{\gamma^2}{2} \int_0^T \boldsymbol{\delta}^T(t) \boldsymbol{\delta}(t) dt. \quad (22)$$

由于 $L(\mathbf{x}(T), \tilde{\mathbf{W}}(T)) \geq 0$, 则

$$\int_0^T \|\mathbf{x}(t)\|_{\tilde{\mathbf{Q}}}^2 dt \leq 2L(\mathbf{x}(0), \tilde{\mathbf{W}}(0)) + \gamma^2 \int_0^T \|\boldsymbol{\delta}(t)\|^2 dt. \quad (23)$$

因此,式(18)所提的 H_∞ 跟踪性能得以满足. 根据假设1,存在 $\sigma_d > 0$ 使得 $\|\boldsymbol{\delta}\| \leq \sigma_d$, 则有

$$\dot{L} \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{x}(t)\|^2 + \frac{1}{2} \gamma^2 \sigma_d^2, \quad (24)$$

其中: $\lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ 代表矩阵 \mathbf{Q} 的最小特征值,由上可知,对于任意小的 $\varepsilon > 0$,若选择 $\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) > \frac{\gamma^2 \sigma_d^2}{\varepsilon^2}$,

那么存在 $\zeta > 0$,使得下式成立,

$$\dot{L} \leq -\zeta \|\mathbf{x}(t)\|^2 < 0, \forall \|\mathbf{x}(t)\| > \varepsilon. \quad (25)$$

因此,闭环系统的所有状态变量一致有界.

结论1 在本文的设计中,假设只有标称的惯性矩阵 $\hat{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q})$ 是已知的,其余的标称参数 $\hat{\mathbf{C}}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 和 $\hat{\mathbf{G}}_0(\mathbf{q})$ 都是未知的.

结论2 在大多数已有的文献[13-15]中,干扰是假设有确切上界的,此时可以通过选择合适的增益矩阵,利用变结构控制、自适应控制等鲁棒控制算法即可保证系统稳定.然而,实际情况中干扰的上界确切值可能无法精确获知.因此,笔者假设干扰是满足能量有界的,通过文中所提的算法可以在干扰上界未知的情况下使得系统能满足特定的跟踪性能.

4 仿真试验

为了验证所提理论的可行性,设置具体参数如下: $m = 10 \text{ kg}$, $R = 0.25 \text{ m}$, $r = 0.05 \text{ m}$, $d = 0$. 假设期望的左右轮转角向量形式为 $\boldsymbol{\theta}_d = [\theta_{rd} \ \theta_{ld}]^T$, θ_{rd}, θ_{ld} 随时间的轨迹为一段梯形折线,初始折线 $\theta_{rd} = t + 0.1 \cos t$, $\theta_{ld} = t$. 初始化以下参数, $\boldsymbol{\theta}(0) = [1 \ 1]^T$, $\dot{\boldsymbol{\theta}}(0) = [0 \ 0]^T$. 选取控制器增益 $\mathbf{K}_v = 50\mathbf{I}_{2 \times 2}$, $\mathbf{K}_p = 150\mathbf{I}_{4 \times 4}$, 外部扰动 $\boldsymbol{\tau}_d = [10(\sin t)e^{-0.2t}, 10(\cos t)e^{-0.2t}]^T$. 为了证实所提算法的有效性,在相同的模型及外部条件下对比CTC方法. 则初始化所提控制器的参数,隐层神经元个数选取为7, $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_v$ 取值同CTC方法中一样, $\gamma = 0.2$, $\mathbf{Q} = 40\mathbf{I}_{4 \times 4}$, $\mathbf{R} = 0.001 \mathbf{I}_{2 \times 2}$. 根据式(15),解出Riccati方程得:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 42.349 \mathbf{I}_{2 \times 2} & 0.085 \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ 0.085 \mathbf{I}_{2 \times 2} & 0.119 \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

仿真结果如图2、3、4所示.

由图2、3可知,设计的新方法在从 $t = 0 \text{ s}$ 到 $t = 30 \text{ s}$ 的整个跟踪过程中,左轮右轮的转角跟踪误差是小于CTC方法的. 尤为突出的是,从图2、3可以明显看出期望轨迹在 $t = 10 \text{ s}$ 和 $t = 20 \text{ s}$ 左右处发生变化时,所设计的方法与CTC方法的跟踪误差发生了变化,但设计的新方法误差抖动明显小于CTC方法,具有更好的鲁棒适应性. 同时,从图4可知,DRNN神经网络的权值最终能稳定在最优值. 而且在面对同样的外扰下,所设计的方法能满足特定的跟踪性能.

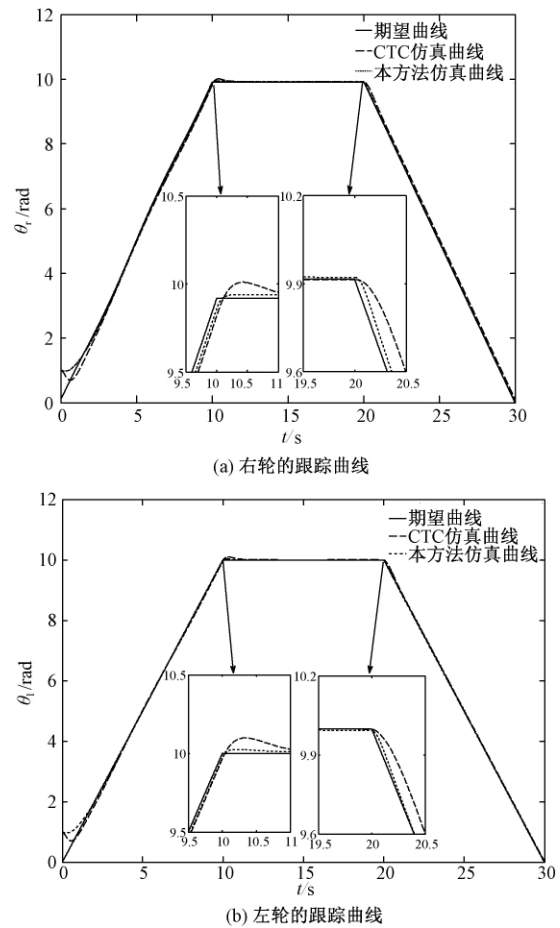
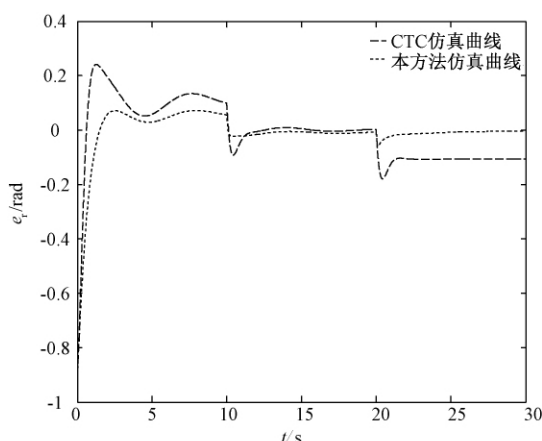


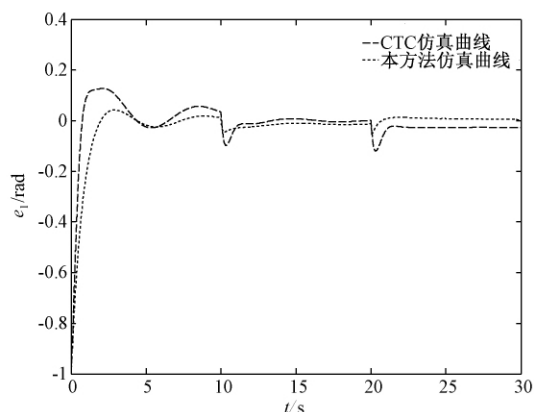
图2 小车两轮的转角跟踪曲线
Fig.2 Tracking curve of two wheels

5 结论

针对非完整约束的轮式移动机器人,笔者提出了一种具有全局稳定性能的鲁棒跟踪控制结构. 它结合了DRNN神经网络和 H_∞ 控制方法. 理论分析表明它对逼近误差的强鲁棒性以及能量有界但不可测量的外扰具有抑制作用. 此外,闭环



(a) 右轮的转角跟踪误差曲线



(b) 左轮的转角跟踪误差曲线

图 3 小车两轮的转角跟踪误差曲线

Fig. 3 The tracking errors of two wheels

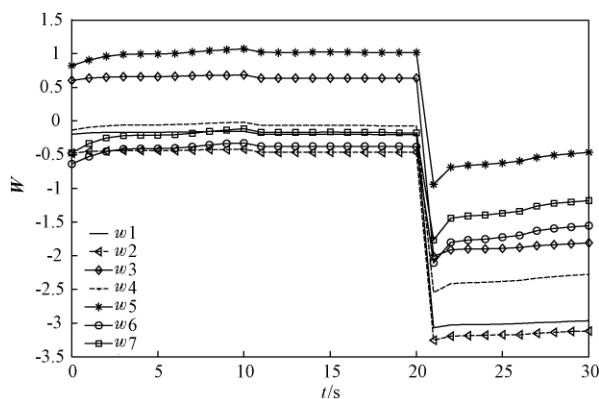


图 4 DRNN 网络权重的变化曲线

Fig. 4 The curve of weight in DRNN network

系统所有的状态变量能够保证有界. 仿真结果表明, 所提算法比控制力矩法具有更好的跟踪性能. 而如何提高实际的硬件仿真效果是下一步研究的内容.

参考文献:

[1] 尉成果, 赖欢, 王太江. 轮式移动机器人轨迹跟踪控制算法的研究[J]. 机电工程, 2012, 29(6): 730-732.

- [2] 白国长, 侯伯杰. 机器人的一种鲁棒控制方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(1): 52-54.
- [3] 李健勇, 赵峰, 楚冰. 广义线性变参数系统输出反馈鲁棒控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 75-78.
- [4] 王瑗琿, 张强, 王东云, 等. 基于滑模变结构的IPMC跟踪控制系统设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 104-107.
- [5] 孙妍, 王朝立, 杨亚民. 基于模糊控制的移动机器人视觉反馈跟踪[J]. 计算机工程, 2011, 37(14): 175-177.
- [6] SPANDAN R, NANDY S. Time delay sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robot: experimental validation [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong: IEEE Press, 2014: 2886-2892.
- [7] 张扬名, 刘国荣, 杨小亮. 基于滑模变结构的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 计算机工程, 2013, 39(5): 160-164.
- [8] WONG C C, LIN B C, CHENG C T. Fuzzy tracking method with a switching grey prediction for mobile robot [C] // The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Melbourne: IEEE Press, 2001: 103-106.
- [9] YI H. A sliding mode control using brain limbic system control strategy for a robotic manipulator [J]. International journal of advanced robotic systems, 2015, 12(158): 23-29.
- [10] WANG K, LIU Y, LI L. Visual servoing trajectory tracking of nonholonomic mobile robots without direct position measurement [J]. IEEE transactions on robotics, 2014, 30(4): 1026-1035.
- [11] SHOJAEI K, SHAHRI A M. Output feedback tracking control of uncertain non-holonomic wheeled mobile robots: a dynamic surface control approach [J]. Control theory and applications, 2012, 6(2): 216-228.
- [12] SHOJAEI K, SHAHRI A N. Adaptive robust time-varying control of uncertain non-holonomic robotic systems [J]. IET control theory and applications, 2012, 6(1): 90-102.
- [13] HWANG C K, CHEN B S, CHANG Y T. Combination of kinematical and robust dynamical controllers for mobile robotics tracking control: (I) optimal H_∞ control [C] // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications. Taipei: IEEE Press, 2004: 1211-1216.
- [14] KHALAJI A K, MOOSAVIAN S A A. Robust adaptive controller for a tractor-trailer mobile robot [J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2014, 19(3):

943–953.

[15] 彭金柱, 王耀南, 王杰. 基于递归模糊神经网络的机器人鲁棒 H_∞ 跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(9): 1145–1151.

[16] 牛雪梅, 高国琴, 鲍智达, 等. 基于滑模变结构控制的温室喷药移动机器人路径跟踪 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 9–16.

A Stable Robust Control for Wheeled Robotic System Based on DRNN Network and H_∞ Methods

PENG Jinzhu, BIAN Yingnan, ZHOU Shuliang

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

Abstract: In order to solve the modeling errors and external disturbances in the system, a stable robust hybrid tracking control scheme for wheeled robotic system with nonholonomic constraint was proposed. The hybrid control scheme combined DRNN neural network with nonlinear H_∞ method. DRNN neural network was employed to approximate the system uncertainty terms, and H_∞ control was utilized to achieve a desired robust tracking performance. Based on Lyapunov stability theory, the tracking errors of the closed-loop system were bounded. In addition, a specified H_∞ tracking performance was obtained by the proposed robust hybrid control even though the disturbances were merely integral bounded. Finally, the proposed control scheme was compared with the computed torque control for nonholonomic mobile robotic system under the uncertainties and external disturbances. Simulation experiments showed that the proposed control strategy was effective.

Key words: DRNN neural network; computed torque control; H_∞ control; uncertainty; Lyapunov stability

(上接第45页)

Comparative Study on Cooling Channel for Electric Vehicle Drive Motor Based on CFD

SHEN Chao¹, YU Peng¹, YANG Jianzhong¹, ZHANG Dongwei², WEI Xinli²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the cooling characteristics of the electric vehicle drive motor, a novel cooling structure the circumferential multi spiral structure, was proposed. The three dimensional numerical model of fluid flow and heat transfer in the shell was established. The flow field and temperature field of different water cooling schemes were calculated based on CFD technology. The numerical results showed that the temperature uniformity and cooling performance of Circumferential "Z" structure is better than the circumferential multi spiral structure; and the circumferential "Z" structure was suitable for the cooling of 135 kW electric vehicle drive motor under the condition of inlet water temperature was 65 °C, with the optimal water flow rate 9.8 L/min. However, the circumferential multi spiral structure could be used for higher power density of the motor cooling for the better performance of pressure resistance. The research provided a theoretical basis for cooling design and optimization of the small size and high power density motor.

Key words: motor cooling; CFD; numerical simulation

运动准备电位单次检测技术研究

逯 鹏, 牛 新, 刘素杰, 胡玉霞, 胡航航

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对自主运动起始时刻难以定位的难点, 以受试者手臂自主运动前的 EMG 信号为研究对象, 采用肌电激活触发点作为自主运动起始时刻, 然后确定有效时间段; 针对运动准备电位频率段难以确定的问题, 采用小波包变换与功率谱分析相融合的方法确定有效频段. 以信号的能量、均值和方差为特征, 利用支持向量机(SVM)进行 RP 单次检测. 实验结果表明: 在自主运动过程单次检测 RP 中, 15 名受试者 9 组试验中最高检测率为 77.5%~91.3%; 每名受试者的 9 组平均检测率为 68.2%~91.2%. 研究结果有助于运动准备电位在异步 BCI 系统中的应用.

关键词: 脑电信号; 肌电信号; 运动准备电位; 小波包变换; 功率谱分析; 支持向量机

中图分类号: TP2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.003

0 引言

目前, 提高 BCI 系统实时性的主要途径是提高算法的效率^[1]. 脑科学研究发现, 大脑在自主运动前的 1 500~2 000 ms 已经被激活^[2], 在大脑额叶皮层区和初级运动皮层区诱发电位, 称为运动准备电位(readiness potentials, RP)^[3]. RP 由两个部分组成: 早期的 RP 于自主运动前 1 500 ms 诱发一个缓慢上升的负电位; 晚期的 RP 于自主运动前 400 ms 诱发一个陡峭的斜坡电位, 如图 1 所示^[4-5]. RP 波幅范围是 2~10 μV , 信噪比低、幅值小、易受干扰. 此外, 提取 RP 的过程易受肌肉收缩力度、收缩速度等影响^[6].

RP 检测技术主要有 Lew 等^[7]采用运动前的脑电信号对自主右手腕扩展动作进行了预测, 结果表明在运动起始前的 0.62 s 对动作的预测正确率平均达到 $(62.75 \pm 10)\%$; Xu 等^[8]采用 MRCP 以位置保留映射方法提取 EEG, 采用 LDA 分类器进行分类, 获得真阳性为 $(79 \pm 11)\%$ 的检测率.

笔者针对 RP 单次特征提取困难的问题, 基于 EMG 信号确定运动准备的有效时间段, 基于有效时间段内的脑地形图序列, 定位激活脑区并选

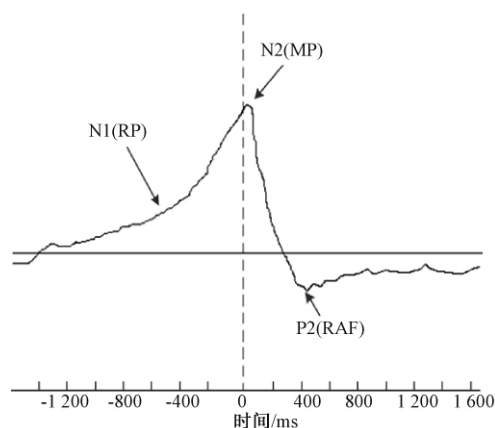


图1 运动相关电位

Fig.1 Motor relative potential

取关联通道, 采用小波包变换与功率谱分析相融合的方法分析低频(0.1~1.0 Hz)信号, 以信号的能量、均值和方差为特征, 并采用支持向量机进行运动单次 RP 检测.

1 试验与数据采集

提示信息采用声音、图片等会诱发相关的脑电信号, 会对 RP 信号造成污染^[9]. 本试验设计一种受试者手腕自主运动的试验范式, 避免提示信息产生的噪声污染. 试验范式流程如下: 受试者坐于计算机屏幕前, 两手自然地垂放在椅子上, 受试

收稿日期:2017-10-14; 修订日期:2018-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60841004; 60971110; 61172152), 郑州市科技攻关项目(112PPTGY219-8), 河南省青年骨干教师计划资助项目(2012GGJS-005)

作者简介: 逯鹏(1974—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事复杂视觉图像信息处理和脑-机接口方面的研究, E-mail: lupeng@zzu.edu.cn.

者注视计算机屏幕,开始提示音后,受试者手腕上下摆动5次,手腕自主摆动的时间间隔约为2 000 ms。2 min后,会有结束提示音,结束这一组试验,如图2所示。

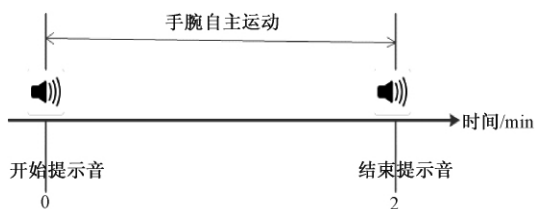


图2 实施范式流程图

Fig. 2 Experimental flowchart

试验采用 Neuroscan SynAmps 64 导联脑电采集系统,10~20 国际标准电极分布,采样频率设置为1 000 Hz,放大器的带通滤波设置为0.01~100 Hz;试验中,脑电采用单极记录方式,将右侧乳突(M2)设置为参考电极,同时记录水平眼电和垂直眼电,电极阻抗小于5 k Ω 。

为了单次检测 RP,将信号分为两部分:无运动意图信号和有运动意图信号,如图3所示。把提示音前的1 000 ms作为0类;把运动开始前的1 000 ms作为1类,用于 RP 检测。

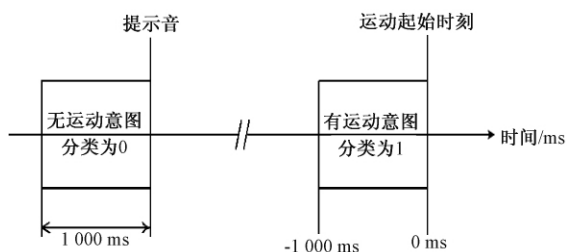


图3 用于训练分类器的数据段

Fig. 3 Selected EEG samples to build the training set of the movement intention intention classifier

2 方法

2.1 预处理

脑电信号中包含了大量的噪声干扰和伪迹信号,其中 RP 易受眼电伪迹、肌电伪迹干扰。采用二阶统计量和时序结构特征法去除眼电伪迹、肌电伪迹,以降低其影响^[10]。

2.2 确定有效时间段

运动准备的有效时间段指的是运动起始前的1 000 ms,如何确定运动的起始时刻是技术难点。

对 EMG 信号采用高通滤波器(高通5 Hz,低通50 Hz,24 dB/octave)滤波,EMG 信号在运动时刻的能量有大幅的增加,选取这一点作为运动的

起始时刻。基于 EMG 信号的能量在运动起始时刻突增这一现象,对受试者分别做9组试验,确定该受试者的最优的阈值,达到阈值的这一时刻,作为运动的起始时刻。其中一个受试者的 EMG 信号图形如图4所示,红色为最优阈值。

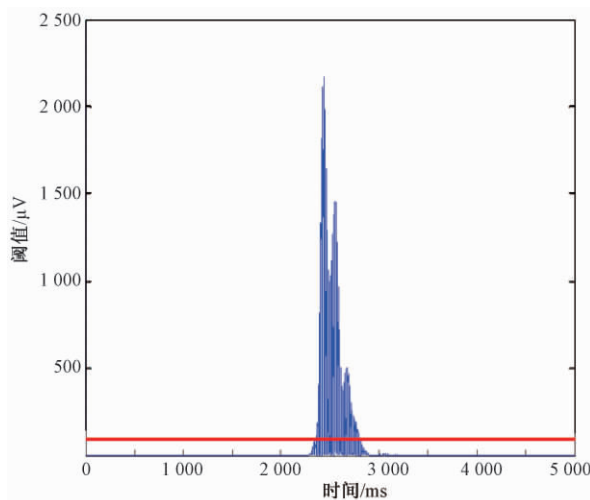


图4 阈值确定运动起始时刻

Fig. 4 Threshold determines the movement starting time

2.3 定位激活脑区并选取关键通道

大脑运动准备过程的大脑机理的研究尚不明确,导致与运动准备电位相关的通道也不能确定^[11]。

针对这一问题,我们采集了被试的全通道 EEG,平均叠加 EEG 中的 RP 成分后,绘制出整个过程的脑地形图,分析时序关系和各个时刻激活的相关区域。其中一个受试者的脑地形图序列如图5所示。

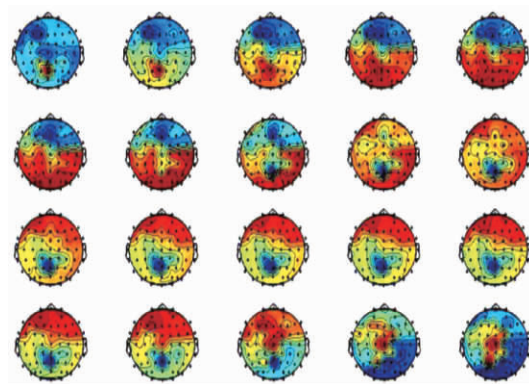


图5 脑地形图序列(低频信号)

Fig. 5 The sequence of brain topographic maps (low frequency)

在图5中,运动的起始时刻前1 000 ms为零时刻,从0 ms时刻到运动起始时刻950 ms绘制脑地形图,每隔50 ms画一幅。在0~100 ms期间,大脑处于静息的状态;在550~800 ms期间,

内侧前额及额中央部观察到 ERP 的差异,这些活动反映运动意图的预测过程。

从脑地形图序列分析发现 C1、C2、C3、C4、C5、C6、CP1、CP2、CP3、CP4、CP5、CP6、FC1、FC2、FC3、FC4、FC5、FC6、P5、P3 这 20 个通道在运动准备时,有较大的振幅。20 个通道所在脑区是后顶叶和额叶皮质区,该脑区与运动规划和运动意图关联较大^[12-13],因此我们选择此 20 个通道提取 EEG 信号。

2.4 确定敏感频率点和频率段

在运动准备过程的有效时间段内,大脑的感觉运动皮层会出现 EEG 的节律性活动,包括低频直流成分^[14-15]。基于小波包变换的性质,采用多次迭代的小波转换进一步分析输入 EEG 的低频直流成分(0.1~1 Hz)。

首先对采样频率为 1 000 Hz,运动准备相关的 20 个通道,运动开始时刻前的 EEG 数据采用小波包进行 12 层分解,将 0.1~1 Hz 频率段 EEG 划分为 7 个频率段,如表 1 所示。

表 1 频带范围

Tab. 1 The frequency range

序号	节点	频率段/Hz
1	[12,1]	0.12~0.24
2	[12,3]	0.24~0.36
3	[12,2]	0.36~0.48
4	[12,7]	0.48~0.61
5	[12,6]	0.61~0.73
6	[12,4]	0.73~0.85
7	[12,5]	0.85~0.97

根据 7 个频率段分量,对每一个通道均进行叠加平均,绘制各频段的功率谱,其中主要通道的功率谱图如图 6 所示。横坐标表示时间,纵坐标表示表中的序号,运动的起始时刻为 1 000 ms。在序号 2 所对应的 0.24~0.36 Hz 频率段,运动起始前的 1 000 ms 的能量比其他时间段的能量高,认为此为运动准备过程的有效特征。

2.5 通道优化

采用 2.3 节中选取的 20 个通道采取 EEG 数据,提取 0.24~0.36 Hz 频率分量作进一步分析,绘制了其中 6 名受试者能量随时间变化的规律。如图 7 所示,横坐标表示时间,纵坐标表示通道,运动的起始时刻为 1 000 ms。不同的被试者之间与运动准备相关的通道有差异,但是都包含在选择的 20 个通道中。因此,选择 20 个通道的数据进行特征提取。

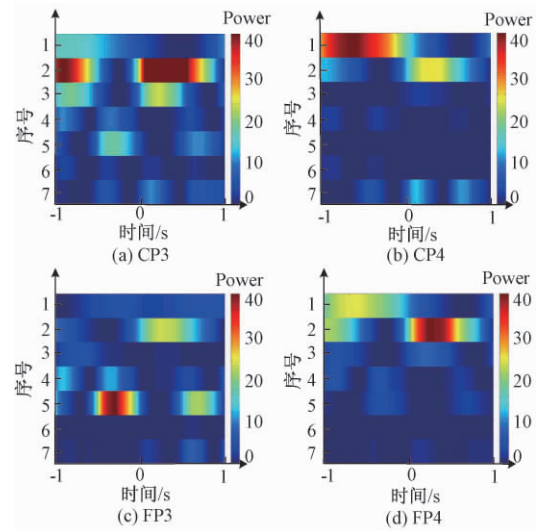


图 6 0.1~1 Hz 功率谱图

Fig. 6 0.1~1 Hz power spectrum

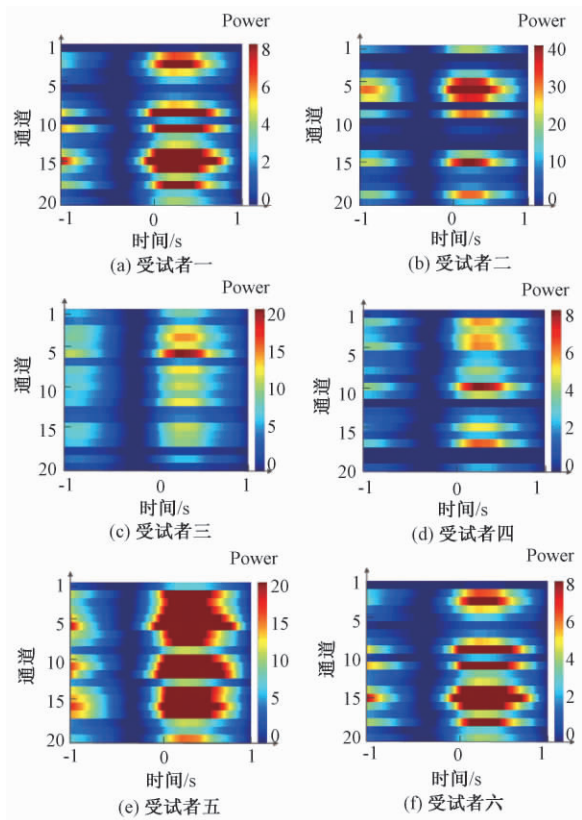


图 7 不同受试者的相关通道功率谱图

Fig. 7 The power spectrum of Correlation channel of different subjects

2.6 特征提取

基于 2.2、2.3、2.4、2.5 节中对于 RP 时域、频域特性分析结果,提出针对 RP 单次特征提取算法。

(1) 对 EMG 信号进行处理,确定运动的起始时刻。

(2) 输入已选择的 20 个通道,运动的起始时

刻前 1 000 ms 的 EEG 数据 $X(i)$.

(3) 去除 EEG 的基线,采用二阶统计量和时序结构特征法去除眼电伪迹、肌电伪迹.

(4) 选取 ‘db4’ 小波包基函数将 EEG 数据 $X(i)$ 进行 12 层分解.

(5) 重构低频 0.24 ~ 0.36 Hz 频率分量 $S_{12,3}$, 其中 $S_{12,3}$ 是小波重构第 12 层第 3 节频率分量.

(6) 计算 $S_{12,3}$ 对应的能量 E_w ,均值 M_w 和方差 V_w .

(7) 对每个通道重复 4 ~ 6 步骤,获得 60 维特征向量.

3 结果分析

3.1 训练模型

SVM 的核参数直接关系到分类器识别正确率的高低.经验值和试算方法确定核参数的计算效率低,且难以找到最优解^[16].笔者采用网格搜索法获得最佳参数 c 和 g ,得到最佳模型.基于 RP 单次特征提取算法,选取每名受试者 80% 数据训练 SVM 模型,如图 8 所示.

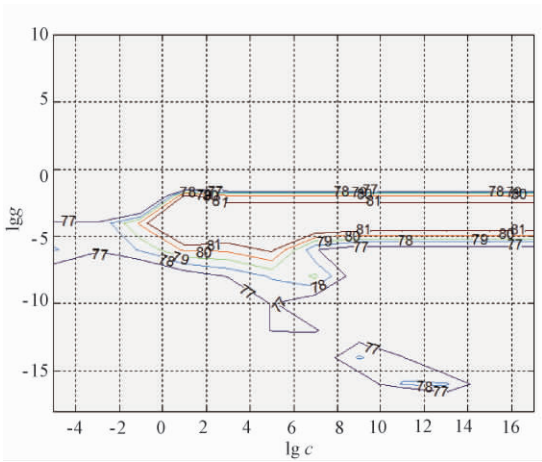


图 8 参数 c 和 g 的搜索结果

Fig.8 The search results of parameter c and g

3.2 分类识别

分别对 15 名受试者进行 9 组试验,并对试验数据进行处理,剔除有明显错误、有明显波动等无效数据,使无运动意图类和有运动意图类两类样本比例为 1:1,取每名受试者 80% 数据训练,剩余 20% 数据进行测试,基于 3.1 节中所述的 RP 单次特征提取算法,采用 SVM 分类器分别进行单次 RP 检测,其结果如表 2 所示.不同的受试者单次 RP 检测准确率存在差异.15 名受试者 9 组试验中最高检测率是 77.5% ~ 91.3%; 每名受试者的 9 组平均检测率是 68.2% ~ 91.2% .

表 2 单次 RP 检测正确率

Tab.2 The single test results of RP %

受试者	最高正确率	平均正确率	受试者	最高正确率	平均正确率
1	82.2	78.2	9	85.5	81.3
2	77.5	71.3	10	90.8	81.8
3	87.6	79.9	11	95.0	83.7
4	78.2	76.3	12	91.3	75.6
5	88.6	81.3	13	88.5	80.2
6	92.7	91.2	14	84.4	73.9
7	83.1	76.2	15	77.5	68.2
8	76.3	71.3			

4 结论

通过实时的 BCI 系统采集运动执行前的 EEG 和 EMG 信号,根据 EMG 信号确定运动准备的有效时间段,由脑地形图定位激活脑区,采用小波包变换的方法提取低频 0.24 ~ 0.36 Hz 频率分量,分析其幅值和能量的特征,用支持向量(SVM) 分类识别.通过单次检测 RP,以确定受试者的运动意图,为异步 BCI 系统的实现提供了新的技术途径.笔者通过离线分析只对运动前 1 000 ms 的数据研究 RP,不同受试者检测准确率存在差异.今后将进一步研究克服不同受试者的差异,提高预测 RP 的准确率,将其应用于在线系统中.

参考文献:

- [1] 张勇,党兰学. 线性判别分析特征提取稀疏表示人脸识别方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2): 94 ~ 98.
- [2] MORREE H M D, KLEIN C, MARCORA S M. Perception of effort reflects central motor command during movement execution[J]. Psychophysiology, 2012, 49(9): 1242 ~ 1253.
- [3] CACIOPPO J T, TASSINARY L G, BERNTSON G G. Handbook of psychophysiology[M]. Cambridge University Press, 2000: 397 ~ 408.
- [4] BAI O, RATHI V, LIN P, et al. Prediction of human voluntary movement before it occurs[J]. Clinical neurophysiology, 2011, 122(2): 364 ~ 372.
- [5] ZEPHANIAH P V, KIM J G. Recent functional near-infrared spectroscopy based brain computer interface systems: Developments, applications and challenges[J]. Biomedical engineering letters, 2014, 4(3): 223 ~ 230.
- [6] YATES J, HUK A, CORMACK L, et al. Psychophysical reverse correlation of motion perception[J]. Jour-

- nal of vision, 2012, 12(9): 746–746.
- [7] LEW E, CHAVARRIAGA R, SILVONI S, et al. Detection of self-paced reaching movement intention from EEG signals [J]. *Frontiers in neuroengineering*, 2012, 5(13): 13–30.
- [8] XU R, JIANG N, LIN C, et al. Enhanced low-latency detection of motor intention from EEG for closed-loop brain-computer interface applications [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2014, 61(2): 288–296.
- [9] POUYA A, STEFANO C, LUCA A. How capable is non-invasive EEG data of predicting the next movement? A mini review [J]. *Frontiers in human neuroscience*, 2013, 7(124): 124–131.
- [10] GE S, HAN J, HAN M. Nonnegative mixture for underdetermined blind source separation based on a tensor algorithm [J]. *Circuits systems & signal processing*, 2015, 34(9): 1–16.
- [11] MÜNßINGER J I, HALDER S, KLEIH S C, et al. Brain painting: first evaluation of a new brain-computer interface application with ALS-patients and healthy volunteers [J]. *Frontiers in neuroscience*, 2010, 4: 182.
- [12] TAKAHASHI J, YASUNAGA D. Reported visual imagery and apparent motion, an event-related potential study [J]. *Neuroreport*, 2012, 23(15): 904–910.
- [13] HAGGARD P. Human volition: towards a neuroscience of will [J]. *Nature reviews neuroscience*, 2008, 9(12): 934–946.
- [14] LEW E, CHAVARRIAGA R, SILVONI S, et al. Detection of self-paced reaching movement intention from EEG signals [J]. *Frontiers in neuroengineering*, 2012, 5(13): 13–30.
- [15] MIRANDA R A, CASEBEER W D, HEIN A M, et al. DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies [J]. *Journal of neuroscience methods*, 2015, 244: 52–67.
- [16] 张震, 张英杰. 基于支持向量机与 Hamming 距离的虹膜识别方法 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(3): 25–29.

Study on Single Trial Detection of Readiness Potentials

LU Peng, NIU Xin, LIU Sujie, HU Yuxia, HU Hanghang

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

Abstract: Aiming at locating the starting time of autonomous motion, the EMG signal before the volunteers' autonomous motion was taken as the research object. The EMG activation trigger point was selected as the starting time of autonomous motion, and then the effective time segment was determined. The frequency section of the motion preparation potential was difficult to be determined, the effective frequency band was determined by the method of combining the wavelet packet transform and the power spectrum analysis. The energy, mean and variance of the extracted signal were characterized by the support vector machine (SVM) for single detection of RP. The experimental results showed that: in the process of self motion of single detection RP, 15 subjects in 9 experiment the highest detection rate was 77.5% ~ 91.3%; each participant of the 9 groups the average detection rate was 68.2% ~ 91.2%. The results of this paper could be useful to the application of motion preparation potential in asynchronous BCI system.

Key words: EEG; EMG; movement readiness potentials; WPD; power spectrum analysis; SVM

一种自适应低剂量 CT 图像质量改善算法

蒋慧琴¹, 徐玉凤¹, 马 岭¹, 杨晓鹏², Toshiya Nakaguchi³

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学第一附属医院 医学装备部, 河南 郑州 450052; 3. 日本千叶大学 先端医工学研究中心, Chiba)

摘要: 针对低剂量 CT (low-dose CT, LDCT) 扫描会导致图像质量劣化问题, 提出一种基于剪切波变换的低剂量 CT 图像质量改善算法. 首先, 利用 Anscombe 变换, 将 LDCT 图像中的 X 射线量子噪声转化为近似服从 Gaussian 分布的噪声; 其次, 将变换后的 LDCT 图像转换成剪切波变换域并针对剪切波域上的低信噪比高频系数子带, 利用剩余自相关功率改进噪声方差的计算精度并结合贝叶斯最大后验估计提取非噪声高频系数; 最后, 利用剪切波逆变换和 Anscombe 逆变换获得重构图像. 大量的实验结果表明, 该算法优于小波域的算法. 其重构图像质量与基于小波域的算法相比, 峰值信噪比 (PSNR) 平均提高 52.2%, 平均结构相似度 (MSSIM) 提高 34.9%.

关键词: 低剂量 CT; 剪切波变换; 量子噪声; 贝叶斯估计; 噪声方差

中图分类号: TP301

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.020

0 引言

为了解决 CT 检查导致的辐射剂量过高问题, 低剂量 CT 扫描逐渐成为临床应用热点. 然而, 低剂量 CT 扫描会导致图像质量退化, 特别是 LDCT 图像中的噪声会严重影响诊断精度. 因此, 去除噪声是改善低剂量 CT 图像质量的重要任务. 低剂量 CT 扫描所引起的噪声主要是 X 射线量子噪声^[1]. 针对图像中的细节和噪声同属高频成分难以分离的经典难题, 小波变换等多尺度分析方法呈现出一定的优势^[2]. 近几年, 许多学者已提出大量的小波域去除量子噪声方法^[3-4]. 主要包括两种思路: 其一, 假设其服从 Gaussian 分布, 利用阈值法去噪, 如小波硬阈值、软阈值和贝叶斯阈值法等^[3]. 其二, 假设其近似服从 Poisson 分布. 首先利用方差稳定变换将其转化为近似服从 Gaussian 分布的噪声, 再利用去除 Gaussian 噪声的常用方法进行处理^[4-7]. 随着多尺度分析方法的发展, 一些学者提出了基于剪切波变换的图像去噪算法. 例如, Dan 等^[8]提出的基于剪切波变换的贝叶斯最大后验估计方法, 能有效去除因小

波去噪产生的伪吉布斯效应; 胡海智等^[9]提出的全变差正则化剪切波域收缩方法, 能更有效地去除 Gaussian 噪声并保留图像中的细节信息等等. 为了去除低剂量 CT 图像中的量子噪声, 笔者假设量子噪声近似服从 Poisson 分布, 并利用 Anscombe 变换, 将原图像中的噪声转化为一个具有近似常数方差的 Gaussian 噪声. 然而, 由于传统 Anscombe 变换对低信噪比的图像其噪声方差无法趋于稳定^[10], 致使去噪效果欠佳. 为了解决这一问题, 文献^[11]通过最优化 Anscombe 逆变换以改进去噪效果; Zhang 等^[12]通过改进 Anscombe 变换, 使当 Poisson 噪声参数 $\lambda > 0.1$ 时, 其噪声方差可以趋于稳定. 但是, 当 $\lambda \leq 0.1$ 时, 该方法仍不能使噪声方差稳定到一个常数值. 基于前期研究^[7]可知, 当 Poisson 噪声参数 $\lambda \leq 0.1$ 时, 如在应用 Anscombe 变换的基础上, 再利用阈值法去除量子噪声可以取得更好的效果, 但其去噪效果依赖于噪声方差值的估计精度.

鉴于此, 笔者针对低信噪比的剪切波高频系数子带, 提出基于剩余自相关功率的噪声方差估计方法, 并结合贝叶斯最大后验估计提取出非噪

收稿日期:2017-12-23; 修订日期:2018-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271146); 河南省国际合作项目(152102410017)

作者简介:蒋慧琴(1964—), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事医学图像处理及分析研究, iehqiang@zzu.edu.cn.

(3) 用贝叶斯最大后验估计法提取高频子带中非噪声剪切波系数近似值:

$$\hat{x}(y) = \text{sign}(y) (|y| - T)_+ = \begin{cases} 0, & \text{if } |y| < T \\ \text{sign}(y) (|y| - T), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 噪声方差估计

对 CT 图像加入均值为 0 的 Gaussian 白噪声,用非下采样剪切波对图像进行尺度为 4 的分解,每层选定一个方向. 由于随着分解层数的增加,高频子带的图像信息逐渐减少,而噪声信息逐渐增多,且第 4 层高频子带的信噪比最低,故笔者分别用 MAD 方法和剩余自相关功率方法计算含噪图像第 4 层高频细节子带的噪声方差,并对实验结果进行比较,其实现步骤如下.

(1) 选取噪声方差的候选值. 利用式 (3) 计算所选高频子带的噪声方差 σ_m , 并且以该值为中心,间隔为 0.1, 选取 30 个噪声方差候选值 $\sum = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m, \dots, \sigma_{30}]$.

(2) 计算所选高频子带所需的阈值. 针对选定的每一个噪声方差候选值 σ_m , 利用式 (4) 所示的贝叶斯最大后验估计方法计算阈值^[8].

(3) 计算剩余误差. 利用贝叶斯最大后验估计法估计第 m 个噪声方差对应的去噪图像 \hat{f}_m , 并计算其剩余误差:

$$\hat{w}_m = g - \hat{f}_m. \quad (8)$$

(4) 计算剩余自相关功率. 计算第 m 个噪声方差候选值对应的剩余误差自相关 $R_{w_m w_m}^{\hat{w}_m}$. 然后, 计算剩余自相关功率.

$$P_m = \frac{1}{N} \sum_{i,j} R_{w_m w_m}^{\hat{w}_m} [i, j]. \quad (9)$$

其中, N 是自相关中点的数量. 当真正的噪声方差为 20 时, 基于不同的噪声方差候选值计算出其对应的 P_m , 其对应关系如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 其对应的 P_m 在接近真正的噪声方差时有一个突变, 且之后 P_m 趋于稳定.

(5) 计算噪声方差. 为了捕捉 P_m 的这种特性, 记

$$D_m = P_{m+1} - P_m. \quad (10)$$

不同的噪声方差候选值与 D_m 的对应关系如图 4 所示, 从图 4 可以看出, 真正的噪声方差即当 D_m 达到最大值时对应的 σ_m 右侧一个较小的值, 这个值的估计公式为:

$$m_{\max} = \arg \max_m D_m. \quad (11)$$

$$m^* = \min_{m > m_{\max}} \{m: D_m < 10^{-2} D_{m_{\max}}\}. \quad (12)$$

$$\sigma(RAP) = \sigma_{m^*}. \quad (13)$$

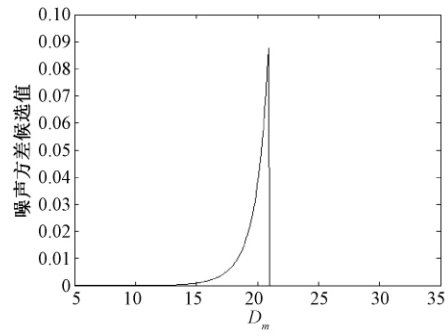


图 3 当噪声方差为 20 时的剩余自相关功率

Fig. 3 Residuals autocorrelation power (RAP) when the true variance is 20

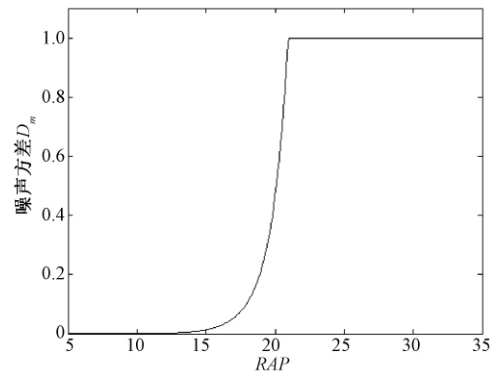


图 4 对应图 3 不同的 RAP 由式 (10) 所得的 D_m

Fig. 4 Difference of RAP, D_m in (10), for the RAPs in Fig. 3

为了验证该方法的准确性, 对常规剂量的 CT 图像加入均值为 0、方差不同的 Gaussian 白噪声进行一系列的仿真实验, 实验结果如表 1 所示, 表示同一幅 CT 图像加入的 Gaussian 白噪声方差分别为 5、10、15、20、25 时的实验结果.

表 1 同一图像 Gaussian 白噪声方差不同时实验结果对比

Tab. 1 Comparison of results in the same image with different White Gaussian noise variances

σ (Gaussian)	$\hat{\sigma}$ (本文方法)	$\hat{\sigma}$ (MAD)
5	5.11	7.44
10	9.97	9.93
15	14.79	12.57
20	20.17	15.30
25	25.20	18.04

由表 1 的实验结果可以看出, 对不同的 Gaussian 白噪声方差, 本文算法的估计精度均高于文献 [3] 中的 MAD 方法.

3 本文算法

笔者提出的自适应低剂量 CT 图像质量改善

算法,其算法框图如图 5 所示,主要包括 5 个步骤。

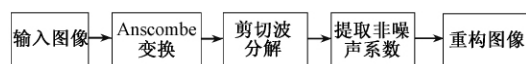


图 5 本文算法框图

Fig. 5 The diagram of the proposed algorithm

步骤 1: Anscombe 变换. 首先采用 Anscombe 变换将低剂量 CT 图像中的量子噪声转变为具有近似常数方差 Gaussian 噪声^[10]. 变换公式为:

$$Z(g_a^0) \rightarrow 2\sqrt{g_a^0 + 3/8}, \quad (14)$$

式中: g_a^0 表示噪声图像; $Z(g_a^0)$ 表示 Anscombe 变换后的图像。

步骤 2: 剪切波分解. 将 Anscombe 变换后的图像进行 4 层剪切波分解, 每层分解为 8 个方向, 得到 1 个低频图像和 32 个高频图像。

步骤 3: 提取非噪声系数. 由于随着分解层数的增加, 高频子带的信噪比逐渐降低, 故利用提出的噪声方差估计方法对信噪比较低的第 3、4 层高频子带估计其噪声方差. 然后基于噪声方差估值, 结合贝叶斯最大后验估计方法提取非噪声高频系数。

步骤 4: 重构图像. 基于步骤 3 获得的非噪声高频系数和低频系数进行剪切波逆变换, 获得去噪图像; 对去噪后的图像实行 Anscombe 逆变换, 得到重构图像. 公式为:

$$Z(\hat{g}_a^0) \rightarrow (\hat{g}_a^0/2)^2 - 3/8, \quad (15)$$

式中: \hat{g}_a^0 表示去噪后图像; $Z(\hat{g}_a^0)$ 表示重构图像。

4 仿真实验

笔者从定量评价和视觉效果来验证提出算法的有效性. 采用 PSNR (peak signal to noise ratio) 值和 MSSIM (mean structure similarity) 值^[11] 为定量评价指标:

$$MSSIM(f, \hat{f}) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(f_j, \hat{f}_j); \quad (16)$$

$$SSIM(f, \hat{f}) = [l(f, \hat{f})]^\alpha \cdot [c(f, \hat{f})]^\beta \cdot [s(f, \hat{f})]^\gamma, \quad (17)$$

其中, f 表示原图像, \hat{f} 表示去噪后的图像. 式 (16) 中, f_j 和 \hat{f}_j 分别表示 f 和 \hat{f} 的第 j 个局部窗中的子图像; M 为局部窗子图像的个数. 式 (17) 中, $l(f, \hat{f})$ 为亮度比较函数; $c(f, \hat{f})$ 为对比度比较函数; $s(f, \hat{f})$ 为结构比较函数; α, β, γ 分别是用来调整亮度、对比度以及结构信息的权重, 使用大小为 11×11 的加权 Gaussian 窗函数, 并设置 $\alpha = \beta =$

$\gamma = 1$.

4.1 定量评价

对取自郑州大学第一附属医院的一系列含有病变的、大小为 512×512 的常规剂量的胸部 CT 图像加入参数 $\lambda \leq 0.1$ 的 Poisson 噪声, 并进行仿真实验, 采用 PSNR 和 MSSIM 来定量评价去噪效果, 实验结果如表 2 和图 6 所示。

表 2 表示对 10 幅常规剂量的 CT 图像添加强度参数 $\lambda = 0.01$ 的 Poisson 噪声, 利用本文方法与文献 [3] 方法对噪声图像进行去噪的实验结果。

表 2 当 Poisson 强度 $\lambda = 0.01$ 时的 PSNR 和 MSSIM 比较

Tab. 2 Comparison of PSNR and MSSIM when the Poisson noise intensity is 0.01 dB

图 像	噪声图像		文献 [3] 方法		本文方法	
	PSNR	MSSIM	PSNR	MSSIM	PSNR	MSSIM
1	18.56	0.667	20.03	0.715	29.58	0.961
2	18.63	0.665	20.18	0.715	32.21	0.969
3	18.72	0.671	20.15	0.724	29.22	0.969
4	18.44	0.670	19.99	0.710	29.47	0.969
5	18.52	0.662	19.92	0.723	30.16	0.970
6	18.45	0.663	20.56	0.712	30.27	0.969
7	18.67	0.670	19.16	0.716	30.25	0.968
8	18.53	0.665	20.42	0.714	30.83	0.969
9	18.78	0.645	19.50	0.714	31.26	0.968
10	18.56	0.672	20.43	0.715	29.32	0.968

图 6 表示对一幅 CT 图像添加强度参数 λ 为 0.005、0.008、0.010、0.050、0.080 和 0.100 的 Poisson 噪声, 本文方法与文献 [7] 方法对噪声图像去噪的实验结果. 图 6(a) 表示随着噪声量的变化, 两种算法的重构图像与噪声图像的 PSNR 折线图, 图 6(b) 表示随着噪声图像的 MSSIM 变化, 两种算法的重构图像的 MSSIM 折线图。

由表 2 可知, 本文方法与文献 [3] 方法相比, PSNR 和 MSSIM 分别提高了 52.2% 和 34.9%. 从图 6 可以看出, 对参数 $\lambda \leq 0.1$ 的 Poisson 噪声, 本文算法所得重构图像的 PSNR 和 MSSIM 均高于文献 [3] 方法; 本文方法在噪声量较多的情况下, 去噪效果尤为突出。

表 2 和图 6 的实验结果表明, 对参数 $\lambda \leq 0.1$ 的 Poisson 噪声, 无论是同一噪声强度下的不同图像还是多种噪声强度下的同幅图像, 与文献 [3] 方法相比, 本文算法所得重构图像的 PSNR 和 MSSIM 均有所提高. 由此得出, 本文算法具有较强的自适应性和鲁棒性。

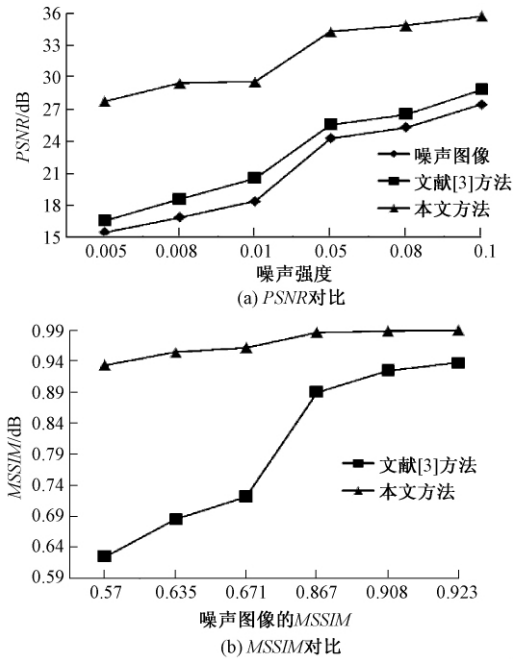


图6 不同 Poisson 噪声强度时的 PSNR 和 MSSIM 对比图
Fig.6 Comparison of PSNR and MSSIM in image with different Poisson noise intensity

4.2 视觉效果

本文视觉效果评价采用在日本千叶大学先端医、工学研究中心,以体膜为扫描对象,进行低剂量扫描所采集的降低不同剂量的多幅实际 CT 图像.低剂量扫描的主要原理是利用放射线剂量与管电流的线性关系,当保持其他参数不变时,通过降低管电流和管电压来降低放射剂量.图 7 (a_i) (*i* = 1, 2) 所表示图像的扫描参数设置分别为管电压 120 kV,扫描层厚为 0.5 mm,管电流分别为 100 mA 和 150 mA;图 7 (a₃) 表示图像的取像参数设置分别为管电压为 120 kV,管电流为 200 mA,扫描层厚为 1 mm.

从图 7 (a_i) (*i* = 1, 2, 3) 可知,随着管电流的减少,噪声量越来越多.分别用本文方法与文献法对这些图像进行仿真实验,实验结果分别由图 7 (b_i) 和图 7 (c_i) (*i* = 1, 2, 3) 表示.图 7 (b_i) (*i* = 1, 2, 3) 为利用文献 [3] 方法所获得的去噪图像,图 7 (c_i) (*i* = 1, 2, 3) 分别表示本文方法的重构图像.由图 7 可以看出,本文算法不仅能有效去除噪声,而且与文献 [3] 方法相比能更好地保留图像中的边缘信息和纹理信息.

上述实验的定量分析和视觉效果表明,本文算法具有自适应地去除参数 $\lambda \leq 0.1$ 的 Poisson 噪声的能力,而且该方法有效提升了重构图像的质量.

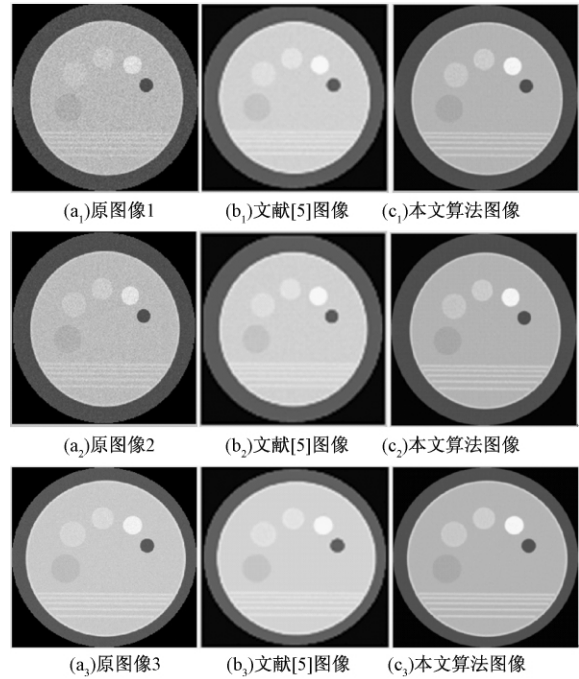


图7 低剂量 CT 图像去噪效果对比
Fig.7 The comparison of de-noising effects for low-dose CT

5 结论

笔者利用剪切波良好的稀疏特性,将 Anscombe 变换与改进的自适应噪声方差估计算法相结合,提出了一种有效改善低剂量 CT 图像质量的方法.对含有 $\lambda \leq 0.1$ 的 Poisson 噪声的 CT 图像进行的定量评价.结果表明,本文方法与文献 [3] 方法相比,其 PSNR 平均提高 52.2%,MSSIM 提高 34.9%.同时,利用本文方法和文献 [3] 方法对多幅实际低剂量 CT 图像进行去噪的对比实验结果也表明,本文方法较文献 [3] 方法可以更好地保留图像细节信息.因此,本文算法具有自适应能力强、重构图像质量高的特点,具有一定的临床应用价值.

参考文献:

- [1] SPERL J, BEQUE D, CLAUS B, et al. Computer-assisted scan protocol and reconstruction (CASPAR) - reduction of image noise and patient dose [J]. IEEE transactions on medical imaging, 2010, 29(3): 724 - 732.
- [2] JIANG H Q, LI W X, LIU Y M, et al. Comparison study of filters for poisson noise removal [C] // 2011 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communication and Signal Processing. Tianjin office of international cooperation: Tianjin Uniterity, 2011: 171 - 174.

- [3] FANG Y, ZHOU Y B, GE D W. De-noising based on wavelet analysis and bayesian estimation for low-dose X-ray CT [C] // Proceedings 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. 北京: 中国电子学会, 2009: 526 – 1051.
- [4] MAKITALO M, FOI A. Optimal inversion of the anscombe transformation in low-count poisson image denoising [J]. IEEE transactions on image processing, 2011, 20(1) : 99 – 109.
- [5] JIANG H Q, ZHANG Y Y, MA L, et al. A shearlet-based filter for low-dose mammography [J]. Breast imaging, 2014, 8539: 707 – 714.
- [6] 张云逸, 蒋慧琴, 马岭. 基于剪切波的自适应泊松噪声的去除算法 [C] // 第十七届全国图像图形学学术会议. 珠海: 中国图像图形学会, 2014: 395 – 401.
- [7] ZHANG A, JIANG H Q, MA L, et al. A shearlet-based algorithm for quantum noise removal in low-dose CT images [J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9784: 978430.
- [8] DAN Z P, CHEN X, GAN H T, et al. Locally adaptive shearlet denoising based on bayesian MAP estimate [C] // IEEE Sixth International Conference on Image and Graphics. Hefei: IEEE Press, 2011: 28 – 32.
- [9] 胡海智, 孙辉, 邓承志, 等. 全变差正则化的 Shearlet 收缩去噪 [J]. 中国图像图形学报, 2011, 16(2) : 168 – 173.
- [10] LUISIER F, VONESCH C, BLU T, et al. Fast inter-scale wavelet denoising of poisson-corrupted images [J]. Signal process, 2010, 90(2) : 415 – 427.
- [11] MAKITALO M, FOI A. Optimal inversion of the anscombe transformation in low-count poisson image denoising [J]. IEEE transactions on image processing, 2011, 20(1) : 99 – 109.
- [12] ZHANG B, FADILI J M, STARCK J L. Wavelets, ridgelets, and curvelets for poisson noise removal [J]. IEEE transactions on image processing, 2008, 17(7) : 1093 – 1108.

An Adaptive Quality Improved Algorithm in Low Dose CT Images

JIANG Huiqin¹, XU Yufeng¹, MA Ling¹, YANG Xiaopeng², TOSHIYA Nakaguchi³

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Equipment of The First Affiliated, Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 3. Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University, Chiba, Japan)

Abstract: The low-dose CT (LDCT) scanning is an effective way to reduce the X-ray radiation dose. However, quantum noise caused by the reduction of radiation dose leads to degradation of image quality. We proposed a quality improvement algorithm of low-dose CT images based on the shearlet transformation. Firstly, LDCT image was transformed using the Anscombe transform, and the quantum noise was transformed into noise which approximately obeyed Gaussian distribution. Secondly, the transformed image is decomposed into low-frequency coefficient sub-bands and multi-directional high-frequency coefficient sub-bands based on shearlet transform. Then, for high-frequency coefficient sub-bands of the low signal noise ratio, a noise variance estimation method based on the residual autocorrelation power (RAP) was proposed, which was combined with Bayesian maximum posterior probability method to obtain the more accurate non-noise high-frequency coefficients. Finally, the reconstructed image was obtained using the shearlet inverse transform and anscombe inverse transform. A series of experimental results of quantitative evaluation and visual effects showed that the proposed algorithm outperformed the de-noising method based on wavelet domain. The quality of the reconstructed image, compared with the de-noising algorithm based on wavelet domain, the Peak Signal Noise Ratio (PSNR) was increased averagely by 52.2% , and the Mean Structure Similarity (MSSIM) was increased by 34.9% .

Key words: low dose CT; shearlet transform; quantum noise; bayesian estimation; noise variance

变时滞耦合不确定复杂网络修正函数投影同步

方 洁, 杜海明, 刘 娜

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 研究了具有不确定参数、外界干扰及时变时滞耦合的复杂动态网络的修正函数投影同步问题。基于 Lyapunov 稳定性理论和不等式变换理论, 设计了自适应鲁棒控制器, 控制器设计中不需要预先设定反馈增益, 其值随自适应律自行调节。该方法能有效地克服未知有界干扰和时变时滞的影响, 数值仿真验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 复杂动态网络; 混沌系统; 修正函数投影同步; 时变时滞耦合; 自适应控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.032

0 引言

近年来, 随着人们对复杂网络研究的深入和对其应用的不断推广, 复杂网络研究已经逐渐渗透到各个学科领域, 并取得了一系列研究成果。同步现象是一类非常普遍而重要的非线性现象, 复杂网络的同步研究是复杂网络研究的一个重要方向^[1-4]。

函数投影同步和修正函数投影同步是近几年刚刚兴起的新的混沌同步方法, 其实现同步的同步尺度因子是一个函数而不是常量, 函数尺度因子的不可预测性对提高混沌保密通信的安全性具有非常重要的潜在应用价值, 因此对混沌系统的函数投影同步研究具有重要的理论价值和现实意义^[5-9]。随着复杂网络研究的蓬勃发展, 已有学者对复杂网络的函数投影同步问题进行了研究^[10-11]。

对于很多实际的复杂网络, 总是不可避免地存在网络自身的不确定性以及外界干扰和时滞等因素。因此, 实现具有不确定参数、外界干扰和时滞的复杂网络的同步更具有实际意义。文献[12]基于 Lyapunov 稳定性理论和泰勒展开实现了具有不确定参数、外界干扰和常时滞耦合的复杂网络的函数投影同步。考虑到绝对的常时滞耦合在实际网络中可能是不存在的, 文献[13]进一步研

究了具有变时滞耦合的复杂网络的函数投影同步, 但没有考虑不确定参数和外界干扰的影响。文献[14]利用牵制控制方法, 分别对节点参数未知和拓扑结构未知的两类复杂网络, 设计了自适应控制器, 使得两类网络和其孤立节点实现函数投影同步。其目标函数是网络中的一个节点, 而且是按固定的函数尺度因子实现同步, 而不是一个函数矩阵。此外, 该研究虽然分别考虑了参数未知和拓扑结构未知的的影响, 但没有考虑外界干扰的影响。

基于以上讨论, 笔者将基于 Lyapunov 稳定性理论和不等式变换理论, 设计简单的鲁棒自适应控制器, 实现具有不确定参数、外界干扰及时变时滞耦合的复杂动态网络的修正函数投影同步。实现同步的目标函数可以是一个平衡点, 周期吸引子或者混沌轨道。该方法不仅能对网络中的未知参数进行估计, 同时也能有效地克服未知有界干扰和时变时滞的影响。控制器中的反馈控制增益可随自适应律自行调节, 不需要人为设定。数值仿真验证了该方法的正确性和有效性。

1 问题描述

具有时变时滞耦合的复杂动态网络模型描述如下:

收稿日期: 2017-09-01; 修订日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775198); 河南省科技攻关项目(182102210609); 河南省自然科学基金面上项目(162300410323); 河南省高等学校青年骨干教师基金(2016GGJS090)

作者简介: 方洁(1981—), 女, 河南南阳人, 郑州轻工业学院副教授, 博士, 主要从事混沌控制, 复杂网络控制研究, Email: fang0511jie@126.com.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = & \mathbf{f}(x_i(t)) + \mathbf{F}(x_i(t)) \boldsymbol{\theta}_i + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \mathbf{F}_1 x_j(t) + \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \mathbf{F}_2 x_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) + \mathbf{u}_i(t), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{in}(t))^T \in \mathbf{R}^n$ 是第 i 个节点的状态变量; $\mathbf{f}: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ 是向量函数; $\mathbf{F}: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^{n \times m}$ 是矩阵函数; $\boldsymbol{\theta}_i \in \mathbf{R}^m$ 是未知的参数向量; $\tau(t) \geq 0$ 是未知的时变耦合时滞; $\Delta_i \in \mathbf{R}^n$ 是外界干扰; $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbf{R}^n$ 是控制输入; c 表示耦合强度; $\mathbf{F}_1 = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 和 $\mathbf{F}_2 = \text{diag}(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n)$ 是内耦合矩阵, 其中 $r_i = 1$ 和 $\zeta_i = 1$ 表示第 i 个状态, 意味着两个节点通过第 i 个状态变量耦合; $\mathbf{A} = (a_{ij})_{N \times N}$ 和 $\mathbf{B} = (b_{ij})_{N \times N}$ 是外耦合矩阵, 表示网络的拓扑结构, 如果节点 i 和节点 j ($j \neq i$) 之间有连接, 则 $a_{ij} \neq 0, b_{ij} \neq 0$, 否则 $a_{ij} = b_{ij} = 0$ ($j \neq i$). 定义矩阵 \mathbf{A}, \mathbf{B} 对角线上的元素满足:

$$\begin{cases} a_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}; \\ b_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$.

定义 1 (MFPS): 对具有模型不确定、外界干扰和时变时滞耦合的复杂动力系统 (1), 如果存在连续可微的函数矩阵 $\mathbf{M}(t)$, 使得系统 (1) 和目标函数 $\mathbf{s}(t)$ 满足式 (3), 则称系统 (1) 和目标函数 $\mathbf{s}(t)$ 实现了修正函数投影同步.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_i(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{M}(t) \mathbf{s}(t)\| = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

其中, $\mathbf{s}(t) \in \mathbf{R}^n$ 是目标函数, 满足 $\dot{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{s}(t))$, $\mathbf{s}(t)$ 可以是一个平衡点, 周期吸引子或者混沌轨道; $\mathbf{M}(t) = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$ 为函数尺度因子矩阵.

假设 1: $\tau(t)$ 是可微函数, 且满足 $0 \leq \dot{\tau}(t) \leq 1$. 即要求时滞网络时变时滞波动较小, 是慢时变时滞系统.

假设 2: 外界干扰 $\Delta_i(t)$ 是有界的, 即存在正常数 d_i , 使得 $\|\Delta_i\| \leq d_i, i = 1, 2, \dots, N$.

引理 1^[15]: 对于任意两个向量 $\mathbf{X}, \mathbf{Y} \in \mathbf{R}^n$, 存在正定的矩阵 $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 使得以下不等式成立: $2\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{Y} \leq \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{X} + \mathbf{Y}^T \mathbf{Y}$.

2 控制器设计

定理 1: 对给定的函数尺度因子矩阵 $\mathbf{M}(t)$ 和

任意的初始值 $\mathbf{s}(0), \mathbf{x}_i(0)$, 如果假设 1 和假设 2 成立, 则在控制器 (4) 和自适应律 (5)、(6)、(7) 的作用下, 复杂网络动力系统 (1) 和目标函数 $\mathbf{s}(t)$ 能实现修正函数投影同步.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) = & -\mathbf{f}(x_i(t)) + \dot{\mathbf{M}}(t) \mathbf{s}(t) + \mathbf{M}(t) \dot{\mathbf{s}}(t) - \\ & \mathbf{F}(x_i(t)) \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \hat{d}_i \text{sign} \mathbf{e}_i - \hat{q}_i \mathbf{e}_i(t), \quad (i = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \quad (4)$$

自适应律

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_i = k_1 \mathbf{F}^T(x_i(t)) \mathbf{e}_i; \quad (5)$$

$$\dot{\hat{d}}_i = k_2 \mathbf{e}_i^T \text{sign} \mathbf{e}_i; \quad (6)$$

$$\dot{\hat{q}}_i = k_3 \mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i, \quad (7)$$

其中, k_1, k_2, k_3 为任意的正常量; $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i$ 是系统 (1) 中未知参数向量 $\boldsymbol{\theta}_i$ 的估计值; \hat{d}_i 是参数 d_i 的估计值; \hat{q}_i 是反馈增益; $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数.

证明: 定义误差向量

$$\mathbf{e}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{M}(t) \mathbf{s}(t), \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (8)$$

式 (8) 对时间求导可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_i(t) = & \dot{\mathbf{x}}_i(t) - \dot{\mathbf{M}}(t) \mathbf{s}(t) - \dot{\mathbf{M}}(t) \mathbf{s}(t) \\ & (i = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \quad (9)$$

将 (1) 和 (2) 代入 (9) 可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_i(t) = & \mathbf{f}(x_i(t)) + \mathbf{F}(x_i(t)) \boldsymbol{\theta}_i + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \mathbf{F}_1 \mathbf{e}_j(t) + \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \mathbf{F}_2 \mathbf{e}_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) + \mathbf{u}_i(t) - \\ & \mathbf{M}(t) \dot{\mathbf{s}}(t) - \dot{\mathbf{M}}(t) \mathbf{s}(t). \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (4) 代入式 (10) 可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_i(t) = & \mathbf{F}(x_i(t)) (\boldsymbol{\theta}_i - \hat{\boldsymbol{\theta}}_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \mathbf{F}_1 \mathbf{e}_j(t) + \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \mathbf{F}_2 \mathbf{e}_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) - \\ & \hat{d}_i \text{sign} \mathbf{e}_i - \hat{q}_i \mathbf{e}_i(t). \end{aligned} \quad (11)$$

选择如下的 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned} V(t) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t) + \frac{1}{2k_1} \sum_{i=1}^N \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i + \\ & \frac{1}{2(1-\varepsilon)} \int_{t-\tau}^t \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(\delta) \mathbf{e}_i(\delta) d\delta + \\ & \frac{1}{2k_2} \sum_{i=1}^N \tilde{d}_i^2 + \frac{1}{2k_3} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_i - q^*)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i = \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \boldsymbol{\theta}_i$; $\tilde{d}_i = \hat{d}_i - d_i$; $0 < \varepsilon < 1$; q^* 是合适的正常量.

对 $V(t)$ 求导可得

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \dot{\mathbf{e}}_i(t) + \frac{1}{2(1-\varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t) -$$

$$\begin{aligned} & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t - \tau) \mathbf{e}_i(t - \tau) + \\ & \frac{1}{k_1} \sum_{i=1}^N \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i + \frac{1}{k_2} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - d_i) \dot{\hat{d}}_i + \\ & \frac{1}{k_3} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_i - q^*) \dot{\hat{q}}_i. \end{aligned} \quad (13)$$

将控制器 (4) 代入 (13) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \left[-\mathbf{F}(x_i(t)) \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_1 \mathbf{e}_j(t) + \right. \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_2 \mathbf{e}_j(t - \tau) + \Delta_i(t) - \hat{d}_i \text{sign} \mathbf{e}_i - \\ & \left. \hat{q}_i \mathbf{e}_i(t) \right] + \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t) - \\ & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t - \tau) \mathbf{e}_i(t - \tau) + \\ & \frac{1}{k_1} \sum_{i=1}^N \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i + \frac{1}{k_2} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - d_i) \dot{\hat{d}}_i + \\ & \frac{1}{k_3} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_i - q^*) \dot{\hat{q}}_i. \end{aligned} \quad (14)$$

将自适应律 (5) ~ (7) 代入上式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \left[c \sum_{j=1}^N a_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_1 \mathbf{e}_j(t) + \right. \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_2 \mathbf{e}_j(t - \tau) + \Delta_i(t) \left. \right] + \\ & \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t) - \\ & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t - \tau) \mathbf{e}_i(t - \tau) - \\ & \sum_{i=1}^N d_i \mathbf{e}_i^T \text{sign} \mathbf{e}_i - q^* \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i. \end{aligned} \quad (15)$$

定义 $\mathbf{e}(t) = (\mathbf{e}_1^T(t), \mathbf{e}_2^T(t), \dots, \mathbf{e}_N^T(t))^T \in \mathbf{R}^{n \times N}$,

$\mathbf{P} = (\mathbf{A} \otimes \boldsymbol{\Gamma}_1)$, $\mathbf{Q} = (\mathbf{B} \otimes \boldsymbol{\Gamma}_2)$, 其中 \otimes 表示克罗内克积.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}(t) + c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t - \tau) + \\ & \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \Delta_i(t) + \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) - \\ & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t - \tau) \mathbf{e}(t - \tau) - \\ & \sum_{i=1}^N d_i \mathbf{e}_i^T \text{sign} \mathbf{e}_i - q^* \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t). \end{aligned} \quad (16)$$

由假设 1 和假设 2 可得 $\frac{1}{2} \leq \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)}$,

$\mathbf{e}_i^T \Delta_i(t) \leq d_i \mathbf{e}_i^T \text{sign} \mathbf{e}_i$, 因此

$$\dot{V}(t) \leq c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}(t) + c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t - \tau) +$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{b^2 - 4ac} \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) - \\ & \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t - \tau) \mathbf{e}(t - \tau) - q^* \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t). \end{aligned} \quad (17)$$

由引理 1 可得

$$c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t - \tau) \leq \frac{1}{2} c^2 \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{e}(t) + \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t - \tau) \mathbf{e}(t - \tau) \text{ 于是, 有}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}(t) + \frac{1}{2} c^2 \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + \\ & \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) - q^* \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) \leq \\ & \left[\lambda_{\max} \left(\frac{1}{2} c^2 \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} + c \mathbf{P} \right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} - q^* \right] \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t). \end{aligned} \quad (18)$$

由此, 可以通过选取适当的 q^* , 使

$$q^* \geq \lambda_{\max} \left(\frac{1}{2} c^2 \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} + c \mathbf{P} \right) + \frac{1}{2(1 - \varepsilon)}, \quad (19)$$

即可得 $\dot{V}(t) \leq -\mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t)$. 由 Lyapunov-Krasovskii 稳定性定理可得当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\mathbf{e}_i(t) \rightarrow 0$, 即复杂网络动力系统 (1) 和目标函数 $s(t)$ 实现了修正函数投影同步, 定理证毕.

注 1: 当 $\tau(t)$ 是常量时, 也满足 $0 \leq \dot{\tau}(t) \leq 1$, 所以定理 1 对具有常时滞耦合的复杂网络的修正函数投影同步也是适用的.

注 2: 因为控制器 (4) 中不连续的符号函数 $\text{sign} \mathbf{e}_i$ 会产生不期望的抖振, 在实际中可用双曲正切函数 $\tanh(\xi \mathbf{e}_i)$, $\xi > 0$ 代替符号函数来削弱抖振现象. 不连续控制器可通过带自动积分限幅功能的控制元件实现. 最后的控制输入为:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) = & -\mathbf{f}(x_i(t)) + \dot{\mathbf{M}}(t) s(t) + \mathbf{M}(t) \dot{s}(t) - \\ & \mathbf{F}(x_i(t)) \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \hat{d}_i \tanh(\xi \mathbf{e}_i) - \hat{q}_i \mathbf{e}_i(t), \\ & (i = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \quad (20)$$

3 数值仿真

以 Chen 混沌系统为目标函数来证明所提方案的有效性. Chen 混沌系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = r_1 s_2 - r_1 s_1; \\ \dot{s}_2 = -s_1 s_3 + (r_3 - r_1) s_1 + r_3 s_2; \\ \dot{s}_3 = -r_2 s_3 + s_1 s_2, \end{cases}$$

其中, s_1, s_2, s_3 为状态变量, r_1, r_2, r_3 为系统参数. 当 $r_1 = 35, r_2 = 3, r_3 = 28$ 时, 该系统处于混沌状态.

复杂动态网络描述如下:

$$\begin{bmatrix} x_{i1}(t) \\ x_{i2}(t) \\ x_{i3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_{i2}(t) - x_{i3}(t) \\ x_{i1}(t) \\ x_{i1}(t)x_{i3}(t) + 0.2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ x_{i2}(t) & 0 \\ 0 & -x_{i3}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{i1} \\ \theta_{i2} \end{bmatrix} + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma_1 \mathbf{x}_j(t) + c \sum_{j=1}^N b_{ij} \Gamma_2 \mathbf{x}_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) + \mathbf{u}_i(t).$$

其中, τ 是时变时滞耦合, 控制器可依据定理 1 设计如下:

$$\begin{cases} u_{i1}(t) = x_{i2}(t) + x_{i3}(t) + m_1(t) \dot{s}_1(t) + \dot{m}_1(t) s_1(t) - \hat{d}_i \text{sign} e_{i1} - \hat{q}_i e_{i1}(t); \\ u_{i2}(t) = -x_{i1}(t) + m_2(t) \dot{s}_2(t) + \dot{m}_2(t) s_2(t) - x_{i2}(t) \hat{\theta}_{i1} - \hat{d}_i \text{sign} e_{i2} - \hat{q}_i e_{i2}(t); \\ u_{i3}(t) = -x_{i1}(t)x_{i3}(t) - 0.2 + m_3(t) \dot{s}_3(t) + \dot{m}_3(t) s_3(t) + x_{i3}(t) \hat{\theta}_{i2} - \hat{d}_i \text{sign} e_{i3} - \hat{q}_i e_{i3}(t), \end{cases}$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$.

自适应律为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_i = k_1 \mathbf{F}^T(x_i(t)) e_i; \\ \dot{\hat{d}}_i = k_2 e_i^T \text{sign} e_i; \\ \dot{\hat{q}}_i = k_3 e_i^T e_i. \end{cases}$$

在数值仿真中, 设定 $c = 0.1, N = 5, \Gamma_1 = \Gamma_2 = \mathbf{I}_{3 \times 3}$, 外耦合矩阵:

$$\mathbf{A} = \mathbf{B} = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -4 \end{pmatrix}.$$

外界扰动 $\Delta_d = [0.3 \cos t, 0.2 \sin t, 0.5 \sin t]$, 函数尺度因子矩阵 $\mathbf{M}(t) = \text{diag}(2 + \sin(\pi t/5), 3 - \cos(\pi t), 3 + \sin(2\pi t/10))$, $k_1 = 4, k_2 = 8, k_3 = 5$, 时变耦合时滞 $\tau(t) = \frac{e^t}{2 + e^t}$, 可得 $\dot{\tau}(t) = \frac{2e^t}{(2 + e^t)^2} \in (0, \frac{1}{2}]$, 假设 1 满足.

仿真结果如图 1~3 所示. 图 1 为同步误差曲线. 图 2 为参数 θ_{i1} 和 θ_{i2} 的估计值. 图 3 为外界干扰界值 d_i 和反馈增益 q_i 随时间进化曲线. 由仿真结果可知, 误差信号经过短时间的震荡后衰减

到零, 即复杂动态网络和目标函数实现了修正函数投影同步并实现了对未知参数的估计. 仿真结果证明了理论分析的正确性.

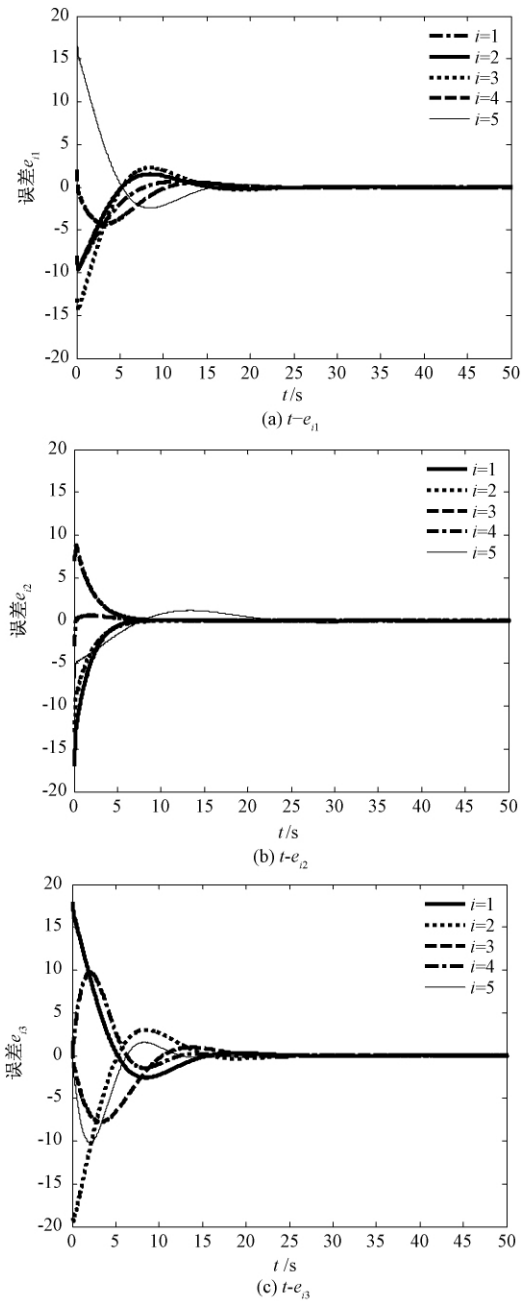
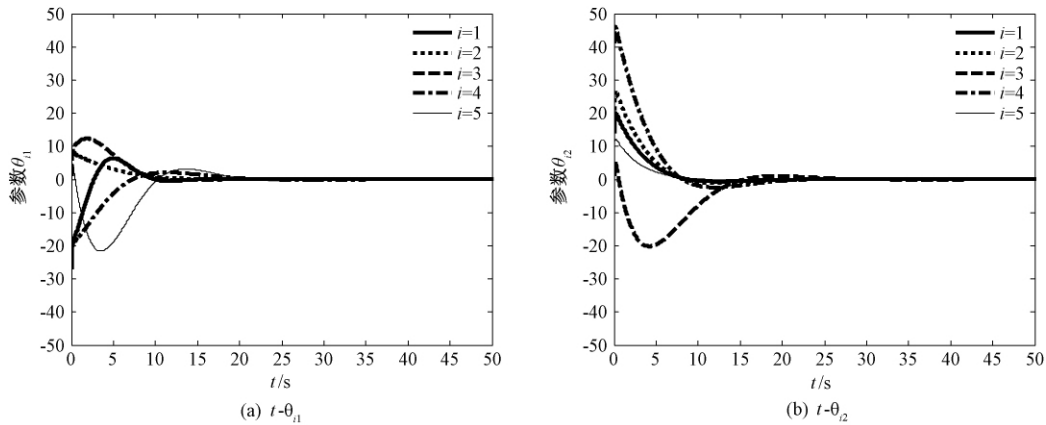
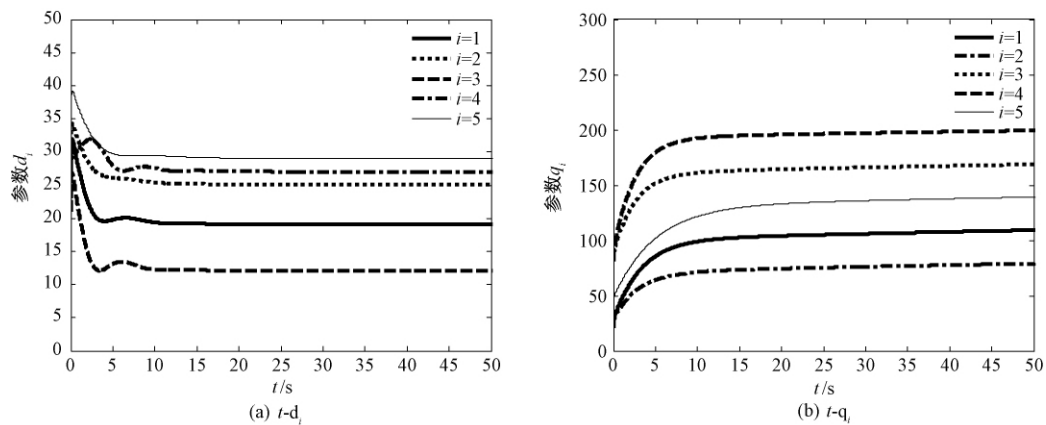


图 1 同步误差曲线

Fig. 1 The time evolution of synchronization errors

4 结论

研究了复杂动态网络的修正函数投影同步问题, 考虑了实际网络中不可避免的模型不确定、外界干扰及时变时滞耦合的影响. 通过构造合适的 Lyapunov 函数, 证明了同步误差系统的稳定性. 该同步控制方法能有效地克服未知有界干扰和时

图2 参数 θ_{i1} 和 θ_{i2} 的估计值Fig. 2 The estimated parameters θ_{i1} and θ_{i2} 图3 参数 d_i 和 q_i 的时间进化曲线Fig. 3 The time evolution of parameters d_i and q_i

滞耦合的影响,对具有常时滞耦合和时变时滞耦合的复杂动态网络均适用.以Chen混沌系统为目标函数进行数值仿真,仿真结果证明了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] LIU X W, CHEN T P. Synchronization analysis for nonlinearly-coupled complex networks with a symmetrical coupling matrix [J]. Physica A, 2008, 387(16/17): 4429–4439.
- [2] 梁义,王兴元. 结点含时滞的具有零和非零时滞耦合的复杂网络混沌同步 [J]. 物理学报, 2013, 62(1): 018901.
- [3] 柳爽,吕翎,李钢. 一类不确定复杂网络的滑模追踪同步 [J]. 物理学报, 2012, 61(16): 160507.
- [4] CHEN G R. Problems and challenges in control theory under complex dynamical network environments [J]. Acta automatica sinica, 2013, 39(4): 312–321.
- [5] 方洁,姜长生,邓玮. 混沌修正函数投影同步研究及其在保密通信中的应用 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(5): 61–65.
- [6] AGRAWAL S K, DAS S. Function projective synchronization between four dimensional chaotic systems with uncertain parameters using modified adaptive control method [J]. Journal of process control, 2014, 24(5): 517–530.
- [7] FU G Y. Robust adaptive modified function projective synchronization of different hyperchaotic systems subject to external disturbance [J]. Commun nonlinear sci numer simulat, 2012, 17(6): 2602–2608.
- [8] SUDHEER K S, SABIR M. Adaptive modified function projective synchronization of multiple time-delayed chaotic Rossler system [J]. Physics letters A, 2011, 375(8): 1176–1178.
- [9] WU X J, WANG H, LU H T. Hyperchaotic secure communication via generalized function projective synchronization [J]. Nonlinear analysis: real world applications, 2011, 12(2): 1288–1299.

(下转第91页)

基于 MEMD 与 MMSE 的滚动轴承退化特征提取方法

李凌均,金 兵,马艳丽,韩 捷,郝旺身

(郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要: 针对滚动轴承故障信号的非平稳性特征以及其退化状态难以识别的问题,提出了基于多维经验模态分解(MEMD)与多元多尺度熵(MMSE)的退化特征提取方法.该方法利用多维经验模态算法在多尺度化过程中能够有效地捕获信号不同尺度的成分的特性,更好地区分了不同退化状态的复杂度.首先,利用 MEMD 算法对滚动轴承不同退化状态对应的多通道信号进行同步自适应分解;然后,对多尺度 IMF 分量重构的信号进行多元多尺度熵分析.对试验信号进行处理,结果表明,该方法能有效反映滚动轴承退化趋势.

关键词: 多维经验模态分解;多元多尺度熵;多尺度化;滚动轴承;退化趋势

中图分类号: TH212; TH213.3 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.004

0 引言

滚动轴承故障的演变存在一个由轻微到严重的发展过程,对其运行过程中故障程度进行准确且及时的识别,对于保障机械设备安全运行、避免经济损失具有重大意义^[1].性能退化特征的选取重点在于该特征信息能否量化设备性能退化程度.传统时域统计参数和基于平稳性假设的频域分析方法对故障的敏感度不足或没有较为一致的趋势.

信息熵是反映信号复杂性和不规则性的一种非线性分析指标^[2].文献[3]将 LMD 和样本熵相结合应用到齿轮故障特征的提取当中,该方法能够有效地诊断出齿轮不同类型的故障. Ahmed 等^[4]基于 Costa 等^[5]提出的多尺度熵(MSE)思想,提出了多尺度多变量样本熵(multi-scale multivariate sample entropy, MMSE).然而,与 MSE 类似,MMSE 在多尺度化过程中的低通滤波和降采样操作会引入频率折叠,同时造成高尺度序列存在很多虚假振荡成分^[6]. Amoud 等^[7]提出了基于 EMD 的多尺度化方法,提高了 MSE 刻画非平稳信号不同尺度的能力.韩龙等^[8]将 EEMD 和 MMSE 相结合应用到风力发电轴承的损伤程度特

征提取中,取得了较好的效果.但 EMD 与 EEMD 在处理多变量时,把每个通道信号作为一项独立变量,单独对每个通道信号进行分解,通常会出现尺度排列不确定性问题. Rehman 等^[9]提出的多变量经验模态分解(multivariate empirical mode decomposition, MEMD)算法,该算法可以实现多通道信号的联合分析,同时可以保证分解得到的 IMF 分量按频率尺度对齐,从而解决了上述问题.因此,将 MEMD 引入到多通道信号计算 MMSE 时的多尺度化过程中,同样可以提高 MMSE 在刻画轴承退化过程中非平稳信号不同尺度的能力.

基于上述分析,结合 MMSE 和 MEMD 两者的优点,提出了基于 MEMD 与 MMSE 的滚动轴承退化特征提取方法.该方法首先用 MEMD 算法对不同退化状态的信号进行分解;然后,选取相应敏感的 IMF 分量进行降序重构;最后用多元多尺度熵进行特征提取;并利用凯斯西楚大学轴承实验数据验证了该方法的有效性.

1 MEMD 算法

MEMD 方法分解多变量信号时,首先将多维信号投影至多个方向向量上,然后分别在各个方向上求取信号的投影包络线,最后通过计算包络

收稿日期:2017-03-01;修订日期:2017-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405453)

作者简介:李凌均(1964—),男,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事机械故障诊断研究,E-mail: lingjun@zzu.edu.cn.

线均值的方式定义多维信号的均值. MEMD 具体算法^[9]如下:

(1) 在 $n-1$ 球面选择一组合适的采样点集, 得到 n 维空间的方向向量;

(2) 计算输入信号 $\{v(t)\}_{t=1}^T$ 沿着方向向量 x^{θ_k} 上的映射 $p^{\theta_k}(t)$;

(3) 确定所有方向向量的映射信号 $\{p^{\theta_k}(t)\}_{k=1}^K$ 极值对应的瞬时刻 $\{t_l^{\theta_k}\}_{k=1}^K, l$ 表示极值点位置, $l \in [1, T]$;

(4) 用多元样条插值函数极值点 $[t_l^{\theta_k}, v(t_l^{\theta_k})]$, 得到 K 个多元包络 $\{e^{\theta_k}(t)\}_{k=1}^K$. 对球空间 K 个方向向量, n 元信号均值 $m(t)$ 为:

$$m(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{\theta_k}(t). \quad (1)$$

(5) 通过 $h(t) = v(t) - m(t)$ 提取本征模态函数 $h(t)$, 如果 $h(t)$ 满足多元 IMF 的迭代条件, 则定义 $h(t)$ 为 IMF, 并对 $v(t) - h(t)$ 重复执行 (2) ~ (5) 步迭代计算, 直至分离出下一阶 IMF. 如果 $h(t)$ 不满足 IMF 迭代终止条件, 则对其重复执行 (2) ~ (5), 直至满足终止条件.

$$v(t) = \sum_{i=1}^d h_i(t) + r(t), \quad (2)$$

式中: d 表示多元信号分解出来的多元 IMF 层数; $h_i(t) = \{h_i^1(t), h_i^2(t), \dots, h_i^n(t)\}_{i=1}^T$; $r(t) = \{r^1(t), r^2(t), \dots, r^n(t)\}_{i=1}^T$ 分别为对应 n 元信号 IMF 分量和 n 个余量.

2 多元多尺度熵(MMSE)算法

在计算多元多尺度熵的过程中, MSE 的估计是很重要的. 因为多元多尺度熵是由传统 MSE 理论扩展来的, 所以首先介绍传统 MSE 算法.

对归一化 t 变量时间序列 $\{x_{k,i}\}_{i=1}^N, k=1, 2, \dots, t$ 进行多维嵌入重构, 从而达到复合延迟向量: $X(i) =$

$$[x_{1,i}, x_{1,i+\lambda_1}, \dots, x_{1,i+(m_1-1)\lambda_1}, x_{2,i}, x_{2,i+\lambda_2}, \dots, x_{2,i+(m_2-1)\lambda_2}, \dots, x_{t,i}, x_{t,i+\lambda_1}, \dots, x_{t,i+(m_t-1)\lambda_t}]. \quad (3)$$

其中, 嵌入向量 $M_m(i) = [m_1, m_2, \dots, m_t] \in \mathbf{R}^t$, 时间延迟向量 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t]$, 复合延迟向量

$X(i) \in \mathbf{R}^m, m = \sum_{k=1}^t m_k$. 多元样本熵计算步骤:

(1) 定义复合延迟向量:

$$X(i) \in \mathbf{R}^m, i = 1, 2, \dots, N-n,$$

其中, $n = \max\{M\} \cdot \max\{\lambda\}$.

(2) 定义两个复合延迟向量的距离:

$$d[X_m(i), X_m(j)] =$$

$$\max_{l=1,2,\dots,m} \{ |x(i+l-1) - x(j+l-1)| \},$$

式中: $i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j$.

(3) 对于给定的复合延迟向量 $X_m(i)$ 及阈值 r 计算满足上述条件的距离 D_i 的个数

$$d[X_m(i), X_m(j)] \leq r, j \neq i. \quad (4)$$

计算其出现频率, $P_i^m(r) = \frac{1}{N-n-1} P_i$, 得到嵌入向量 $M_m(i)$ 时的条件概率:

$$P^m(r) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} P_i^m(r). \quad (5)$$

(4) 扩展多元延迟向量的维数从 m 维至 $m+1$ 维. 将嵌入向量 $M_m(i) = [m_1, m_2, \dots, m_t]$ 扩展到 $M_{m+1}(i) = [m_1, m_2, \dots, m_{k+1}, \dots, m_t]$ ($k=1, 2, \dots, t$) 有 t 种不同方式. 因此, 在空间 \mathbf{R}^{m+1} 中就可以得到 $t \times (N-n)$ 个向量 $X_{m+1}(i), X_{m+1}(i)$ 表示对于变量 k , 嵌入维度从 m_k 增加到 m_k+1 时的复合延迟向量. 在嵌入过程中, 其他数据的嵌入维度不变, 也就是系统的总嵌入维度从 m 增加到 $m+1$.

(5) 当 $d[X_m(i), X_m(j)] \leq r, j \neq i$, 计算向量 S_i 的数量. 统计其出现的频率 $P_i^{m+1}(r) = \frac{1}{t(N-n)-1} S_i$, 得到嵌入向量 $M_{m+1}(i)$ 时的条件概率:

$$P^{m+1}(r) = \frac{1}{t(N-n)} \sum_{i=1}^{t(N-n)} P_i^{m+1}(r). \quad (6)$$

(6) 得到多元多尺度熵 E_{MMS} 的表达式为:

$$E_{\text{MMS}}(M, \lambda, r, N) = -\ln \left[\frac{P^{m+1}(r)}{P^m(r)} \right], \quad (7)$$

式中: N 为样本的时间序列长度; r 是相似容限; $P^m(r)$ 和 $P^{m+1}(r)$ 分别表示嵌入维度为 $m, m+1$ 时, 两个复合延迟向量相似性的条件概率.

3 MEMD 与 MMSE 的特征提取

3.1 基于 MEMD 的 MMSE 算法

为解决传统多尺度化方法不能处理非平稳信号的问题, 首先通过 MEMD 分解获得一系列多元 IMF 分量; 然后, 从原始时间序列中逐步去除低频 IMF 分量, 从而实现多变量序列的多尺度化. 由此, 笔者定义基于 MEMD 的 MMSE 算法如下:

(1) 对归一化 p 变量时间序列 $\{x_{k,i}\}_{i=1}^N (k=1, 2, \dots, p)$ 进行 MEMD 分解, 得到一系列多元 IMF 分量(趋势项视为最后一个 IMF 分量), 设每一个序列得到 IMF 数量为 J , 则 p 变量 IMF 分量可以表示为 $\{c_{k,i}^j\}_{i=1}^N (k=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, J)$.

(2) 多变量序列的多尺度化, 取每个时间序

列的后 j 个 IMF 分量进行,则其中第 n 个尺度上的序列可以表示为:

$$y_{k,i}^n = \sum_{j=1}^{J-n+1} c_{k,i}^j, \quad n \in [1, J]. \quad (8)$$

(3) 对 p 变量第 n 个尺度上的序列 $y_{k,i}^n$, 按上述 MMSE 定义计算每个尺度上的熵值.

3.2 多元多尺度熵偏均值

针对传统方法将多个尺度上的熵值作为特征向量输入分类器中来实现对故障的定性识别,并没有从多个尺度熵值中提取一个具体指标对设备的损伤程度作出量化描述,文献[10]提出一个新的故障程度定量描述指标——多尺度熵偏均值(partial mean of multi-scale entropy, PMME),实验表明该指标能够很好地追踪滚动轴承的故障发展趋势.鉴于 PMME 优良特性,笔者将其引入到 MMSE 的综合信息提取中,提出一种多元多尺度熵偏均值的故障程度定量指标(partial mean of multi-scale multivariate entropy, PMMME).据此,笔者提出 PMMME 指标的定义如下.

假定某一状态信号 X 的多元多尺度熵 $E_{\text{MMS}}(X) = \{E_{\text{MMS}}(1), E_{\text{MMS}}(2), \dots, E_{\text{MMS}}(8)\}$, 则有:

$$E_{\text{MME}} = (1 + |\text{ske}(E_{\text{MMS}})|/3) \cdot \text{mean}(E_{\text{MMS}}), \quad (9)$$

式中: $\text{ske}(E_{\text{MMS}})$ 和 $\text{mean}(E_{\text{MMS}})$ 分别为 8 个尺度

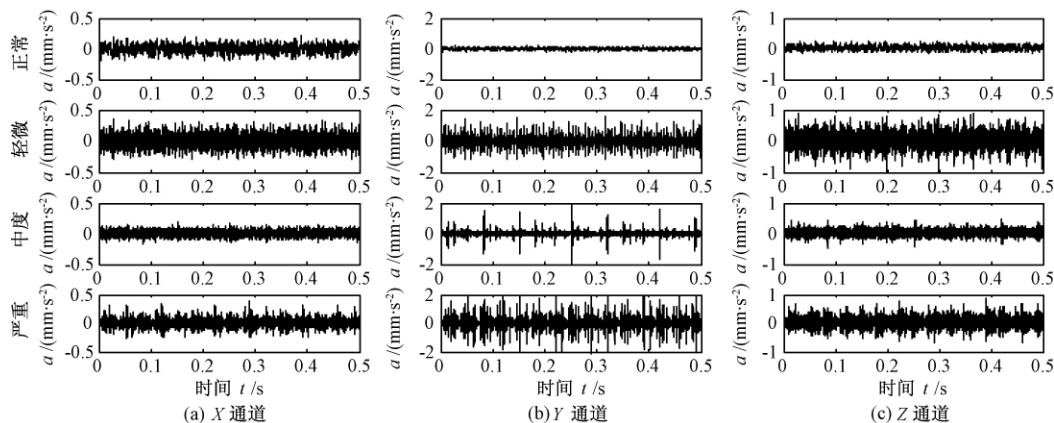


图2 内圈不同损伤程度下信号时域波形图

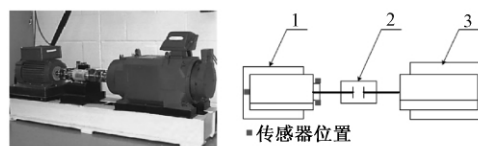
Fig.2 Time domain waves of inner race fault with different severity

从图2中可以看出,对于不同故障程度的轴承来说,随着故障程度加深其冲击幅值随之增大,同时可以直观看出,相同故障程度下的不同通道振动信号之间存在明显差异,仅从某个通道难以判断出轴承损伤程度,而传统的退化特征提取大多采用的是单通道的线性分析方法,并且需要冗长的数据样本,这时有必要采用基于 MEMD 与 MMSE 的多通道非线性退化特征定量提取方法,

上的多变量样本熵的偏斜度和均值.

4 实例分析

为了验证基于 MEMD 与多元多尺度熵表征轴承退化程度的有效性,对来自凯斯西储大学轴承数据中心的滚动轴承实测信号进行分析,其试验台如图1(a)所示;试验采用 SKF6205 深沟球轴承,安装在电机右侧的驱动端用于支撑电机轴,滚动轴承多通道故障信号由3个加速度传感器同步采集的,传感器的安装位置如图1(b)所示.轴承故障损伤都是通过电火花加工的方法在轴承外工作面上划上一定宽度单损伤点来模拟,分别以内圈损伤直径 0、0.017 78、0.035 56、0.053 34 cm 表示滚动轴承不同损伤程度(正常、微弱、中度、严重).实验数据在采样频率为 12 kHz 下获得.轴承内圈4种不同损伤程度振动信号的时域波形图如图2所示.



(a) 滚动轴承试验台 (b) 试验台结构示意图及传感器位置

图1 滚动轴承试验台与试验台结构示意图及传感器位置
Fig.1 Rolling bearing test rig and the test rig structure diagram and the location of the sensor

该方法能够实现多通道同步联合分析,并且其熵值的计算对数据样本长度要求不高.

由 MMSE 的定义可知,对熵值的计算结果影响较大的参数有3个:嵌入维数 m 、相似容限 r 、样本长度 N ,其中 m 和 r 是根据先验公式选取,一般取嵌入维数 $m = 2$ 或者 3. 样本长度和 m 一般满足 $N = 10^m \sim 30^m$,实验数据的采样频率为 12 kHz,为了保证频率分辨率和信息的完备性,样本长度

N 大于 1 000 点,所以选择 $m = 3$. 一般相似容限 $r = (0.1 \sim 0.25) \sigma$ (σ 是原始数据样本的标准差),由于 r 过大会丢失掉很多统计信息; r 过小,估计出的统计特性的效果不理想. 参考文献 [8] 和 [10],将 r 取 0.15σ . 但是样本长度 N 对计算多元多尺度熵的影响并没有先验公式可参考. 所以,

通过试验来分析样本长度 N 对多元多尺度熵的影响. 以滚动轴承内圈两种不同损伤程度(损伤直径 0.017 78、0.053 34 cm) 下的振动信号进行分析,选取样本长度 $N = 1\ 000$ 、 $N = 3\ 000$ 、 $N = 5\ 000$ 和 $N = 7\ 000$,分别计算每段样本序列的多元多尺度熵,结果如图 3 所示.

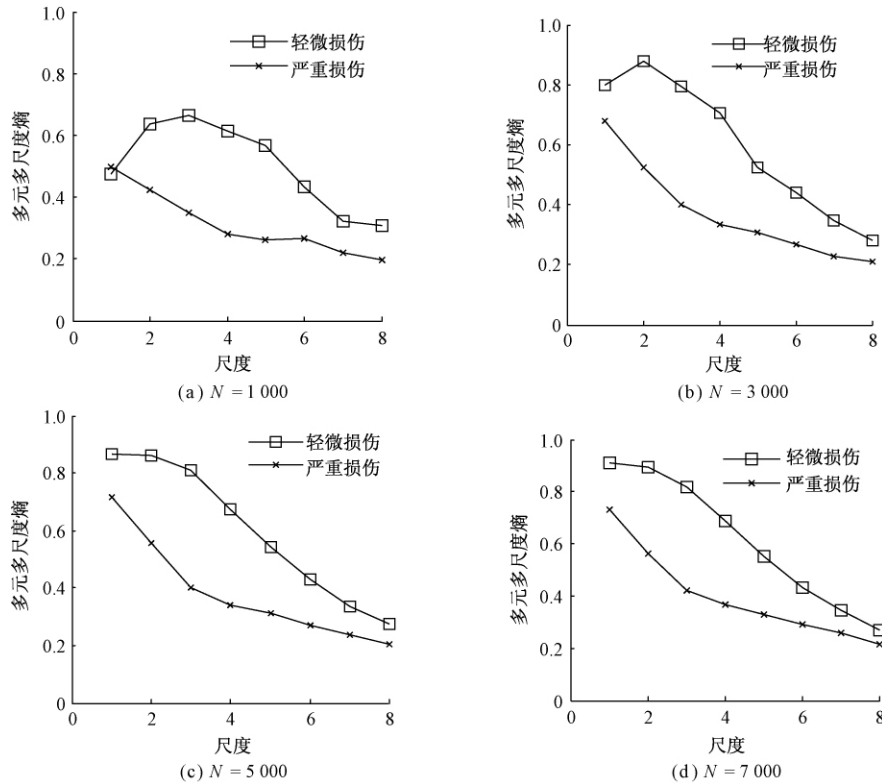


图 3 样本长度 N 对于多元多尺度熵的影响

Fig. 3 The influence of sample length to multi-scale multivariate sample entropy

从图 3 可看出,当样本长度 $N = 1\ 000$ 、 $3\ 000$ 时,多元多尺度熵曲线不仅波动较大,并且不够光滑,说明信号样本长度 $N = 1\ 000$ 、 $3\ 000$ 时的多元多尺度熵不能很好地表征滚动轴承内圈的退化状态;当 $N = 5\ 000$ 、 $7\ 000$ 时所得到的多元多尺度熵曲线比较平滑,能够更稳定地表征滚动轴承的退化状态,其中 $N = 7\ 000$ 时,多元多尺度熵曲线更加平滑,说明表征退化状态的能力更强. 结果表明:样本长度越长,多元多尺度熵表征轴承的退化状态的性能就越稳定. 但是随着样本长度的增加,多元多尺度熵的计算量也随之增加. 综合分析选取 $N = 5\ 000$.

为对比说明 MEMD 多尺度化在提高 MMSE 刻画非平稳信号不同尺度的能力,直接计算不同退化状态信号的多元多尺度熵值,结果如图 4 所示.

将选定样本长度的 4 种不同损伤状态轴承的振动信号进行 MEMD 分解,得到一系列多元 IMF 分量,一般来说故障信息主要集中在前几阶 IMF 分

量里,为了避免计算多元多尺度熵样本数据冗余,选取前 8 阶进行分析,再对三通道降序重构的 IMF 分量分别计算其多元多尺度熵,结果如图 5 所示.

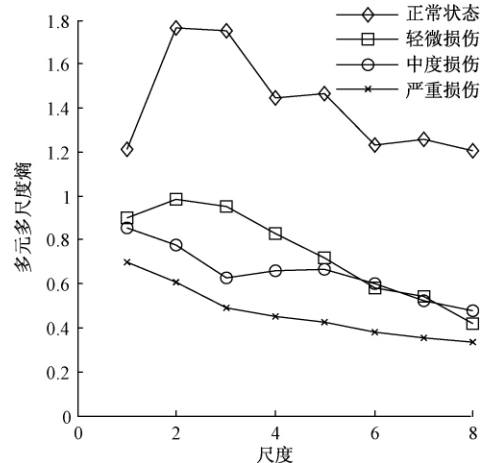


图 4 基于粗粒化的 MMSE

Fig. 4 MMSE based on scale coarse graining

从图 4 可以看出,基于粗粒化的 MMSE 在前 5 个尺度上可以有效地区分轴承不同的损伤状

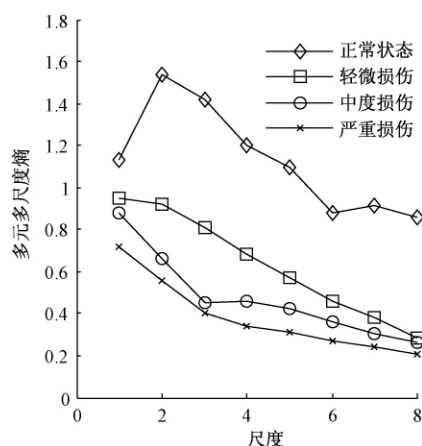


图5 基于 MEMD 的 MMSE

Fig.5 MMSE based on MEMD

态,但是在后几个尺度上中度损伤的熵值与轻微损伤的熵值出现了混叠,与之形成对比的是图5中基于 MEMD 多尺度化的 MMSE 在多个尺度上无交叉重叠,都能很好地区分轴承的损伤程度,说明基于 MEMD 多尺度化的 MMSE 在稳定性方面要优于基于粗粒化的 MMSE.

从图5可直观看出,不同损伤程度的滚动轴承,其状态信号的熵值也不同;同种故障程度的轴承,状态信号在不同尺度上的熵值也不同.从多个尺度上观察不同损伤状态的熵,正常状态下,滚动轴承的熵值在每个尺度上都最大,因为正常状态滚动轴承的振动信号是随机振动,所以信号的复杂度就比较大,无规则程度较高,自相关性最低,因而熵值较大.对于处于损伤状态的滚动轴承,在特定的频段内有一定的周期性冲击,所以信号的自相似性较高,熵值较正常状态下的要小.总体来说,不同损伤程度信号在不同尺度下的熵值构成的曲线区分很显著.对于不同退化程度下的滚动轴承振动信号而言,随着故障程度的加深,熵值将随之减少,就意味着振动信号的复杂度降低.因此,可以根据轴承不同退化状态信号在多个尺度下熵值大小来区分轴承损伤的不同程度.为了进一步对滚动轴承损伤程度进行定量化识别,采用多元多尺度熵偏均值这个具体指标来描述多个尺度上的复合信息.计算出轴承从正常、轻微损伤、中度损伤、严重损伤状态下的 PMME 值分别为 8.58、5.13、4.53、2.87.可以看出 PMME 值随着损伤度加深呈现递减趋势,因此,利用该指标能够很好地区分轴承内圈损伤的不同程度.

5 结论

(1) 在 MMSE 多尺度化过程中引入能够同时

处理多通道信号的 MEMD 算法并进行试验分析,试验结果表明:与基于粗粒化的 MMSE 相比,基于 MEMD 的 MMSE 可以更有效地区分滚动轴承各种退化状态信号在不同尺度上的成分.

(2) 引入能够定量化识别的多元多尺度熵偏均值指标,该指标综合了各种退化状态信号在多个尺度上的非线性信息,可以实现对滚动轴承内圈不同损伤程度进行定量化评估.通过进一步完善,可以将该方法推广应用到工业现场的滚动轴承状态监测中,更好地为现代化设备管理服务.

参考文献:

- [1] 王国彪,何正嘉,陈雪峰,等.机械故障诊断基础研究“何去何从”[J].机械工程学报,2013,49(1):63-72.
- [2] WANG W N, PEDRYCZ W, LIU X D. Time series long-term forecasting model based on information granules and fuzzy clustering[J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2015, 41: 17-24.
- [3] 王洪明,郝旺身,韩捷,等.基于 LMD 和样本熵的齿轮故障特征提取方法研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(3):44-48.
- [4] AHMED M U, MANDIC D P. Multivariate multiscale entropy: A tool for complexity analysis of multichannel data[J]. Physical Review e-statistical, nonlinear, and soft matter physics, 2011, 84(6): 061918.
- [5] COSTA M, ARY L, GOLDBERGER, et al. Multiscale entropy analysis of biological signals[J]. Physical review e-statistical, nonlinear, and soft matter physics, 2005, 71(2): 021906.
- [6] COSTA M, ARY L, GOLDBERGER, et al. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series[J]. Physical review letters, 2002, 89(6): 068102.
- [7] AMOUD H, SNOUSSI H, HEWSON D, et al. Intrinsic mode entropy for nonlinear discriminant Analysis[J]. IEEE signal processing letters, 2007, 14(5): 297-300.
- [8] 韩龙,李成伟,王丽,等.基于 EEMD 和多元多尺度熵的风力发电机组滚动轴承故障特征提取[J].工业仪表与自动化装置,2016(1):23-26.
- [9] REHMAN N, MANDIC D P. Multivariate empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the royal society London A: mathematical, physical and engineering science, 2010, 466(2117): 1291-1302.
- [10] 张龙,黄文艺,熊国良.基于多尺度熵的滚动轴承故障程度评估[J].振动与冲击,2014,33(9):185-189.

The Method of Degradation Feature Extraction of Rolling Bearing Based on MEMD and Multivariate Multiscale Entropy

LI Lingjun, JIN Bing, MA Yanli, HAN Jie, HAO Wangsheng

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

Abstract: The method of extracting degradation features was proposed based on MEMD and MMSE to solve the fault signals of roller bearing and degradation condition, which was characteristic of non-stationarity and hard to recognize. The character of MEMD was adopted to catch different scales of signals effectively during the process of multiscale, which made complexity of different degradation condition distinguished better than other methods. Firstly, multichannel signals corresponding to various degradation condition of roller bearing were decomposed adaptively using MEMD; then, the reconstructed signals by multiscale IMF was dealt with MSE analysis. The results showed that the proposed method could efficiently evaluate the degradation trend of roller bearing by analyzing the experimental signals.

Key words: MEMD; MMSE; multiscale; roller bearing; degradation trend

(上接第 85 页)

- [10] DU H Y. Function projective synchronization in drive-response dynamical networks with non-identical nodes [J]. *Chaos, solitons & fractals*, 2011, 44 (7) : 510 – 514.
- [11] WU X J, LU H T. Generalized function projective (lag, anticipated and complete) synchronization between two different complex networks with nonidentical nodes [J]. *Commun nonlinear science and numerical simulation*, 2012, 17(7) : 3005 – 3021.
- [12] WANG S G, ZHENG S. Adaptive function projective synchronization of uncertain complex dynamical networks with disturbance [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22 (7) : 070503.
- [13] DU H Y, SHI P, Lü N. Function projective synchronization in complex dynamical networks with time delay via hybrid feedback control [J]. *Nonlinear analysis: real world applications*, 2013, 14(2) : 1182 – 1190.
- [14] 李德奎,连玉平,张建刚. 时变时滞耦合复杂网络的函数投影同步 [J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41 (2) : 207 – 214.
- [15] GAO Y B, SUN B H, LU G P. Modified function projective lag synchronization of chaotic systems with disturbance estimations [J]. *Applied mathematical modelling*, 2013, 37(3) : 4993 – 5000.

Modified Function Projective Synchronization of Uncertain Complex Dynamical Networks with Time-varying Coupling Delay

FANG Jie, DU Haiming, LIU Na

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper investigated the modified function projective synchronization of complex dynamical networks with uncertain parameters, external disturbance and time-varying coupling delay. Based on Lyapunov stability theory and some inequality techniques, the adaptive robust controller was designed, by which the drive and response systems could realize synchronize to a desired scaling function matrix and estimate the unknown parameters. The feedback control gains were determined by adaptive updated laws. The controller could overcome the effects of the external disturbances and time-varying coupling delay effectively. Numerical simulations illustrated the effectiveness of the proposed method.

Key words: complex dynamical networks; chaotic system; modified function projective synchronization; time-varying coupling delay; adaptive control

汽车鼓式制动器的多工况热-力耦合仿真分析

张三川,郭向利,田金坤

(郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘要: 制动器是保障汽车行驶安全的核心零部件,为解决鼓式制动器制动过程中其动态性能的测试难题,运用 ANSYS 仿真模拟试验的分析方法,研究了制动鼓在紧急、多次重复和连续等多工况制动条件下的制动力和摩擦热对制动鼓的耦合作用。结果表明,紧急制动时制动鼓内表面易出现高温闪点;重复制动时制动鼓温度和应力都比较大,会造成制动效能下降和裂纹生成;持续制动时高温会引起等效应力增大,并可能出现热衰退现象。

关键词: 鼓式制动器;热-力耦合;仿真分析;高温闪点;热衰退

中图分类号: U462.3

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.018

0 引言

制动器是保障汽车行驶安全的核心部件,制动过程中承受制动力和摩擦热的强耦合作用,实际测定其动态性能难度很大,因此对制动器进行温度场及应力场的耦合分析,可以为制动器结构优化设计提供理论支持。制动工况对制动器的热-力耦合特性有比较显著的影响程度^[1],毕厚煜等^[2]对刹车片在模态分析的基础上进行了热力耦合分析,其结果表明仿真分析对制动器性能研究具有良好的有效性。楚拯中等^[3]对盘式制动器进行了耦合仿真,得到了温度场与应力场分布规律,并分析了两者间耦合关系,但是未考虑摩擦副材料温变特性对结果的影响。马迅等^[4]研究了鼓式制动器紧急制动工况温度场变化情况,但是未考虑制动蹄等边界条件影响。因此,笔者拟对某商用车后轮鼓式制动器进行有限元建模,并考虑制动鼓材料的温变特性,采用直接耦合方法对其在不同工况下进行仿真分析,以期为后续深入研究鼓式制动器的制动性能提供一定的参考依据。

1 鼓式制动器有限元分析原理

1.1 热-力耦合分析原理

在 ANSYS 中采用更新 Lagrange 方法进行热-力耦合求解,即在每次迭代计算开始前,首先更新

制动器几何形状,在新的 Lagrange 坐标下采用非线性方程迭代解法求解温度场方程,收敛后在同一增量步中更新温度值,检测热应变并求解力平衡方程,收敛后进行下一次迭代计算。由能量守恒和力平衡,可得到制动鼓结构瞬态温度场和应力应变场分析有限元方程^[5]:

$$\dot{\mathbf{u}}^T (\mathbf{K}_u \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{M}_T \dot{\mathbf{T}}(t) - \mathbf{F}(t)) = 0; \quad (1)$$

$$\mathbf{T}^T (\mathbf{C}_u \dot{\mathbf{T}}(t) + \mathbf{M}_u \dot{\mathbf{u}}(t) - \mathbf{D} - \mathbf{Q} - \mathbf{K}_T \mathbf{T}(t)) = 0, \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}_u 为力学刚度矩阵; \mathbf{M}_T 为热学刚度矩阵; \mathbf{C}_u 为热容矩阵; \mathbf{K}_T 为热传导矩阵; \mathbf{M}_u 为热力耦合矩阵; \mathbf{Q} 为热载荷矢量; \mathbf{D} 为耗散矢量。

1.2 瞬态热传导理论

制动器因摩擦不断产生的热量大部分被制动鼓吸收,而制动鼓内部因为温差而发生热传导现象。因此只需确定传热控制方程及其定解条件,即可计算出制动鼓的瞬态温度场分布。由能量守恒定律和傅里叶定律可得制动鼓内部瞬态传热微分方程为^[6]:

$$\rho c \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = \rho Q, \quad (3)$$

式中: ρ 为制动鼓的密度, kg/m^3 ; c 为制动鼓的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t 为时间, s ; k_x 、 k_y 、 k_z 分别为制动

收稿日期:2017-07-16; 修订日期:2017-10-04

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAG02B04)

作者简介:张三川(1962—),男,四川资阳人,郑州大学教授,博士,主要从事车辆设计与制造研究, E-mail: sc.zhang@zzu.edu.cn.

鼓材料沿 x, y, z 轴的导热系数, $W/(m \cdot K)$; Q 为制动鼓微元体热源密度, $Q = Q(x, y, z, t)$, W/kg . 该方程的定解条件如下.

制动鼓端面温度条件:

$$\phi = \bar{\phi}; \quad (4)$$

制动鼓内表面热流密度条件:

$$k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z = q; \quad (5)$$

制动鼓外表面对流换热条件:

$$k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z = h(\phi_a - \phi), \quad (6)$$

式中: $\bar{\phi}$ 为制动鼓端面的初始温度, K ; n_x, n_y, n_z 分别为制动鼓边界外法线的方向余弦; q 为制动鼓内表面的热流密度, W/m^2 ; ϕ_a 为外表面散热的环境温度, K ; h 为制动鼓与环境之间的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$.

2 制动鼓有限元模型

2.1 材料与制动参数

制动鼓和制动蹄材料分别选用 HT250 和 QT450, 因二者材料机械性能参数受温度影响较大, 在有限元仿真运算分析时, 自动添加温度变化的影响. 摩擦片为特制无石棉非金属, 参数如表 1 所示, 其材料机械性能几乎不受温度影响.

表 1 摩擦片材料参数^[7]

Tab.1 Material parameters of friction lining

密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松比	热导率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	热膨胀 系数/ ($10^{-5} K^{-1}$)
2 700	1	0.30	1.01	1 034	2.00

2.2 有限元模型

由于鼓式制动器结构相对复杂, 而分析的重点在制动鼓, 所以在不影响仿真精度的前提下, 对制动器进行合理的简化, 忽略次要的圆角和倒角, 忽略促动装置, 省略主销, 省略螺栓孔.

采用三维 10 节点耦合单元 Solid227 对简化后的制动器进行网格划分, 一共有 13 176 个单元以及 28 969 个节点. 装配体中一共有 4 个接触对, 其中摩擦片与制动蹄之间没有相对运动, 设置其为绑定接触. 摩擦片与制动鼓之间有摩擦力并且发生相对滑动, 设置其为带摩擦的接触, 摩擦因数为 0.35. 对摩擦面网格进行细化, 从而得到制动器有限元模型, 如图 1 所示.

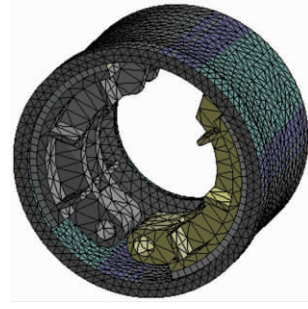


图 1 制动器有限元模型

Fig.1 Finite element model of drum brake

2.3 边界条件

在进行鼓式制动器热力耦合仿真时需要在模型上施加准确的边界条件. 笔者研究的制动鼓在工作时绕其轴线转动, 所以利用远端位移约束方式使制动鼓只有绕其轴线转动的自由度, 约束其他 5 个自由度, 并在法兰面施加转动位移模拟制动鼓转动. 对于制动蹄, 通过施加圆柱孔约束方式约束其销孔内表面轴向和径向位移, 释放其绕销孔轴 (z 轴) 的转动自由度, 并给出部分初始边界条件, 如表 2 所示.

表 2 不同制动工况下部分初始边界条件

Tab.2 Partial initial boundary conditions in different braking conditions

制动工况	初始条件		
	领蹄促动力/ N	从蹄促动力/ N	温度/ ℃
紧急制动	11 210	41 765	80
重复制动	5 728	21 342	80
持续制动	1 528	5 691	80

3 仿真结果及分析

3.1 紧急制动工况分析

紧急制动工况假定汽车 ($14\ 200\ kg$) 以 $60\ km/h$ 初速度匀减速行驶, 经过 $2.8\ s$ 停止运动. 对于制动鼓而言, 初始角速度为 $32.62\ rad/s$, 经过 $2.8\ s$ 匀减速运动停止转动, 角速度变化曲线如图 2 所示.

经仿真得到制动结束时制动鼓温度分布云图如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 最高温度 ($122.36\ ^\circ C$) 出现在摩擦片与制动鼓接触的边界位置, 而法兰面的温升最小.

图 4 为制动鼓不同部位节点温度变化曲线. 从图 4 可见, 紧急制动时制动鼓内表面摩擦区有明显的闪点温度产生, 出现在 $0.409\ s$ 的节点

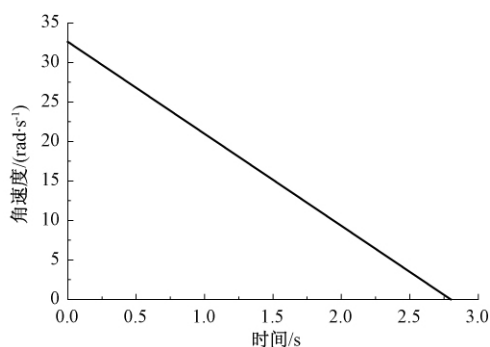


图2 紧急制动制动鼓角速度变化曲线

Fig.2 Brake drum angular velocity change curve over emergency braking

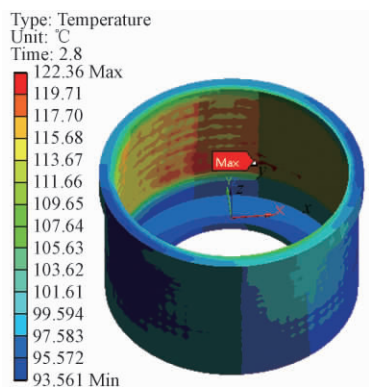


图3 紧急制动结束时制动鼓温度云图

Fig.3 Temperature distribution of brake drum after emergency braking

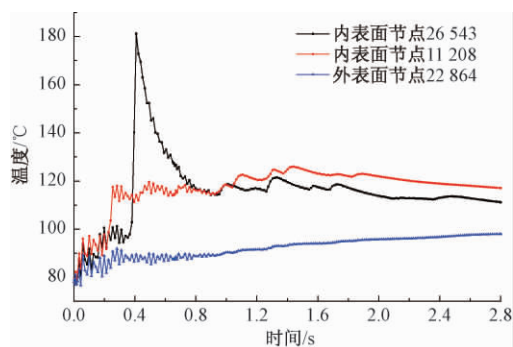


图4 制动鼓温度随时间变化曲线

Fig.4 Time-varying curve of brake drum temperature 26 543,其主要原因是较大的紧急制动力施加时间极短,导致摩擦区域摩擦热流过大而造成其局部剧烈温升,故紧急制动易于发生刹车抱死故障.内表面的另一节点 11 208 在 $0 \sim 0.20$ s 区间,其温升出现明显的低位波动,是由于制动鼓的角速度较大,节点处于高频率吸热-散热循环状态造成的;而在 $0.20 \sim 1.44$ s 区间则总体呈现出较大幅度的阶跃式升高;在 $1.44 \sim 2.80$ s,随着制动鼓角速度不断减小,制动鼓内外表面温差越来越小,温度呈现出下降趋势.

同一径向上与节点 11 208 相对应的制动鼓

外表面节点 22 864 在 $0 \sim 1.0$ s 区间,温度也呈现上升趋势的明显小幅波动,之后波动幅度越来越小,温度继续小幅平稳上升,主要原因是外表面为非摩擦生热区域,主要受制动鼓的热传导影响.

图5为紧急制动结束时制动鼓应力分布云图.从图5可见,紧急制动产生的应力显著集中于制动接触区及其附近,而最大应力值(125.86 MPa)出现在制动鼓加强筋外侧边缘处,主要是在快速施加的制动力作用下产生的结构应力与热应力的耦合作用的结果.

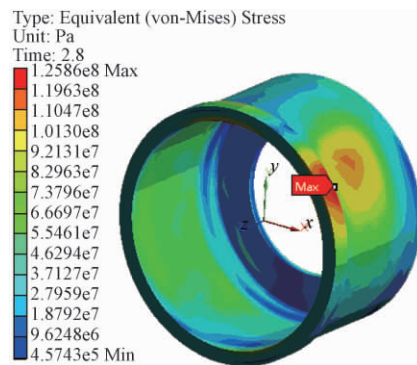


图5 紧急制动结束时制动鼓应力云图

Fig.5 Stress distribution of brake drum after emergency braking

3.2 重复制动工况分析

依据 QC/T 479—1999《货车、客车制动器台架试验方法》,对制动器进行重复制动仿真,车速随时间变化规律如图6所示.制动初始速度 v_0 为 65 km/h(制动鼓初始角速度为 35.33 rad/s),制动减速度为 3 m/s^2 ,制动末速度 v_1 为 30 km/h(制动鼓角速度 16.31 rad/s),制动时间 3.3 s;然后以加速度 0.21 m/s^2 加速到 65 km/h,加速时间 46.7 s;最后匀速行驶 10 s,即完成一个制动循环.一个循环周期为 60 s,循环制动 15 次.

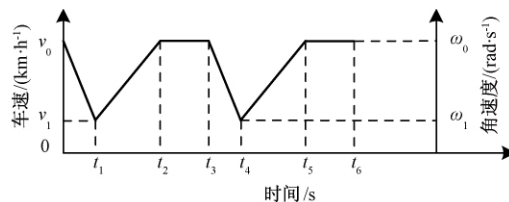


图6 重复制动车速和制动鼓转速变化示意图

Fig.6 Automotive speed and brake drum angular velocity change diagram over repetitive braking

重复 15 次制动后的制动鼓温度分布云图如图 7(a),重复 15 次制动节点温度变化曲线如图 7(b)所示.

从图 7(a)可见,在重复 15 次制动后,制动鼓最高温度达到 305.15 $^{\circ}\text{C}$,明显高于紧急制动温度,

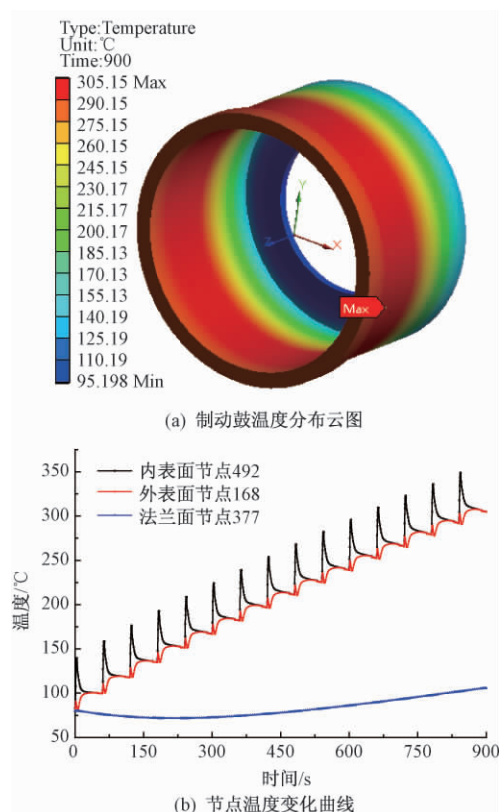


图7 重复15次制动制动鼓温度图

Fig. 7 Temperature of brake drum after 15-times repetitive braking

这是由于重复制动生成的热量大于散失掉的热量,从而导致制动鼓温度不断增加.此时须防范过高温引起摩擦材料衰退以及热流对制动鼓材料的影响,可以通过强制散热途径使摩擦产生的热量及时散失出去,从而防止制动鼓因高温造成制动效能下降.在制动鼓的轴向上高温集中在摩擦区域附近,且轴向温度梯度较大,而法兰面处温度依然较低.

由图7(b)可见,制动鼓内表面节点492在每次重复制动时温度会急剧上升,上次制动结束到下次制动开始期间,温度会出现下降,因为此时无热量生成,而内表面热量仍会继续向外表面传递,故使其温度有所下降,但制动鼓的连续多次制动,将造成制动鼓内表面层的能量累积,所以制动鼓内表面整体温度会不断升高.制动鼓外表面温度靠由内向外的热量热传递,因此其温度变化与内表面节点温度变化相似,只是变化幅度没有内表面的大而已,由于重复制动热传递吸收的热量大于其向外界环境散失的热量,故整体上外表面的温度也呈现不断升高趋势.

图8为重复制动结束时的应力云图.由图8可见,制动鼓外表面周向上拉应力分布较为均匀,而内表面摩擦区域的应力值比非摩擦区域的明显

变大,最大应力值达到174.3 MPa,与紧急制动的最大应力值相比仍有大幅提高.显然,在重复制动工况下,摩擦生热使制动鼓周向膨胀形成的拉应力与内侧摩擦区表面的摩擦拉应力耦合,从而使内表面摩擦区的拉应力大于其他区域的拉应力,这种拉应力作用结果会造成制动鼓内表面萌生热-力耦合疲劳裂纹.

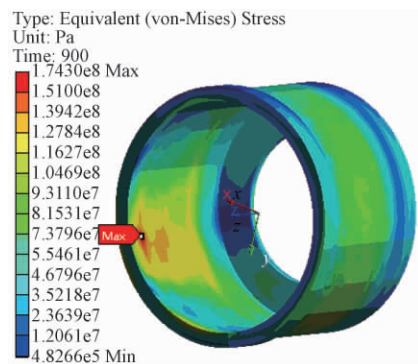


图8 重复15次制动制动鼓应力分布云图

Fig. 8 Stress distribution of brake drum after 15-times repetitive braking

3.3 持续制动工况分析

为仿真载重汽车下长坡时的制动工况,假设其行驶速度为60 km/h(制动鼓角速度32.62 rad/s),道路坡度为6%,持续制动时间不能超过36 s^[8],在分析时,对制动鼓进行150 s仿真,制动结束时制动鼓温度云图如图9所示.

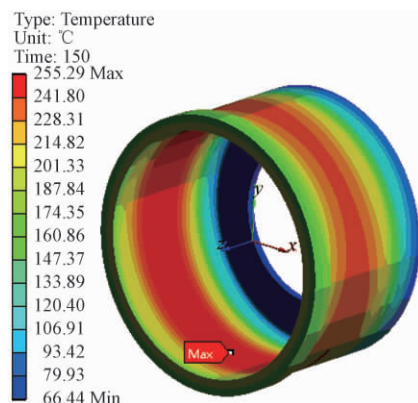


图9 持续制动制动鼓温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution of brake drum after continuous braking

由图9可见,在持续制动过程中,摩擦片与制动鼓一直处于摩擦状态,不断产生热量,有稳定的热流密度.制动结束时制动鼓与摩擦片接触区域温度最高达到255.29℃,温度在制动鼓径向和轴向方向呈现递减趋势,法兰面温度最低.此时高温可能造成制动鼓与摩擦片间摩擦因数大幅度下降,出现热衰退现象.

图 10 为持续制动工况下的应力云图。从图中可知,主要应力集中在摩擦区域,最大应力值(155.86 MPa)出现在制动鼓与摩擦片接触的边界位置,而法兰面和凸台位置应力值相对较小。持续制动的制动力较小,但制动时间较其他方式的均要长得多,因此制动摩擦温升的积累多,制动鼓摩擦区域及附近的热膨胀产生的等效应力也较大,可能会引起制动鼓变形,导致其制动性能下降。

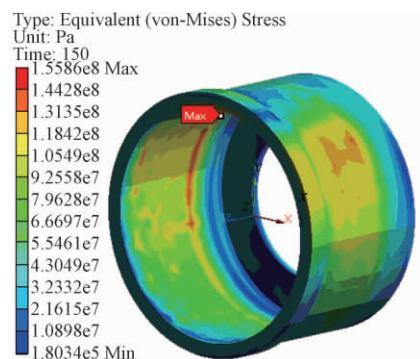


图 10 持续制动制动鼓应力分布云图
Fig. 10 Stress distribution of brake drum after continuous braking

4 结论

(1) 在紧急制动时,制动初期内表面温度升高且波动较大,极易形成高温斑点,并可能造成抱死,制动结束时制动鼓最大应力值为 125.86 MPa。

(2) 在重复制动工况下,制动鼓最高温度达到 305.15 °C,制动器会因为高温造成制动效能下降,甚至出现热衰退,其最大等效应力高达 174.3 MPa,在拉、压应力交变作用下制动鼓内表面此时易萌生疲劳裂纹,可能造成制动鼓破

裂失效。

(3) 下长坡持续制动工况下,制动鼓温度一直呈上升趋势,制动结束时达到 255.29 °C,最大等效应力值达到 155.86 MPa,制动热衰退是其失效的主要原因。

(4) 3 种常见制动工况的热力耦合分析结果都表明,制动鼓摩擦温升和应力分布对制动鼓性能的影响较大,且影响机理也不尽相同,但均可采用可能的强制降温措施提高制动鼓的安全制动效果。

参考文献:

- [1] 张立军,何臻,孟德建. 制动防抱死工况制动器热机耦合特性仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(3): 610-619.
- [2] 毕厚煌,何家宁,李世瑾. 汽车盘式刹车机构的模态与热力耦合分析[J]. 机械强度, 2017, 39(1): 204-209.
- [3] 楚拯中,苏楚奇. 通风盘式制动器热力耦合分析[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(4): 440-443.
- [4] 马迅,张建辉. 汽车蹄鼓式制动器瞬态温度场仿真分析[J]. 机械传动, 2013, 37(5): 81-85.
- [5] 徐新琦,成学军. 热-机耦合分析的有限元法及其应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19(3): 380-386.
- [6] 纪飞龙. 鼓式制动器接触与热-结构耦合有限元分析[D]. 武汉: 武汉科技大学汽车与交通工程学院, 2013.
- [7] 范久臣,孙雪梅,李洪洲,等. 多次紧急制动工况下的鼓式制动器热-结构耦合分析[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2015, 16(3): 410-416.
- [8] 中交第一公路勘察设计研究院. 公路路线设计规范: JTG D20—2006 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

Thermo-mechanical Coupling Analysis of Automotive Drum Brake under Multiple Braking Conditions

ZHANG Sanchuan, GUO Xiangli, TIAN Jinkun

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

Abstract: Drum brake is the core component to ensure safety of commercial vehicles. In order to solve the problem of dynamic performance in braking process, the coupling effect of braking force and friction heat on the brake drum under the braking conditions of emergency, repetitive and continuous braking was studied using ANSYS simulation method. The results showed that it was prone to appear high temperature flash point on the inner surface of the brake drum under the emergency braking condition. In the repetitive braking condition, the temperature and the stress of the brake drum were relatively large, which would cause decrease of the brake performance and crack generation. And in the continuous braking condition, the high temperature would cause the equivalent stress to increase, and it was possible to appear the heat fade.

Key words: drum brake; thermo mechanical coupling; simulation analysis; high temperature flash point; heat fade