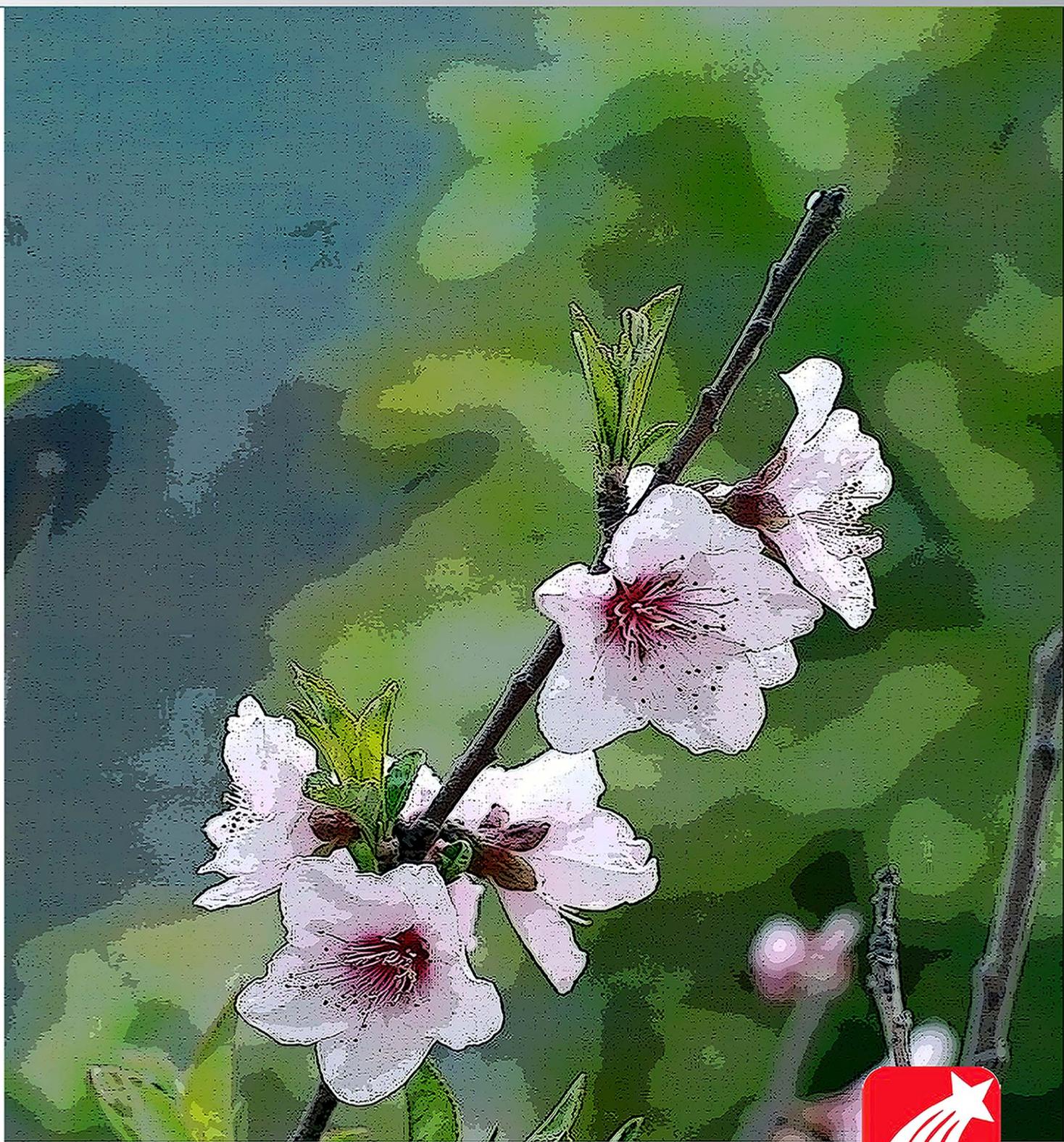


郑州大学学报(工学版)

2017年第04期



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（新加坡国立大学）

编委会主任：

邵国胜（郑州大学）

编委（按姓氏笔画为序）：

王亚明（郑州大学）

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）

刘金盾（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 冰（郑州大学）

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）

郭院成（郑州大学）

梁长浩（合肥物质科学院）

董 林（郑州大学）

潘复生（重庆大学）

王宗敏（郑州大学）

王 凌（清华大学）

左其亭（郑州大学）

刘国际（郑州大学）

刘 波（中国科学院数学与系统科学研究院）

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）

张少军（郑州大学）

张 涛（北京航空航天大学）

陈静波（郑州大学）

庞新厂（郑州大学）

赵明峰（郑州大学）

高丹盈（郑州大学）

唐 珂（中国科学技术大学）

梁 静（郑州大学）

韩一帆（郑州大学）

臧双全（郑州大学）

目 次

化工与材料工程

基于 ANSYS CFX 的汽轮机叶片气动性能优化模拟研究 周俊杰, 王 璞, 周金方(1)

纵向激励下防波板组合形式对罐箱液体晃动的影响..... 丁 昌, 付延唐, 吴学红, 龚 毅(7)

基于包埋功能微生物的生物滤塔净化甲苯废气研究
..... 朱亚中, 李顺义, 骆翼梦, 马宏业, 王 岩(12)

颗粒直径与轴向分布对吸附热变换器传热传质的影响..... 盛遵荣, 薛 冰, 刘周明, 魏新利(17)

锆氧化物/石墨烯的制备及其对 PO_4^{3-} 的吸附性能
..... 史春燕, 范冰冰, 李娅娅, 胡永宝, 张 锐(23)

电气与信息工程

土壤电参数频变性对接地体有效长度的影响分析
..... 李景丽, 贺鹏威, 邱再森, 李渊博, 郭丽莹(29)

基于人工鱼群优化 SVM 的声磁标签信号检测研究 邓记才, 耿亚南(35)

SINS 姿态估计的 HoMM-UKF 模型算法 丁国强, 张 铎, 熊 明, 周卫东(39)

基于 PSO-RBF 神经网络的雾霾车牌识别算法研究 毛晓波, 张 群, 梁 静, 刘艳红(46)

基于概率自适应蚁群算法的云任务调度方法..... 王俊英, 颜芬芬, 陈 鹏, 董方敏, 臧兆祥(51)

基于图的概念重现发现与预测..... 白 洋, 王志海, 孙艳歌(57)

大规模 MIMO 系统中功率分配算法的能效研究 陆彦辉, 苗盼盼, 杨守义(65)

WSN 中基于离散人工鱼群的分簇拓扑优化算法 阎新芳, 张晓丹, 严晶晶, 冯 岩(69)

基于 Voronoi 盲区的三维无线传感器网络覆盖优化算法 方 伟, 梅希薇(73)

土木、交通工程与其他

风化花岗岩地层隧道衬砌裂损分析与处理研究..... 孙雁军, 阳军生, 张 箭, 王树英(78)

悬挂式单轨交通线路适应性研究与分析..... 刘文龙, 徐延海(84)

在役钢筋混凝土 T 形梁桥承载能力的模糊随机评估法 翟科玮, 杜朝伟, 郑凤玺, 郑元勋(88)

关于凸极小化的 Douglas-Rachford 分裂方法的一个注 康倍倍, 董云达, 王亚丽(94)

CONTENTS

【Chemical Engineering and Materials Engineering】

- Study on Numerical Simulation of the Steam Turbine Blade Aerodynamic Performance Optimization Based on ANSYS CFX ...
..... ZHOU Junjie, WANG Pu, ZHOU Jinfang (1)
- The Influence of Different Baffles Arrangement on Liquid Sloshing in Container Under Longitudinal Excitation
..... DING Chang, FU Yantang, WU Xuehong, GONG Yi (7)
- Biodegradation of Toluene in a Biofilter under Low Concentration
..... ZHU Yazhong, LI Shunyi, LUO Yimeng, MA Hongye, WANG Yan (12)
- Effect of Particle Diameter and Particle Axial Distribution on Heat and Mass Transfer inside Adsorption Heat Transformer
..... SHENG Zunrong, XUE Bing, LIU Zhouming, WEI Xinli (17)
- Preparation of Zirconium Oxide / Graphene Composites and the Adsorption Properties for PO_4^{3-}
..... SHI Chunyan, FAN Bingbing, LI Yaya, HU Yongbao, ZHANG Rui (23)

【Electrical Engineering and Information Engineering】

- The Impact of Soil Electrical Parameters Frequency-Dependence Characteristics on the Effective Length of the Grounding Electrode
..... LI Jingli, HE Pengwei, QIU Zaisen, LI Yuanbo, GUO Liying (29)
- The Research Based on the Improved Artificial Fish Swarm Algorithm and the SVM in the Acoustic Magnetic EAS
..... DENG Jicai, GENG Yanan (35)
- The HoMM-UKF Algorithm of SINS' Attitude Estimation Model
..... DING Guoqiang, ZHANG Duo, XIONG Ming, ZHOU Weidong (39)
- The Haze Plate Recognition System Based on PSO-RBF Neural Network
..... MAO Xiaobo, ZHANG Qun, LIANG Jing, LIU Yanhong (46)
- Task Scheduling Method Based on Probability Adaptive Ant Colony Optimization in Cloud Computing
..... WANG Junying, YAN Fenfen, CHEN Peng, DONG Fangmin, ZANG Zhaoxiang (51)
- Recurring Concept Detection and Prediction Based on the Graph
..... BAI Yang, WANG Zhihai, SUN Yange (57)
- Optimal Energy Efficiency Power Allocation Alogrithm for Massive MIMO Systems
..... LU Yanhui, MIAO Panpan, YANG shouyi (65)
- A Hierarchical Clustering Topology Optimization Algorithm Based on DAFS in WSN
..... YAN Xinfang, ZHANG Xiaodan, YAN Jingjing, FENG Yan (69)
- Blind-Zone Centroid-Based Scheme in Three Dimensional Wireless Sensor Network Area
..... FANG Wei, MEI Xiwei (73)

【Civil, Construction Engineering and other】

- The Effect of Weathered Granites on the Highway Tunnel Lining
..... SUN Yanjun, YANG Junsheng, ZHANG Jian, WANG Shuying (78)
- Simulation Research and Analysis on the Adaptability of Suspended Monorail Transport Line
..... LIU Wenglong, XU Yanhai (84)
- Load Bearing Capacity of Existing Highway RC T Beam Bridge Based on Fuzzy Stochastic Comprehensive Evaluation
..... ZHAI Kewei, DU Chaowei, ZHENG Fengxi, ZHENG Yuanxun (88)
- A Note on Douglas-Rachford Splitting Method for Convex Minimization
..... KANG Beibei, DONG Yunda, WANG Yali (94)

文章编号: 1671-6833(2017)04-0001-06

基于 ANSYS CFX 的汽轮机叶片气动性能优化模拟研究

周俊杰, 王 璞, 周金方

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 以 125 MW 轴流式汽轮机某一冲动级叶片为研究对象, 利用商业软件 ANSYS CFX 对该级静动叶片的气动性能进行了三维数值模拟优化计算. 结果表明, 通过优化前缘和尾缘椭圆率、相对节距以及其级间配比等几何参数, 降低了表面压力差分布, 有效控制了二次流损失; 叶片等熵效率提高了 0.43%, 总压损失系数降低了 0.005 左右. 优化改进后, 叶片的气动性能得到提高, 降低了其能量损失, 增加了汽轮机效率.

关键词: 汽轮机; 叶片; ANSYS CFX; 数值模拟; 气动性能

中图分类号: TK26 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.008

0 引言

电在当今国民经济各个部门领域中有着非常重要的作用. 目前, 主要采用煤、石油、天然气以及其他燃料燃烧产生蒸汽, 借助汽轮机将之转化为机械能驱动发电机发电. 近年来, 为了满足更为苛刻的高参数化(高压、高功率、高温等), 工况变更范围更宽和空间结构更紧凑等的需求, 汽轮机通流部分蒸汽的流动也变得更为复杂. 为了探求改善流动, 降低叶栅损失和提高效率等新方法, 国内外学者对其内部流动研究一直都没停止过.

Elbatsh^[1] 研究实验与数值模拟研究结果显示二次流受压力梯度沿叶高分布较大, 且叶根处通道涡远大于叶顶的, 所以减少环形叶栅的二次流损失的重点应该放在叶根处通道涡. Verpe^[2] 在验证数值模拟可靠的基础上, 利用数值模拟结果揭示了因进口剪切流引起的二次流而导致的尾缘涡流的形成. 刘云峰等^[3] 利用 NUMECA 软件分析了某 660 MW 机组中动叶片进汽侧中间体和围带倒圆角后高中低压的气动性能影响, 得出了低压部分倒圆角后收益最大, 中压最小. 陈远东^[4] 利用叶轮机械优化设计平台 FINE/Design 3D 对喷嘴进行了气动性能优化. 王喜华等^[5] 采用商业 CFD 软件 Numeca 分析技术, 分析了不同相对叶高下汽轮机的气动性能, 结果表明, 对于相对叶高

较小的调节级, 采用外端壁子午收缩后调节级效率有所提升. 石玉文等^[6] 采用商业软件 CFX, 对哈汽公司设计的汽轮机不同出口马赫数下大焓降动叶的气动性能进行了模拟分析, 得出了哈汽公司设计的大焓降动叶具有后加载特性, 出口马赫数越高, 后加载特性越明显. 王定标等^[7] 利用 ANSYS Workbench 软件对汽轮机流量性能进行了分析, 并通过数值模拟结果, 借助软件 BladeGen 对汽轮机末级静叶型线进行优化改进. 周俊杰等^[8] 利用 ANSYS Workbench 软件对凝汽式汽轮机叶片进行静、动联合数值模拟, 模拟结果表明, 优化后叶片表面压力系数分布曲线较理想, 叶片表面压差降低, 减小了径向二次流损失.

笔者主要通过商业软件 ANSYS CFX 对 125 MW 轴流式汽轮机某一冲动级的通流部分建立单流道模型并进行数值模拟, 对模拟得出的结果进行分析, 得出叶栅能源损失的来源, 然后结合叶片结构几何参数设计, 以提高蒸汽做工、等熵效率, 达到节能减排的目的.

1 数值模拟

CFX 软件是基于有限体积法, 具有精确的计算结果和丰富的物理模型, 例如化学反应、多相流、辐射与传热、可压缩或不可压缩的流体流动等, 广泛应用在能源化工、旋转机械及航空等重要

收稿日期: 2016-11-09; 修订日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276173)

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

领域,其中 CFX 在旋转机械领域上的使用尤为广泛. CFX 为用户提供多种计算模块,能够使旋转机械的模拟更加精确.

1.1 数学模型

汽轮机单流道内的流体流动符合质量、动量和能量方程. 它们的控制方程^[9]分别为

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \mathbf{u} 为速度矢量.

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} \mathbf{u}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} \mathbf{v}) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{w} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} \mathbf{w}) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w, \quad (4)$$

式中: \mathbf{u} 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{w} 为速度矢量在 x 、 y 、 z 方向的分量; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; S_u 、 S_v 、 S_w 为动量守恒方程的广义源项.

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{k_1}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T, \quad (5)$$

式中: c_p 为流体的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为流体的温度, K ; k_1 为流体的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_T 为黏性耗散项.

1.2 物理模型

研究对象为 125 MW 轴流式汽轮机某一冲动级汽轮机叶片. 该级静叶片为 TC-1A 型叶片, 其几何参数: 节圆直径 950 mm, 节距 38 mm, 相对节距 0.80, 叶高 52 mm, 进气角 $\alpha_0 = 29^\circ 30'$, 数量为 79. 该级动叶片为 HQ-1 型叶片, 其几何参数: 节圆直径 951 mm, 节距 22.4 mm, 相对节距 0.73, 叶高 55 mm, 进气角 $\beta_1 = 78^\circ$, 数量为 133.

1.3 模型建立及网格划分

由于汽轮机叶片是周期性均匀分布的, 则汽轮机内部流场也呈现周期性分布, 为了节省计算时间, 对模型进行简化, 只对单个动静叶之间的流场进行了分析, 模型如图 1 所示.

Gambit 软件不仅具有全面三维几何建模能力, 而且还可以导入大多数 CAD/CAE 软件所建立的几何和网格. 导入过程中可以自动修补几何功能, 以保证几何的高质量. 笔者选择了 Gambit 软件对所建模型进行了网格划分. 采用 TGrid 的

网格划分方式, 对动静叶进行了网格划分. 总网格数为 1 341 816, 如图 2 所示.



图 1 汽轮机单流道模型

Fig. 1 The model of steam turbine single channel

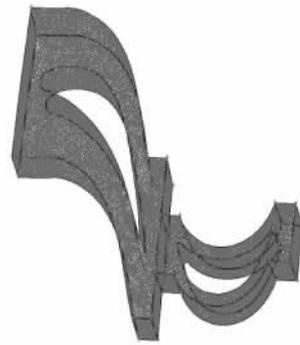


图 2 汽轮机网格划分

Fig. 2 Meshing of steam turbine

1.4 工质属性及边界条件划分

为了与实际状况更加吻合, 采用了平衡态的水蒸气. 在 CFX 软件自带的材料库中, 分别选取单相水和水蒸气, 然后通过设置参数的方式建立平衡态的水蒸气. 选取的单相水和水蒸气最高温度设置为 800 K, 最低温度为 273.15 K; 最高压力为 9.5 MPa, 最低压力为 7.5 MPa.

在边界条件设置上, 由于工质为平衡水蒸气, 考虑到稳定性, 选用 P-Total Inlet、P-Static Out 为边界条件, 交界面设置为 Frozen Rotor, 来流方向垂直于进口截面. 进口总压 9.3 MPa, 出口静压 8.1 MPa, 进口总温 760 K.

2 叶片气动性能分析及改进

2.1 叶片型线分析及改进

2.1.1 静叶片前缘和尾缘优化改进

原静叶叶型的椭圆率为 1, 因此, 在原有静叶叶型的椭圆率附近调试, 最终确定静叶片前缘椭圆率为 2, 后缘椭圆率为 0.2, 如图 3 所示. 由于修

改的叶型为静叶栅,其气动性能评价为静叶片表面压力分布曲线,如图 4 所示.

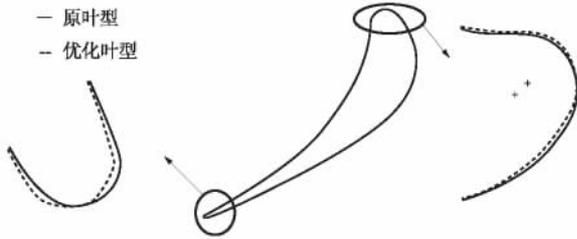


图 3 静叶前缘、尾缘前后改进对比图

Fig. 3 Comparison chart of leading edge and trailing edge of stator before and after improvement

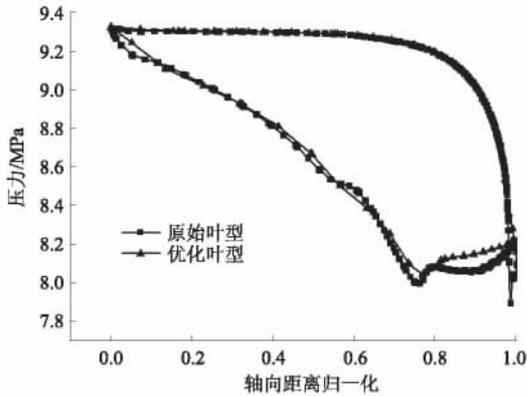


图 4 静叶表面压力分布曲线

Fig. 4 The static pressure distribution curve in the surface of stator

由图 4 可以看出,静叶片整体的压力分布曲线是相同的,但优化改进后,从静叶片尾缘处可以看出转折点由原来的 76% 弦长处往后移至 80% 弦长处,扩压程度有所减少,并且较原静叶片弦长 10% .55% 处吸力面压力梯度变化更平缓,降低了静叶片的能量损失. 静叶片原叶型喷嘴效率为 93. 91% ,在改进叶片的前缘和尾缘后,喷嘴效率为 94. 50% ,提高了 0. 59% .

2. 1. 2 动叶前缘和尾缘优化改进

汽轮机叶栅能量损失主要发生在动叶,因此,通过改变椭圆率来改进动叶前缘、尾缘,以提高等熵效率,在原有叶型的椭圆率上进行修改,最终调整椭圆率为 2. 改进前后的动叶前缘、尾缘如图 5 所示.

图 6 给出了动叶表面压力分布曲线. 由图 6 可以看出,动叶吸力面较原叶型具有较好的顺压压力梯度,且保证动叶进口与出口处的压力差值较小. 这样可以减少动叶出口处的余速损失,增加推动力,使蒸汽动能更多地转换成机械能. 动叶片前缘和尾缘处的压力分布曲线局部放大图如图 5 所示,动叶吸力面的转折点由 78% 往后推至

80% . 动叶的前缘和尾缘的压力面和吸力面的压力波动有所减轻,降低了动叶的端部损失.

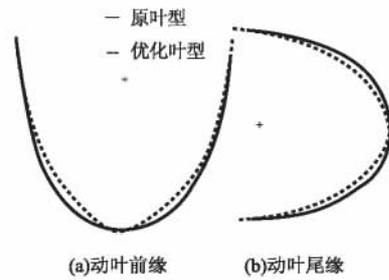


图 5 动叶前缘、尾缘前后改进对比图

Fig. 5 Comparison chart of leading edge and trailing edge of rotor before and after improvement

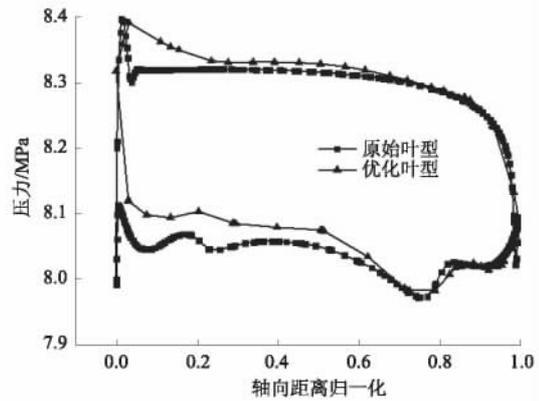


图 6 动叶表面压力分布曲线

Fig. 6 The static pressure distribution curve in the surface of rotor

图 7 为单流道通流中 50% 叶高处的熵值分布图. 由图中可以看出,沿着叶片表面流向方向的熵值有所增加,但是其增加范围明显减少.

原始叶型的汽轮机等熵效率为 91. 67% ,改进后,其等熵效率为 92. 10% ,增加了 0. 43% . 说明通过优化改进叶型的前缘和尾缘对汽轮机效率提高有一定的效果.

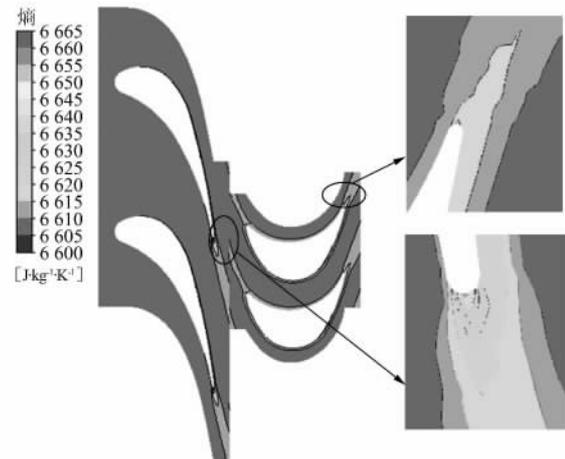


图 7 50% 叶高处熵值分布云图

Fig. 7 The entropy contours of the 50% span normalized

2.2 汽轮机叶栅相对节距分析及改进

一般冲动级叶栅较反动式叶栅对相对节距的变化更为敏感,冲动级叶栅的最佳相对节距 $\vec{t}_n = 0.55 \sim 0.72$,而本文中静动叶的相对节距分别为0.80和0.73,已经超过了最佳节距的范围,因此需通过改变汽轮机静动叶片的数量来控制相对节距.

2.2.1 静叶栅相对节距的优化改进

通过每次减少叶栅距3 mm,得到4组静叶栅相对节距,分别为 $\vec{t}_n = 0.740, 0.690, 0.638, 0.585$,对应的叶片数量分别为85、91、98、107.通过模拟计算,求得这4组相对节距的静叶片的表面压力分布曲线,如图8所示.

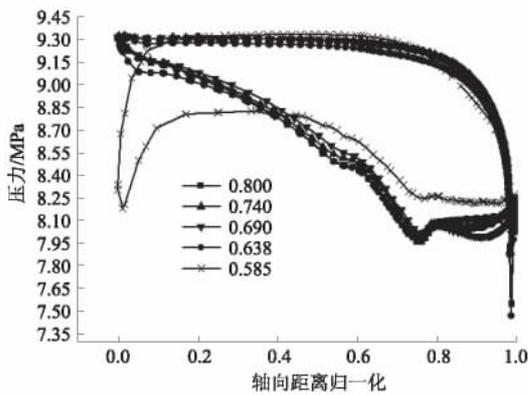


图8 不同相对节距静叶表面压力分布曲线

Fig. 8 The pressure distribution curve of different relative pitch in the surface of stator

由图8可以看出,静叶片压力面的压力随叶栅相对节距的变化不大,前3组相对节距下的静叶片压力面的压力曲线基本是重合的,当相对节距为0.585时,静叶片压力面压力发生变化较大,这是因为冲动式叶栅对相对节距偏小的静叶片较为敏感.当静叶片相对节距为0.638时,静叶前缘出现了小范围的扩压现象,当相对节距降低到0.585时,其前缘出现了严重的扩压现象,吸力面的附面层将在静叶前缘发生分离,产生的扰流造成巨大的能量损失.相对节距为0.800、0.740、0.690时,静叶片吸力面的压力分布基本相同,但是当相对节距为0.690时,压力分布曲线的转折点较其他两种的靠后,且在出口处压力没有出现较大的波动,因此该汽轮机某一冲动级静叶片的相对节距较优值为0.690.

2.2.2 动叶栅相对节距优化改进

改变动叶栅数量来改变动叶片之间的相对节距,

$\vec{t}_n = 0.650, 0.561$,与之相对应的叶片数为150、173.原叶片相对节距以及改进的两种叶片相对节距的动叶片表面的压力分布曲线对比图,如图9所示.

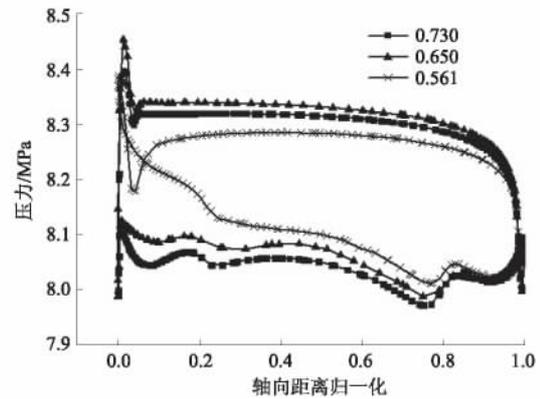


图9 不同相对节距动叶表面压力分布曲线

Fig. 9 The pressure distribution curve of different relative pitch in the surface of rotor

如图9所示,相对节距为0.561时,动叶片表面压力分布较不理想,前缘压力波动比较大,以至于吸力面的压力大于压力面压力,发生了严重的二次流以及叶型能量损失.相对节距为0.650时,相对原叶型相对节距表面压力分布整体上移,在流道内蒸汽压力降低较少,使得流速增加比较缓慢,减少了余速损失.

2.3 静动叶栅级间对比对汽轮机性能优化影响

图10为动叶片不同高度的表面压力分布曲线.由图10可以看出,动叶片吸力面出现了极速扩压区,因此通过调整动叶进出口角来调整级间配比,达到优化改进动叶进口流动状况的目的.

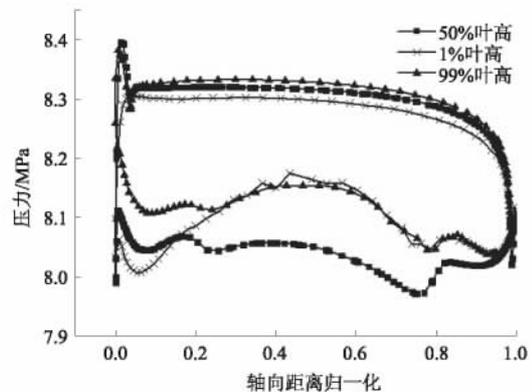


图10 动叶不同叶高表面压力分布曲线

Fig. 10 The pressure distribution curve of different span normalized in the surface of rotor

笔者通过改变动叶叶型弧线方向来调整动叶进口角,以优化静动叶栅配比,改善动叶进口流动

状况. 并且采用了总压损失系数来做为评价其动力性能好坏的指标.

总压损失系数表达式:

$$C_{pt} = \frac{2(P_{0i} - P_i)}{\rho_i c_i^2}, \quad (6)$$

式中: P_i 为流道内 1% 轴向弦长处的压力; P_{0i} 为进口滞止压力; c_i 为出口处的速度; ρ_i 为出口处的密度.

图 11(a) 和图 11(b) 给出了动叶截面总压损失系数分布云图. 由图 11(a) 中可以看出, 在流向 $X/B = 1/3$ 截面上总压系数 ≤ 0.01 , 在叶片吸力面, 叶根到叶顶总压系数最大值 ≤ 0.09 . 由图 11(b) 可以看出, 在流向 $X/B = 2/3$ 截面上, 叶片吸力面总压损失系数远大于 0.01, 最大值接近于 0.4. 主要原因是边界层分离造成二次流, 使得总压损失较大. 叶片吸力面沿流线方向上逐渐降低, 因此越靠近叶片尾缘, 压力与进口滞止压力差值越大, 造成了总压损失系数增大.

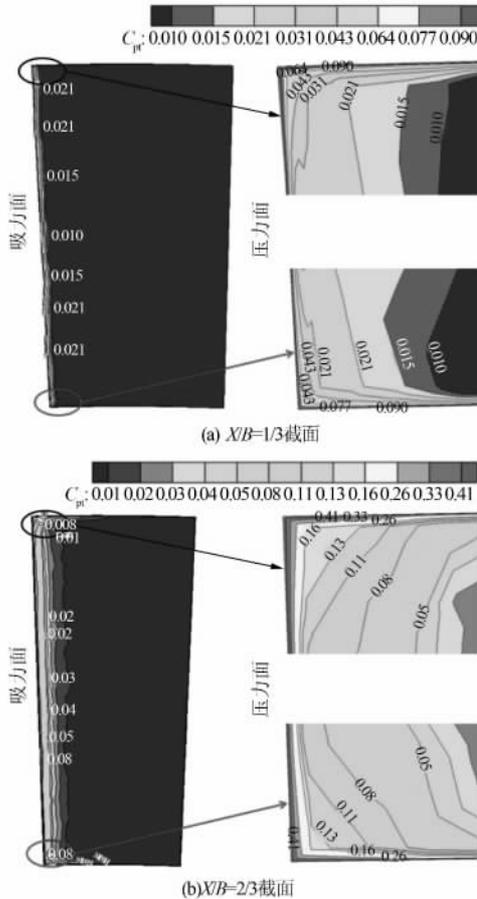


图 11 流向截面上总压系数分布云图
Fig. 11 The contour of the total pressure coefficient of flow section

改变动叶进口角来调整静动叶级间的配比, 得到截面吸力面上的总压损失系数沿叶高方向分布曲线. 图 12(a) 与图 12(b) 分别是在流向 $X/B = 1/3$ 与 $X/B = 2/3$, 动叶吸力面总压损失系数曲线

图. 由图 12(a) 和图 12(b) 中可以看出, 通过静动叶片级间配比优化, 动叶截面总压损失系数随叶高的变化趋势相似, 但总压损失系数降低, 总体减少 0.005 左右. 总压损失降低说明蒸汽做功的能力得到了提高.

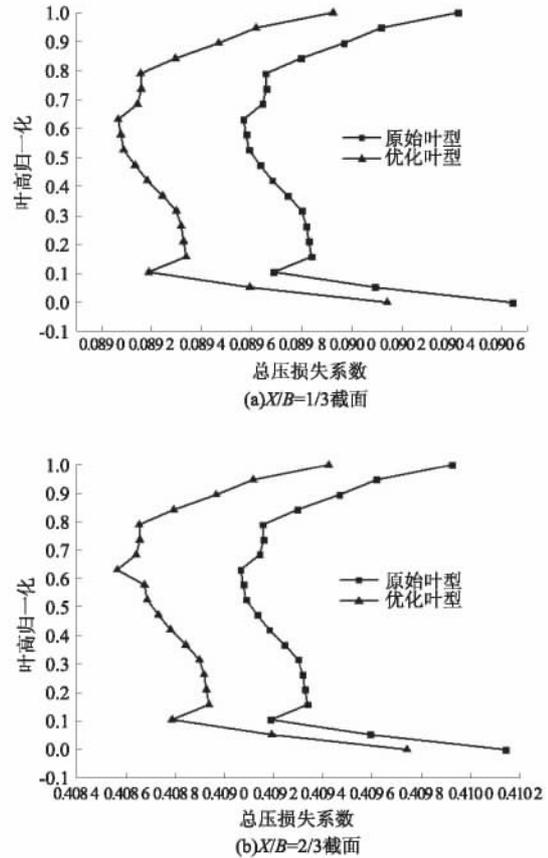


图 12 沿流向动叶吸力表面总压损失系数曲线
Fig. 12 The total pressure coefficient of rotor suction surface along flowing

图 13 和图 14 为动叶入口角调整前后的子午面速度分布云图. 由图 13、14 可以看出, 优化后叶型子午截面速度最大值为 130 m/s 左右, 原叶型子午面速度最大值为 125 m/s 左右, 优化后子午面速度增大. 蒸汽流速增大可以减弱边界层在叶片表面上的厚度, 从而减小边界层摩擦损失, 避免较厚的附面层分离造成二次流损失. 由式 (6) 推断出, 蒸汽流速增大, 叶片的总压损失系数会随之减少.

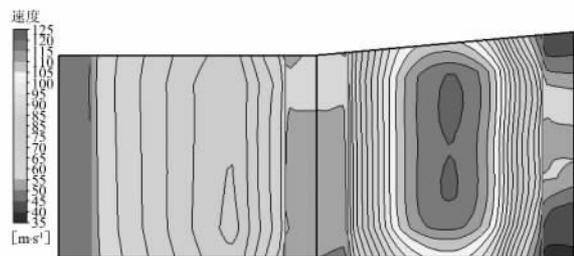


图 13 原叶型子午面速度云图
Fig. 13 Meridian velocity contour of the original blade meridian

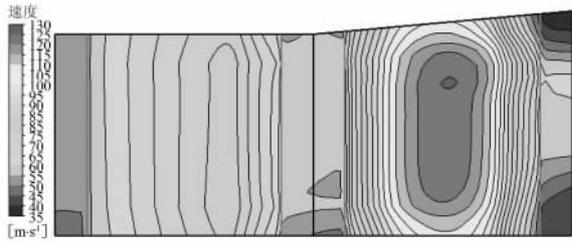


图 14 优化后叶型子午面速度云图

Fig. 14 Meridian velocity contours of blade meridian after optimization

3 结论

(1) 通过改变静动叶片的椭圆率来达到优化改进的目的。模拟结果表明,静叶片前缘椭圆率为 2,尾缘椭圆率为 0.2 时,其喷嘴效率由原来的 93.91% 提高到 94.50%;动叶前缘尾缘椭圆率为 2 时,其汽轮机等熵效率由原来的 91.67% 提高到 92.10%。

(2) 通过改变静动叶片的数量来改变其相对节距。模拟结果表明,静叶片相对节距为 0.690,动叶片相对节距 0.650 时,表面压力分布整体上移,在流道内蒸汽压力降低较少,使得流速增加比较缓慢,减少余速损失。

(3) 通过改变动叶进口角大小来改变静动叶级间配比,模拟结果表明,沿流向界面 $X/B = 1/3$ 和 $X/B = 2/3$,总压损失系数都有所降低,总体减少 0.005 左右,说明优化静动叶级间配比对提高

汽轮机气动性能有一定效果。

参考文献:

- [1] ELBATSH H M. Effect of the radial pressure gradient on the secondary flow generated in an annular turbine cascade [J]. International journal of rotating machinery, 2012(3): 1-13.
- [2] VARPE M K. Investigation of the shear flow effect on secondary flow and losses in a low speed axial flow compressor cascade [J]. International journal of gas turbine, 2014, 6(2): 17-26.
- [3] 刘云峰,郭魁俊,张宏涛,等. 动叶片中间体和围带进汽侧倒圆角对气动性能影响研究 [J]. 汽轮机技术, 2015, 57(1): 21-22.
- [4] 陈远东. 汽轮机调节阀喷嘴组气动优化设计 [J]. 汽轮机技术, 2015, 57(4): 251-254.
- [5] 王喜华,钟刚云,吴其林,等. 子午流道最调节级气动性能影响的三维数值研究 [J]. 东方汽轮机, 2014, 6(2): 12-17.
- [6] 石玉文,韩万龙,韩万金,等. 马赫数对大焓降动叶气动特性影响的数值研究 [J]. 汽轮机技术, 2014, 56(1): 1-5.
- [7] 王定标,雷凤林. 汽轮机末级变工况三维数值模拟与叶型改进设计 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(5): 1-4.
- [8] 周俊杰,王梅玲. 汽轮机叶型的三维数值模拟及优化 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 49-53.
- [9] 周云龙,郭婷婷. 高等流体力学 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

Study on Numerical Simulation of the Steam Turbine Blade Aerodynamic Performance Optimization Based on ANSYS CFX

ZHOU Junjie, WANG Pu, ZHOU Jinfang

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

Abstract: The analysis was held with the 125MW axial flow steam turbine impulse stage blade. The three-dimensional numerical simulation and optimization were conducted by using the commercial software ANSYS CFX. The results showed that the pressure distribution of blade surface reduced, and the radial secondary flow loses was controlled effectively, with optimizing the structure geometric parameters such as ellipticity of the leading edge and trailing edge, relative pitch, inter-stage ratio, and so on. Isentropic efficiency increased by 0.43%, the total pressure loss coefficient decreased about 0.005. After the optimization, the aerodynamic performance of the blade increased, and the energy loss in the blade decreased and the efficiency of steam turbine increased.

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

文章编号: 1671-6833(2017)04-0007-05

纵向激励下防波板组合形式对罐箱液体晃动的影响

丁 昌, 付延唐, 吴学红, 龚 毅

(郑州轻工业学院 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于VOF(volume of fluid)模型采用Fluent软件,模拟了罐车突然制动时罐箱内液体的晃动过程.对比罐箱内液体晃动对前后封头的压强变化,结果表明,液体主要对前封头有较大的冲击载荷.设置防波板可有效减小罐箱内液体的晃动,降低液体对封头的冲击力,提高罐箱的安全性.研究了5块相同的弓形防波板在全下布置、全上布置、上下交错、左右交错4种不同的布置形式在不同充液率时对前封头的冲击,结果表明,在较低充液率时防波板左右交错和全下布置均能降低液体对前封头的冲击载荷,而防波板上下交错和全上布置的防波效果较差.随着充液率的升高,防波板左右交错的效果逐渐变差.在不同的充液率下,防波板全下布置均有较好的防波效果.

关键词: 罐箱;VOF模型;防波板;布置形式;防波效果

中图分类号: U469.61 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.012

0 引言

液体晃动现象广泛存在于运输、地震、核工程、航空航天等领域^[1].罐箱作为工业生产中常用的运输工具,由于其装载量大,当运动状态突然发生改变时,引起内部液体大幅晃动,对罐壁产生冲击载荷,严重影响罐车的安全行驶^[2].此外,由于罐箱内介质大多属于易燃、易爆、有毒物质,液体晃动产生的静电和热量,导致罐箱内压力升高,造成介质泄露甚至产生爆炸,对罐箱的安全构成极大的威胁^[3].在罐箱内设置合理的防波板能够有效减弱液体的晃动,降低罐箱内液体对罐壁的冲击力,对罐车安全稳定的行驶具有重要的意义^[4].

20世纪70年代初,国外学者已经开始进行理论研究,Moiseev^[5]通过Ritz法得出了液体在立式圆柱形容器和矩形容器内晃动的固有频率.但是由于影响罐内液体晃动的因素较多,液面的边界条件是十分复杂的非线性方程,使得罐内液体晃动的求解极其困难,其他国内外学者对此也进行了大量的理论分析、实验研究和数值模拟^[6].Lee等^[7]对造波池中相同尺寸的空贮箱和部分充液的贮箱进行了实验和模拟研究,随着波浪频率

的增大,充液贮箱的晃动逐渐比空贮箱剧烈.Akyildiz等^[8]针对三维液罐内液体晃动的压强分布进行了实验研究,发现防波板能够大大降低液体的晃动.AKyildiz等^[9]实验研究了圆柱形贮箱在未带防波板和带有环形防波板两种情况下,液体对贮箱压强的变化,以及在不同安装位置、不同充液高度、不同旋转速度下环形防波板的作用,环形防波板非常有效地降低了液体对贮箱的冲击载荷.Xue等^[10]针对竖直防波板和带孔防波板在不同激励下进行试验和数值模拟研究,结果表明,竖直防波板在低频激励下降低了液体的晃动,而在高频激励下带孔防波板有较好的防波效果.Panigrahy等^[11]通过实验对竖直带孔防波板和环形防波板进行了研究,结果表明,环形防波板具有更好的效果.Zhang^[12]提出一种楔形LNG储罐,并用数值模拟的方法研究了其防波性能,结果表明其防波效果较好.Yu等^[13]提出了一个流固互相影响的计算框架,利用自己开发的有限元方法获得了穿刺能量和速度之间的定量相关性.张韬等^[14]采用VOF模型对罐车制动过程中内部液体的自由晃动过程进行了模拟,计算得出罐体各个部分的应力分布.文献大多研究了防波板的形状、位置等因素对防波效果的影响,少有人研究防波板的布

收稿日期: 2016-10-28; 修订日期: 2016-11-11

基金项目: 河南省产学研合作项目(23000253); 郑州轻工业学院横向项目(001586); 郑州轻工业学院博士项目(000524)

通信作者: 丁昌(1981—),男,河南信阳人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要从事低温容器的热性能与结构优化等方面的研究,E-mail: shcsdc@126.com.

置形式对防波效果的影响。

笔者针对某种型号的罐车,基于VOF法,采用Fluent软件,对安装5块相同的弓形防波板进行数值模拟。由于罐箱运行过程中以纵向激励载荷(载荷沿着罐体的轴向)为主,因此重点关注纵向激励条件下的液体晃动特性。首先研究了罐车制动时罐内液体的涌动规律及防波板的作用;其次对不同防波板布置形式的防波效果进行了比较,并研究了充液率对结果的影响。

1 理论模型

1.1 流体动力学控制方程^[15]

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(\rho u_j) u_i] - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho f_i = 0. \quad (2)$$

式中: u 为速度, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

1.2 VOF 体积函数方程^[16]

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla(uF) = 0, \quad (3)$$

式中: F 为流体体积分数; u 为速度, m/s 。

2 初始计算条件

采用基于压力的非稳态算法, κ - ϵ 方程, 动网格技术。初始速度 $v = 10 \text{ m/s}$, 制动加速度 $a = 5 \text{ m/s}^2$ 。速度和压力耦合采用 SIMPLE 算法, 压力修正方程的离散格式采用 PRESTO 格式, 对流项离散格式采用一阶迎风格式。

3 罐内液体的晃动过程

3.1 几何模型

图1为建立的罐箱模型, 罐体长 $L = 9\,080 \text{ mm}$,

前后封头为标准椭圆封头, 直径 $D = 2\,600 \text{ mm}$ 。充液率为 50%, 罐内液体为水, 其余为空气, 物性参数如表 1 所示。

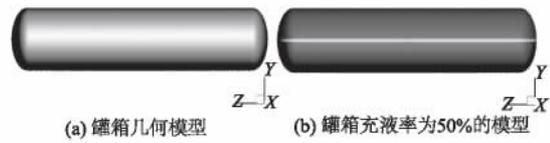


图1 罐箱的模型

Fig.1 Container model

表1 介质的物性参数

Tab.1 Properties of medium parameters

介质	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
水	998.2	1.0×10^{-3}
空气	1.2	1.8×10^{-5}

3.2 晃动过程分析

假设罐箱以初速度 $v = 10 \text{ m/s}$ 沿 Z 轴正向运动, 突然以 $a = 5 \text{ m/s}^2$ 的加速度作减速运动, 2 s 后静止, 计算时间共 10 s。图 2 表示了制动过程中罐箱内液体的变化。

由图 2 可以看出, 罐箱在制动时, 罐箱内液体因惯性作用向 Z 轴正向即前封头涌动, 在 2 s 罐车静止时, 罐箱内上部液体已经开始向后封头涌动, 随着时间的推移, 冲向后封头的液体越来越多。8 s 时罐箱内液体又向前封头涌动, 10 s 时趋于平缓状态。整个过程中前后封头所受压强的变化如图 3 所示(充液率为 50%), 前封头的压强逐渐增大, 后封头的压强逐渐减小, 在 1.2 s 时前封头的压强达到最大值 $4.3 \times 10^5 \text{ Pa}$, 之后液体开始向后封头涌动, 前封头压强随之降低, 2.2 s 时前封头压强降到最小值, 此时后封头压强达到局部最大值。如此反复的涌动, 由于罐箱的作用力和液体的黏性力, 罐箱内液体的晃动逐渐趋于平缓。当罐箱内安置防波板时, 液体对前封头的压强变化

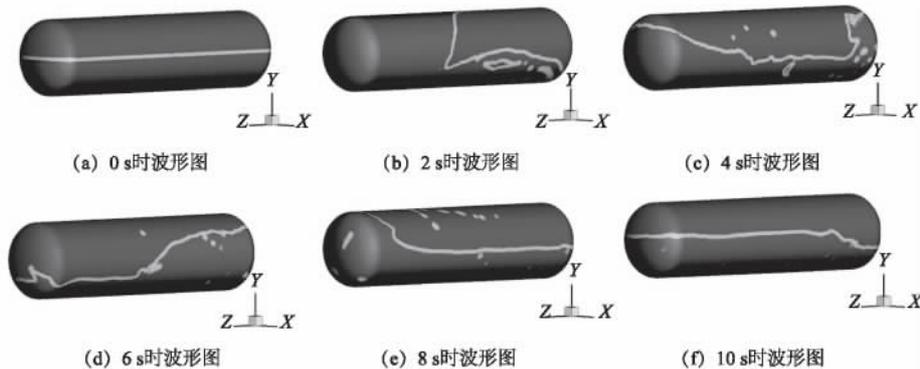


图2 罐箱内液体的晃动过程

Fig.2 The process of liquid sloshing in the container

如图4所示(充液率为50%),从图中4可以看出,罐箱内加防波板以后,前封头的最大压强为 2.1×10^5 Pa,没有明显的上升阶段,而是不断下降直至趋于稳定,这是由于防波板改变了罐箱内的空间布局,进而改变了液体的流场分布,能够明显抑制液体的晃动,降低液体对前封头的冲击载荷。

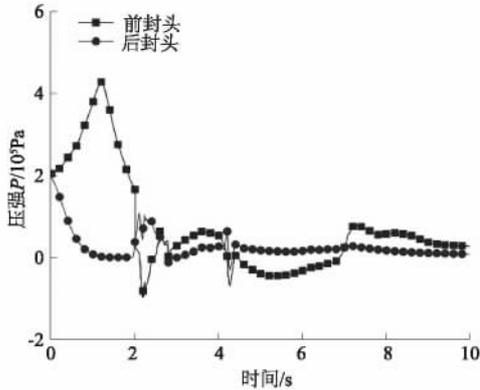


图3 前后封头的压强曲线

Fig. 3 The change of pressure former and after in the head

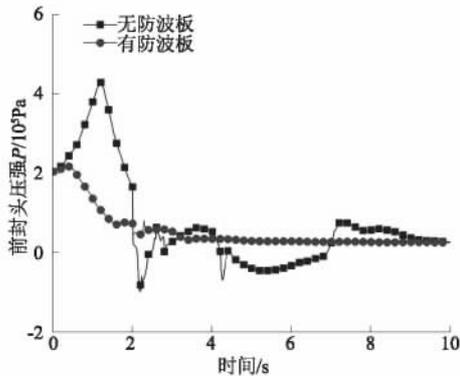


图4 前封头的压强曲线

Fig. 4 Pressure variations former head

4 防波板不同布置形式的结果分析

由图3可以看出,罐箱内液体主要对前封头有较大的冲击载荷,因此以液体对前封头的压强的大小评价防波板不同布置形式的优劣,并考虑充液率对其结果的影响.从图4可以看出,有无防波板的比较主要体现在罐箱制动的前2s以内,2s以后基本无变化.基于对罐箱内液体晃动规律的研究,防波板安装方向均垂直于液体的涌动方向。

4.1 防波板的4种布置形式

采用5块相同的弓形防波板,弓形防波板的面积为罐箱横截面的一半,防波板所在的平面把罐箱内部均分为6部分.图5所示为4种防波板

的布置形式:全上布置、全下布置、上下交错布置、左右交错布置。

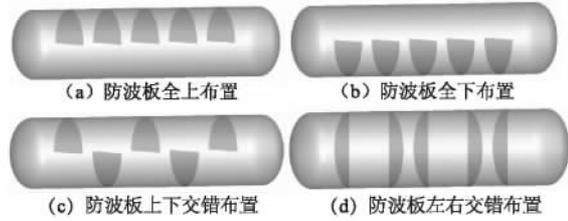


图5 防波板的布置形式

Fig. 5 Arrangement of baffles

4.2 充液率为50%和60%时的结果分析

图6为充液率为50%和60%时防波板不同组合形式条件下罐箱前封头压强变化曲线图.由图中可以看出,防波板左右交错和全下布置的布置形式均能降低液体对前封头的冲击载荷,其中防波板全下布置时前封头所受压强的峰值最小,防波效果最好.防波板全上布置和上下交错布置时罐内液体晃动加剧,不仅没有降低液体对前封头的冲击载荷,反而加大了液体对前封头的冲击。

充液率为50%时,防波板全上和上下交错的布置形式在0.1s出现局部的压强波峰,此时壁面剪切力的矢量图如图7所示,距离前封头最近的防波板处均出现漩涡,阻挡了表面液体向后封头的涌动,迫使前封头的压强增大.部分液体在压力下向第一块防波板(距离前封头最近)和第二块防波板之间涌动,前封头压强随之降低,但仍高于无防波板时的压强.液体在前封头聚集到一定程度从液体表面向后封头涌动,防波板全上布置和上下交错布置时,距前封头最近防波板均在顶部形成半封闭的结构,迫使压力波峰提前出现且波峰值增大。

充液率为50%时,无防波板的罐箱前封头在1.2s时达到压强波峰.图8为无防波板和防波板全下布置在1.2s时的液相图,从图8中可以看出,罐箱制动时液体向前封头涌动,主流区域在罐箱内底部,全下布置的形式有效地阻挡液体的晃动。

充液率为60%时,左右交错的布置在1.2s时出现压强波峰,液相图和壁面剪切力矢量图如图9(c)、(d)所示.(a)、(b)为充液率为50%时的液相图和壁面剪切力矢量图.随着充液率的升高,防波板左右交错布置时罐箱内液体对前封头的压强并不是简单的线性增大,液体的晃动过程发生了改变,防波板对液体的阻挡作用降低,液体聚集到一定程度后更迅速地涌向前封头,前封头处的静压大幅度增大,造成总压强剧增。

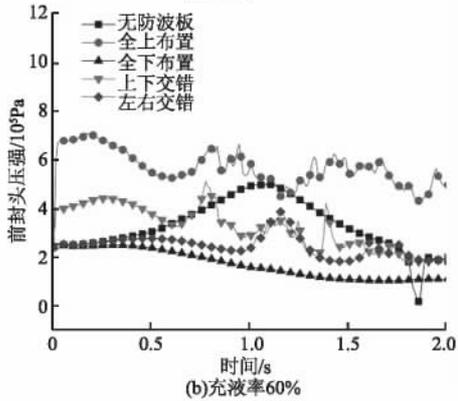
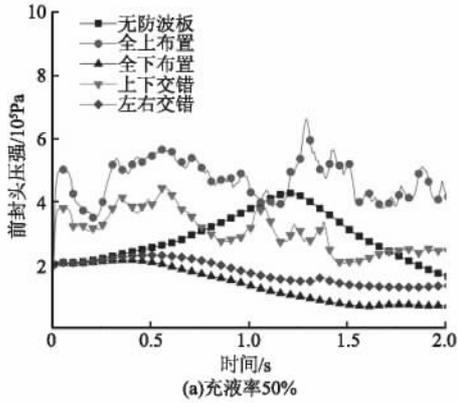


图6 充液率为50%和60%时前封头压强变化曲线
Fig.6 The pressure curve on former head filling rate of 50% and 60%

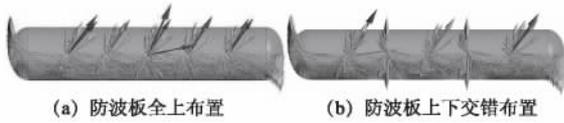


图7 壁面剪切力矢量图
Fig.7 Wall shear force vector



图8 波形图
Fig.8 Waveforms

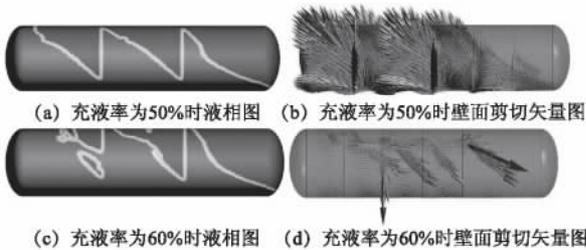


图9 防波板左右交错布置在1.2s时的波形图和壁面剪切力矢量图
Fig.9 Baffles disposed in staggered around 1.2 s of waveforms and wall shear stress vector

4.3 充液率为70%和80%的结果分析

图10为充液率为70%和80%条件下,罐箱前封头的压强变化曲线.由图可见,随着充液率从50%升高到70%,4种不同的防波板布置形式和无防波板的罐箱内液体对前封头的压强波峰均随着充液率的升高而增大.当充液率为80%时,罐箱内液体晃动的幅度减小,不同防波板布置形式之间的差别减小,防波板全上布置的前封头压强波峰值反而出现了下降.图11所示为充液率70%和80%防波板全上布置在压强波峰时刻的液相图和壁面剪切力图,从图中可以看出,随着充液量的升高,上部防波板起到一定阻挡作用,前封头所受最大压强降低.

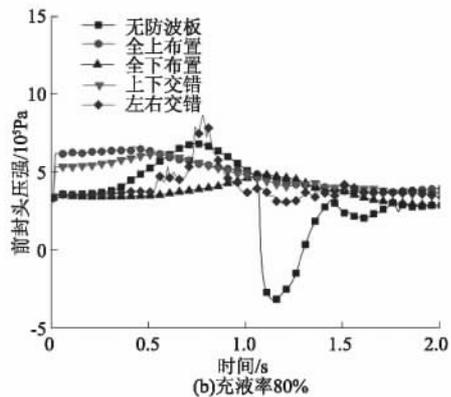
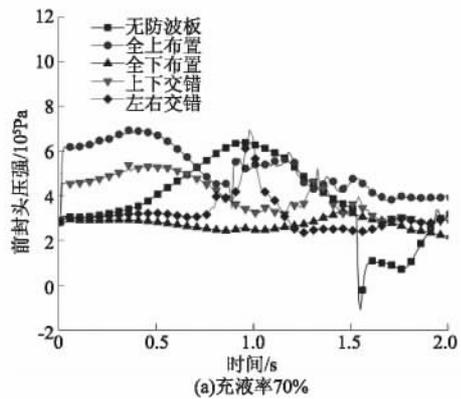


图10 充液率为70%和80%时前封头的压强变化曲线
Fig.10 The pressure curve on former head filling rate of 70% and 80%

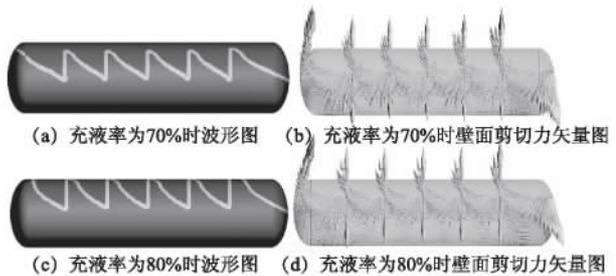


图11 波形图和壁面剪切力矢量图
Fig.11 Waveforms and wall shear stress vector

4.4 充液率为90%的结果分析

防波板左右交错的布置形式在罐内形成一个水平方向的蛇形流道,随着充液率的升高,大量液体在前封头聚集时,蛇形流道阻碍作用开始明显出现,阻挡了液体向后封头涌动,造成前封头压强短时间内急剧增大,如图12所示.同样由于防波板上下交错的布置形式在垂直方向形成一个蛇形通道,防波板上下交错布置时前封头的压强超过全上布置时前封头的压强.

无防波板的罐箱内液体对前封头的压强出现两次较大波峰,而防波板全下布置的方式则出现一次波峰且波峰值小于无防波板时的波峰值,因此充液率为90%时防波板全下布置仍具有较好的防波效果.

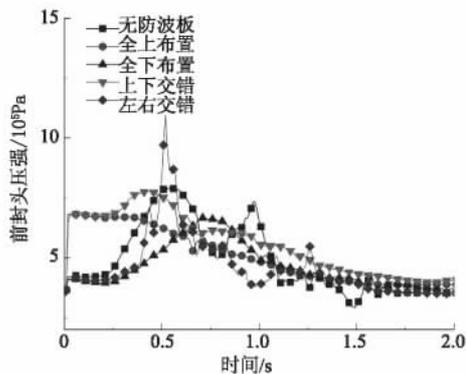


图12 充液率为90%时前封头的压强变化曲线

Fig.12 The pressure curve on former head filling rate of 90 %

5 结论

通过对设置5块防波板的罐箱在纵向激励载荷作用下液体晃动特性的计算分析,可得出如下结论:

(1) 以一定速度沿纵向运行的罐箱在制动时,罐箱的前封头压力在短时间内迅速增加,随后急剧下降,然后逐渐趋于平稳.后封头的压力则从制动开始时不断下降,随后维持在与前封头压力几乎相同的数值水平上.

(2) 当充液率变化时,不同的防波板设置形式在对罐箱内液体晃动的防波动效果上有显著的差异.在较低充液率时,防波板全下布置和左右交错的布置形式均有较好的防波效果,防波板上下交错和全上布置防波效果较差.随着充液率的升高,防波板左右交错的效果逐渐变差,在高充液率时防波板左右交错的布置形式最差.

(3) 防波板全下布置的形式由于位于主流区

域,在不同的充液率下均具有最好的防波效果.充液率为80%时,罐箱内液体的晃动幅度最小,是较适宜的充液系数.

参考文献:

- [1] IBRAHIM R A. Liquid sloshing dynamics: theory and application [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [2] 孙丽娜,周国发. 罐式集装箱液体晃动过程数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012,31(22): 147-150.
- [3] 陈志伟. 移动式压力容器介质晃动数值模拟及防波装置研究[D]. 浙江大学材料与化学工程学院, 2006.
- [4] 刘奎,康宁. 罐车制动时液体晃动的仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009,35(7): 799-803.
- [5] MOISEEV N N. On the theory of nonlinear vibrations of a liquid of finite volume [J]. Applied mathematics and mechanics, 1958, 22(5): 612-621.
- [6] 靳玉林. 具有新型防晃结构贮箱的液体晃动动力学分析[D]. 哈尔滨工业大学航天学院力学系, 2013.
- [7] LEE D Y, CHOI H S, FALTIBSEN O M. A study on the sloshing effect on the motion of 2d boxes in regular waves [J]. Journal of hydrodynamics, 2010, 22(5): 446-451.
- [8] AKYILDIZ H, ÜNAL E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing [J]. Ocean engineering, 2005, 32(12): 1503-1516.
- [9] AKYILDIZ H, ERDEM ÜNAL N, AKSOY H. An experimental investigation of the effects of the ring baffle-son liquid sloshing in a rigid cylindrical tank [J]. Ocean engineering, 2013, 59(1): 190-197.
- [10] XUE M A, LIN P Z, ZHENG J H, et al. Effects of perforated baffle on reducing sloshing in rectangular tank: experimental and numerical study [J]. China ocean engineering, 2013, 27(5): 615-628.
- [11] PANIGRAHY P K, SAHA U K, MAITY D. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks [J]. Ocean engineering, 2009, 36(4): 213-222.
- [12] ZHANG C W. Analysis of liquid sloshing in LNG carrier with wedge-shaped tanks [J]. Ocean engineering, 2015, 105(7): 304-317.
- [13] YU H, JEONG D Y. Impact dynamics and puncture failure of pressurized tank cars with fluid-structure interaction: a multiphase modeling approach [J]. International journal of impact engineering, 2016, 90(12): 12-25.

(下转第34页)

文章编号: 1671-6833(2017)04-0012-05

基于包埋功能微生物的生物滤塔净化甲苯废气研究

朱亚中, 李顺义, 骆翼梦, 马宏业, 王 岩

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 以自制包埋有恶臭假单胞杆菌的缓释复合滤料(CPW)为填料, 采用生物过滤法净化甲苯废气. 分析了进气载荷和停留时间对降解能力的影响, 验证了滤塔停歇期和重新启动后对微生物的变化和系统净化效率的影响. 结果表明, 包埋功能菌剂的复合填料, 无需挂膜, 微生物数量多、活性强, 对甲苯有较强的降解能力, 在适宜的气体停留时间 74.2 s, 去除率为 97.3%, 进气载荷为 22.11 g/(m³·h) 时, 最大去除负荷为 16.97 g/(m³·h). 装置在停歇 3、7、30 d 后, 系统净化能力恢复稳定至 80%, 所需的时间分别为 5、21 和 45 h. 停歇周期对生物滤塔恢复及填料微生物影响较大, 停歇 30 d 恢复运行后的细菌数量要明显高于恢复前, 且下层细菌数量最多.

关键词: 生物滤塔; 甲苯; 停歇; 生物降解

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.010

0 引言

在工业生产中会产生大量的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs), 对生态、环境和人体健康造成巨大危害. 甲苯是 VOCs 中常见的污染物之一, 炼油、石化、染料、造纸及印刷工业是其主要来源^[1]. 生物法是目前处理可生化气体最常用的技术之一, 尤其对那些低浓度、大气量的可生物降解物质. 与传统的物化方法相比, 具有低成本、低能耗、低运行维护以及处理高效和无二次污染等优点^[2]. 生物过滤工艺是生物法处理废气的常用处理方法^[3].

填料和微生物是影响生物滤塔性能的重要因素^[3]. 有机填料如堆肥、木屑等, 运行一段时间后会 出现压实、破碎等情况, 导致压降升高, 气流分布不均, 去除效率下降; 同时填料易腐解, 一般需 1~3 a 更换一次, 给工业应用带来极大不便. 无机填料如珍珠岩、火山岩等具有寿命长、性质稳定等优点, 但是其本身不含有微生物, 还需额外补充营养物质^[4-5]. 复合填料具有机械强度高、pH 缓冲性能好, 本身含有营养物质等特点, 是当前研究的热点.

基于以上研究背景, 本研究以自主研发的功

能复合填料为滤料, 以筛选出的恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida* BRJC₁) 为菌源, 采用包埋固定化技术将菌剂负载至填料中, 采用生物过滤法净化甲苯废气. 同时为验证滤塔停运及重新启动对微生物及净化效率的影响, 在不同的停歇周期, 对重新运行后系统的净化恢复性能进行了研究, 并对滤塔不同层的微生物数量变化进行了初步分析, 为进一步的工业化应用提供理论和技术指导.

1 材料与方法

1.1 填料和微生物接种

生物滤塔所选用填料为自制缓释复合填料^[6], 其物理特性如表 1 所示^[7]. 传统的生物滤塔一般采用活性污泥直接挂膜, 但由于活性污泥中生物群落复杂, 导致驯化周期长, 净化效率低, 装置启动慢. 因此, 试验采用筛选的 *Pseudomonas putida* BRJC₁ 为菌源, 采用包埋固定化技术, 负载至填料内部, 填料内部的菌剂数量多、活性高, 运行过程中无需微生物驯化和挂膜阶段, 装置净化效率高.

1.2 生物滤塔装置

生物滤塔是由有机玻璃柱制作, 内径为 105 mm. 生物滤塔填料分为 3 层, 各填料层厚度为 300 mm,

收稿日期: 2016-11-25; 修订日期: 2016-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1304216); 教育部博士点新教师基金资助项目(20124101120015); 河南省教育厅重点项目(13A610689)

通信作者: 李顺义(1976—), 男, 河南洛阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事大气污染控制方面的研究, E-mail: lsy76@zzu.edu.cn.

填料层的间隙为 200 mm,床层总体积为 8.24 L.生物滤塔系统的示意图如图 1 所示.装置采用逆流模式操作,甲苯废气从生物滤塔底部进入,通过 3 层填料得到净化,从生物滤塔顶部排出.

表 1 填料的物理性质

Tab.1 Physical properties of materials

粒径/ mm	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	孔隙率/ %	持水能力/ %
φ12×20	471.0±0.8	3.91±0.20	38~41	49±1.3

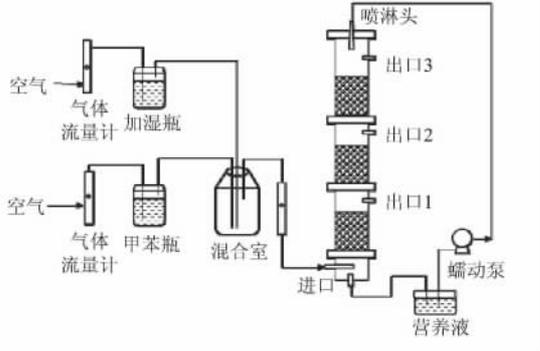


图 1 生物滤塔系统示意图

Fig.1 Diagram of the biofilter system

1 L 营养液以 1.2 L/h 的速度由蠕动泵从上次定期进行喷淋,每天喷淋 30 min,前期研究表明,此喷淋密度和频度可以使生物滤塔保持良好的水分和养分.营养液每 5 d 更换一次,试验在室温 20~25 °C 下进行.营养液成分由常量元素和微量元素组成,具体见表 2.每天测定进气口和出气口废气中甲苯的浓度.

表 2 营养液组成

Tab.2 Composition of the nutrient solution

常量元素	浓度/(g·L ⁻¹)	微量元素	浓度/(mg·L ⁻¹)
K ₂ HPO ₄	0.11	FeCl ₃	0.25
KH ₂ PO ₄	0.04	MnSO ₄	0.03
NH ₄ Cl	0.54	ZnSO ₄	0.04
MgSO ₄	0.067	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.03
CaCl ₂	0.036	—	—

不同条件下的生物滤塔性能,用气体停留时间 *EBRT*、去除率 *RE*、进气载荷 *ILR* 和去除负荷 *EC* 来分析,各参数定义如下:

$$EBRT = \frac{V}{Q}; \quad (1)$$

$$RE = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}; \quad (2)$$

$$ILR = \frac{Q C_{in}}{V_1}; \quad (3)$$

$$EC = \frac{Q(C_{in} - C_{out})}{V}, \quad (4)$$

式中: *Q* 是总气体流量; *V* 是空塔体积; *C_{in}* 是进口浓度; *C_{out}* 是出口浓度.

1.3 分析方法

甲苯浓度采用气相色谱仪(GC1120,上海舜宇恒平),FID 检测器,毛细柱(FFAP,30 m×0.25 mm×0.25 μm),氮气作为载气,进行测定.

微生物计数方法:从生物滤塔中取 1 g 的湿填料,采用稀释梯度法进行测定.

1.4 实验设置

1.4.1 不同运行条件下生物滤塔性能试验

试验运行控制见表 3,生物滤塔运行分为阶段 I、阶段 II 和阶段 III,各阶段气体流量分别为 0.1、0.2、0.4 m³/h.在不同阶段,使进气浓度从 100 mg/m³ 逐渐提高浓度.在每个阶段同一浓度保持 7 d,使生物滤塔系统达到稳定状态.

表 3 生物滤塔运行阶段设置

Tab.3 Operating conditions of the biofilter

运行阶段	运行天数/d	进气流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	进气浓度/ EBRT/s (mg·m ⁻³)	ILR/ (g·m ⁻³ ·h ⁻¹)
I	1~42	0.1	148.3	107~1321
II	43~84	0.2	74.2	104~1271
III	85~126	0.4	49.4	104~1188

1.4.2 停歇恢复运行试验

试验是在气体停留时间 74.2 s,进气浓度为 700 mg/m³ 左右条件下进行的.停歇期间停止对生物滤塔进气,营养液正常喷淋.停歇 3、7 和 30 d 后,滤塔重新启动,测定进出口甲苯浓度,考察滤塔恢复至正常稳定状态的能力.

2 结果与讨论

2.1 生物滤塔运行性能

2.1.1 进气浓度对降解性能的影响

图 2 为生物滤塔长期运行中甲苯进、出口浓度以及去除率随时间的变化示意图.

在阶段 I,*EBRT* 为 148.3 s 时,在较低的进气浓度时,生物滤塔的出口浓度低于 GB16297—1996《大气污染物综合排放标准》规定的 60 mg/m³,可以达标排放.在阶段 II,*EBRT* 为 74.2 s 时,在较低的进气浓度时,出口浓度依然很低.当进口浓度达到 900 mg/m³ 左右时,出口浓度明显变大,去除率下降至 76.8%.在阶段 III,*EBRT* 为 49.4 s 时,甲苯出口浓度几乎是随着进口浓度的增加而

增加,浓度最高时的去除率只有 36.7%.

结果表明,在低进气浓度时,进气负荷未超过微生物的净化能力,气体停留时间对系统能力影响不大.而随着甲苯进气浓度的增加,停留时间改变对系统性能影响较大.随着停留时间的降低,系统性能急剧下降.

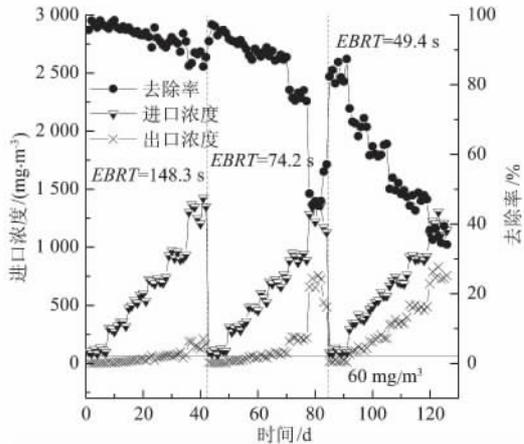


图2 生物滤塔甲苯进、出口浓度和去除率随时间变化
Fig.2 The variation of the inlet and outlet toluene concentrations and RE of the biofilter as a function of time

2.1.2 气体停留时间对净化性能的影响

在 148.3、74.2、49.4 s 不同气体停留时间下,甲苯进气负荷对去除率和去除负荷的影响分别如图 3 所示.

在气体停留时间为 148.3 s 情况下,在进气

负荷比较低的时候,去除负荷趋近于 100% 去除线.随着进气负荷的继续增加,去除负荷也不断增加,去除率稍有下降.

在气体停留时间 74.2 s 时,进气负荷增加到 17.22 g/(m³·h) 之前,去除负荷持续线性增加,去除率基本保持稳定.当进气负荷为 22.11 g/(m³·h) 时,去除负荷达到最大 16.97 g/(m³·h).当进气负荷超过 22.11 g/(m³·h) 时,去除率开始下降,去除负荷与之前相比增加的很缓慢.另外,基质抑制也是去除率和去除负荷下降的一个原因.在气体停留时间为 49.4 s 时,去除负荷偏离 100% 去除线现象更加明显.随着进气负荷的逐渐增大,去除负荷逐渐稳定在 20.75 g/(m³·h) 左右,此时的去除率仅为 46.9%.以上实验结果和 Rene 等^[8]、Dorado 等^[9] 和 Gutierrez 等^[10] 的研究一致.

结果表明,最佳的气体停留时间为 74.2 s,进气浓度低于 900 mg/m³ 时,去除率在 88% 以上.进气负荷为 22.11 g/(m³·h) 时,达到最大去除能力为 16.97 g/(m³·h).Zamir 等^[1] 研究了堆肥和火山岩混合填料生物过滤法去除甲苯废气,最大去除率为 92%,EC_{max} 为 1.9 g/(m³·h),远低于本试验研究.Gallastegui 等^[11] 研究了生物过滤塔处理甲苯和对二甲苯,甲苯的 EC_{max} 为 40.3 g/(m³·h),其较好的性能是由于其气体停留时间较长,此外对二甲苯的存在可能会促进甲苯的降解.

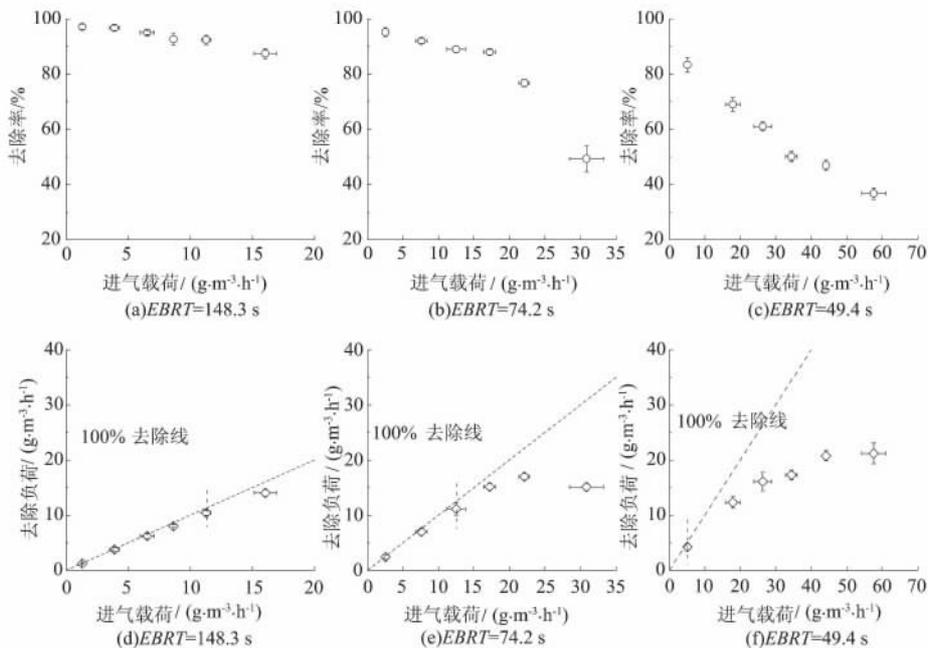


图3 不同气体停留时间下甲苯进气负荷对去除率和去除负荷的影响
Fig.3 Effect of toluene ILR on RE and EC of biofilter at various EBRT

2.2 生物滤塔停歇恢复

在生物滤塔停歇恢复试验中,气体停留时间为 74.2 s,进气浓度维持在 700 mg/m^3 左右.测定不同停歇时间滤塔恢复运行后的进、出口浓度变化.图4中3条曲线分别为停歇3、7和30 d后,恢复运行后去除率的变化.

随着停歇时间的延长,系统启动后,起始净化效率有较大差异.停歇3 d重新启动后,净化效率在70%左右,同时在恢复运行后的第5 h,去除率可达82.1%.任爱玲等^[12]研究了停歇3 d后的生物滤塔恢复至80%以上所需时间为11 h,因此,本实验的生物滤塔恢复性能较优.停歇7 d后,在第21 h,去除率达到80.6%.当停歇30 d时,起始净化效率只有24%左右,净化效率提高缓慢,滤塔中微生物所需适应时间变长.随后去除率快速增加,在恢复运行后的第45 h,去除率达到86.5%.

由此得出,停歇周期对系统净化效率有较大影响.停歇时间越短,起始净化效率越高,同时能较快恢复至稳定运行.

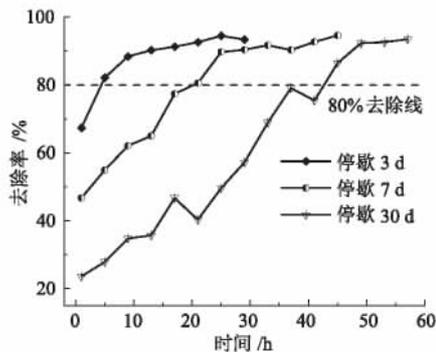


图4 不同停歇时间恢复运行后去除率变化

Fig. 4 Variations of RE after recoveries from different shut-down periods as a function of time

2.3 塔内微生物变化

生物滤塔填料在生产中,采用包埋固定化技术添加了单一菌源(恶臭假单胞菌).但长期运行后,在填料上发现了另一种菌,经镜检为球状细菌,菌落呈圆形,淡黄色,边缘光滑,表面湿润,但该菌数量要远低于BRJC₁,因此BRJC₁仍然为优势菌种.

停歇30 d后,系统的初始净化效率很低,说明塔内微生物所受影响较大,因此研究停歇期30 d和系统恢复运行稳定后填料的菌源的数量及分布变化,来考察长时间停歇对生物滤塔内部微生物的影响.如表4所示.

表4 停歇30 d恢复前后微生物数量变化

Tab. 4 Variations of the microorganism before and after recovery from a shut-down period of 30 d

填料层	恶臭假单胞菌/ (CFU · g ⁻¹)		球菌/ (CFU · g ⁻¹)	
	停歇期	稳定运行	停歇期	稳定运行
上层	1.5×10^3	3.0×10^4	6.5×10^3	8.4×10^4
中层	2.0×10^3	5.5×10^5	2.2×10^3	6.3×10^3
下层	3.3×10^4	1.2×10^6	2.0×10^3	4.5×10^3

由表4可以看出,该球菌可以耐受甲苯废气,但微生物数量远低于BRJC₁,因此BRJC₁为滤塔系统内优势菌落.球菌在稳定运行后的数量只是有了稍微的增加,变化不大.处于停歇期的BRJC₁,上层和中层数量相差不大,下层数量要高于其余两层.稳定运行后恶臭假单胞菌数量变化明显.中层和下层恶臭假单胞菌数量比恢复前增加了两个数量级,且恢复后下层恶臭假单胞菌数量依然要高于其它两层.

在停歇期甲苯停止供应,导致以甲苯为碳源的BRJC₁没有了营养来源,数量减少.此外在停歇期,塔内氧气含量减少,不适宜BRJC₁生长和繁殖.滤塔恢复运行后,碳源丰富,氧气浓度较高,有利于其生长.由于甲苯废气是从下而上供应的,而且营养液从上而下供应,营养液在下层富集较多,所以下层微生物数量要高于其他两层.

3 结论

笔者研究表明填充复合功能填料的生物滤塔处理甲苯废气是可行的,该生物滤塔能够有效处理甲苯废气.最佳停留时间为74.2 s,进口浓度低于 900 mg/m^3 ,去除率高于88%,出口浓度低于 100 mg/m^3 .进气负荷增加到 $22.11 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 之前,去除负荷线性增加,最大去除负荷为 $16.97 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

停歇时间对生物滤塔性能影响较大,生物滤塔停歇3、7、30 d之后,恢复运行后起始净化效率变化较大,同时恢复至净化效率稳定在80%以上所用的时间也有较大差异.气体和喷淋液的逆向流动,使底部填料层的营养物质充足,使得顶部填料层的营养物质相对匮乏,并最终使生物滤塔下层微生物数量明显高于其他两层.

参考文献:

- [1] ZAMIR S M, HALLADJ R, NASERNEJAD B. Removal of toluene vapors using a fungal biofilter under intermittent loading [J]. Process safety and environ-

- mental protection, 2011, 89(1): 8–14.
- [2] DELHOMÉNIE M C, HEITZ M. Biofiltration of air: A review [J]. Critical reviews in biotechnology, 2005, 25(1/2): 53–72.
- [3] RENE E R, MOHAMMAD B T, VEIGA M C, et al. Biodegradation of btex in a fungal biofilter: Influence of operational parameters, effect of shock-loads and substrate stratification [J]. Bioresource technology, 2012, 116: 204–213.
- [4] ANET B, COURIOL C, LENDORMI T, et al. Characterization and selection of packing materials for biofiltration of rendering odourous emissions [J]. Water, air, & soil pollution, 2013, 224(7): 1–13.
- [5] MOE W M, IRVINE R L. Polyurethane foam medium for biofiltration. I: Characterization [J]. Journal of environmental engineering, 2000, 126(9): 815–825.
- [6] 李顺义. 一种包埋功能微生物缓释复合填料及其制备方法: 201210446960.1 [P]. 2012–11–09.
- [7] 李顺义, 朱仁成, 张雅丽, 等. 一种包埋微生物复合填料的制备及性能评价 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 260–265.
- [8] RENE E R, KAR S, KRISHNAN J, et al. Start-up, performance and optimization of a compost biofilter treating gas-phase mixture of benzene and toluene [J]. Bioresource technology, 2015, 190: 529–535.
- [9] DORADO A D, BAEZA J A, LAFUENTE J, et al. Biomass accumulation in a biofilter treating toluene at high loads-part 1: Experimental performance from inoculation to clogging [J]. Chemical engineering journal, 2012, 209: 661–669.
- [10] GUTIERREZ A O B, ARRIAGA S, ESCOBAR B V A, et al. Performance of innovative pu-foam and natural fiber-based composites for the biofiltration of a mixture of volatile organic compounds by a fungal biofilm [J]. J Hazard Mater, 2012, 201: 202–208.
- [11] GALLASTEGUI G, AVALOS R A, ELIAS A, et al. Performance and macrokinetic analysis of biofiltration of toluene and p-xylene mixtures in a conventional biofilter packed with inert material [J]. Bioresource technology, 2011, 102(17): 7657–7665.
- [12] 任爱玲, 赫环环, 郭斌, 等. 生物滴滤塔净化含低浓度苯乙烯废气的研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1840–1848.

Biodegradation of Toluene in a Biofilter under Low Concentration

ZHU Yazhong, LI Shunyi, LUO Yimeng, MA Hongye, WANG Yan

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

Abstract: Self-made biological fillers embedded with *Pseudomonas putida* were used as biofilter packing materials for treating toluene. The effects of inlet loading rate (*ILR*) and empty bed residence time (*EBRT*) were evaluated. Changes in micro-organisms before and after the shut down period and its effect on biofilter performance were investigated. Results indicated that, no need for hanging film, activities of micro-organisms were high, capacity to eliminate toluene was strong. Optimal *EBRT* was 74.2 s, and removal efficiency ranged from 49.3 to 97.3%; maximum elimination capacity, $16.97 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ was occurred at *ILR* of $22.11 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. The recovery time needed for achieving constant state, after biofilter shut down for 3 d, 7 d and 30 d, were 5, 21 and 45 h, respectively. Microbial counts after recovery were significantly higher than the 30d shut-down period, and lower layer had the highest microbial population.

Key words: biofilter; toluene; shutdown; biodegradation

文章编号: 1671-6833(2017)04-0017-06

颗粒直径与轴向分布对吸附热变换器传热传质的影响

盛遵荣¹, 薛冰¹, 刘周明¹, 魏新利^{1,2}

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 热能系统节能技术与装备教育部工程研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用沸石吸附液态水的直接接触方式, 提高吸附热变换器内的传热传质速率, 回收热水直接生成过热蒸汽, 并通入干燥气使沸石再生. 反应器内填充相同质量、不同直径的球形沸石, 小颗粒填充床生成蒸汽的质量比大颗粒填充床提高 64.89%, 蒸汽最高温度和系统温升提高约 37 °C. 双层反应器的两种填充类型(密集-松散型床和松散-密集型床)的实验表明, 小颗粒对蒸汽和填充床的升温更加有效, 密集-松散型床的顶部蒸汽最高温度平均值比松散-密集型床提高 37.23%, 最高温度持续时间缩短 14.25%. 密集-松散型床的蒸汽生成速率较松散-密集型床提高 16.18%, 有利于快速生成蒸汽, 在沸石再生过程中, 上反应器干燥时间比松散-密集型床减少 25.03%, 更有利于沸石再生.

关键词: 吸附; 热变换器; 颗粒直径; 颗粒分布; 传热; 传质; 蒸汽生成

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2017.01.011

0 引言

我国工业生产中存在着大量的低温余热, 因品位低, 很难进行生产再利用^[1]. 吸附式热能存储技术具有结构简单、活动件数量少、环境友好等优势^[2], 并且吸附床可以使用低品位余热或者太阳能驱动再生^[3-5], 具有节能与减排的双重意义.

日本九州大学 Fukai 团队^[6-8]建立了以沸石-水为工质对的直接接触式吸附热泵系统, 回收低品位的热水(≤80 °C)及热气(≤200 °C)中的热量来生成中高品位的蒸汽(≤300 °C), 系统 COP (coefficient of performance) 达 0.23.

除了吸附系统的研究外, 还有关于吸附填料的研究. Janchen 等^[9]研究了在开放式吸附热系统中填充材料的储热性能的对比, 研究表明: 该系统中未使用黏合剂的蜂窝状沸石填料的吸附性能最好. Chan 等^[10]对 13X 沸石与 CaCl₂ 的复合吸附剂进行了制备和研究, 将复合吸附剂应用在太阳能驱动制冷系统中, 研究结果表明: 该制冷系统的 COP 达到 0.76, 较仅使用沸石作填料的制冷系统 COP 提高 81%.

本研究分析不同直径的沸石颗粒和颗粒轴向

分布对蒸汽生成和沸石再生过程中传热传质的影响. 笔者首先研究颗粒直径对生成蒸汽和系统性能的影响, 然后建立双层反应器, 改变颗粒轴向分布情况, 考察在蒸汽生成阶段的蒸汽生成情况, 并对沸石再生阶段沸石颗粒轴向分布对干燥速率的影响进行实验研究.

1 材料与实验系统

实验采用球形颗粒状 13X 沸石分子筛, 分子式为 Na₈₆ [(AlO₂)₈₆(SiO₂)₁₀₆] · xH₂O, 其有效孔径约为 1 nm, 比表面积为 800 ~ 1 000 m²/g. 选取颗粒平均直径为 2.2 mm 的小颗粒沸石(填充床空隙率为 0.33)和平均直径为 3.9 mm 的大颗粒沸石(填充床空隙率为 0.42)做对比实验, 初始含水量均为 0.03.

图 1 为开式吸附热泵系统实验装置示意图. 主要包括反应器、进水管路、干燥管路、排水管路及测温设备.

进水管路中的设备包括恒温水浴箱、计量泵、金属转子流量计和冷凝器; 干燥管路包括空气压缩机、干燥器、涡街流量计、加热器; 测温设备主要包括热电偶(±1.5 °C)、数据采集仪; 辅助测量设

收稿日期: 2016-11-01; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506187); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A480003)

通信作者: 魏新利(1956—), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事低温余热发电和高效热泵技术等研究, E-mail: xlwei@zhu.edu.cn.

备包括加热带、电子天平(± 0.01 g)、温度湿度测量仪、电磁搅拌机、加热炉、鼓风干燥箱、电子干燥箱等。

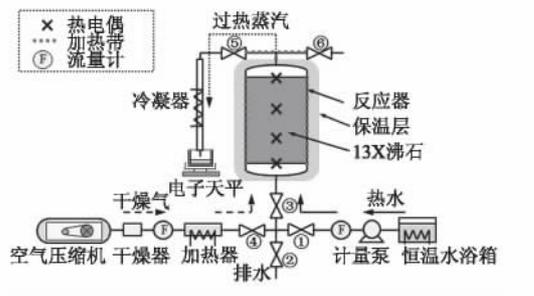


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup

实验分为蒸汽生成和沸石再生两个阶段:

(I) 蒸汽生成阶段: 用加热带将反应器预热到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 仅打开阀门①、③、⑤, 热水从恒温水浴箱以 2.5 L/h 的流量通入到反应器中, 沸石与水发生吸附作用, 释放吸附热, 水吸收吸附热生成蒸汽, 产生的水蒸气经冷凝器冷凝, 冷凝水的重量由出口处电子天平测量, 直至液位达到上反应器填充床顶端时停止进水, 打开排水阀门②, 排出反应器内大部分自由水。(II) 沸石再生阶段: 仅打开阀门③、④、⑥, 控制 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥气以 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 的流量通入反应器, 至反应器内所有测温点均接近进气温度后, 停止干燥。

2 颗粒直径的影响

2.1 填充床及蒸汽温度分布

在反应器内分别装填大、小颗粒沸石进行实验. 不同直径沸石的填充床各位置温度变化曲线如图2所示, 其中 T_{bot} 为反应器底部温度, $T_{1/3}$ 和 $T_{2/3}$ 分别为反应器 1/3、2/3 高的温度, T_{top} 为反应器顶部蒸汽温度. 两种不同的填充床温度变化趋势一致, 说明对于相同材料的沸石来说, 蒸汽生成过程中沸石吸附水的过程相似。

从图2中可以看出, 小颗粒填充床内 1/3、2/3 高处及出口蒸汽温度均高于大颗粒填充床, 说明小颗粒沸石对填充床和蒸汽温度的提升优于大颗粒沸石, 原因是在沸石的吸附过程中, 沸石与水的传质阻力是影响温度变化的主要因素, 传质阻力包括: ①外部气流阻力^[11-12]; ②颗粒内部扩散阻力^[13-14]; ③表面扩散阻力^[15], 其中第二项对传质阻力影响最大, 其取值与颗粒直径有关, 小颗粒沸石直径小, 传质阻力小, 更加容易与水接触释放吸附热, 所以小颗粒沸石有利于提升填充床和蒸

汽的温度. 图2(b)中, 填充床顶部温度在最大值处保持一段时间, 这说明在小颗粒填充床顶部生成蒸汽的温度、沸石含水量及蒸汽压力达到了平衡, 出口蒸汽稳定。

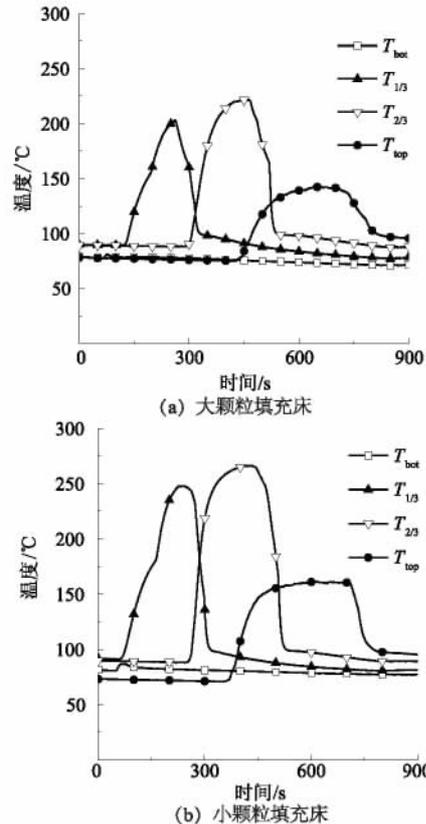


图2 蒸汽生成过程填充床温度变化

Fig. 2 Temperature variation in packed bed during generation process

2.2 蒸汽品位及系统性能

循环过程中假设系统向外界的热量损失为零, 那么进入水含有的热量和干燥气的热量, 可以完全转化为蒸汽所含的热量和反应器内积累的显热. 其中, 干燥气的热量由沸石干燥所需热量进行计算。

$$Q_{w,\text{in}} + Q_{\text{reg}} = Q_{s,\text{out}} + Q_{\text{loss}}, \quad (1)$$

式中: $Q_{w,\text{in}}$ 为进入水含有的热量, kJ; Q_{reg} 为沸石再生所需要的热量, kJ; $Q_{s,\text{out}}$ 为生成蒸汽含有的热量; Q_{loss} 为循环过程的热损失量, kJ.

$$Q_{s,\text{out}} = m_s [C_{p,w}(T_{\text{bp}} - T_{\text{ref}}) + \gamma + C_{p,s}(T_s - T_{\text{bp}})], \quad (2)$$

式中: m_s 为生成蒸汽的质量, kg; $C_{p,w}$ 为水的比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_{bp} 为水的沸点, $^{\circ}\text{C}$; T_{ref} 为温度参考值, $^{\circ}\text{C}$; γ 为水的汽化潜热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{p,s}$ 为蒸汽的比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_s 为蒸汽的温度, $^{\circ}\text{C}$.

$$Q_{\text{reg}} = \gamma m_z (x_{\text{fin}} - x_{\text{ini}}) + \Delta H_{\text{ads}} m_z (x_{\text{fin}} - x_{\text{ini}}) + (C_{p,z} m_z + C_{p,r} m_r) (T_{\text{ini}} - T_{\text{fin}}), \quad (3)$$

式中: m_z 为沸石的质量, kg; x_{ini} 、 x_{fin} 分别为沸石初始和吸附结束时的含水质量与干燥沸石的质量比; ΔH_{ads} 为沸石的吸附热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{p,z}$ 为沸石的比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $C_{p,r}$ 为反应器的比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; m_r 为反应器的质量, kg; T_{ini} 、 T_{fin} 分别为初始和结束温度, $^{\circ}\text{C}$.

系统生成的可用能量是蒸汽中所含的热量. 定义制热系数 COP_h (coefficient of performance for heating) 的计算式

$$\text{COP}_h = Q_{s,out} / Q_{reg}. \quad (4)$$

焓效率 COP_{ex} (exergy coefficient of performance) 计算公式为:

$$\text{COP}_{ex} = \text{COP}_h \left[(1 - T_0/T_s) / (1 - T_0/T_L) \right], \quad (5)$$

式中: T_0 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; T_L 为余热温度, $^{\circ}\text{C}$.

定义系统温升为生成蒸汽的平均温度与热水和干燥气平均温度的差值:

$$\Delta T = T_s - (T_{w,in} + T_g) / 2, \quad (6)$$

式中: T_s 为生成蒸汽的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{w,in}$ 为进水温度, $^{\circ}\text{C}$; T_g 为干燥气温度, $^{\circ}\text{C}$.

颗粒直径对蒸汽品位及系统性能影响结果见表1, 小颗粒填充床生成蒸汽的质量较大颗粒提高 64.89%, 蒸汽最高温度和系统温升约提升 37°C , 说明在生成蒸汽品位方面, 小直径沸石比大直径沸石的性能更优. 由于小颗粒填充床生成蒸汽品位更高, 所以在制热系数和焓效率方面要高于大颗粒沸石填充床.

表1 颗粒直径对蒸汽品位和系统性能的影响

Tab.1 Effect of particle diameter on steam quality and system performance

填充类型	颗粒直径/mm	沸石质量/g	蒸汽质量/g	蒸汽最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	系统温升/ $^{\circ}\text{C}$	制热系数	焓效率
大颗粒	3.9	310	24.04	224	135	0.429	0.449
小颗粒	2.2	310	39.64	261	171	0.436	0.471

3 颗粒轴向分布的影响

3.1 填充床介绍

建立双层反应器, 如图3所示: (a) 图为密集-松散型床 (fine-coarse bed, 下文简称“F-C 床”); (b) 图为松散-密集型床 (coarse-fine bed, 下文简称“C-F 床”), 其他设备均与图1相同.

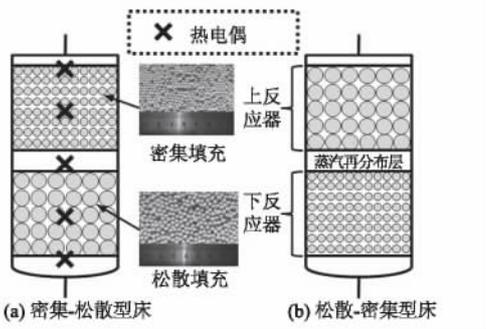


图3 两种颗粒填充分布

Fig.3 Two types of particle packing distributions

上、下反应器沸石填充质量均为 340 g, 不同类型填充床仅改变上、下层的颗粒尺寸. 松散填充采用球形大颗粒沸石, 平均直径为 3.9 mm; 密集填充采用球形小颗粒, 平均直径为 2.2 mm. 5 个热电偶分别位于上反应器中心轴的顶部和中心、蒸汽再分布层中心、下反应器中心和底部. 蒸汽再

分布层高为 30 mm, 其中的热电偶测量中间蒸汽温度, 在上反应器顶端的热电偶测量顶部蒸汽温度.

3.2 填充床和蒸汽温度

蒸汽生成阶段填充床内各点温度变化如图4所示, 其中 T_{bot} 为下反应器底部温度, T_{lower} 和 T_{upper} 分别为下反应器和上反应器中心温度, T_{s1} 和 T_{s2} 分别为中间蒸汽和顶部蒸汽温度.

下反应器底部出现突然升温时, 说明下部热水产生的蒸汽接触到下反应器底部沸石, 发生吸附反应导致升温, 设该点为蒸汽生成阶段的开始时刻. 两种类型填充床的下反应器中心温度在达到最高点后迅速下降, 而上反应器中心温度维持在最高点的时间较长.

F-C 床与 C-F 床对蒸汽温度和持续时间的影响如表2所示.

取与最高温度值相差 5°C 的连续温度作为最高温度平均值的范围. 从表2可以看出, F-C 床的下反应器中心温度最大值低于 C-F 床, 但上反应器中心最高温度平均值高于 C-F 床, 可见小颗粒沸石对填充床升温有较大促进作用. F-C 床的中间蒸汽最高温度平均值低于 C-F 床, 但顶部蒸汽最高温度达 246.6°C , 比 C-F 床提高 37.23%, 主

要是小颗粒沸石对蒸汽升温影响大于大颗粒沸石. 两种类型填充床的顶部蒸汽最高温度持续时间均大于中间蒸汽,且温度波动幅度小,利用价值较高,原因是上层的沸石与水蒸气的吸附平衡时间长,蒸汽温度更容易和沸石含水量及蒸汽压力达到平衡. 其中 F-C 床顶部蒸汽最高温度持续时间长达 489 s,比 F-C 床持续时间提高 14.25%,原因主要是 F-C 床上层大颗粒沸石的传质阻力大,吸附速率较小,吸附热释放效率低,增加了蒸汽生成时间.

3.3 蒸汽生成情况对比

蒸汽生成阶段遵循质量守恒,进入反应器的水一部分转化为蒸汽,一部分被沸石吸附,剩余部分以自由水的形式存在于反应器内. 理论生成蒸汽量 $m_{s,e}$ 的计算公式为:

$$m_{s,e} = m_{w,in} - m_{ads} - m_{acc}, \quad (7)$$

式中: $m_{w,in}$ 为进水量, kg; m_{ads} 为吸附水质量, kg; m_{acc} 为未被吸附的自由水质量, kg. ($m_{ads} + m_{acc}$) 的值等于排出自由水的质量与实验前后沸石质量增加量之和.

$$m_{ads} = m_z(x_{eq} - x_{ini}), \quad (8)$$

式中: x_{ini} 和 x_{eq} 分别为沸石初始和吸附平衡时的含水量与干燥沸石的质量比.

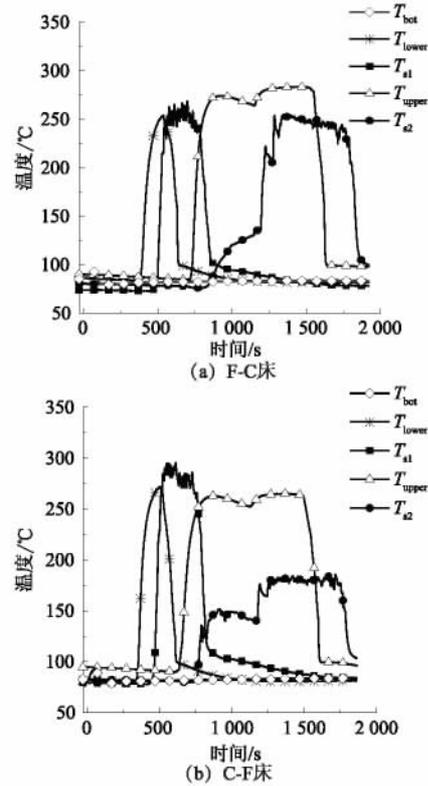


图4 蒸汽生成过程填充床温度变化

Fig. 4 Temperature variation in packed bed during generation process

表2 F-C 床与 C-F 床对蒸汽温度和持续时间的影响

Tab. 2 Effect of F-C bed and C-F bed on steam temperature and duration

类型	下反应器中心 温度最大值/°C	中间蒸汽最高 温度平均值/°C	中间蒸汽最高 温度持续时间/s	上反应器中心最高 温度平均值/°C	顶部蒸汽最高 温度平均值/°C	顶部蒸汽最高温 度持续时间/s
F-C 床	254.0	253.5	246	276.8	246.6	428
C-F 床	271.8	283.0	207	261.1	179.7	489

定义蒸汽质量的实验测量值与理论值误差为:

$$E_m = (m_{s,e} - m_{s,c}) / m_{s,c}. \quad (9)$$

定义蒸汽生成速率为:

$$\dot{m} = \frac{m_{s,c}}{t}, \quad (10)$$

式中: t 为蒸汽生成持续时间, s.

实验中冷凝得到的蒸汽量作为实验蒸汽量 $m_{s,c}$, 表3 为两种类型填充床的蒸汽生成情况对比, 可见两种类型填充床的蒸汽量相近, 说明颗粒分布对蒸汽产量影响较小. C-F 床产生蒸汽的时刻比 F-C 床提前 69 s, 原因是大颗粒沸石的填充床空隙率大, 有利于蒸汽较早流出. F-C 床的蒸汽生成速率较 C-F 床提高 16.18%, 原因是小颗粒沸石的传质阻力小, 吸附速率快, 吸附热释放效率

高, 有利于快速生成蒸汽.

误差产生主要原因: ①存在蒸汽再分布层、上反应器顶端间隙和蒸汽出口管路, 导致部分蒸汽冷凝、滞留; ②冷凝器效率有限, 部分蒸汽未冷凝即

表3 F-C 床和 C-F 床的蒸汽生成情况

Tab. 3 Steam generation of C-F bed and C-F bed

参数	F-C 床	C-F 床
实验蒸汽量/g	46.11	44.57
理论蒸汽量/g	54.27	54.88
质量误差/%	15.04	18.79
蒸汽生成时间/s	1 328	1 259
蒸汽生成速率/(g · s ⁻¹)	0.079	0.068

排出, 无法测量.

3.4 沸石再生阶段的干燥速度

研究表明^[16-17],被干燥物料的排列结构对干燥过程影响巨大.为了使沸石能够重复利用,向吸水饱和后的沸石中通入干燥气进行再生.沸石再生阶段使用流量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 的 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥气(相对湿度5%),空塔线速度约为 0.55 m/s .沸石再生阶段填充床内温度间变化如图5所示.

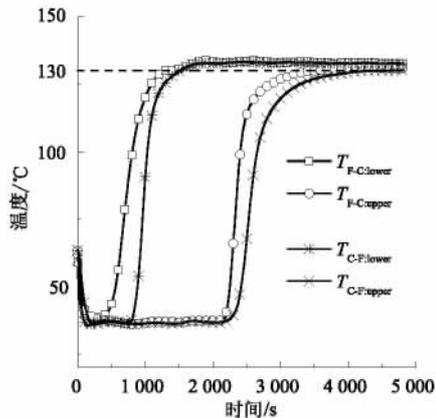


图5 再生过程填充床温度变化

Fig. 5 Temperature variation in packed bed during regeneration process

对比不同类型填充床内的沸石温度升高至 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 的时间,F-C床中下反应器、上反应器所需 1322 s 和 3456 s ,分别比F-C床下、上反应器减少 14.52% 、 25.03% ,说明F-C床在从底部通入干燥气时,干燥速度更快,原因是大颗粒沸石的填充床空隙率较大,当从反应器底部通入干燥气时,F-C床底层的大颗粒沸石有利于提高沸石表面非结合水的表面汽化速率,有效减少表面汽化控制阶段的时间.当沸石表面水分逐渐降低,干燥气的热量无法全部用于汽化水分,填充床逐渐升温,此阶段用于干燥内部结合水.虽然C-F床小颗粒沸石的结合水干燥速率更快(由图5曲线的斜率可知),但大颗粒沸石的非结合水的干燥速率对整体的干燥速率的提升更为有效.另一方面,在反应器上层的干燥过程中,由于C-F床下层小颗粒沸石的填充床空隙率低,导致上层干燥气的压降较大,降低了上层大颗粒沸石的干燥速率.

4 结论

1) 球形小颗粒沸石对填充床和蒸汽温度的提升优于大颗粒沸石.前者出口蒸汽温度能够与沸石含水量、蒸汽压力达到平衡,温度稳定.

2) 密集-松散型床和松散-密集型床在蒸汽生

成阶段的顶部蒸汽比中间蒸汽的温度波动幅度小,且持续时间长.密集-松散型床顶部蒸汽温度高,但持续时间比松散-密集型床短.

3) 密集-松散型床和松散-密集型床的产生蒸汽量相近.前者的蒸汽生成速率大于后者,但蒸汽排出时刻迟于后者.

4) 密集-松散型床在沸石再生阶段的干燥速度大于松散-密集型床,其颗粒分布有利于沸石再生.

参考文献:

- [1] 魏新利,李明辉,马新灵,等.有机朗肯循环系统的实验研究和性能分析[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(2):73-76.
- [2] NARAYANAN S, YANG S, KIM H, et al. Optimization of adsorption processes for climate control and thermal energy storage [J]. International journal of heat and mass transfer, 2014, 77: 288-300.
- [3] WANG R Z, XIA Z Z, WANG L W, et al. Heat transfer design in adsorption refrigeration systems for efficient use of low-grade thermal energy [J]. Energy, 2011, 36(9): 5425-5439.
- [4] ULLAH K R, SAIDUR R, PING H W, et al. A review of solar thermal refrigeration and cooling methods [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 24: 499-513.
- [5] SCHREIBER H, GRAF S, LANZERATH F, et al. Adsorption thermal energy storage for cogeneration in industrial batch processes: experiment, dynamic modeling and system analysis [J]. Applied thermal engineering, 2015, 89: 485-493.
- [6] OKTARIANI E, NODA A, NAKASHIMA K, et al. Potential of a direct contact adsorption heat pump system for generating steam from waste water [J]. International journal of energy research, 2012, 36(11): 1077-1087.
- [7] XUE B, TAHARA K, NAKASHIMA K, et al. Numerical simulation for steam generation process in a novel zeolite-water adsorption heat pump [J]. Journal of chemical engineering of Japan, 2012, 45(6): 408-416.
- [8] XUE B, IWAMA Y, TANAKA Y, et al. Cyclic steam generation from a novel zeolite-water adsorption heat pump using low-grade waste heat [J]. Experimental thermal and fluid science, 2013, 46: 54-63.
- [9] JANCHEN J, HERZOG TH, GLEICHMANN K, et al. Performance of an open thermal adsorption storage system with linde type A zeolites: Beads versus honey-

- combs [J]. Microporous and mesoporous materials journal homepage, 2015, 207: 179 – 184.
- [10] CHAN K C, CHAO C Y H, SZE-TO G N, et al. Performance predictions for a new zeolite 13X/CaCl₂ composite adsorbent for adsorption cooling systems [J]. International journal of heat and mass transfer, 2012, 55: 3214 – 3223.
- [11] WILSON E J, GEANKOPLIS C J. Liquid mass transfer at very low reynolds numbers in packed beds [J]. Industrial and engineering chemistry fundamentals, 1966, 5(1): 9 – 14.
- [12] WAKAO N, FUNAZKRI T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficients in packed beds: Correlation of sherwood numbers [J]. Chemical engineering science, 1978, 33(10): 1375 – 1384.
- [13] THOMAS W J, CRITTENDENK B. Adsorption technology and design [M]. Oxford UK: Butterworth-Heinemann Ltd, 1998: 71 – 72.
- [14] BIRD R B, STEWART W E, LIGHTFOOT E N. Transport phenomena [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007: 441.
- [15] FURUKAWA S, GODA K, ZHANG Y, et al. Molecular simulation study on adsorption and diffusion behavior of ethanol/water molecules in NaA zeolite crystal [J]. Journal of chemical engineering of Japan, 2004, 37(1): 67 – 74.
- [16] BRUTTINI R, LIAPIS A I. The drying rates of spray freeze drying systems increase through the use of stratified packed bed structures [J]. International journal of heat and mass transfer, 2015, 90: 515 – 522.
- [17] 李艳, 徐英英, 袁月定, 等. 仓内稻谷干燥的多尺度多层结构热质传递模拟及实验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 258 – 265.

Effect of Particle Diameter and Particle Axial Distribution on Heat and Mass Transfer inside Adsorption Heat Transformer

SHENG Zunrong¹, XUE Bing¹, LIU Zhouming¹, WEI Xinli^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Engineering Research Center of Energy Saving Technology and Equipment of Thermal Energy System, Ministry of Education, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A direct-contact method of zeolite adsorption liquid water was adopted to enhance heat and mass transfer rate within adsorption heat transformer. Hot water was recycled to generate superheated steam directly, and then saturated zeolite would be regenerated by drying gas. The reactor with was filled spherical zeolite with same mass and different diameters. The mass of steam generated by small particle packed bed was 64.89% higher than that generated by big particle packed bed. The maximum steam temperature and gross temperature life had increased by about 37°C. Experiments of two kinds of packed types in double layer reactor (fine-coarse bed and coarse-fine bed) have shown that small particle played a more effective role for the heating of steam and packed bed; the mean maximum temperature of the steam at the top of fine-coarse bed is 37.23% higher than that of coarse-fine bed and the lasting time of the maximum temperature is decreased by 14.25%. The steam generation rate of fine-coarse bed was 16.18% higher than that of coarse-fine bed, which is more efficient in steam generation. In regeneration process, drying time of upper reactor was 25.03% shorter than coarse-fine bed. It concluded that fine-coarse bed was more effective for zeolite regeneration.

Key words: adsorption; heat transformer; particle diameter; particle distribution; heat transfer; mass transfer; steam generation

文章编号: 1671-6833(2017)04-0023-06

锆氧化物/石墨烯的制备及其对 PO_4^{3-} 的吸附性能

史春燕¹, 范冰冰¹, 李娅娅¹, 胡永宝¹, 张锐^{1,2}

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州航空工业管理学院河南省航空材料与应用技术重点实验室, 河南 郑州 450015)

摘要: 采用改进的 Hummers 法制备氧化石墨烯, 采用超声-搅拌-共沉淀法制备出氢氧化锆/石墨烯 ($\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$) 复合材料, 并利用氢氧化锆/石墨烯前驱体采用水热法制备氧化锆/石墨烯 (ZrO_2/rGO) 复合材料. 通过 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 对磷酸根的吸附性能研究表明: 两种吸附剂材料对 PO_4^{3-} 的吸附容量均随着 pH 值的升高而降低, 吸附容量均随 PO_4^{3-} 浓度与溶液温度升高而升高. 当 pH 值为 2 时, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 最大吸附容量分别为 81.84 mg/g、63.58 mg/g. $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 与 ZrO_2/rGO 样品对 PO_4^{3-} 吸附过程均符合准二级动力学方程, 等温吸附过程均满足 Langmuir 吸附等温方程. $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 的再利用吸附 PO_4^{3-} 容量有所下降, 而 ZrO_2/rGO 再生后吸附 PO_4^{3-} 容量与初次吸附性能相当.

关键词: 石墨烯; 氢氧化锆; 氧化锆; 吸附; PO_4^{3-}

中图分类号: TB34; X52 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.009

0 引言

近年来, 大量含磷的城市生活污水和工业废水排入到环境中, 导致水体富营养化^[1-2]. 目前, 水体除磷的方法主要分为生物法、化学沉淀法、膜分离法、吸附法^[3-7]. 因吸附法具有效率高、操作简便、能再生和可回收磷资源等优点, 受到了广泛关注.

石墨烯负载锆氧化物不仅保持其大的比表面积, 且有效防止锆氧化物纳米颗粒团聚, 成为目前吸附材料研究的热点. 庞欢等^[8]在水热 200 °C 反应 24 h 制备梭状氧化锆/石墨烯复合材料. Teymourian 等^[9] 180 °C 水热反应 12 h 制备得到石墨烯/氧化锆复合材料; 王家宏等^[10]在 50 ~ 100 °C 下回流搅拌 24 ~ 72 h, 获得氧化锆改性石墨烯; 许昭怡等^[11]在惰性气氛保护下制备氧化锆/氧化石墨烯吸附剂, PO_4^{3-} 的最佳吸附量为 20.5 mg/g. 但在上述研究中, 存在溶剂有毒、制备时间较长、吸附容量相对较低等缺点.

为解决上述问题, 笔者采用改进的 Hummers 方法制备氧化石墨烯, 采用 NaOH 溶液作为氢氧

化锆的沉淀剂, 制备出前驱物氢氧化锆/石墨烯 ($\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$), 并以上述反应物为前驱体, 采用水热法制备出氧化锆/石墨烯复合材料 (ZrO_2/rGO), 并研究了 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 与 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 的吸附性能.

1 试验方案

1.1 样品制备

采用改进的 Hummers 法制备氧化石墨^[12], 称取 3.22 g 氧氯化锆 (天津市光复精细化工研究所) 与 0.82 g 氧化石墨烯溶于 200 mL 水中, 超声混合 30 min, 在超声-搅拌下逐滴滴加 1 mol/L 的 NaOH 溶液, 直至 pH 值为 10, 离心水洗至中性, 真空冷冻干燥后得到氢氧化锆/石墨烯复合材料.

取上述氢氧化锆/石墨烯为前驱体溶液 60 mL 置入反应釜, 加热至 200 °C 保温 30 min, 随炉冷却, 离心水洗至中性, 经真空冷冻干燥, 可获得氧化锆/石墨烯复合材料.

1.2 样品表征与性能检测

物相分析采用 XD-3 型 X 射线衍射仪, 以 $\text{K}\alpha$

收稿日期: 2016-11-20; 修订日期: 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51602287)

通信作者: 范冰冰(1982-), 女, 河南淮阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事石墨烯基复合材料和功能陶瓷材料的研究, E-mail: fanbingbing@zzu.edu.cn.

铜 ($\lambda = 0.154\ 06\ \text{nm}$) 为 X 射线源, 测试电压为 36 kV, 电流为 20 mA. SEM 形貌分析采用 JSM-7001F 型扫描电镜 (日本电子株式会社) 观察获得. 在 $400 \sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 的扫描范围内, 用 TEN-SOR27 型傅立叶变换红外光谱仪 (德国 Bruker 公司) 测量并获得材料所含官能团. 用 T6 New Century 型紫外可见分光光度计 (北京普析通用仪器) 对样品进行 PO_4^{3-} 吸附性能测试.

1.3 吸附实验

PO_4^{3-} 含量采用钼锑抗分光光度法检测 (A) [13]. 分别将 0.05 g $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 加入到 50 ml 的 25、50、100、200、400 mg/L 的 PO_4^{3-} 溶液中, 在预定温度下磁力搅拌吸附一段时间后, 取上清液按照标准液检测方式进行检测. 根据测量出的吸光度以及绘制的标准曲线计算出浓度. 根据下式分别计算复合粉体对 PO_4^{3-} 吸附量 q (mg/g).

$$q = \frac{(c_0 - c_e) v}{w}, \quad (1)$$

式中: v 为水溶液的体积, L; w 为吸附剂的投加量, g; c_0 为初始溶液中 PO_4^{3-} 离子浓度, mg/L; c_e 为经吸附后上清液中 PO_4^{3-} 离子浓度, mg/L.

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

图 1 是 GO、 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 与 ZrO_2/rGO 的 XRD 图谱. 从图 1 中可以看出, 氧化石墨在 $2\theta = 11^\circ$ 处有明显 (001) 晶面的衍射峰 [8]. 当采用 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 与 ZrO_2 进行负载后, 氧化石墨的衍射峰消失, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 的衍射图谱中, 衍射峰均为馒头峰, 可能是由于 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 样品为无定型纳米结构, 由于氢氧化钠中 OH^- 与氧化石墨烯的含氧官能团的作用 [14], 导致氧化石墨烯被部分还原, 形成了还原氧化石墨烯. 在 ZrO_2/rGO 样品中, 出现明显氧化锆结晶衍射峰.

2.2 SEM 分析

图 2 为 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 与 ZrO_2/rGO 的 SEM 图. 从图 2 中可以看出, 石墨烯表面负载一层细小且形状不规则颗粒, 颗粒尺寸约为 10 nm, 未发现明显的颗粒团聚现象, 如图 2 (a) 所示. 同时 BET 测试样品的表面积为 $198.63\ \text{m}^2/\text{g}$, 表明采用石墨烯作为基底, 负载氢氧化锆可以有效阻止氢氧化锆颗粒之间的团聚, 获得较大比表面积的复合材料. $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 前驱体经过水热反应后, 获得结晶态氧化锆负载于石墨烯表面, 部分颗粒出现长大现象, 颗粒平均尺寸约为 23 nm, 如图 2 (b)

所示, 样品比表面积下降为 $160.55\ \text{m}^2/\text{g}$.

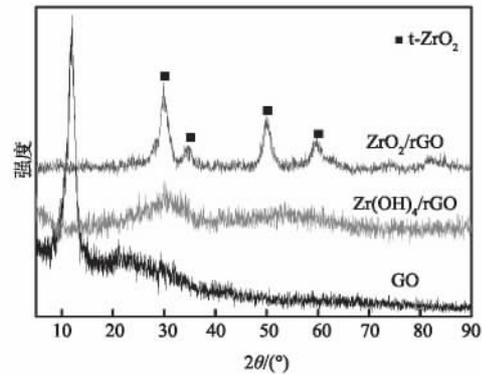


图 1 GO、 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 与 ZrO_2/rGO 的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of GO, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ and ZrO_2/rGO

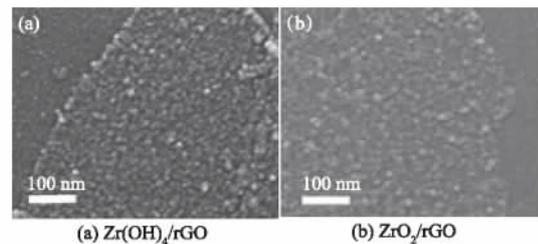


图 2 样品 SEM 图

Fig.2 SEM images of sample

2.3 FT-IR 分析

图 3 是 GO、 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 与 ZrO_2/rGO 的 FT-IR 图谱, GO 样品中出现较强的 sp^3 ($1\ 629\ \text{cm}^{-1}$) 杂化碳骨架环的振动与 OH 弯曲振动重叠峰 [15-16], 同时存在 $-\text{OH}$ ($1\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 079\ \text{cm}^{-1}$) 及 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ($1\ 228\ \text{cm}^{-1}$) 振动吸收峰, $1\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 为结构中羟基的 O—H 弯曲振动峰, $1\ 725\ \text{cm}^{-1}$ 处羰基或羧基的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰 [17]; $2\ 922\ \text{cm}^{-1}$ 及 $2\ 853\ \text{cm}^{-1}$ 处为 sp^2 碳上的 C—H 吸收峰. 而 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 样品 $1\ 725\ \text{cm}^{-1}$ 处羰基或羧基的 $\text{C}=\text{O}$ 消失, 表明 OH^- 部分还原了 GO 上面的羰基和羧基, 与 XRD 研究结果一致; $1\ 624\ \text{cm}^{-1}$ 处衍射峰为 sp^3 杂化碳骨架环的振动峰与氢氧化锆表面的羟基重叠峰, 相对 GO 样品的 $1\ 629\ \text{cm}^{-1}$ 处 sp^3 杂化碳骨架环的振动峰与石墨烯表面羟基重叠峰存在一定的偏移. 而 $1\ 338\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 049\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰相对 $1\ 380\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 079\ \text{cm}^{-1}$ 的羟基吸收峰发生了明显偏移, 这是由于含有羟基的氢氧化锆负载于石墨烯表面引起的. $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 样品在 $517\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现 $\text{Zr}-\text{O}$ 键特征吸收峰, 相对于 $473\ \text{cm}^{-1}$ 处 [16] 纯氢氧化锆的 $\text{Zr}-\text{O}$ 特征峰有所偏移, 可能是氢氧化锆与石墨烯表面上

的官能团相互作用导致. ZrO_2/rGO 样品各位置的吸收峰相对 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 同样发生偏移, $1\ 000 \sim 1\ 167\ \text{cm}^{-1}$ 的宽峰应为羟基与 $\text{Zr}=\text{O}$ 的重叠峰^[18], $591\ \text{cm}^{-1}$ 、 $502\ \text{cm}^{-1}$ 处出现两个明显吸收峰, 为 $\text{Zr}-\text{O}$ 键吸收峰, 氧化锆的结晶导致 $\text{Zr}-\text{O}$ 发生偏移.

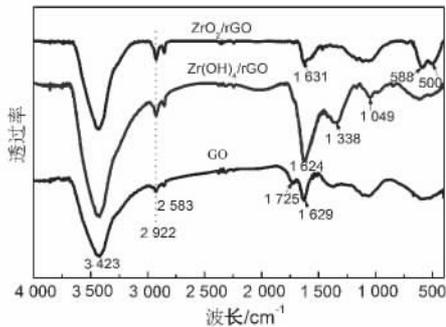


图3 GO、 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 与 ZrO_2/rGO 的 FT-IR 图谱

Fig. 3 FT-IR spectra of GO, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ and ZrO_2/rGO

2.4 吸附性能研究

2.4.1 pH 值对吸附作用的影响

图4是溶液 pH 值对材料吸附 PO_4^{3-} 容量的影响. 从图中可以看出, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 两种吸附剂对磷酸根的吸附容量均随着溶液 pH 值的升高而降低. $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 的吸附性能随着 pH 值增加而降低较快. 随着 pH 值减小, 当 H^+ 过多时, 氢氧化锆会被酸解^[19]. 因此, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 样品应避免在较低 pH 值下进行吸附操作^[20]. 当 $\text{pH} = 2$ 时, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 的最大吸附容量分别可达 81.84、63.58 mg/g, 较目前文献报道^[11] 的 20.5 mg/g 高出 3~4 倍; 是活性炭负载氧化锆吸附磷容量 7.8 mg/g 的约 10 倍^[21], 这可能是由于样品较大的比表面积提高了其吸附容量.

2.4.2 PO_4^{3-} 溶液初始浓度对吸附作用的影响和吸附等温线

$\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 的吸附容量均随磷酸根溶液浓度的增加而增加. $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 吸附剂的吸附容量随 PO_4^{3-} 初始浓度的增加而近似线性的增长, 而 ZrO_2/rGO 吸附剂的吸附容量增加速率随着 PO_4^{3-} 初始浓度的增加逐渐变小, 到最后吸附容量会保持平衡, 如图5所示, 这是由材料本身特性所决定的.

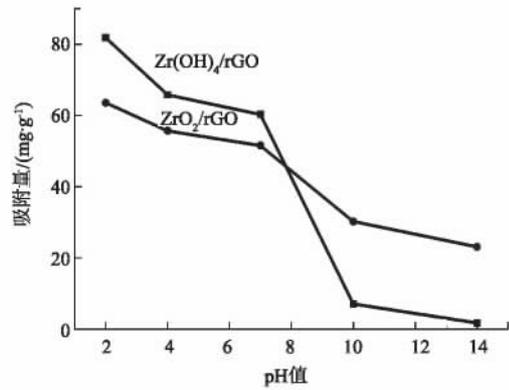


图4 溶液 pH 值对材料吸附 PO_4^{3-} 容量的影响
Fig. 4 Effect of pH on adsorption capacity of the material PO_4^{3-}

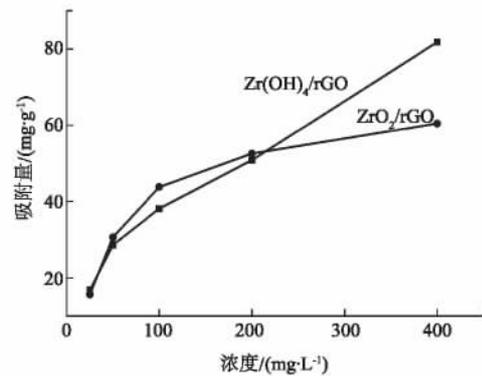


图5 PO_4^{3-} 溶液浓度对材料吸附容量的影响
Fig. 5 Effect of PO_4^{3-} concentration on the adsorption capacity of samples

2.4.3 PO_4^{3-} 溶液温度对吸附性能的影响

从图6可以看出, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 吸附 PO_4^{3-} 的饱和吸附容量均随温度的升高而有所上升, 在 $0\ ^\circ\text{C}$ 升至 $30\ ^\circ\text{C}$ 过程中, 吸附容量增加较多, 在 $30\ ^\circ\text{C}$ 升温至 $80\ ^\circ\text{C}$ 过程中, 吸附容量增加较少. 这表明该吸附材料不仅可以用于室温条件下的溶液处理, 同时可以用于处理温度较高的含磷废水.

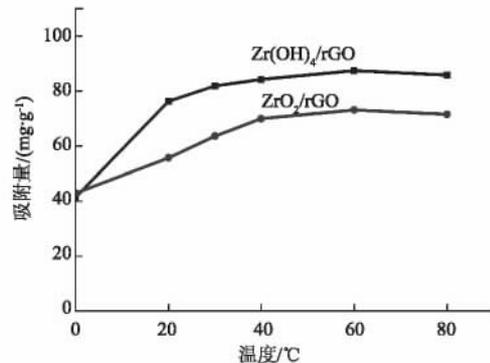


图6 温度对材料吸附 PO_4^{3-} 容量的影响
Fig. 6 Effect of temperature on the adsorption capacity of PO_4^{3-}

在 $30\ ^\circ\text{C}$ 条件下进行等温吸附反应, 两种吸附

剂的数据分别拟合 Freundlich 和 Langmuir 等温式^[22],得到的结果如图 7、8 及表 1 所示.将数据点用 Freundlich 等温吸附曲线进行线性拟合,所得 R^2 分别为 0.880(图 7(a))与 0.890(图 8(a)), n 值分别为 2.613 与 2.563, n 值均大于 1,说明两种吸附剂材料对磷酸根离子均属于易于吸附材料^[20].将数据点用 Langmuir 方程进行拟合,得到线性相关系数 R^2 分别为 0.980(图 7(b))与 0.998(图 8(b)),这说明数据点与拟合曲线符合度较高, $Zr(OH)_4/rGO$ 、 ZrO_2/rGO 吸附剂等温吸附过程均满足 Langmuir 吸附等温方程.

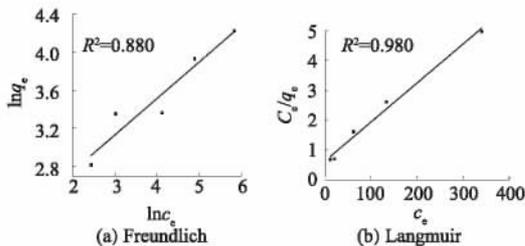


图 7 $Zr(OH)_4/rGO$ 对 PO_4^{3-} 吸附等温方程拟合
Fig. 7 Adsorption isotherm equation fitting lines of $Zr(OH)_4/rGO$

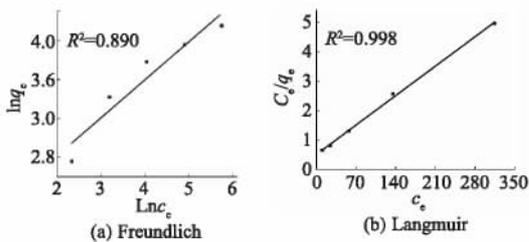


图 8 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 吸附等温方程拟合
Fig. 8 Adsorption isotherm equation fitting lines of ZrO_2/rGO

2.4.4 时间对吸附效果的影响

图 9 是锆氧化物/石墨烯对磷酸根离子的吸附动力学曲线.从图中可以看出,在吸附初期, ZrO_2/rGO 样品吸附量在 30 min 内已达到吸附平衡,而 $Zr(OH)_4/rGO$ 样品吸附量在 120 min 时才达到吸附平衡,且吸附平衡后,随着时间延长,吸附容量不再发生变化.

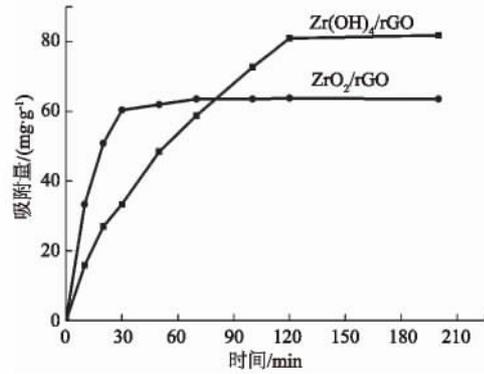
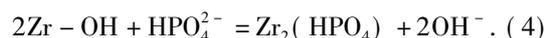
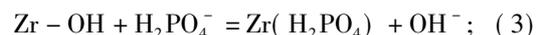


图 9 $Zr(OH)_4/rGO$ 、 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 的吸附量随时间的变化

Fig. 9 Adsorption quantity of $Zr(OH)_4/rGO$ and ZrO_2/rGO at different time

结合其吸附动力学方程发现: $Zr(OH)_4/rGO$ 对 PO_4^{3-} 吸附在 60 min 内符合伪一级动力学方程.如图 10(a) 所示,随着吸附时间的延长,拟合直线与实验数据点的偏离越来越大,拟合直线与实验数据的线性相关系数 R^2 为 0.784,说明准一级动力学无法对整个吸附过程进行描述.使用准二级动力学方程对实验数据进行线性拟合,结果如图 10(b) 所示,拟合所得直线与数据点的偏离较小,计算所得线性相关系数 R^2 为 0.978,线性相关系数较高,说明 $Zr(OH)_4/rGO$ 对磷酸根吸附符合准二级动力学模型.

然而, ZrO_2/rGO 对磷酸根吸附全部过程更符合准二级动力学方程,如图 11 所示.其吸附机理包含了外部液膜扩散传质、吸附反应及粒内扩散等吸附的全部过程^[20].由于氧化锆与氢氧化锆均为两性氧化物,表面含有的羟基决定了吸附过程中的反应活性,当 pH 值为 3~9 时,磷酸盐在溶液中主要以 $H_2PO_4^-$ 与 HPO_4^{2-} 存在,两种吸附剂吸附去除磷酸盐机理相同,均为离子交换机制,吸附剂表面发生如下反应^[23]:



溶液 pH 值低于等电点时, ZrO_2 表面的羟基被质子化,变成带正电荷,带负电荷的磷酸根在静电引力作用下吸附到 ZrO_2/rGO 表面,其反应方程

表 1 $Zr(OH)_4/rGO$ 、 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 吸附的等温吸附模型参数

Tab. 1 Adsorption isotherm model parameters of $Zr(OH)_4/rGO$ and ZrO_2/rGO samples

样品名称	Freundlich 等温吸附方程拟合参数				Langmuir 等温吸附方程拟合参数			
	拟合方程	K_F	n	R^2	拟合方程	K_L	q_m	R^2
$Zr(OH)_4/rGO$	$Y=0.3827X+1.98410$	7.273	2.613	0.880	$Y=0.010X+0.630$	0.0158	100.000	0.980
ZrO_2/rGO	$Y=0.3901X+2.03559$	7.657	2.563	0.890	$Y=0.014X+0.511$	0.0279	70.126	0.998

如下:

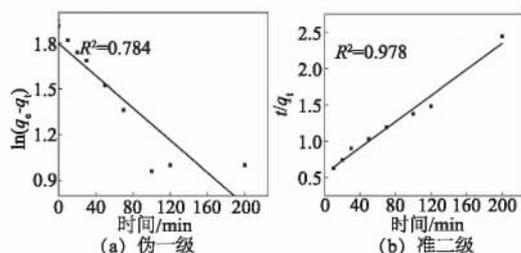
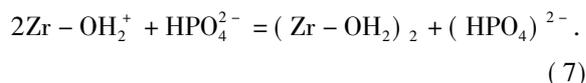
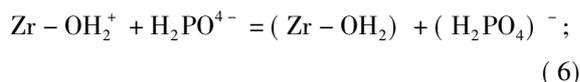
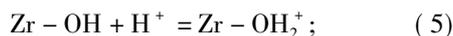


图 10 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 对 PO_4^{3-} 吸附动力学拟合
Fig. 10 Adsorption kinetics fitting of $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$

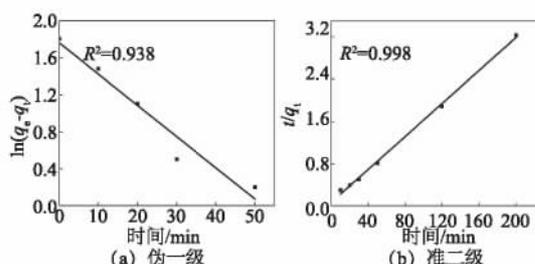


图 11 ZrO_2/rGO 对 PO_4^{3-} 吸附动力学拟合
Fig. 11 Adsorption kinetics fitting of ZrO_2/rGO

2.4.5 锆氧化物/石墨烯对 PO_4^{3-} 吸附再利用性能研究

图 12 为 50 次再生后,样品吸附 PO_4^{3-} 容量随时间变化图.从图 12 中可以看出, ZrO_2/rGO 样品脱附后再吸附磷酸根容量略有上升,从第一次吸附饱和容量的 63.58 mg/g 上升到 75.86 mg/g .原因可能是使用氢氧化钠再生后,少量 OH^- 残留在样品表面,致使再利用时吸附容量有所升高.而 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 样品再生后吸附容量从 81.84 mg/g 降至 68.96 mg/g ,可能是 pH 值为 2 时,使 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 上面的氢氧化锆有了一定的流失,造成再利用吸附容量下降^[20].

3 结论

采用超声-搅拌-共沉淀法制备得到氢氧化锆/石墨烯 ($\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$) 复合材料,并以氢氧化锆/石墨烯为前驱体,在 200°C , 30 min 水热条件下,制备得到氧化锆/石墨烯 (ZrO_2/rGO) 复合材料.当 pH 值为 2 时, $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 、 ZrO_2/rGO 的最大吸附容量分别为 81.84 、 63.58 mg/g . 等温吸附过程均满足 Langmuir 吸附等温方程, $\text{Zr}(\text{OH})_4/$

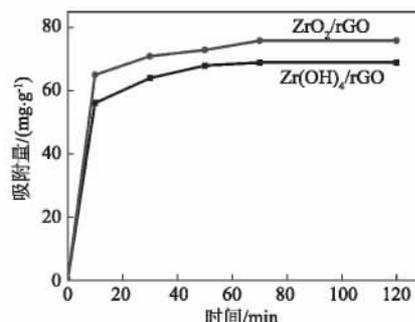


图 12 再利用吸附 PO_4^{3-} 吸附容量随时间的变化
Fig. 12 PO_4^{3-} adsorption capacity of reusing $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ and ZrO_2/rGO at different time

rGO 与 ZrO_2/rGO 样品对 PO_4^{3-} 吸附过程均符合准二级动力学方程. pH 值为 2 时的吸附条件使 $\text{Zr}(\text{OH})_4/\text{rGO}$ 上面的氢氧化锆有了一定的流失,造成再利用吸附容量从 81.84 mg/g 降至 68.96 mg/g ,而 ZrO_2/rGO 复合材料,由于少量 OH^- 残留在样品表面,导致再生后吸附 PO_4^{3-} 容量从第一次吸附饱和容量的 63.58 mg/g 上升到 75.86 mg/g .

参考文献:

- [1] 付春平, 钟成华, 邓春光. 水体富营养化成因分析 [J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(1): 128-131.
- [2] 周启星, 俞洁, 陈剑. 某城市湖泊中磷的循环特征及富营养化发生潜势 [J]. 环境科学学报, 2004, 25(5): 138-142.
- [3] 唐朝春, 刘名, 陈惠民, 等. 吸附除磷技术的研究进展 [J]. 水处理技术, 2014, 40(9): 1-7.
- [4] 吕亚云. 污水化学除磷处理技术 [J]. 河南化工, 2010, 27(4): 45.
- [5] 王荣斌, 李军, 张宁, 等. 污水生物除磷技术研究进展 [J]. 环境工程, 2007, 25(1): 84-86.
- [6] 胡远来. 利用阴离子交换膜去除水中磷的试验研究 [D]. 湖南: 湖南大学土木工程学院, 2011.
- [7] 满文苍. 载氧化锆生物复合材料的制备及对磷酸盐吸附性能的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学环境与化学工程学院, 2014.
- [8] 庞欢. 功能性微纳米材料的控制合成及其性能研究 [D]. 南京: 南京大学化学化工学院, 2011.
- [9] TEYMOURIAN H, SALIMIA, FIROOZI S, et al. One-pot hydrothermal synthesis of zirconium dioxide nanoparticles decorated reduced graphene oxide composite as high performance electrochemical sensing and biosensing platform [J]. Electrochimica Acta, 2014, 143: 196-206.
- [10] 王家宏, 陈浩. 氧化锆改性石墨烯及去除水中氟离子的方法: CN103861559. A [P]. 2014-06-18.

- [11] 许昭怡,宗恩敏,郑寿荣.一种氧化锆改性的氧化石墨吸附去除水体中磷酸盐的方法:CN102910700. A [P]. 2013-02-06.
- [12] FAN B B, GUO H H, ZHANG R, et al. Structural evolution during the oxidation process of graphite [J]. Chinese physics letters, 2014, 31:078102-1.
- [13] 国家环境保护委员会总局,水和废水检测分析方法委员会.水和废水检测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] 范冰冰,郭焕焕,李稳,等.石墨烯/银纳米复合材料的制备及其影响因素研究[J].物理学报,2013,62(14):148101.
- [15] 郭焕焕.银/石墨烯纳米复合材料的制备及其对MCF-7细胞毒性探索[D].郑州:郑州大学材料科学与工程学院,2013.
- [16] 李保庆,袁文辉,李莉.热剥离法制备石墨烯纳米片对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附[J].物理化学学报,2016,32(4):997-1004.
- [17] 黄桥,孙红娟,杨勇辉.氧化石墨的谱学表征及分析[J].无机化学学报,2011,27(9):1721-1726.
- [18] GUO G Y, CHEN Y L. spectroscopic and X-ray diffractive analyses of zirconium hydroxides precipitated at low pH values [J]. Materials chemistry and physics, 2004, 39(12):4039-4043.
- [19] BALCI S. Nature of ammonium ion adsorption by sepiolite: analysis of equilibrium data with several isotherms [J]. Water research, 2004, 38(5):1129-1138.
- [20] 孟凡忠.氢氧化锆/聚砜复合材料制备及对卤水中 SO_4^{2-} 吸附性能研究[D].天津:天津大学化工学院,2012.
- [21] 朱格仙,张建,王蓓.活性炭负载氧化锆制备除磷吸附剂的最佳条件研究[J].中国给水排水,2008,24(3):79-81.
- [22] 刘景亮,宗恩敏,陈欢.氧化锆-活性炭纤维复合材料的制备及其对F-吸附性能[J].无机化学学报,2015,31(6):1105-1111.
- [23] LIU H L, SUN X F, YIN C J, et al. Removal of phosphate by mesoporous ZrO_2 [J]. Journal of hazardous materials, 2008, 151(2/3):616-622.

Preparation of Zirconium Oxide / Graphene Composites and the Adsorption Properties for PO_4^{3-}

SHI Chunyan¹, FAN Bingbing¹, LI Yaya¹, HU Yongbao¹, ZHANG Rui^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In this work, graphene oxide (GO) was prepared by an improved Hummers method. Zirconia/graphene composites (ZrO_2/rGO) were rapidly synthesized by hydrothermal method with $Zr(OH)_4/rGO$ as precursor prepared by ultrasound-stirred-coprecipitation. The adsorption capacity of $Zr(OH)_4/rGO$ and ZrO_2/rGO composites decreased with the increase of pH value and increased with the increase of phosphate concentration and the solution temperature. The maximum adsorption capacities of $Zr(OH)_4/rGO$ and ZrO_2/rGO composites were 81.84 mg/g and 63.58 mg/g respectively at pH 2.0. The adsorption kinetics of these two adsorbents accorded with the pseudo-second-order model and isothermal adsorption complied with the Langmuir isotherm equation. The results of its recycling properties showed the adsorption capacity decreased for the $Zr(OH)_4/rGO$ samples, while ZrO_2/rGO samples were almost the same as the initial adsorption performance.

Key words: graphene; zirconium hydroxide; zirconia; adsorption; PO_4^{3-}

文章编号: 1671-6833(2017)04-0029-06

土壤电参数频变性地接地体有效长度的影响分析

李景丽, 贺鹏威, 邱再森, 李渊博, 郭丽莹

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 接地装置冲击特性是影响输电线路耐雷水平和雷击跳闸率的重要因素. 将电力系统接地分析软件 CDEGS 中的快速傅里叶变换模块 FFTSES 和电磁场频域分析模块 HIFREQ 相结合, 通过引入 Visacro-Alipio 土壤频变公式, 建立可以考虑土壤电参数频变性的接地装置冲击特性的数值计算模型. 利用所建模型重点仿真分析不同土壤电阻率和不同冲击电流波形下土壤电参数频变特性对接地装置有效长度的影响情况. 仿真数据分析表明, 考虑土壤频变性时接地装置的有效长度与不考虑土壤频变性时的有效长度相比有一定减小, 并且在高土壤电阻率下减小程度更明显.

关键词: 频变性; 接地体; 傅里叶变换; CDEGS; 有效长度

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.016

0 引言

在高土壤电阻率地区的电力系统接地装置设计中, 降低输电线路杆塔接地电阻的主要方法是增加水平接地体长度, 在中国部分地区, 其长度通常可增至数百米. 这一方法可有效降低杆塔接地系统工频接地电阻, 但是, 其冲击接地电阻不会随接地体长度的增加而持续降低, 而是当接地体长度增加到某一特定值以后冲击接地电阻逐渐趋近于某一恒定值, 这一特定长度即为冲击有效长度^[1]. 准确地计算接地体冲击有效长度是合理设计接地装置, 保障输电线路安全可靠运行并降低工程造价的重要工作^[2].

国内外学者对典型接地体的有效长度研究主要包含接地体有效长度的定义和接地体有效长度的影响因素两个方面. 文献[1]将满足冲击接地电阻对接地体长度的导数小于某一规定值的接地体长度定义为接地体的有效长度. 对接地体有效长度影响因素的研究主要有: 文献[3]对水平和方形接地体进行仿真分析和数值计算, 发现接地体的冲击有效长度与土壤电阻率和注入电流的波头时间存在密切的关系, 并且随着土壤电阻率和注入电流波头时间的增大, 接地体冲击有效长度也有增大的趋势. 单根水平接地体的有效长度还

与冲击电流的注入点有关, 且单端注入时有效长度最短. 文献[4]对典型接地体进行模拟试验和数值计算, 结果表明接地体有效长度与注入电流的波头时间、幅值、土壤电阻率有着密切的联系, 并对试验和计算的数据拟合得出考虑土壤火花放电现象的接地体冲击有效长度的公式. 然而, 目前计算有效长度时, 常假定土壤电阻率等于工频测定值, 并将相对介电常数取值为 $4 \sim 81$ (随土壤湿度而定)^[5]. 但研究表明^[6-10], 土壤电参数具有明显的频变性. 文献[7]分别对具有不同初始电阻率的多种类型土壤的电参数进行测量, 结果表明, 土壤电阻率和介电常数与注入电流频率密切相关, 呈现明显的频变性, 并拟合试验数据得到土壤频变公式. 文献[10-12]建立了考虑土壤电参数频变性的接地体有限元模型, 分析了土壤电参数频变性地接地体冲击特性的影响, 结果表明, 考虑土壤电参数频变性时, 接地极的冲击接地电阻明显减小, 且工频土壤电阻率越高, 接地电阻减小越明显.

笔者通过引入具有代表性的 Visacro-Alipio 土壤频变公式, 利用电力系统接地分析软件 CDEGS 中的 FFTSES (快速傅里叶变换) 模块和 HIFREQ (电磁场频域分析) 模块, 建立了可以考虑土壤电参数频变性的接地体冲击特性模型. 利用所建模型仿真分析了不同工频土壤电阻率及不

收稿日期: 2016-11-01; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307152)

作者简介: 李景丽(1983-), 女, 河南周口人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电磁场数值计算方法、电力系统过电压与接地技术、高电压及绝缘技术等方面的研究, E-mail: lijingli1022@zhu.edu.cn.

同冲击电流波头时间下土壤电参数频变性对接地体有效长度的影响情况。

1 土壤电参数频变特性

土壤是由固体颗粒、液体和气体组成的混合物,其中固体颗粒间充斥着水分和空气间隙,在结构上呈现明显的多孔特征.从物理学微观角度分析,土壤介质的极化过程中涉及到多个电极化机制,如空间电荷极化、偶极子极化、离子极化/原子极化、电子极化.由于介质具有质量,当外电场频率较大时,介质的电极化响应无法瞬时跟上外电场的变化而显现滞后效应,且随着外电场频率增加,滞后效应更明显^[13-14].

在低频范围内,由于外电场变化缓慢,所有极化机制均能发挥作用,共同促进极化进行;随着频率的升高,每种机制的作用维持在一定的频率段内,超出频率段极化作用会逐渐消失.例如,频率超过 f_1 后,空间电荷极化作用基本消失;频率超过 f_2 后,偶极子极化作用基本消失;频率超过 f_3 后,离子/原子极化作用基本消失;频率超过 f_4 后,电子极化作用基本消失.这些极化作用的逐渐消失导致极化储能减小,介电常数随频率升高逐渐减小,如图1所示.

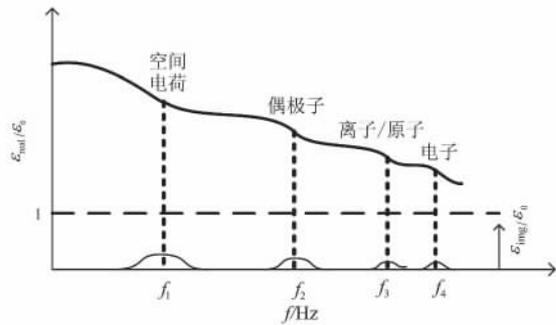


图1 介电常数随频率变化的简图

Fig. 1 Dielectric constant changes with frequency

为了在接地计算中考虑土壤电参数的频变性,需要得到频变规律,最好是找出以频率为变量的土壤电参数频变解析式.目前已经总结出多种土壤频变公式,如 Scott 式、Smith-Longmire 式、Messier 式、Portela 式、Visacro-Portela 式、Visacro-Alipio 式等^[15].文献[15]利用 Kramers-Kronig 关系检验了以上 6 种公式的准确性,其中 Visacro-Alipio 式比较具有代表性,能很好地反映土壤频变特点,因此笔者引入 Visacro-Alipio 频变公式到接地计算中.

Visacro-Alipio 频变公式是 Visacro 等利用试验测量与解析计算相结合的复合电磁模型(hy-

brid electromagnetic model, HEM), 测量了 31 个地区的土壤(工频电阻率覆盖 60 ~ 9 100 $\Omega \cdot m$, 测量时土壤保持自然条件)在不同频率下的电参数,并根据试验数据总结得出土壤电参数随频率变化的土壤频变公式:

$$\begin{cases} \rho(f) = \rho_0 \cdot \{1 + [1.2 \times 10^{-6} \rho_0^{0.73}] \cdot \\ [(f-100)^{0.65}]^{-1}\}; \\ \epsilon_r(f) = 7.6 \times 10^3 \rho_0^{0.73} f^{-0.4} + 1.3, \end{cases} \quad (1)$$

其中, ρ_0 是 100 Hz 时的土壤电阻率.土壤电阻率频变公式适用范围 100 Hz ~ 4 MHz,基本完整覆盖了常用雷电流的整个频谱.相对介电常数频变公式适用范围 10 kHz ~ 4 MHz,频率低于 10 kHz 时,介电常数一律取 10 kHz 时的数值^[8].

2 考虑土壤电参数频变性的接地冲击特性模型

为了准确计算典型接地体冲击有效长度,采用国际公认的接地计算软件包 CDEGS 建立考虑土壤参数频变性时接地体的冲击特性数值计算模型.

为验证所用模型的准确性,以水平接地极为例,参照文献[9]中试验所用参数:单端注入的钢制水平接地极,等效半径为 0.007 m,电导率为 1.7×10^7 S/m,相对磁导率为 636,分别埋设于工频电阻率为 525 $\Omega \cdot m$ 和 2 500 $\Omega \cdot m$ 的均匀土壤中,埋深为 0.5 m;雷电流模型选用 Heidler 首次、后续回击雷电流函数模型,其解析表达式为:

$$\begin{cases} i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_{ok}}{\eta_k} e^{-t/\tau_{2k}} \frac{(t/\tau_{1k})^{n_k}}{1 + (t/\tau_{2k})^{n_k}}; \\ \eta_k = \exp\left[-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right]. \end{cases} \quad (2)$$

研究表明后续回击的破坏性更大^[10],故只对后续回击雷电流进行仿真分析,其参数如表 1 所示.幅值为 15 782 A,上升时间为 1.3 μs .

表 1 后续回击雷电流参数

Tab. 1 The parameters of subsequent return stroke lightning current

k	I_{ok}/kA	n_k	$\tau_{1k}/\mu s$	$\tau_{2k}/\mu s$
1	14	2	0.25	2.5
2	9	2	2.1	230

对雷电流进行傅里叶分解,得到其特征频率,代入 Visacro 土壤电参数频变公式可得特征频率点下的土壤电阻率和相对介电常数,表 2 即列出土壤工频电阻率为 525 $\Omega \cdot m$ 和 2 500 $\Omega \cdot m$ 时各特征频率点下的土壤电参数.

不考虑土壤电参数频变性时,只需将土壤的

电阻率和相对介电常数以定值的形式输入 HIFREQ 模型中,在频域下计算接地体的接地电位升 GPR,再通过 FFTSES 模块进行傅里叶反变换,得到其不考虑土壤电参数频变性时的 GPR. 考虑土壤电参数频变性时,将傅里叶变换与土壤频变公式相结合,在每个特征频率点下建立一个 HIFREQ 仿真模型,并保持其他条件不变,把土壤的电阻率和相对介电常数做为变量考虑进每个模型分别计算,然后将各频率点下的结果文件一起进行傅里叶反变换,得到考虑土壤频变性的冲击特性. 计算步骤如图 2 所示,结果如图 3 所示.

表 2 特征频率点下的土壤电阻率和相对介电常数

Tab.2 Relative soil resistivity and relative dielectric constant in the characteristic frequency

特征频率 / Hz	电阻率/(Ω·m) (工频电阻率为 525 Ω·m)	电阻率/(Ω·m) (工频电阻率为 2 500 Ω·m)	相对介电常数
13 333.3	426.1	2 130.8	171.4
20 000.0	384.7	2 039.3	145.9
33 333.3	379.3	1 900.7	119.2
53 333.3	374.2	1 750.4	99.0
240 000.0	333.9	1 168.5	54.8
480 000.0	300.9	896.6	41.8
720 000.0	276.6	751.3	35.8
960 000.0	257.6	656.8	32.1
1 200 000.0	242.1	589.0	29.4
1 440 000.1	229.0	537.3	27.4
1 680 000.1	227.7	496.3	25.9
1 706 666.8	426.0	492.2	25.7

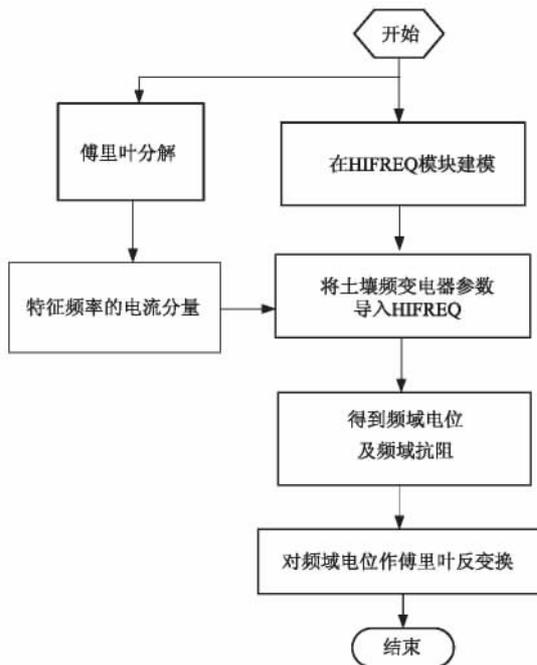
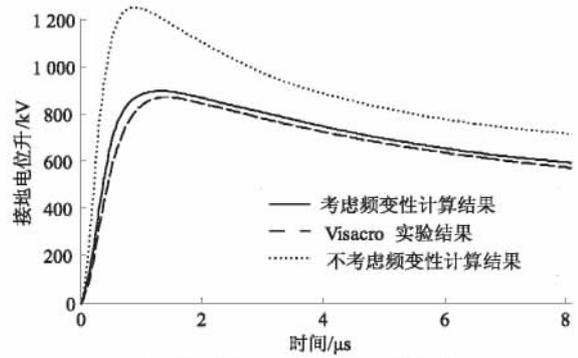
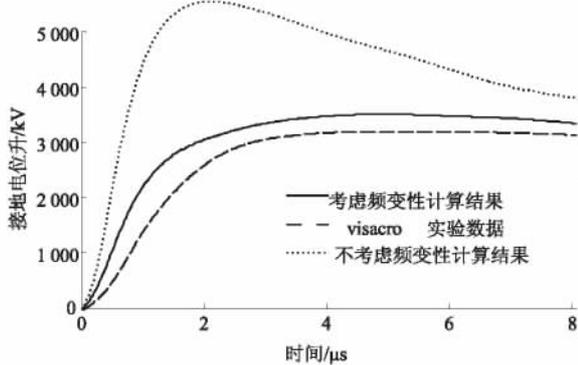


图 2 冲击特性计算流程图

Fig.2 Flow chart of impact performance calculation



(a) 土壤工频电阻率为525 Ω·m的接地电位升



(b) 土壤工频电阻率为2 500 Ω·m的接地电位升

图 3 不同土壤工频电阻率水平接地极的接地电位升

Fig.3 GPR of a horizontal electrode buried in soils of different resistivity

如图 3(a)、(b) 所示,考虑土壤频变性有限元模型的计算结果和试验结果相比十分接近,有效地验证了本文模型的准确性. 并且从图中可以看出,不考虑土壤频变性会导致计算结果(GPR)比实际值偏大,这一点和文献 [10 - 13] 中的结论相一致.

3 土壤电参数频变性地接地体有效长度的影响

3.1 接地体冲击有效长度的计算

文献 [1] 将满足冲击接地电阻对接地体长度的导数小于某一规定值的接地体长度定义为接地体的有效长度,公式为:

$$-dR_i/dl \leq \tan \alpha, \quad (3)$$

式中: R_i 为冲击接地电阻, Ω ; l 为接地体长度, m; α 为冲击接地电阻随接地体长度变化的曲线上满足上式要求的点的切线与水平方向的夹角,通过大量计算表明, $\alpha = 5^\circ$ 时,冲击接地电阻变化很小.

以土壤工频电阻率为 $1\ 000\ \Omega \cdot m$ 为例,阐述单端注入水平接地极有效长度的确定. 首先在 CDEGS 中建立上述考虑土壤频变性典型杆塔接地装置冲击特性数值计算模型,分别取接地极长

度为 10、30、50、70、90、110 m, 继而分别计算其 GPR 和冲击接地电阻, 下图 4(a) 中列出了注入点动态接地电位升。

对模型计算所得各接地体长度下的冲击接地电阻数据进行拟合, 可得到水平接地体的冲击接地电阻随接地体长度的变化关系曲线, 如图 4(b) 所示, 接地体的 GPR 和冲击接地电阻随着接地体长度的增大呈现减小的趋势, 且减小的速度越来越慢并逐渐趋于饱和, 反映在图中为曲线斜率的绝对值越来越小。因此, 可以结合有效长度的定义计算出不考虑土壤电参数频变性时接地极的有效长度约为 66.7 m; 考虑土壤电参数频变性时接地极的有效长度约为 56.1 m。

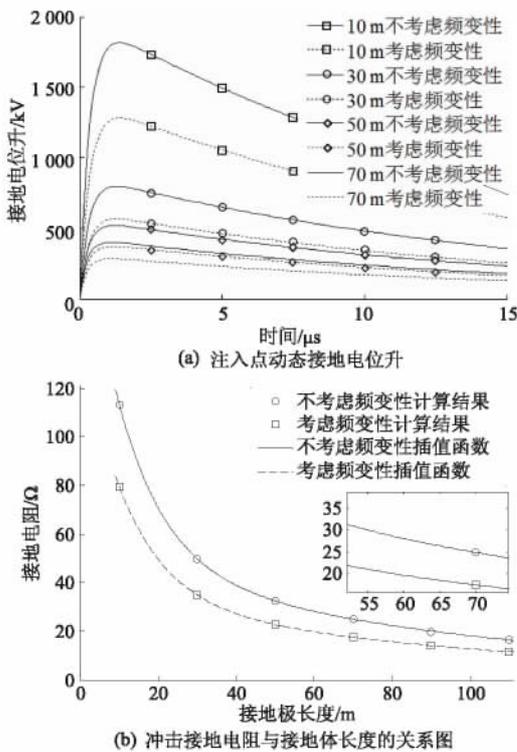


图 4 水平接地体长度对 GPR 和冲击接地电阻的影响

Fig. 4 Influence of the length of the horizontal electrode on GPR and implus grounding resistance

3.2 土壤频变性对接地体有效长度的影响

利用前述接地体冲击有效长度的计算方法, 分别计算不考虑土壤电参数频变性时不同土壤工频电阻率下单端注入水平接地体的冲击有效长度; 并计算相同条件下考虑土壤电参数频变性时的冲击有效长度, 单端注入水平接地极有效长度随其周围土壤工频电阻率变化关系如图 5 所示。

由图 5 可知: 考虑土壤电参数频变性与不考虑频变性时, 单端注入水平接地体的冲击有效长

度与土壤工频电阻率关系密切, 且均随着土壤工频电阻率的增大而增大, 在土壤工频电阻率高于 $500 \Omega \cdot m$ 时曲线斜率减小, 有效长度随土壤电阻率增大而增大的现象趋于饱和。这是因为高土壤电阻率将阻碍冲击电流从接地极入地端向土壤中散流, 冲击电流将趋于沿接地体向末端散流, 使得接地体的冲极有效长度增加。考虑土壤电参数频变性时, 接地体的有效长度跟不考虑频变性时相比有一定程度减小, 在高土壤电阻率 ($1000 \Omega \cdot m$ 以上) 下减小程度更明显。这是由于土壤电参数随着注入电流频率的增加呈现非线性下降, 相比于土壤工频电阻率来讲, 对冲击电流的阻碍作用小, 引起水平接地体冲击有效长度较之不考虑土壤电参数频变性时减小的现象; 同时土壤电参数频变性具有在高土壤电阻率下更加明显的特征。因此, 土壤电阻率越高, 其对冲击有效长度的影响越大, 导致考虑土壤频变性与不考虑土壤频变性的有效长度值相差越来越大。

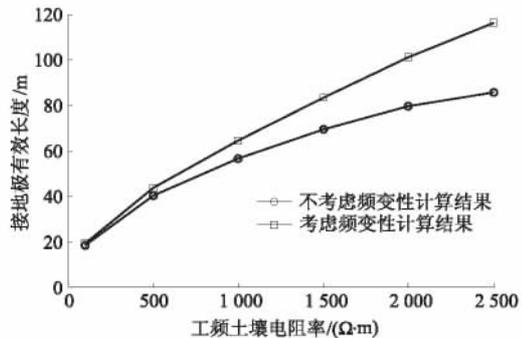


图 5 单端注入单根水平接地极的有效长度与电阻率关系
Fig. 5 Relation of effective length of single injection of single horizontal electrode and soil resistivity

3.3 冲击电流波形对接地体有效长度的影响

为分析冲击电流波形对接地体冲击有效长度的影响, 采用上述考虑土壤电参数频变性的接地体冲击特性数值计算方法对单端注入的单根水平极建立模型, 接地体埋设于电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$ 的土层均匀土壤 0.5 m 深处, 保持冲击电流的幅值不变, 分别取上升时间为 1.3、2.6、5.2、7.8 μs, 计算得单端注入水平接地极冲击有效长度与冲击电流上升时间的关系如图 6(a) 所示; 然后保持冲击电流上升时间为 2.6 μs 不变, 幅值为 10、20、50、100、150、200 kA, 仿真计算水平接地极冲击有效长度与冲击电流上升时间的关系如图 6(b) 所示。

如图 6(a) 显示, 当冲击电流的上升时间增大时, 接地体的有效长度也逐渐增大, 即随着冲击电

流陡度的变缓,接地体的冲击有效长度呈现增大的趋势,这是由于陡波前冲击电流包含更多高频分量,接地体对高频分量电流呈现明显电感效应,冲击电流更趋向于沿土壤流散,冲击有效长度较之前缓波冲击电流有所减小.同理,增大冲击电流的幅值使电流波形陡度增加,则接地体的冲击有效长度逐渐减小,如图6(b)所示.并且考虑土壤电参数频变性会使接地体有效长度有一定的降低,但对于不同的冲击电流波形,土壤电参数频变性地对有效长度的影响并没有很大的区别.

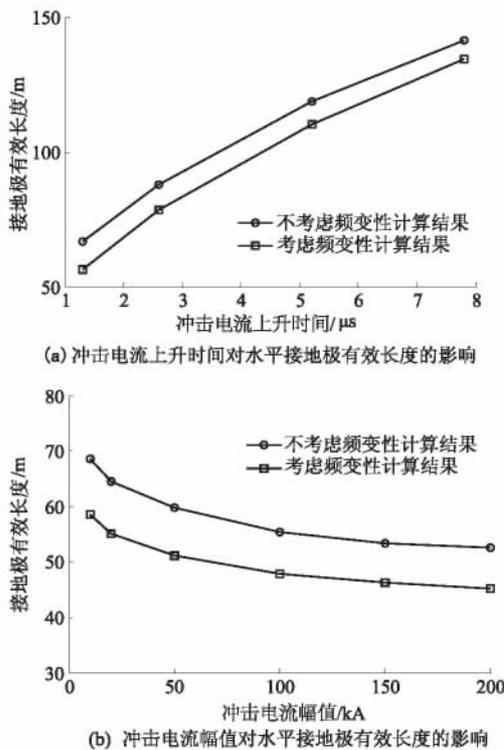


图6 冲击电流波形对单端注入水平接地极有效长度影响

Fig. 6 The impact of current waveform on effective length of single injection horizontal electrode

4 结论

笔者采用 CDEGS 建立了可以考虑土壤电参数频变性的接地装置冲击特性的数值计算模型.利用所建模型重点仿真分析了不同土壤电阻率和不同冲击电流波形下土壤电参数频变特性对接地装置有效长度的影响,所得结论如下:

1) 单端注入的水平接地体的冲击有效长度与土壤工频电阻率的关系很密切,并随着土壤工频电阻率的增大也有增大的趋势,且这种趋势逐渐变缓.

2) 考虑土壤电参数频变性时接地体的有效长度与不考虑电参数土壤频变性时的有效长度相

比有一定程度的减小,且土壤电阻率越高减小的程度越明显.

3) 冲击电流波形陡度变缓时,水平接地体的冲击有效长度会随之增大,土壤电参数也会发生一定的变化,但对接地体有效长度的影响并不明显.

参考文献:

- [1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 李景丽,郭丽莹,武东亚,等. 考虑土壤电离的接地装置冲击特性分析 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 20-25.
- [3] GUPTA B R, THAPAR B. Impulse impedance of grounding grids [J]. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(6): 2357-2362.
- [4] 何金良,曾嵘. 输电线路杆塔接地装置冲击系数及其拟合计算公式 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(5): 9-12.
- [5] 袁涛,李景丽,司马文霞. 土壤电离动态过程对接地装置冲击散流的影响分析 [J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1606-1613.
- [6] 朱勇. 铬污染场地复电阻率法时频域联合探测技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学机电与信息工程学院, 2013.
- [7] VISACRO S, ALIPIO R. The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2011, 53(2): 401-406.
- [8] VISACRO S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents [J]. IEEE transactions on power delivery, 2007, 22(1): 381-386.
- [9] VISACRO S, ALIPIO R. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes [J]. IEEE transactions on power delivery, 2012, 27(2): 927-934.
- [10] 司马文霞,唐妍,袁涛,等. 土壤介电频变特性对接地极冲击散流的影响 [J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1512-1518.
- [11] 朱彬. 土壤电参数变化特性及其对接地装置性能的影响研究 [D]. 重庆大学电气工程学院, 2015.
- [12] 李景丽,乔志远,武东亚,等. 考虑土壤频变特性的接地系统有限元模型 [J]. 电瓷避雷器, 2015, 267(5): 100-110.
- [13] 成林,王森,李志忠,等. 接地装置冲击过程中土壤电气特性的研究进展综述 [J]. 电网技术, 2014, 42(10): 63-67.

- [14] 张良莹,姚熹. 电介质物理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [15] DAMIR C, NICOLAS M. A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2014, 56(1): 177-185.

The Impact of Soil Electrical Parameters Frequency-Dependence Characteristics on the Effective Length of the Grounding Electrode

LI Jingli, HE Pengwei, QIU Zaisen, LI Yuanbo, GUO Liying

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

Abstract: Impulse characteristics of grounding devices was the important factor of lightning withstand level and lightning trip-out rate of transmission line. Based on HIFREQ program and FFTSES program in grounding power system analysis software CDEGS, this paper presented a grounding system impulse characteristic modeling considered soil frequency-dependence, especially, the Visacro-Alipio soil frequency-dependence formula has been introduced. The impact of the soil frequency-dependence on the effective length of the grounding device in different initial soil resistivity and different impulse current waveform was analyzed. The calculating results showed that when considering soil frequency-dependence, the impulse effective length would be shorter, especially for the grounding devices buried in high resistivity soil.

Key words: frequency-dependence; grounding; fourier transform; CDEGS; effective length

(上接第 11 页)

- [14] 张韬,柯龙燕,白光建. 罐车制动工况液体晃动的流固耦合分析 [J]. 专用汽车, 2015, 26(8): 88-91.
- [15] 岳宝增. 液体大幅晃动动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries [J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.

The Influence of Different Baffles Arrangement on Liquid Sloshing in Container Under Longitudinal Excitation

DING Chang, FU Yantang, WU Xuehong, GONG Yi

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001 Henan)

Abstract: FLUENT software was adopted to simulate the sloshing process of liquid in container under the sudden braking condition based on VOF (volume of fluid) model. The pressure variation of front and back head was compared, which showed that the sloshing liquid mainly had a greater impact on the front head. Baffles could effectively weaken the sloshing in the container, reduce the impact on the head and improve the container safety. The liquid impact on front head was studied in the condition of different filling ratio for different baffle arrangement (all down, all up, up and down interlaced, left and right interlaced) of five same arc baffles. Results show that the arrangement style of left and right interlaced, all down could reduce impact load on front head for low filling ratio, however the arrangement style of up and down interlaced all up had poor anti-wave effect. The anti-wave effect of the arrangement style of left and right interlaced became poorer and poorer with the increment of filling ratio. Compared with other arrangement style, the arrangement style of all down had better anti-wave effect.

Key words: container; vof model; baffles; arrangement; anti-wave effect

文章编号: 1671-6833(2017)04-0035-04

基于人工鱼群优化 SVM 的声磁标签信号检测研究

邓记才, 耿亚南

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了提高声磁 EAS 系统的检测率, 增强系统抗干扰性, 研究了一种改进人工鱼群算法(IAFSA)与支持向量机(SVM)相结合的声磁标签信号检测算法(IAFSA-SVM). 分析了支持向量机和传统人工鱼群算法的优势和缺陷, 并提出了改进方案. 实验表明: 改进人工鱼群算法相比人工鱼群算法、遗传算法和粒子群算法收敛速度更快、寻优精度更高; IAFSA-SVM 算法相比传统的声磁标签检测算法体现出了检测率高、检测距离远和误报率低等优势, 并且可以满足系统实时检测要求.

关键词: 人工鱼群算法; 支持向量机; 声磁标签; 检测率; 实时检测

中图分类号: TP181 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.04.001

0 引言

声磁 EAS(electronic article surveillance, EAS) 系统是利用音叉原理设计, 广泛应用于零售行业的电子产品防盗系统^[1]. 针对 EAS 系统的研究, 国外研究重点在电磁辐射和标签识别算法方面, 而国内主要针对系统的硬件电路设计. 目前, 国内研发的声磁 EAS 系统采用的标签识别方法主要是快速傅立叶变换(FFT)和计算信噪比(SNR), 虽然这两种算法实时性好、灵敏度高, 但检测率较低. 有研究者尝试将两种算法相结合, 采用双门限检测策略, 应用发现漏报现象严重. 支持向量机^[2](support vector machine, SVM) 是基于统计学习的 VC 维理论和结构风险最小原理的一种新型的机器学习方法. 测试发现, SVM 模型的学习能力受参数设置的影响很大, 而由于学习对象的不同, 参数的选择并没有规律可循. 群体智能优化算法的兴起为 SVM 参数的选择提供了一种新方法, 如蚁群算法^[3]、人工鱼群算法^[4](artificial fish swarm algorithm, AFSA)、遗传算法^[5]、粒子群算法^[6]等, 但群体优化算法也各有不足, 遗传算法收敛速度慢, 粒子群算法易陷入局部最优, 人工鱼群算法虽然具有全局寻优能力良好、鲁棒性强、对初始化参数不敏感等优点, 但也存在后期收敛速度慢、精度低等缺点.

为了提高声磁 EAS 系统的检测率, 笔者提出了一种改进人工鱼群算法(improved-AFSA, IAFSA)与 SVM 相结合的声磁标签检测模型.

1 IAFSA-SVM 检测原理

1.1 支持向量机

支持向量机通过在特征空间中寻找样本分类间隔最大的超平面实现样本分类^[7], 可线性分类模型如图 1 所示.

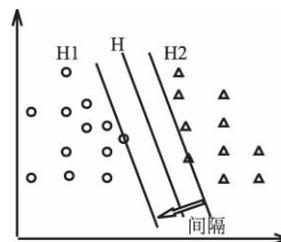


图 1 可线性分类模型

Fig. 1 The linear classification model

设存在线性可分的训练样本:

$$(x_i, y_i), x_i \in \mathbf{R}^n, y_i \in \{1, -1\}, i = 1, 2, \dots, n.$$

分类函数表示为:

$$f(x) = \mathbf{w}^T x + b. \quad (1)$$

式中: \mathbf{w} 表示正交向量; b 为常数.

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \xi_i \geq 0, y_i(\mathbf{w}^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i.$$

收稿日期: 2017-04-08; 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金委-民航联合基金(U1433106); 2016年度河南省科技攻关计划项目(162102210162)

通信作者: 邓记才(1964—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事嵌入式系统研究, E-mail: iejcdeng@zhu.edu.cn.

其中惩罚参数 C 和松弛因子 ξ_i 用来调整分类函数误差, 对应拉格朗日函数:

$$L(w, b, \xi_i) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i - \sum_{i=1}^l \alpha_i [y_i (w^T x_i + b) - 1 + \xi_i] - \sum_{i=1}^n \gamma_i \xi_i, \quad (3)$$

式中: $0 \leq \alpha_i \leq C; \gamma_i \geq 0$.

对于非线性可分类^[8]问题, 可以通过非线性映射将输入特征空间映射到高维空间来实现超平面分割, 避免了在原空间中的非线性分割计算. 定义核函数^[9] $K(x, y)$ 表示样本转换空间后的内积运算.

$$K(x, y) = \varphi(x) \cdot \varphi(y). \quad (4)$$

通过 Lagrange 乘数法^[8]求解, 最终得到 SVM 线性分类函数:

$$f(x) = \text{sgn} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i K(x_i, x_j) + b \right]. \quad (5)$$

SVM 核函数有线性核函数、多项式核函数、径向基核函数 (RBF)、Sigmoid 核函数. 在光滑性假设下, 若没有充分的分类先验信息和样本数据, RBF 有很好的机器学习能力和泛化能力, 故选择 RBF 为 SVM 核函数, RBF 表达式:

$$K(x_1, x_2) = \exp\left(-\frac{\|x_1 - x_2\|^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

确定核函数后, SVM 模型待定参数有 C 和 σ , 寻找 (C, σ) 最优组合就成了 SVM 学习性能的关键.

1.2 人工鱼群算法

人工鱼群算法^[10]是一种新型群体智能优化算法, 其模拟鱼群的觅食、尾随、群聚和随机行为, 通过个体的竞争和配合, 最终聚集到营养丰富水域, 实现全局寻优.

标记人工鱼当前位置 $X, X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 人工鱼最大视野为 V , 单次最大距离为 S , 人工鱼将在视野内随机搜索, 若某时刻视点位置 V_{next} 比所处位置食物浓度大, 则向 V_{next} 方向处移动至 X_{next} 点, 其他人工鱼位置标记 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 算法模型如图 2 所示.

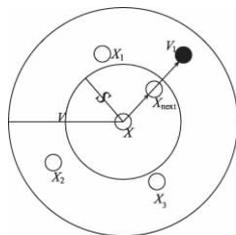


图2 人工鱼群算法模型

Fig.2 The artificial fish model

$$V_{\text{next}} = x_i + V \cdot \theta, i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

$$X_{\text{next}} = \frac{X_i - X}{\|X_i - X\|} \cdot S \cdot \theta + X. \quad (8)$$

式中: θ 表示 $[-1, 1]$ 的随机数.

算法初始化参数包括: 鱼群规模 N 、视野 V 、步长 S 、拥挤因子 δ 、迭代次数 M 等.

1.3 改进的人工鱼群算法

1) 设置两个不同视野参数. 如果视野范围过大导致算法收敛速度变慢, 视野太小会导致算法陷入局部最优. 将群聚和尾随视野设置为较大值 V_1 , 提高寻优范围; 觅食视野设置较小值 V_2 , 加快收敛速度.

2) 引入参数动态调节系数 $R (0 < R < 1)$. 设置 $S = R \cdot S, V = R \cdot V$, 在算法迭代过程中, 适当地减小视野范围和步长, 可以提高算法的收敛速度.

3) 引入淘汰机制. 当算法迭代次数过半, 若某条人工鱼的目标函数值低于预设阈值时则被淘汰, 释放内存, 淘汰机制可以有效地降低算法复杂度.

2 声磁标签信号特征

商品上都附着电子标签, 标签的谐振频率和载波频率一致, 标签经过检测区域时就会产生共振现象, 若系统检测器检测到了共振信号, 就说明有商品未经购买被带出商场, 触发报警. 市场上采用的声磁标签的谐振频率主要在 $58 \sim 68 \text{ kHz}$, 笔者所研究的是 58 kHz 声磁 EAS 检测系统.

由于信号的耦合和反射等原因, 检测器将持续性地接收到噪声信号, 实际检测信号如图 3 所示.

通过分析信号频域特征可以发现, 噪声信号功率谱能量集中在 60 kHz , 最大模值为 36.68 .

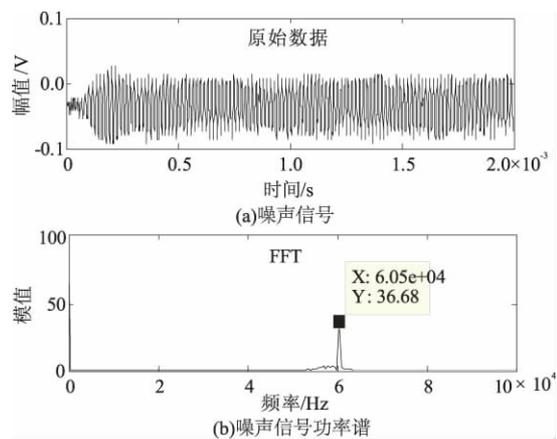


图3 噪声信号分析结果

Fig.3 The analysis results of noise

声磁 EAS 系统的检测宽度在 1.0 ~ 1.5 m 之间,标签越接近天线,共振信号幅度越大,将标签放置在距离接收天线 0.8 m 处,实际检测信号如图 4 所示.

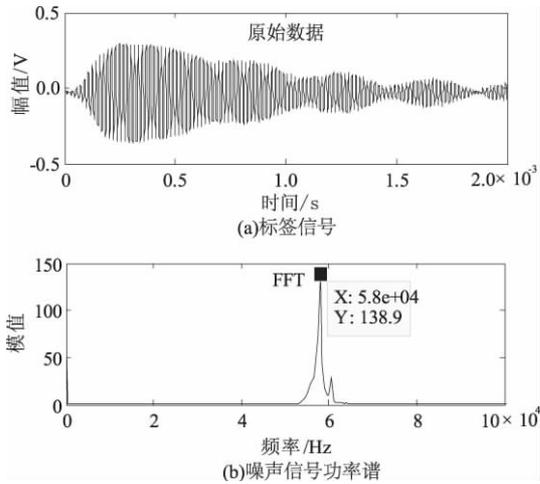


图 4 标签信号处理结果

Fig. 4 The analysis results of activate tag

通过分析信号频域特征可以发现,标签信号功率谱能量集中在 58 kHz,与标签谐振频率一致,信号最大模值为 138.9.

综合考虑标签信号的可靠性和算法复杂度,在标签经过检测区域时,采集标签距离接收天线 0.5、1.0 和 1.5 m 处的接收信号,提取信号中心频率、最大模值和信噪比作为特征向量,所以 SVM 输入向量包含 9 个参数,输出包括 +1(有标签)和 -1(无标签).

3 实验结果分析

为了测试改进的人工鱼群算法在支持向量机参数中的寻优性能,分别与粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)和人工鱼算法(AFSA)进行了对比实验.采集 2 072 组声磁标签信号数据,随机均匀抽取 1 072 组作为训练样本,剩余 1 000 组作为测试样本.

3.1 实验参数设置

基于 IAFSA-SVM 算法的声磁 EAS 标签信号检测流程如图 5 所示,虚框中步骤可以由其他检测算法所代替.

- 1) 遗传算法:交叉概率为 0.8,变异概率为 0.01.
- 2) 粒子群算法:最大速度为 0.5,最小速度为 -0.5,局部搜索参数为 1.4,全局搜索参数为 1.6.
- 3) 人工鱼群算法:最大试探参数为 30,拥挤因子为 0.652,视野为 0.6,步长为 0.1.
- 4) 改进人工鱼群算法:最大试探参数为 30,

拥挤因子为 0.652,尾随和群聚行为视野为 0.8,觅食行为视野 0.4,步长为 0.1,波动因子为 0.5,淘汰阈值 0.6.

5) 初始化群体进化最大评价次数为 50,群体规模为 10, C 和 σ 取值范围均为 $[0.01, 10]$.

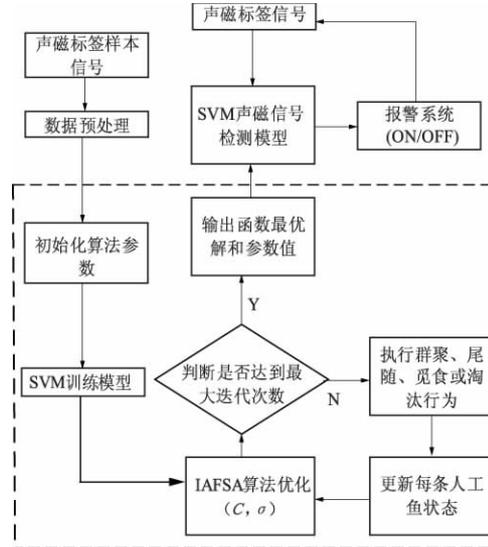


图 5 系统检测流程图

Fig. 5 The test's flowchart based on IAFSA-SVM

3.2 实验结果分析

为了测试算法的抗干扰性,分别采用标准声磁信号样本和混入噪声的信号样本进行测试,结果如图 6 和图 7 所示,图中虚线是以常用的网格搜索法确定参数的基础 SVM 模型的测试结果.

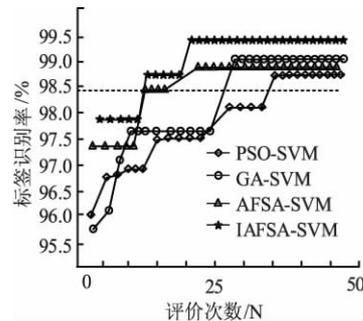


图 6 标准信号测试结果

Fig. 6 The test's results of normal signal

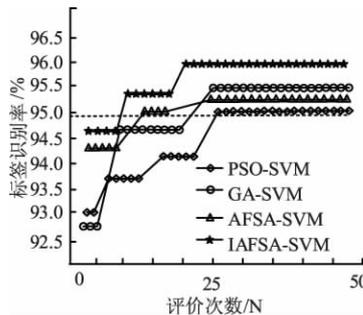


图 7 混入噪声的信号测试结果

Fig. 7 The test's results of normal signaland noise

实验结果表明:在检测声磁标签信号中,IAFSA 相比 GA、PSO、AFSA 和网格搜索法具有收敛速度快、寻优精度高、抗干扰能力强的优点。

为了测试 IAFSA-SVM 在声磁 EAS 系统中应用的性能,分别与基础 SVM、FFT 和 SNR 进行实验对比,其中 IAFSA-SVM 和基础 SVM 的参数组合分别为(5.358 0,0.228 5)、(4.138 0,0.206 5),重复测试 10 次取均值,结果如表 1 和图 8 所示。

表 1 标签检测算法对比

Tab.1 The comparison of label detection

算法	耗时/ms	距离/m	误报次数	检测率/%
FFT	2.3	1.30	2	97.49
SNR	1.2	1.19	5	93.82
IAFSA-SVM	4.6	1.51	0	99.75
SVM	3.2	1.44	0	98.63

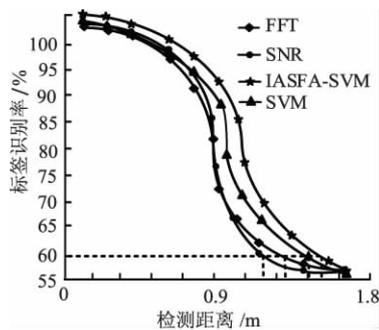


图 8 声磁信号检测结果

Fig.8 The test's result of the activate tag

IAFSA 属于随机类型算法,为了更加严谨地得出结论,使用 Wilcoxon 秩和检验方法分析实验数据,以说明 IAFSA-SVM 相比另 3 种方法在检测率方面是否有变化。

假设 $H_0: M_1 = M_2$ 即两种方法的检测率总体分布相同; $H_1: M_1 \neq M_2$, 即两种方法的检测率总体分布不同。取 $\alpha = 0.05$, 查表 $T_{0.026}(10, 10) = (79, 131)$, 实验结果如表 2 所示。

表 2 秩和检验分析各组实验结果

Tab.2 The experimental result of Wilcoxon

比较组	T 值	P 值	结论
IAFSA/SVM	70	$P < 0.026 < 0.05$	$M_1 \neq M_2$
IAFSA/FFT	59	$P < 0.026 < 0.05$	$M_1 \neq M_2$
IAFSA/SNR	48.5	$P < 0.026 < 0.05$	$M_1 \neq M_2$

表 2 结果表明, IAFSA-SVM 与 FFT、SNR 和基础 SVM 的检测率结果总体分布均不同, 结合实验均值结果可以得出结论: IAFSA-SVM 相比传统的声磁标签信号检测算法检测率更高, 检测距离更远; 并且平均检测时间为 4.6 ms, 在现有的 DSP

或 FPGA 平台上均可以满足实时检测要求。

4 结论

针对传统声磁 EAS 标签检测算法检测率低、漏报和误报现象严重等问题, 提出了一种改进的人工鱼群算法和支持向量机相结合的标签检测算法。实验结果表明: 改进的人工鱼群算法相比传统人工鱼群算法、遗传优化算法和粒子群算法在确定 SVM 最优参数组合方面有更突出的寻优能力; IAFSA-SVM 模型相比传统的声磁标签检测算法表现出了检测距离远、检测率高、误报率低等优点, 同时可以满足系统实时检测要求。IAFSA-SVM 在声磁 EAS 标签信号检测中的研究不仅丰富了 SVM 的应用, 也为标签信号识别问题提供了一种新的解决方法。

参考文献:

- [1] KHAN L, AWA M, THURASINGHAM B. A new intrusion detection system using support vector machines and hierarchical clustering [J]. The VLDB journal, 2007, 16: 507 - 521.
- [2] 肖建, 于龙, 白裔峰. 支持向量回归中的核函数和超参数选择方法综述 [J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(3): 297 - 303.
- [3] SUYKENS J A K, VANDEWALLE J. Least squares support vector machine classifiers [J]. Neural processing letters, 1999, 9(3): 293 - 300.
- [4] AMINIAN M, AMINIAN F. A modular fault-diagnostic system for analog electronic circuits using neural networks with wavelet transform as a preprocessor [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2007, 56(5): 1546 - 1554.
- [5] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Wiley, 1998: 20.
- [6] 谭明交, 张宏梅, 吕艳秋. 群体智能算法及其性能评价指标研究 [J]. 计算机与数学工程, 2008, 8(3): 10 - 12.
- [7] JAYADCVA R, KHEMCHANDANI S C. Twin support vector machines for pattern classification [J]. IEEE trans on pattern analysis and machine intelligence, 2007, 29(5): 905 - 910.
- [8] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 32 - 42.
- [9] 王华忠, 俞金寿. 核函数方法及其模型选择 [J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2006, 5(4): 500 - 504.
- [10] FLAKE M W, LAWRENCE S. Efficient SVM regression training with SMO [J]. Machine learning, 2002, 46(1): 271 - 290.

(下转第 83 页)

文章编号: 1671-6833(2017)04-0039-07

SINS 姿态估计的 HoMM-UKF 模型算法

丁国强¹, 张 铎¹, 熊 明¹, 周卫东²

(1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对舰船捷联惯性导航系统姿态控制计算精度要求, 提出一种高阶矩匹配 UKF (high-order moment matching UKF, HoMM-UKF) 的 SINS 系统四元数模型姿态估计算法. 在 UKF 迭代递推计算过程中利用高阶矩匹配方法计算系统状态参数的预测采样点集及其权值的概率分布平均偏态和峰值, 使其精确逼近状态参数最优估计. 采用四元数姿态建模方法构建新型 SINS 状态变量与噪声向量相关的姿态方程模型, 利用伪观测向量构建观测噪声与四元数相关的观测方程模型, 设计系统噪声方差分离计算算法开展系统噪声方差计算, 引入拉格朗日乘子算法计算四元数估计均值, 最后利用 SINS 四元数姿态估计模型对 HoMM-UKF 算法开展仿真试验研究. 通过 UKF 算法、CDKF 算法与 HoMM-UKF 算法对比, 验证了 HoMM-UKF 算法计算精度高, 并且算法计算量负担较小, 计算效率较高.

关键词: 捷联惯性导航; 姿态估计; 高阶矩匹配; HoMM-UKF 算法; Lagrangian 乘子

中图分类号: TP271 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.017

0 引言

非线性最优估计方法是舰船导航系统的一类关键技术, 最优估计技术关键问题是随机向量经由系统非线性函数映射的后验概率分布计算, 针对可解析概率密度函数在 Bayesian 最优估计框架下利用 Bayes 规则经由预测与更新步骤实现后验证概率分布递推计算, 但是其多元变量函数最优解析解积分结果无法获得, 为此人们提出很多基于数值逼近次优估计算法, 如扩展 Kalman 估计 (EKF) 算法^[1]、中心差分估计 (CDKF) 算法^[2] 以及 UKF 算法^[3-5] 等, 通过预测概率分布统计特性的逼近计算和线性最小均方误差估计器来获得系统状态参数次优估计计算. EKF 算法的 Taylor 级数一阶项线性化操作造成其原理上的高阶截断误差, 若提高计算精度需要考虑截取其余高阶项, 但这样会造成计算量增加, 以致算法计算稳定性变差^[6-7]. CDKF 算法利用 Stirling 插值变换替代 EKF 算法的 Jacobian 和 Hessian 矩阵计算, 计算精度可达二阶, 但是随着系统状态变量维数增加, 其最优估计计算稳定性变差; UKF 算法利用 $2n+1$ 个采样点逼近计算后验算概率分布统计特性, 计

算精度也仅仅达到二阶水平.

UKF 算法已经应用到很多非线性动态系统状态参数最优滤波计算中, 如导航定位, 组合导航系统以及移动机器人等^[8-10], 并且获得很好的计算效果. UKF 算法利用采样点及其权值集合经由非线性系统映射以及预测状态参数的统计特性经过加权变换来逼近状态参数概率统计特性, 获得状态参数逼近最优估计计算.

UKF 算法假设采样点集满足 Gaussian 分布, 但是经由非线性系统函数映射后获得采样点集的预测值一般不能满足该假设条件, 特别是噪声项显著情形中造成采样点集的预测值概率分布偏离 Gauss 分布情形, 导致最优估计算法计算性能变差^[11], 基于这一情况有必要研究非线性函数高阶矩的捕获方法, 有效改善传统 UKF 算法的计算性能. 由此提出一类高阶矩 UKF (higher-order moment matching UKF, HoMM-UKF) 算法来消除这种影响, 即在传统 UKF 算法框架中的每次递推步骤内, 利用高阶矩匹配方法精确匹配系统状态参数的预测采样点集及其权值概率分布平均偏态值和峰值, 达到修正采样点集及其权值, 使其能够精确逼近状态参数最优估计的目的. 笔者利用 SINS

收稿日期: 2016-11-08; 修订日期: 2016-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1204603)

作者简介: 丁国强 (1975—), 男, 河南南阳人, 郑州轻工业学院副教授, 博士, 主要从事非线性最优估计理论的算法与导航自动化技术研究, E-mail: dinglyit@163.com.

四元数姿态估计模型对 HoMM-UKF 算法开展仿真试验研究,经由 UKF 算法、CDKF 算法与 HoMM-UKF 算法对比,本文的 HoMM-UKF 算法计算精度可达到四阶水平,并且算法计算量负担较小,计算效率较高。

1 SINS 姿态估计模型算法

1.1 SINS 姿态方程

四元数是描述载体姿态旋转的一类特殊四维矢量,其定义为四元数是一个四维的非独立参量向量

$$\mathbf{q} = [\vartheta_0, \boldsymbol{\vartheta}^T]^T,$$

其中, $\boldsymbol{\vartheta} = [\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3]^T$ 为向量分量; ϑ_0 为实数分量,四元数运算过程中要求满足规范化限制,即有

$$\mathbf{q}^T \mathbf{q} = \|\mathbf{q}\|^2 = \boldsymbol{\vartheta}^T \boldsymbol{\vartheta} + \vartheta_0^2 = 1.$$

由四元数描述的姿态矩阵可表达为:

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}) = (\vartheta_0^2 - \boldsymbol{\vartheta}^T \boldsymbol{\vartheta}) \mathbf{I}_3 + 2\boldsymbol{\vartheta} \boldsymbol{\vartheta}^T + 2\vartheta_0 \langle \boldsymbol{\vartheta} \times \rangle = \mathbf{M}^T(\mathbf{q}) \mathbf{N}(\mathbf{q}). \quad (1)$$

其中,

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\vartheta}^T \\ \vartheta_0 \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} - \langle \boldsymbol{\vartheta} \times \rangle \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\mathbf{N}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\vartheta}^T \\ \vartheta_0 \cdot \mathbf{I}_3 + \langle \boldsymbol{\vartheta} \times \rangle \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中, \mathbf{I}_3 是 3×3 的单位矩阵 $\langle \boldsymbol{\vartheta} \times \rangle$ 表示由四元数向量分量表达的斜对称矩阵,定义为:

$$\langle \boldsymbol{\vartheta} \times \rangle = \begin{bmatrix} 0 & -\vartheta_3 & \vartheta_2 \\ \vartheta_3 & 0 & -\vartheta_1 \\ -\vartheta_2 & \vartheta_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

根据四元数微分计算法则,结合式(2)进一步整理获得 SINS 系统姿态四元数微分方程:

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \mathbf{q} \otimes \boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2} \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cdot \boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}) \cdot \mathbf{q}, \quad (4)$$

其中, $\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}) = \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{\omega}^T \\ \boldsymbol{\omega} & -\langle \boldsymbol{\omega} \times \rangle \end{bmatrix}$.

SINS 系统姿态四元数微分方程中的角速率由载体坐标系中三轴速率陀螺测量得到,其表达式为:

$$\begin{cases} \overline{\boldsymbol{\omega}}(t) = \boldsymbol{\omega}(t) + \boldsymbol{\alpha}(t) + \boldsymbol{\mu}_v(t); \\ \dot{\boldsymbol{\alpha}}(t) = \boldsymbol{\mu}_u(t), \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\overline{\boldsymbol{\omega}}(t)$ 表示陀螺的量测输出角速率向量; $\boldsymbol{\alpha}(t)$ 表示陀螺随时间变化的漂移量; $\boldsymbol{\mu}_v(t)$ 和 $\boldsymbol{\mu}_u(t)$ 分别表示陀螺测量噪声和陀螺漂移的随机

噪声,它们是互不相关的 Gauss 白噪声,满足 $\boldsymbol{\mu}_v(t) \sim (0, \boldsymbol{\sigma}_v^2)$ 和 $\boldsymbol{\mu}_u(t) \sim (0, \boldsymbol{\sigma}_u^2)$.

整理获得 SINS 系统姿态四元数微分方程:

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}(\overline{\boldsymbol{\omega}} - \boldsymbol{\alpha}) \cdot \mathbf{q} - \frac{1}{2} \mathbf{M}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\mu}_v. \quad (6)$$

1.2 SINS 姿态四元数观测方程

可以利用飞行器携带的辅助观测设备如星敏感器等获得精确的参考观测向量 \mathbf{R} ,若在 SINS 载体系中得到的观测向量为 \mathbf{B} ,根据 QUST 观测模型^[12-14]得到:

$$\overline{\mathbf{B}}_j = \mathbf{C}(\mathbf{q}) \mathbf{R}_j + \boldsymbol{\mu}_j, \quad (7)$$

其中, $\overline{\mathbf{B}}_j$ 是一个具有观测噪声的 3 维观测向量, $\boldsymbol{\mu}_j$ 是观测传感器的观测高斯白噪声,具有 $\boldsymbol{\mu}_j \sim \mathbf{N}(0, \boldsymbol{\sigma}_B^2)$ 分布。

由此根据文献[5]得到 SINS 系统的伪观测模型方程:

$$\mathbf{Z}_j = \mathbf{G}_j \mathbf{q} - (1/2) \mathbf{M}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\mu}_j, \quad (8)$$

其中, $\mathbf{G}_j = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\langle \overline{\mathbf{B}}_j + \mathbf{R}_j \rangle \times & (\overline{\mathbf{B}}_j - \mathbf{R}_j) \\ -(\overline{\mathbf{B}}_j - \mathbf{R}_j) & 0 \end{bmatrix}$.

若按照式(8)展开 k 次观测获得的观测方程为:

$$\mathbf{Z}_k = [\mathbf{G}_1^R \mathbf{q}, \mathbf{G}_2^R \mathbf{q}, \dots, \mathbf{G}_N^R \mathbf{q}]^T + \boldsymbol{\mu}_k = \mathbf{G}(\mathbf{X}_k, \overline{\mathbf{B}}_k) + \boldsymbol{\mu}_k, \quad (9)$$

其中, $\mathbf{G}(\mathbf{X}_k, \overline{\mathbf{B}}_k) = [\mathbf{G}_1^R \mathbf{q}, \mathbf{G}_2^R \mathbf{q}, \dots, \mathbf{G}_N^R \mathbf{q}]^T$, $\overline{\mathbf{B}}_k = [\overline{\mathbf{B}}_1 \ \overline{\mathbf{B}}_2 \ \dots \ \overline{\mathbf{B}}_k]^T$. 伪观测方程中的第一项 $\mathbf{G}_j \mathbf{q}$ 是四元数向量的线性函数,其矩阵秩 $r = 2$. 伪观测方程的噪声项 $-(1/2) \mathbf{M}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\mu}_j$ 是四元数相关项,和系统四元数姿态方程的过程噪声项相似,可以方便开展观测噪声方差计算^[15].

1.3 SINS 模型噪声方差分解算法

考虑观测噪声与向量 \mathbf{X}_k 相关的观测方程写为:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{G}_e(\mathbf{X}_k) \mathbf{w}_k. \quad (10)$$

状态向量均值计算:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Z}}_k &= E[\mathbf{Z}_k] = E[\mathbf{G}_e(\mathbf{X}_k) \mathbf{w}_k] = \\ & \mathbf{G}_e[E(\mathbf{X}_k)] E(\mathbf{w}_k) = \mathbf{G}_e(\hat{\mathbf{X}}_k) \hat{\mathbf{w}}_k. \end{aligned} \quad (11)$$

定义 \mathbf{Z}_k 外积计算式:

$$\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^T = \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} \mathbf{G}_{e_i}(\mathbf{w}_{k_i} \mathbf{w}_{k_l}) \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T \mathbf{G}_{e_l}^T. \quad (12)$$

那么,对其两边求期望值得到:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^T] &= E \left[\sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} \mathbf{G}_{e_i}(\mathbf{w}_{k_i} \mathbf{w}_{k_l}) \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T \mathbf{G}_{e_l}^T \right] = \\ & \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} \mathbf{G}_{e_i} E(\mathbf{w}_{k_i} \mathbf{w}_{k_l}) E(\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T) \mathbf{G}_{e_l}^T = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} \mathbf{G}_{e_i} [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T)_{il} (\mathbf{P}_{X_k} + \hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{X}}_k^T)] \mathbf{G}_{e_l}^T = \\ & \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} \mathbf{G}_{e_i} [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes (\mathbf{P}_{X_k} + \hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{X}}_k^T)]_{il} \mathbf{G}_{e_l}^T = \\ & [\mathbf{G}_{e_1} \mathbf{G}_{e_2}, \dots, \mathbf{G}_{e_{n_w}}] [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes (\mathbf{P}_{X_k} + \hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{X}}_k^T)] \cdot \\ & [\mathbf{G}_{e_1} \mathbf{G}_{e_2}, \dots, \mathbf{G}_{e_{n_w}}]^T. \quad (13) \end{aligned}$$

令 $\mathbf{G}_e = [\mathbf{G}_{e_1} \mathbf{G}_{e_2}, \dots, \mathbf{G}_{e_{n_w}}]$, 式(13) 简化为:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^T] &= \mathbf{G}_e [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes (\mathbf{P}_{X_k} + \hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{X}}_k^T)] \mathbf{G}_e^T = \\ & \mathbf{G}_e [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes \mathbf{P}_{X_k}] \mathbf{G}_e^T + \\ & \mathbf{G}_e [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes (\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{X}}_k^T)] \mathbf{G}_e^T, \end{aligned}$$

其中,第二项进一步化简

$$\begin{aligned} & \mathbf{G}_e [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes (\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{X}}_k^T)] \mathbf{G}_e^T = \\ & \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} \mathbf{G}_{e_i} [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T)_{il} (\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{X}}_k^T)] \mathbf{G}_{e_l}^T = \\ & \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} \mathbf{G}_{e_i} \hat{\mathbf{X}}_k [e_i (\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T)_{il} e_l^T] (\mathbf{G}_{e_l} \hat{\mathbf{X}}_k)^T = \\ & \mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) \sum_{i=1}^{n_w} \sum_{l=1}^{n_w} [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T)_{il} e_i e_l^T] \mathbf{G}_e^T(\hat{\mathbf{X}}_k) = \\ & \mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) (\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \mathbf{G}_e^T(\hat{\mathbf{X}}_k), \end{aligned}$$

其中,式中 \otimes 表示 Kronecker 乘积^[16],且对于 $i = 1, 2, \dots, N_w$, 有 $\mathbf{G}_{e_i} \hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{G}_e(\hat{\mathbf{X}}_k) e_i$ 成立,从而得到

$$\begin{aligned} E[\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^T] &= \mathbf{G}_e [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes \mathbf{P}_{X_k}] \mathbf{G}_e^T + \\ & \mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) (\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \mathbf{G}_e^T(\hat{\mathbf{X}}_k). \quad (14) \end{aligned}$$

则向量 \mathbf{Z} 的噪声方差计算:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{Z_k} &= E[\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^T] - \hat{\mathbf{Z}}_k \hat{\mathbf{Z}}_k^T = \mathbf{G}_e [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes \mathbf{P}_{X_k}] \mathbf{G}_e^T + \\ & \mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) (\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \mathbf{G}_e^T(\hat{\mathbf{X}}_k) - [\mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) \hat{\mathbf{w}}_{k_i}] [\mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) \hat{\mathbf{w}}_{k_i}]^T = \\ & \mathbf{G}_e [(\mathbf{P}_{w_k} + \hat{\mathbf{w}}_{k_i} \hat{\mathbf{w}}_{k_i}^T) \otimes \mathbf{P}_{X_k}] \mathbf{G}_e^T + \mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) \mathbf{P}_{w_k} \mathbf{G}_e^T(\hat{\mathbf{X}}_k). \quad (15) \end{aligned}$$

若噪声向量 \mathbf{w}_k 是均值为 0 的 Gauss 白噪声, 则式(15) 计算可以化简为:

$$\mathbf{P}_{Z_k} = \mathbf{G}_e (\mathbf{P}_{w_k} \otimes \mathbf{P}_{X_k}) \mathbf{G}_e^T + \mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}_k) \mathbf{P}_{w_k} \mathbf{G}_e^T(\hat{\mathbf{X}}_k). \quad (16)$$

1.4 四元数加权均值算法

考虑四元数由 $k-1$ 时刻到 k 时刻更新操作产生误差四元数为:

$$\delta \mathbf{q}_{i,k-1} = \mathbf{q}_{i,k-1} \otimes \mathbf{q}_{i,k-1}^{-1},$$

其中, $\mathbf{q}_{i,k-1}$ 是 $k-1$ 时刻更新计算的四元数, $\mathbf{q}_{i,k|k-1}$ 为四元数一步预测值, $\delta \mathbf{q}_{i,k-1}$ 向量部分

$\delta \mathbf{q}_{i,k-1}$ 为:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{q}_{i,k-1} &= -\mathbf{q}_{i,k-1} \mathbf{q}_{i,k-1} + \langle \mathbf{q}_{i,k-1} \times \rangle + \mathbf{q}_{i,k-1} \mathbf{q}_{i,k-1} = \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{i,k-1} I_3 - \langle \mathbf{q}_{i,k-1} \times \rangle \\ -\mathbf{q}_{i,k-1}^T \end{bmatrix} \mathbf{q}_{k|k-1}. \end{aligned}$$

若考虑 HoMM-UKF 算法中四元数均值计算的加权因子 κ_i^m , 则可以把四元数加权求均值问题转化为代价函数的极值计算问题, 那么四元数代价函数可写为:

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^n k_i^m (\delta \mathbf{q}_{i,k-1})^T \delta \mathbf{q}_{i,k-1}; \\ J(\mathbf{q}_{k|k-1}) &= \mathbf{q}_{k|k-1}^T \mathbf{L} \mathbf{q}_{k|k-1}. \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= \sum_{i=1}^n k_i^m \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{i,k-1} I_3 - \langle \mathbf{q}_{i,k-1} \times \rangle \\ -\mathbf{q}_{i,k-1}^T \end{bmatrix}^T \cdot \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{i,k-1} I_{3 \times 3} - \langle \mathbf{q}_{i,k-1} \times \rangle \\ -\mathbf{q}_{i,k-1}^T \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

由于 $\mathbf{q}_{k|k-1}^T \mathbf{q}_{k|k-1} = \|\mathbf{q}_{k|k-1}\| = 1$, 那么设拉格朗日算子 λ , 利用拉格朗日乘法构造代价函数^[17]:

$\bar{J}(\mathbf{q}_{k|k-1}) = \mathbf{q}_{k|k-1}^T \mathbf{L} \mathbf{q}_{k|k-1} + \lambda(1 - \mathbf{q}_{k|k-1}^T \mathbf{q}_{k|k-1})$, 那么, 可以通过计算 \bar{J} 函数的最小值, 得到

$$\mathbf{L} \mathbf{q}_{k|k-1} = \lambda \mathbf{q}_{k|k-1},$$

代价函数 \bar{J} 最小的矩阵 \mathbf{L} 最小特征值的特征向量就是所求均值四元数.

2 高阶矩匹配算法

针对非线性系统函数 $\mathbf{Z} = f(\mathbf{X})$, 若状态向量均值为 $\bar{\mathbf{X}}$, 利用 Taylor 级数在均值附近对其展开

$$\mathbf{Z} = f(\mathbf{X}) = f(\bar{\mathbf{X}}) + \mathbf{D}_{\Delta \mathbf{X}} f + \frac{1}{2!} \mathbf{D}_{\Delta \mathbf{X}}^2 f +$$

$$\frac{1}{3!} \mathbf{D}_{\Delta \mathbf{X}}^3 f + \dots + \frac{1}{k!} \mathbf{D}_{\Delta \mathbf{X}}^k f + \dots.$$

得到映射向量 \mathbf{Z} 期望为:

$$\bar{\mathbf{Z}} = E\{\mathbf{Z}\} = f(\bar{\mathbf{X}}) + \frac{1}{2!} \mathbf{f}^{(2)} \mathbf{P}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} +$$

$$\frac{1}{3!} \mathbf{f}^{(3)} E(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X})^3 + \frac{1}{4!} \mathbf{f}^{(4)} E(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X})^4 + \dots, \quad (17)$$

其中, $E(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X})^3$ 表示状态向量 \mathbf{X} 的三阶中心矩, $E(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X})^4$ 表示状态向量 \mathbf{X} 的四阶中心矩, 定义它们分别为 $\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 参数

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha} = E(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X})^3; \\ \boldsymbol{\beta} = E(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X})^4. \end{cases} \quad (18)$$

在 UKF 算法中引入适当的加权因子 κ_i , 有映射向量逼近估计为:

$$\hat{\mathbf{Z}} = \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i \mathbf{f}(\mathbf{X}^{(i)}).$$

对其进行变换可得到

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Z}} &= \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i \mathbf{f}(\mathbf{X}^{(i)}) = \\ &\kappa_0 \mathbf{f}(\bar{\mathbf{X}}) + \kappa_1 \mathbf{f}(\bar{\mathbf{X}} + \alpha \sqrt{N\mathbf{P}_{XX}}) + \\ &\kappa_2 \mathbf{f}(\bar{\mathbf{X}} - \beta \sqrt{N\mathbf{P}_{XX}}). \end{aligned}$$

在状态变量 \mathbf{X} 均值附近对 \mathbf{f} 展开得到映射变量估计值

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Z}} &= \kappa_0 \mathbf{f}(\bar{\mathbf{X}}) + \kappa_1 \left[\mathbf{f}(\bar{\mathbf{X}}) + \mathbf{f}^{(1)} \alpha \sqrt{\mathbf{P}_{XX}} + \right. \\ &\left. \frac{1}{2!} \mathbf{f}^{(2)} (\alpha \sqrt{\mathbf{P}_{XX}})^2 + \right. \\ &\left. \frac{1}{3!} \mathbf{f}^{(3)} (\alpha \sqrt{\mathbf{P}_{XX}})^3 + \frac{1}{4!} \mathbf{f}^{(4)} (\alpha \sqrt{\mathbf{P}_{XX}})^4 + \dots \right] + \\ &\kappa_2 \left[\mathbf{f}(\bar{\mathbf{X}}) - \mathbf{f}^{(1)} \beta \sqrt{\mathbf{P}_{XX}} + \frac{1}{2!} \mathbf{f}^{(2)} (\beta \sqrt{\mathbf{P}_{XX}})^2 + \right. \\ &\left. \frac{1}{3!} \mathbf{f}^{(3)} (\beta \sqrt{\mathbf{P}_{XX}})^3 + \frac{1}{4!} \mathbf{f}^{(4)} (\beta \sqrt{\mathbf{P}_{XX}})^4 + \dots \right], \end{aligned}$$

整理获得

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Z}} &= \mathbf{f}(\bar{\mathbf{X}}) + \mathbf{f}^{(1)} \sqrt{\mathbf{P}_{XX}} (\alpha \kappa_1 - \beta \kappa_2) + \\ &\frac{1}{2!} \mathbf{f}^{(2)} \mathbf{P}_{XX} (\kappa_1 \alpha^2 + \kappa_2 \beta^2) + \\ &\frac{1}{3!} \mathbf{f}^{(3)} \sqrt{\mathbf{P}_{XX}^3} (\alpha^3 \kappa_1 - \beta^3 \kappa_2) + \\ &\frac{1}{4!} \mathbf{f}^{(4)} \mathbf{P}_{XX}^2 (\kappa_1 \alpha^4 + \kappa_2 \beta^4). \end{aligned} \quad (19)$$

式(18)定义的参数 α 和 β 作用在于匹配状态变量 \mathbf{X} 的第三阶和第四阶中心矩,也就是状态变量的概率分布平均偏态值和峰值.对比式(17)和式(20)可以获得参数 α 和 β 的表达式为:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2} [\phi_1 \pm \sqrt{4\phi_2 - 3\phi_1^2}]; \\ \beta = -\frac{1}{2} [\phi_1 \mp \sqrt{4\phi_2 - 3\phi_1^2}], \end{cases} \quad (20)$$

其中, ϕ_1 和 ϕ_2 由状态向量平均偏态值和峰值计算获得:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{\sum_{j=1}^n \mathbf{W}_j}{\sqrt{N} \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \mathbf{S}_{lk}^3}; \\ \phi_2 &= \frac{\sum_{j=1}^n \Psi_j}{N \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \mathbf{S}_{lk}^4}, \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{S}_{lk} = (\sqrt{\mathbf{P}_{XX}})_{lk}$ 表示系统状态向量的方差矩阵 Cholesky 分解因子矩阵的第 l 行第 k 列元素;

$$\mathbf{W}_j = \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i (\mathbf{X}_j^{(i)} - \bar{\mathbf{X}}_j)^3; \quad \Psi_j = \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i (\mathbf{X}_j^{(i)} - \bar{\mathbf{X}}_j)^4,$$

分别表示状态向量的第三阶中心矩和第四阶中心矩,很明显所有 Sigma 点加权均值及其方差满足

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i \mathbf{X}^{(i)} &= (\bar{\mathbf{X}} \mathbf{0}_{m_1 \times 1} \mathbf{0}_{m_2 \times 1})^T; \\ \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i (\mathbf{X}^{(i)} - \bar{\mathbf{X}}) (\mathbf{X}^{(i)} - \bar{\mathbf{X}})^T &= \\ &\text{diag}\{P_{xx} \quad Q \quad R\}; \end{aligned}$$

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i (\mathbf{X}_j^{(i)} - \bar{\mathbf{X}}_j)^4 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Psi_j;$$

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i (\mathbf{X}_j^{(i)} - \bar{\mathbf{X}}_j)^3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{W}_j.$$

3 高阶 UKF 估计算法

若考虑离散非线性动态系统为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{f}(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{w}_{k-1}); \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{X}_k, \mathbf{v}_k), \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{X}_k \in \mathbf{R}^n$ 是 k 时刻的系统状态变量; \mathbf{w}_{k-1} 是 m_1 维过程噪声; $\mathbf{Z}_k \in \mathbf{R}^m$ 是 k 时刻系统量测向量; \mathbf{v}_k 是 m_2 维量测噪声.

1) 滤波参数初始化.

$$\hat{\mathbf{X}}_0 = E[\mathbf{X}_0],$$

$$\mathbf{P}_0 = E[(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)^T].$$

对系统状态向量初始方差矩阵和系统噪声方差矩阵实施 Cholesky 分解, $\mathbf{P}_0 = \mathbf{S}_0 \mathbf{S}_0^T$; $\mathbf{Q}_0 = \mathbf{S}_{Q,0} \mathbf{S}_{Q,0}^T$.

2) Sigma 点及权值系数计算.

$$\mathbf{X}_{0,k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \\ \mathbf{0}_{m_1 \times 1} \end{bmatrix}, \quad i=0;$$

$$\mathbf{X}_{1i,k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + (\alpha \sqrt{N} \mathbf{S}_{k-1})_i \\ \mathbf{0}_{m_1 \times 1} \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, n;$$

$$\mathbf{X}_{2i,k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} - (\beta \sqrt{N} \mathbf{S}_{k-1})_i \\ \mathbf{0}_{m_1 \times 1} \end{bmatrix}, \quad i=n+1, \dots, 2n.$$

其对应的权值系数为:

$$\kappa_0 = 1 - \sum_{i=1}^{2N} \kappa_i, \quad i=0;$$

$$\kappa_i = \frac{1}{\alpha(\alpha + \beta)N}, \quad i \in [1, n];$$

$$\kappa_i = \frac{1}{\beta(\alpha + \beta)N}, \quad i \in [n+1, 2n]. \quad (22)$$

同时,系统噪声的 Sigma 采样点及其权值系数为:

$$\boldsymbol{\chi}_{3i,k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_{k-1} \\ (\sqrt{N}\boldsymbol{S}_{Q,k-1})_{i-2n} \end{bmatrix},$$

$$i = 2n + 1, \dots, 2n + m_1;$$

$$\boldsymbol{\chi}_{4i,k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_{k-1} \\ -(\sqrt{N}\boldsymbol{S}_{Q,k-1})_{i-2n} \end{bmatrix},$$

$$i = 2n + m_1 + 1, \dots, 2n + 2m_1.$$

其中,权值系数为:

$$\kappa_i = 1/(2N), N = n + m_1. \quad (23)$$

3) 系统方程时间更新.

$$\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_{ji,k-1}), (j=0,1,2,3,4),$$

获得的 Sigma 点预测向量,进一步得到状态向量的一步预测值为:

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i \boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1},$$

同时状态向量一步预测误差方差阵可表达为:

$$\boldsymbol{P}_{x_k,k|k-1} = \sum_{i=0}^{2N} \kappa_i (\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1}) \cdot (\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1})^T,$$

对预测方差矩阵实施 Cholesky 分解获得

$$\boldsymbol{P}_{x_k,k|k-1} = \boldsymbol{S}_{x_k,k|k-1} \boldsymbol{S}_{x_k,k|k-1}^T,$$

同时,对观测噪声方差矩阵也实施 Cholesky 分解操作获得 $\boldsymbol{R}_k = \boldsymbol{S}_{R,0} \boldsymbol{S}_{R,0}^T$,相应 Sigma 点更新值为:

$$\boldsymbol{\chi}_{0,k|k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} \\ \mathbf{0}_{m_2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad i = 0;$$

$$\boldsymbol{\chi}_{1i,k|k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} + (\alpha \sqrt{N}\boldsymbol{S}_{x_k,k|k-1})_i \\ \mathbf{0}_{m_2 \times 1} \end{bmatrix},$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\boldsymbol{\chi}_{2i,k|k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} - (\beta \sqrt{N}\boldsymbol{S}_{x_k,k|k-1})_i \\ \mathbf{0}_{m_2 \times 1} \end{bmatrix},$$

$$i = n + 1, \dots, 2n.$$

其对应权值系数取式(22),同样地观测噪声项的 Sigma 采样点更新为:

$$\boldsymbol{\chi}_{3i,k|k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} \\ (\sqrt{N}\boldsymbol{S}_{R,k-1})_{i-2n} \end{bmatrix},$$

$$i = 2n + 1, \dots, 2n + m_2;$$

$$\boldsymbol{\chi}_{4i,k|k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} \\ -(\sqrt{N}\boldsymbol{S}_{R,k-1})_{i-2n} \end{bmatrix},$$

$$i = 2n + m_2 + 1, \dots, 2n + 2m_2.$$

其权值系数取式(23).

4) 系统观测方程更新.

$$\boldsymbol{y}_{i,k|k-1} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{\chi}_{ji,k|k-1}), (j=0,1,2,3,4),$$

获得观测向量预测值:

$$\hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2M} \kappa_i \boldsymbol{y}_{i,k|k-1},$$

观测向量的一步预测误差方差阵:

$$\boldsymbol{P}_{z,k|k-1} = \sum_{i=0}^{2M} \kappa_i (\boldsymbol{y}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1}) \cdot (\boldsymbol{y}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1})^T,$$

状态向量与观测向量的交叉协方差阵为:

$$\boldsymbol{P}_{xz,k|k-1} = \sum_{i=0}^{2M} \kappa_i (\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1}) \cdot (\boldsymbol{y}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1})^T.$$

5) Kalman 滤波计算.

$$\text{相应的 Kalman 增益阵 } \boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{xz,k|k-1} \boldsymbol{P}_{z,k|k-1}^{-1}.$$

$$\text{状态向量估计值 } \hat{\boldsymbol{X}}_k = \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k (\boldsymbol{Z}_k - \hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1}).$$

$$\text{相应估计误差方差阵 } \hat{\boldsymbol{P}}_x = \boldsymbol{P}_{x,k|k-1} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{P}_z \boldsymbol{K}_k^T.$$

4 仿真研究

笔者采用 SINS 姿态估计平台试验系统,针对 SINS 载体姿态状态变量开展估计仿真验证,仿真初始条件设置如表 1 所示.

为了验证 HoMM-UKF 算法的有效性及其数值计算优势,将其与传统 UKF 算法和 CDKF 算法进行仿真比较验证,从而获得如图 1 基于 UKF 算法的系统姿态角估计曲线,图 2 为基于 CDKF 模型算法系统姿态角的估计误差曲线,图 3 为 HoMM-UKF 模型算法获得系统姿态角的估计误差曲线.从图 1 和图 3 估计误差曲线可以看出,采用高阶矩匹配方法的 HoMM-UKF 算法,可以获得良好的计算效能,其横滚角和俯仰角误差曲线能够迅速地收敛并保持稳定,估计误差稳定在 $10'$ 之内,其偏航角误差曲线在初始的震荡之后能够快速收敛并保持稳定.而 UKF 算法的横滚角和俯仰角估计精度在 $10'$ 之内,但偏航角估计精度在 $40'$ 之内,其偏航角误差曲线收敛困难并且稳定性差.利用高阶矩匹配方法进行估算算法得到的数

据更加精确,稳定性较强.原因在于高阶矩匹配方法能够精确匹配系统状态参数的预测采样点集及其权值概率分布平均偏态和峰值,达到修正采样点集及其权值使其能够精确逼近状态参数最优估计目的.

表1 SINS 姿态估计平台初始参数
Tab.1 The initial parameters set of SINS attitude estimation platform

参数名称	参数值
载体初始位置	(N45°, E126°, H0m)
载体初始速度/(m·s ⁻¹)	(0,0,0)
载体初始姿态角误差/(°)	(2,4,15)
光纤陀螺测量噪声/(°·h ⁻¹)	$\sigma_w = 0.04$
光纤陀螺漂移噪声/(°·h ⁻¹)	$\sigma_v = 0.005$
三轴陀螺初始漂移/(°·h ⁻¹)	(1,1,1)
光纤陀螺输出频率/Hz	100
试验仿真时间/s	300

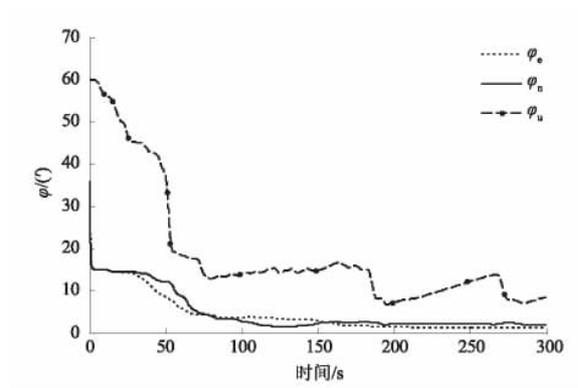


图1 系统姿态角的 UKF 算法估计误差曲线
Fig.1 Attitude Angle estimate error curve based on UKF algorithm

另外, SINS 系统姿态估计模型采用传统 CDKF 模型算法和 HoMM-UKF 算法进行计算效能比较,获得如图 2 所示的基于 CDKF 模型算法系统姿态角的估计误差曲线.对图 2 和图 3 的误差

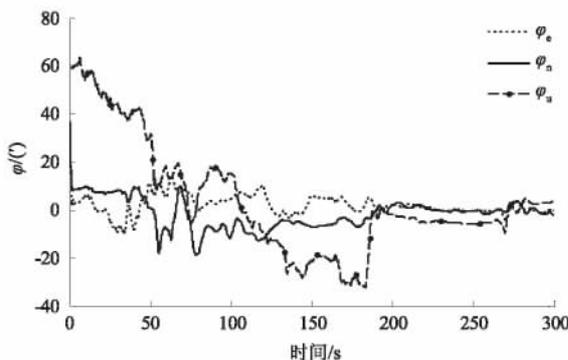


图2 系统姿态角的 CDKF 算法估计误差曲线
Fig.2 Attitude Angle estimate error curve based on CDKF algorithm

数据进行比较,可以发现 HoMM-UKF 算法获得的横滚角和俯仰角估计精度在 20'之内,能够快速收敛并保持稳定,而 CDKF 算法横滚角和俯仰角估计精度在 20'之内,但偏航角估计精度在 60'之内,收敛速度慢并且稳定性差.与 CDKF 算法相比, HoMM-UKF 算法计算精度优于 CDKF 算法,数值计算稳定性较好,说明 HoMM-UKF 算法拥有良好的性能及计算精度优势.

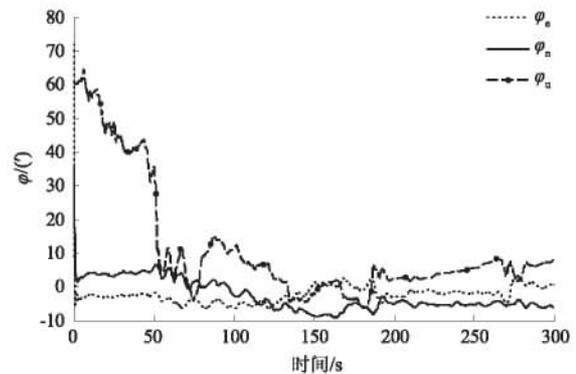


图3 系统姿态角的 HoMM-UKF 算法估计误差曲线
Fig.3 Attitude Angle estimate error curve based on HoMM-UKF algorithm

5 结论

基于 SINS 系统姿态估计高精度稳定数值计算要求,结合传统 UKF 算法设计了计算精度达到四阶的 HoMM-UKF 算法.利用四元数构建舰船载体 SINS 系统姿态估计模型,并且利用伪观测法构建了系统噪声相关的乘性噪声观测模型算法,并设计了乘性噪声方差分离算法.经由 SINS 试验平台仿真验证,相比于 UKF 算法和 CDKF 算法, HoMM-UKF 算法具有计算精度高、数值计算稳定的优点,在舰船载体 SINS 姿态估计应用中具有适用价值.

参考文献:

- [1] 王彤,马建仓,秦涛,等.基于旋转四元数的姿态解算算法[J].弹箭与制导学报,2014,34(3):15-16.
- [2] 韩萍,干浩亮,何炜琨,等.基于迭代中心差分卡尔曼滤波的飞机姿态估计[J].仪器仪表学报,2015,36(1):187-193.
- [3] 杨建强,刘斌,侯建军,等.一种改进的速度加姿态匹配传递对准方法[J].光学与光电技术,2014,12(6):61-64.
- [4] 丁国强,马军霞,熊明,等.大失准角传递对准杆臂效应影响研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(3):110-115.

- [5] 丁国强,徐洁,周卫东,等. SINS/CCD 系统四元数中心差分姿态估计算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014,42(9): 19-23.
- [6] 张端金,刘雪,范鑫. 基于 Delta 算子时变时延网络控制系统的 H_{∞} 滤波[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016,37(3): 10-14.
- [7] 宋宇,翁新武,郭昕刚. 基于光流和惯性导航的小型无人机定位方法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(1): 13-16.
- [8] 杨功流,王丽芬,袁二凯,等. 大方位失准角下舰载机快速传递对准技术[J]. 中国惯性技术学报, 2014,22(1): 45-50.
- [9] 韩萍,干浩亮,何炜琨,等. 基于 CDKF 的飞机姿态角估计[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(6): 790-795.
- [10] 庞鸿锋,潘孟春,王伟,等. 基于高斯牛顿迭代算法的三轴磁强计校正[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1507-1511.
- [11] 丁国强,马军霞,熊明,等. 大失准确传递对准杆臂效应影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 36(3): 110-114.
- [12] 邓红,刘光斌,陈昊明,等. 基于 UKF 的导弹 SINS/CNS 姿态估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010,32(9): 1987-1990.
- [13] 祝继华,郑南宁,袁泽剑,等. 基于中心差分粒子滤波的 SLAM 算法[J]. 自动化学报, 2010,36(2): 249-253.
- [14] 闫林波,贾维敏,姚敏立,等. 基于扩展卡尔曼滤波的动中通低成本姿态估计[J]. 电光与控制, 2013, 20(7): 53-57.
- [15] JIN Y, HE Y, FU J, et al. A fineinterpolationbased parametricinterpolation method with a novel real-time lookaheadalgorithm[J]. Computer-aided design, 2014, 55: 37-48.
- [16] KARASALO M, HU X M. An optimization approach to adaptive Kalman filtering[J]. Automatica, 2011, 47(8): 1785-1793.
- [17] BAVDEKAR V A, DESHPANDE A P, PATWARDHAN S C. Identification of process and measurement noise covariance forstate and parameter estimation using extended Kalman filter[J]. Journal of process control, 2011,21(4): 585-601.

The HoMM-UKF Algorithm of SINS' Attitude Estimation Model

DING Guoqiang¹, ZHANG Duo¹, XIONG Ming¹, ZHOU Weidong²

(1. College of Electrical & Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the precision requirement about the attitude control of the strap-down inertial navigation system, the high order moment matching UKF (Higher-order Moment Matching UKF, HoMM-UKF) algorithm was proposed, that is to estimate the SINS' attitude parameters of based on its quaternion error model. In the recursive calculation process, for accurately approximating computational purposes, it uses high order moment matching method to calculate the average skewness value and peak value of the predicted sampling points set and their weights of the system state parameters in the view of the probability distribution. Making use of attitude quaternion method, then online quaternion error model was constructed, in which model the system noise vector depends on system state vector, meanwhile construct its measure equation whose measurement noise vector depends on quaternion measurement vector by pseudo observation vector method was constructed, the weighted average of estimated quaternion with Lagrangian operator was calculated, the system noise variance calculation with the system noise separation algorithm was carried out, and finally construct the SINS' attitude estimation HoMM-UKF algorithms simulation on SINS attitude experiment platform was designed. It can be seen that HoMM-UKF algorithm's calculation accuracy is higher than others and has better numerical stability, comparison of the UKF, and CDKF algorithms, and so the HoMM-UKF algorithm's feasibility and calculation accuracy is verified.

Key words: strap-down inertial navigation system; attitude estimation; higher order moment matching; HoMM-UKF algorithm; lagrangian multiplier

文章编号: 1671-6833(2017)04-0046-05

基于 PSO-RBF 神经网络的雾霾车牌识别算法研究

毛晓波, 张群, 梁静, 刘艳红

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 给出一种雾霾环境下车牌识别改进算法. 首先利用改进的暗原色先验法对雾霾天气下的车牌图像进行去雾处理; 然后经预处理、定位、分割与提取, 得到粗网格特征矩阵; 最后采用经粒子群算法优化的径向基函数神经网络进行识别. 实验结果表明, 系统去雾效果良好, 且能缩短去雾处理的时间, 有效提高雾霾天气下车牌识别的速度和准确率.

关键词: 车牌识别; 暗原色先验法; 粒子群优化算法; 径向基函数神经网络

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2017.04.002

0 引言

随着智能交通的普及, 车牌识别系统飞速发展, 在阳光充足的情况下, 准确率和速度都基本能够满足人们的需求^[1]. 但是近些年来, 随着雾霾天气的增多, 现有的车牌识别系统已经很难满足人们的需求. 这就迫切需要引入去雾算法, 以设计出效果良好的雾霾车牌识别系统.

常用的去雾算法可分为两大类: 第一类是利用图像增强方法实现去雾, 如增加对比度, 但该方法会造成图像部分信息丢失^[2]; 第二类是基于物理模型的方法, 如 He 等提出的暗原色先验法^[3]. 该方法耗时较长, 无法满足车牌识别系统的时效性^[4]. 笔者拟通过改进暗原色先验算法透射率的细化方法, 来减少算法的计算量, 增加去雾的时效性.

常用的车牌识别算法有模板匹配法与神经网络识别算法^[5]. 基于模板匹配的识别算法使用较早, 方法简单, 但准确率较低; 基于神经网络的识别算法使用广泛, 最常用的神经网络是 BP 神经网络^[6]. 但由于雾霾车牌图像干扰量较多, 而 BP 神经网络抗干扰性差, 使其对雾霾车牌图像进行识别效果不佳. 因此, 笔者选用改进粒子群优化的径向基函数(PSO-RBF)神经网络对雾霾车牌图像进行识别. 实验证明: 该方法能够有效地提高雾霾车牌识别的准确率. 该算法还可以应用到目标

追踪^[7]中, 对雾霾天气下的移动车辆进行追踪并识别其车牌信息, 为智能交通系统更好地适应恶劣天气提供新的技术手段.

1 改进的暗原色先验去雾算法

暗原色先验(dark channel pixel)是由 He 等在 2009 年提出的一种图像统计规律^[3]. 他发现, 在晴朗的天气下拍摄出来的图片, 某些像素总会有一个或者多个色彩通道的值很低, 他把这些像素称为暗原色. 但是, 如果在雾霾天气下拍摄同样的照片, 这些暗原色像素的光强度会明显增大. 这些像素光强度的变化可以反映出雾霾的投射情况, 再结合大气散射模型, 通过计算, 可以得到清晰的去雾图像. 具体算法如下:

1) 求出 RGB(Red、Green、Blue) 3 个色彩通道各自的暗原色图像 $J_{\text{dark}}^c(x)$,

$$J_{\text{dark}}^c(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)) \right), \quad (1)$$

$J^c(y)$ 表示彩色图像的每个通道的光强度值; $\Omega(x)$ 代表图像的一个局部区域.

2) 求出透射率 $t(x)$.

$$t(x) = 1 - \omega \left(\frac{J_{\text{dark}}^c(x)}{A} \right), \quad (2)$$

式中: ω 为调整参数, 可以调整远处景物的朦胧感, 此处设定为 0.8; A 为大气光成分的强度值.

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473266); 2017 年度河南省高等学校重点科研项目(17A413011); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(17IRTSTHN013)

作者简介: 毛晓波(1965—), 男, 河南开封人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事仿生机器视觉研究, E-mail: mail-mxb@zhu.edu.cn.

3) 得到去雾的图像 $J(x)$.

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A, \quad (3)$$

式中: $I(x)$ 为要输入的雾霾车牌图像; $J(x)$ 为要得出的清晰图像; t_0 为设定的最低透射率, 设定为 0.1.

按上述步骤得出的 $t(x)$ 较为粗糙, 去雾效果无法达到要求, 需要对 $t(x)$ 进行细化. 在何凯明提出的暗原色先验法中, 采用软抠图 (soft matting) 细化 $t(x)$ [3]. 该方法计算量巨大, 速度较慢, 严重影响了去雾的速度. 因此, 笔者提出一种透射率细化的方法, 减少计算量, 缩短去雾处理的时间. 该方法是在图像的边缘交界处, 采用最大值滤波, 修复被低估的暗原色的值. 具体算法如下.

1) 求取雾霾车牌图像的暗原色图像:

$$I_{\text{dark}}(x) = \min_{c \in (r, g, b)} (\min_{y \in \Omega(x)} (I_c(y))). \quad (4)$$

2) 对雾霾车牌图像的暗原色图像进行滤波处理, 修复边界处的暗原色.

$$I_{\text{dark}}^{\text{refine}}(x) = \max_{y \in \Omega(x)} (I_{\text{dark}}(x)). \quad (5)$$

细化后的透射率:

$$t(x) = 1 - \omega \max_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_{\text{dark}}^{\text{refine}}(x)}{A} \right). \quad (6)$$

随机选取两张颜色不同的车辆车牌图像进行去雾处理, 去雾效果如图 1 所示.



图 1 去雾处理前后对比图

Fig. 1 The comparison charts of before and after defogging

选用峰值信噪比 (PSNR) 作为性能指标评判去雾效果. 其值越大说明去雾效果越好. 去雾前后图片的 PSNR 值如表 1 所示.

表 1 PSNR 指标数据

Tab. 1 Indicator data of PSNR

图像状态	白车 PSNR/dB	红车 PSNR/dB
去雾前	8.431	9.763
暗原色先验法	16.324	18.084
去雾后		
改进暗原色	17.213	19.101
先验法去雾后		

由表 1 可以看出: 暗原色先验算法具有良好的去雾效果; 算法改进后, 计算量减少, 去雾效果也略有提升.

2 车牌图像处理

去雾处理后的车牌图像无法直接用来识别, 需要经过预处理、定位与分割, 得到归一化的字符才能进行识别. 由于识别对象为去雾处理后的图像, 为了增加图像特征的鲁棒性, 笔者对处理后的字符图像进行粗网格特征提取, 以达到更好的识别效果.

2.1 车牌图像预处理

摄像头采集到的一般为 24 位真彩色图像 [8], 无法直接用来定位与分割, 这就首先需要对图像进行预处理. 这样可以消除各种噪声, 以减少对后续识别过程的干扰.

车牌图像预处理的过程包括二值化、边缘检测和形态学处理 [9]. 经过预处理, 可以得到轮廓清晰的二值化图像.

2.2 车牌图像的定位

利用投影法来进行车牌定位 [10], 具体为:

1) 上下边界定位. 逐行扫描二值化的图像, 当到达车牌部位时, 黑白像素会有规律的变化, 以此来确定车牌的上下边界. 具体算法为: 自上而下逐行扫描, 若某一行跳变点数 (黑白像素的交替点) 大于 12 时, 则认为该行为车牌上边界, 继续扫描, 直到跳变数小于 12, 认为该行为车牌下边界.

2) 左右边界定位. 自左向右逐列扫描, 第一次出现 6 个以上白像素的列, 为左边界, 继续扫描, 到终点, 最后一次出现 6 个以上白像素的列为右边界.

车牌定位的效果图如图 2 所示.



图2 车牌定位效果图

Fig. 2 The rendering of license plate positioning

2.3 车牌字符分割

由于字符的颜色与车牌的底色差异非常大,并且两个字符之间有一定的间距^[11].根据该规律可知车牌的投影特征图像中,每两个字符之间总有一段灰度为零,裁剪掉灰度为零的部分,就可以得到分割好的图像.图3为字符分割后的图像.



图3 车牌字符分割后图像

Fig. 3 The images of license plate character after segmentation

2.4 粗网格特征提取

为了增强图像的鲁棒性和抗干扰能力,减少个别像素点的误差累计对图像总体像素分布的干扰,选用粗网格特征提取法提取字符信息.粗网格特征提取法是将图像分割成若干个区域,统计每个区域的像素数目.若将图像分为 $N \times N$ 个区域,那么总的像素数目就构成了一个 N^2 维的特征向量.考虑到识别速度和准确率,在本次车牌识别中,选取 $N=8$.

3 基于 PSO-RBF 的字符识别

最常用的车牌识别算法是运用 BP 神经网络进行车牌识别,但是由于去雾处理增加了图像的干扰量,导致该方法准确率下降.而径向基神经网络抗干扰能力强,鲁棒性好,故选用径向基函数(radius basis function, RBF)神经网络来实现字符识别.为了更简单有效地确定 RBF 神经网络的参数,进一步提高识别的准确率,笔者用粒子群优化(PSO)算法对 RBF 神经网络参数进行优化.

3.1 RBF 神经网络

RBF 神经网络是具有单隐层的 3 层前馈网络.其输入层与隐层之间直接连接,而隐层与输出层之间为权连接.

其完成如下非线性映射:

$$f_n(\mathbf{X}) = w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{X} - \mathbf{C}_i\|), \quad (7)$$

式中: w_i 是权值; $\mathbf{X} \in \mathbf{R}_n$ 是输入矢量; $\phi(\bullet)$ 是一

个 $\mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}$ 的非线性函数,一般取高斯型函数:

$$\phi(\|\mathbf{X} - \mathbf{C}_i\|) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{X} - \mathbf{C}_i\|^2}{\sigma_i^2}\right). \quad (8)$$

式中: \mathbf{C}_i 和 σ_i 是基函数的数据中心和宽度; n 为中心数目.

RBF 神经网络中有两类待定的参数:其一为基函数的中心 \mathbf{C}_i 和宽度 σ_i , 以及中心数目 n ; 其二为输出层与隐层之间的连接权重.其中,确定基函数中心数目 n 的方法为减聚类法^[12].具体算法如下:

1) 将数据归一化为一个 n 维空间的 p 个数据点 (x_1, x_2, \dots, x_p) , 则 x_1 处的密度指标为:

$$D_i = \sum_{j=1}^p \left[-\exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{(\gamma_a/2)}\right) \right]. \quad (9)$$

2) 每个数据点的密度计算结束后,选择最高密度指标点作为第一个聚类点,标记为 D_{c1} .然后根据式(10)对每个数据点的密度指标进行更新.

$$\dot{D}_i = D_i - \sum_{i=1}^p \exp\left[-\frac{\|x_i - x_{cm}\|^2}{(\gamma_b/2)}\right]. \quad (10)$$

3) 每个点的密度指标都更新后,选定新的聚类中心,再次修正,直到选出的最高密度指标 $D_{\max} < \lambda D_{c1}$ (λ 为规定的一个非常小的值)为止.结束聚类,所得的聚类中心即为基函数中心的个数.

由于车牌的第一个字符为汉字,后 6 个字符为字母与数字的混合,故设计两个分类器,分别为汉字分类器与字母数字混合分类器.两个网络的输入均为 $N^2 = 64$.在不考虑特殊车牌的情况下,我国的车牌第一个汉字为京、津、晋、冀、蒙、辽、吉、黑、沪、苏、浙、皖、闽、赣、鲁、豫、鄂、湘、粤、桂、琼、川、贵、云、藏、陕、甘、青、宁、新、渝这 31 个汉字中的一个^[5],故汉字网络的输出节点为 31.为了区别于数字,26 个字母中“O”与“I”不出现在车牌中^[12],故字母数字混合网络的输出节点为 34.使用减聚类算法 30 次,对结果进行平均取整,得到两个网络的隐层节点分别为 36 和 50.然后用粒子群优化算法来确定基函数的中心 \mathbf{C}_i 和宽度 σ_i .

3.2 基于 PSO-RBF 神经网络学习算法

粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 等人于 1995 年提出的一种基于种群搜索的自适应进化计算技术,其思想来源于人工生命和演化计算理论^[13].

用 PSO 算法确定 RBF 网络权值的基本步骤如下:

步骤 1: 采集聚类样本;

步骤 2: 使用减聚类算法进行聚类分析,得到基函数的中心个数;

步骤 3: 粒子群的种群初始化;

步骤 4: 每个粒子的适应度 f_i 与它的最好位置的适应度相比较,选出最好,更新数据;

步骤 5: 每个粒子的适应度 f_i 与群体所经历最好位置的适应度相比较,选出最好,更新数据;

步骤 6: 不断调整粒子的位置和速度;

步骤 7: 一直重复步骤 4、5 与 6,直到多次迭代得到的解的差值小于 0.000 1;

步骤 8: 将群体所经历最好位置进行求解,得出基函数的宽度和中心位置;

步骤 9: 再次初始化粒子群的种群,随机选取调整权值 w_i ,此次适应度函数为 $G = \|Y_i - Z_i\|$,其中隐层输出 $Z_i = R_i(\|X - C_i\|)$,输出层输出 $Y = \sum_{i=1}^k w_i Z_i$;

步骤 10: 比较每个粒子的适应度 G 与它所经历的最好位置的适应度,选出最好,更新数据;

步骤 11: 比较每个粒子的适应度 G 与群体所经历最好位置的适应度,选出最好,更新数据;

步骤 12: 同样重复步骤 4、5 与 6,直到多次迭代得到的解的差值小于 0.000 1;

步骤 13: 输出最优参数,停止计算.

4 实验及结果分析

随机选取 5 张雾霾车牌图像进行去雾处理,去雾时间如表 2 所示.

表 2 算法改进前后的处理时间对比

Tab. 2 The time comparison of before and after the algorithm improved ms

图像编号	改进前时间	改进后时间
1	878	91
2	765	87
3	956	121
4	882	98
5	1 233	223
平均	943	124

由表 2 可知,改进后的算法去雾时间比改进前明显减少.通过大量的实验对比可以得出结论:改进后的暗原色先去雾算法能在保证去雾效果的同时,大幅提高实时性,符合车牌图像快速去雾需求.

选取 800 张雾霾车牌图像(其中 600 张来源于网络,200 张来自实验室研究人员各地实地拍

摄)仅进行预处理,得到归一化的字符,然后对处理后得到的字符进行筛选.选出 200 个汉字字符,这些字符中每个汉字至少出现 5 次.利用 matlab R2014a 仿真软件,分别用 BP 神经网络、RBF 神经网络与 PSO-RBF 神经网络方法进行训练,然后利用训练后的神经网络对 800 张车牌进行识别,统计出识别准确率.同理,训练字母数字神经网络,并进行识别,统计准确率.将上述过程重复进行 20 次,对得到的准确率求均值.对 800 张雾霾车牌图片分别进行普通去雾处理和改进去雾处理,依上文提高的方法进行训练与识别,同样重复进行 20 次试验,得到的均值结果如表 3 所示.

表 3 几种算法的识别准确率比较

Tab. 3 The recognition accuracy of several algorithms %

识别方法	汉字	字母/数字
BP 神经网络	75.33	76.34
RBF 神经网络	75.91	77.13
PSO-RBF 神经网络	77.23	78.14
BP 神经网络(普通去雾)	84.53	86.21
RBF 神经网络(普通去雾)	86.23	87.43
PSO-RBF(普通去雾)	89.14	91.33
BP 神经网络(改进去雾)	86.13	87.43
RBF 神经网络(改进去雾)	87.45	88.11
PSO-RBF(改进去雾)	91.27	91.56

通过表 3 中准确率的对比可以发现:未经去雾处理的雾霾车牌图像识别准确率较低,经过去雾处理后,雾霾车牌图像的识别准确率大幅度提高;利用 PSO-RBF 神经网络准确率略高于 BP 神经网络与 RBF 神经网络;基于 PSO-RBF 神经网络,使用改进去雾算法的系统对于雾霾天气下的车牌图像识别率最高.

仅仅利用均值来评价神经网络的性能是不够的,还需要利用 t -检验的方法,在统计学意义上对算法的性能进行了比较. t -检验是一种相对严格的基于概率意义的性能对比评价方法^[14].取 t -检验的分位数为单侧 0.05,自由度为 20, t -检验的临界值通过查表为 1.725.针对改进去雾后车牌雾霾图像识别结果,PSO-RBF 神经网络相对于 BP 神经网络的 t 值为 3.342,PSO-RBF 神经网络相对于 RBF 神经网络的 t 值为 2.429.可知 PSO-RBF 神经网络无论在准确率还是稳定性方面均高于 BP 神经网络和 RBF 神经网络.

5 结论

针对雾霾车牌图像识别时间长、识别率低的

缺点,提出基于 PSO-RBF 神经网络的车牌识别系统.通过改进去雾算法,明显地减少了暗原色先验法去雾时间,提高了系统的实时性.同时,利用 PSO-RBF 神经网络对雾霾车牌图像进行识别,克服了去雾后图像干扰增多的影响,提高了识别的准确率.通过大量实验得出结论,该系统能在保证去雾效果的同时,减少去雾时间,提高识别准确率.

参考文献:

- [1] 张涛,王剑魁,张国山.多雾霾天气车牌识别系统图像预处理算法[J].山东理工大学学报(自然科学版),2015,29(1):15-19.
- [2] 吴迪,朱青松.图像去雾的最新研究进展[J].自动化学报,2015,41(2):221-239.
- [3] HE K, SUN J, TANG X. Single image-haze removal using dark channel prior [C]//Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Miami, FL, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.
- [4] 孙小明,孙俊喜,赵立荣.暗原色先验单幅图像去雾改进算法[J].中国图象图形学报,2014,19(3):381-385.
- [5] 李志强,李永斌.车牌识别技术的发展及研究现状[J].科技信息,2012(5):110,125.
- [6] 昝润华,苏婷婷,马晓伟. BP 神经网络联合模板匹配的车牌识别系统[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(9):1221-1226.
- [7] 毛晓波,郝向东,梁静.基于 ELM 与 Mean Shift 的遮挡目标跟踪算法[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(1):1-5.
- [8] 马爽,樊养余,雷涛.一种基于多特征提取的实用车牌识别方法[J].计算机应用研究,2013,30(11):3495-3499.
- [9] 宁彬.图像处理技术在机动车车牌自动识别技术中的应用[J].科学技术与工程,2013,13(2):366-371.
- [10] 冯慧娜,白艳萍,胡红萍.一种基于图像处理和投影的车牌定位方法[J].电子科技,2010,23(11):5-7.
- [11] 郑巧,唐鹏,韦璞.基于自适应投影分割的接触网号牌字符提取[J].信息技术,2016(5):58-62.
- [12] 杨飞,胡万强,李耀辉.基于 RBF 元模型集的多变量全局优化算法研究[J].郑州大学学报(理学版),2016,48(2):116-120.
- [13] 梁静,宋慧,瞿博阳.基于改进粒子群算法的路径优化问题研究[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(1):34-38.
- [14] 李鹏飞.随机性优化算法性能定量对比评价方法与应用[D].北京:中国工程物理研究院,2013.

The Haze Plate Recognition System Based on PSO-RBF Neural Network

MAO Xiaobo, ZHANG Qun, LIANG Jing, LIU Yanhong

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

Abstract: In this paper, a new algorithm of license plate recognition in the hazy weather was designed. Firstly, defogging operation was introduced for license plate image in the environment of hazy by using improved dark channel prior. Then after the pretreatment, positioning, segmentation and extraction, coarse grid characteristic matrix is obtained. Finally, radial basis function (RBF) neural network, which was optimized by particle swarm algorithm in advance, was used to identify the character. The experiment results showed that the improved algorithm not only had a good effect on haze removal, but also reduced the duration of defogging, which effectively improve the license plate recognition speed and accuracy in fog and haze weather.

Key words: license plate recognition; dark channel pixel; particle swarm optimization; radial basis function

文章编号: 1671-6833(2017)04-0051-06

基于概率自适应蚁群算法的云任务调度方法

王俊英^{1,2}, 颜芬芬^{1,2}, 陈鹏¹, 董方敏^{1,2}, 臧兆祥¹

(1. 三峡大学 计算机与信息学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对基本蚁群算法在求解云任务调度问题时易陷入局部最优的不足, 提出一种任务分配概率自适应的蚁群算法。算法根据任务量的大小对任务进行降序排序。定义了任务分配集中度, 引入了概率自适应调整因子对任务分配过于集中的资源节点的分配概率进行调整。结果表明, 相对基本蚁群算法及改进蚁群算法, 该算法有效地缩短了任务完成时间, 且算法的执行效率、收敛速度均有一定程度的改善。

关键词: 云计算; 任务调度; 蚁群算法; 概率自适应

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.018

0 引言

云计算是将计算任务分布在大量计算机构成的数据中心, 通过网络、硬件及系统软件等为用户提供服务^[1]。云计算模式涵盖范围非常广泛, 从底层的软、硬资源聚集管理到虚拟化计算池, 乃至通过网络提供各类计算的服务。它将带来生活、生产方式和商业模式的深刻改变, 已成为当前社会关注的热点。任务调度是云计算研究的核心问题之一, 对云计算中心整体性能发挥影响很大^[2]。由于云任务调度是一个 NP 难题, 对于用户提交的任务, 云任务调度器可根据用户对计算、存储和网络等的特定需求将资源动态划分给用户, 仅采用简单的分配调度方法, 如轮转算法、加权轮转法和最小负载优先法等, 很难满足用户及云计算中心性能要求^[3]。近些年仿生智能算法备受各界学者的关注, 已在连续空间约束优化^[4]、任务分配^[5]、图形分割^[6]等问题上得到广泛应用。20世纪90年代意大利学者 Dorigo 通过模拟蚂蚁的群体行为提出蚁群算法(ant colony optimization, ACO)^[7]。由于其正反馈、分布式并行、鲁棒性及可扩展性等特点, 在解决组合优化问题上, 具有较大优势^[8]。为进一步提高 ACO 算法性能, 文献[9]结合遗传算法全局收敛的特点, 将遗传

算法融入到蚁群算法中, 以避免算法局部收敛; 文献[10]提出自适应路径选择和信息素更新的蚁群算法, 提高了算法的全局搜索能力及收敛速度; 文献[11]改进算法局部更新策略, 提出一种高效鲁棒的蚁群算法; 文献[12]提出遗传蚁群算法, 以遗传算法随机产生的二进制编码个体, 对蚁群算法的路径选择概率进行调整。然而, 这些算法在实际运行过程中, 仍有一定的局限性, 解的质量也有待进一步提高。针对上述问题, 笔者深入研究了蚁群算法机制, 分析了云环境的特殊性质, 提出基于概率自适应蚁群算法(probability adaptive ant colony optimization, PAACO)的云任务调度方法。

1 云计算任务调度问题描述

笔者对云任务调度为将 m 个相互独立的任务分配到 n 个异构资源节点上, 使得任务完成时间较短。为深入分析问题, 建立如下云任务调度模型。

定义 1 设任务集合 $TASK = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, 表示在当前时刻任务队列共有 m 个相互独立的任务, 任务大小用百万指令(million instructions, MI)表示, 一个任务只能在一个资源节点上处理。

定义 2 由于云任务粒度越小对总任务的完

收稿日期: 2016-11-19; 修订日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272236、61272237、61502274); 湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB336); 三峡大学人才科研启动基金项目(KJ2011B011、KJ2013B064)

作者简介: 王俊英(1971—), 女, 湖北黄梅人, 三峡大学副教授, 博士, 主要从事人工智能与模式识别方面的研究, E-mail: wannjy@qq.com.

成时间程度影响越小,笔者根据任务大小对其按降序排列,以此序列作为任务调度顺序。

定义 3 云计算中心的可用资源包括服务器、普通 PC 及各种处理单元. 假设云计算中有 n 个计算资源, 表示为 $RE = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, 处理能力用百万指令每秒 (million instructions per second, MPIS) 表示. 设定任务数量大于资源数量, 即 $m > n$, 更符合云计算中心调度任务的实际情况。

定义 4 任务在资源节点上预期完成时间集

合用矩阵 ETC 表示, $ETC = \begin{bmatrix} etc_{11} & \cdots & etc_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ etc_{m1} & \cdots & etc_{mn} \end{bmatrix}$,

通过 $etc_{ij} = S_{T_i} / P_{R_j}$ 估计任务完成时间, S_{T_i} 表示第 i 个任务的大小, P_{R_j} 表示第 j 个资源节点的处理能力。

设定矩阵 X 的大小为 $m \times n$, 表示任务与资源的映射关系, 即一种任务分配方案, x_{ij} 为 X 中元素, $x_{ij} \in \{0, 1\}$, 若第 i 个任务分配到第 j 个资源节点上, x_{ij} 为 1, 否则为 0. 将 m 个任务分配到 n 个资源上, 任务的总完成时间: $F_{time} = \max(\sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot etc_{ij})$, 优化目标: $\min F_{time}$.

2 基于蚁群算法的云任务调度

蚁群算法的实质为蚂蚁通过个体之间的信息素交流达到合作. 笔者以经典的 TSP 为例, 说明运用蚁群算法对云任务调度的过程。

构建图 $G = (C, L)$ 来描述平面上的 n 个城市节点, C 为城市集合, L 表示城市节点间的距离集合. 假设有 m 只蚂蚁, 第 k 只蚂蚁已经访问过的城市节点存放于 $Tabu_k$ 禁忌表中, $Allowed_k = \{C - Tabu_k\}$, 表示第 k 只蚂蚁未到达的城市节点集合. d_{ij} 表示城市 i 与城市 j 之间的距离, $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$, 表示从城市 i 到城市 j 的启发式期望程度, τ_{ij} 表示在 t 时刻路径 (i, j) 上信息素残留量. 在初始时刻, 令各路径上信息素含量 $\tau_{ij}(0) = w$, w 为常数, 则在 t 时刻, 第 k 只蚂蚁从城市 i 转移到城市 j 的概率为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^n [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & j \in Allowed_k; \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为信息素影响力因子, 反映了路径累积的信息素含量对蚂蚁路径选择的影响程度; β 为启发信息影响因子, 反映了蚂蚁在行进过程中, 启发信息对路径选择的影响程度. 通常取 $\alpha = 1, \beta =$

2 ~ 5. 为避免信息素无限累积, 采用如下方式对信息素更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k, \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{边}(i, j) \text{ 在第 } k \text{ 只蚂蚁构建的路径 } T_k \text{ 上;} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)表示在下一时刻, 路径 (i, j) 上信息素浓度, $\rho \in (0, 1]$ 表示信息素挥发因子, 通常取 $\rho = 0.5$; $\Delta \tau_{ij}^k$ 表示第 k 只蚂蚁向边 (i, j) 释放的信息素量. 式(3)中, Q 为常数, 表示信息素强度, 通常取 $Q = 1$; L_k 表示路径 T_k 的长度^[13].

由于云计算环境的独特性, 在运用基本蚁群算法解决云任务调度问题时, 还需将 TSP 问题与云任务调度问题进行差异性分析. 两者的差异性为:

1) 在 TSP 问题中, 对于蚂蚁到达过的城市节点, 蚂蚁不能重复访问; 云环境中, 对于已经被分配过的任务不能再次被分配。

2) 在 TSP 问题中, 蚂蚁访问城市节点的总距离影响信息素更新; 云环境中, 通过资源与任务的较优组合所得的相关系数表示信息素浓度。

3) 在云计算环境中, 资源对任务的启发信息用资源的能见度表示, 资源能见度包括资源的计算能力、通信能力、存储能力等相关参数。

3 基于 PAACO 算法的云任务调度

ACO 算法具有正反馈、分布式并行的特点, 但易陷入局部最优. 在运用 ACO 算法对任务进行调度时, 蚂蚁根据任务与资源节点间信息素浓度及资源对任务的启发信息来分配任务, 若信息素含量过高, 任务分配到资源节点的集中程度则过大, 可能使算法因过强的正反馈信息陷入局部最优。

为避免算法局部收敛, 当算法累计多次未更新最优解, 则认为算法已陷入局部最优, 为使算法跳出局部最优解, 笔者定义任务分配集中度概念, 引入任务分配概率自适应调整因子, 对任务分配集中度过高的任务分配概率进行调整, 避免算法由于过强的正反馈信息导致局部收敛。

通过分析可知, 由于算法在迭代后期, 将逐渐趋于收敛, 此时任务分配集中度已相对较高, 若再引入概率自适应调整因子对任务分配概率进行调整, 将导致算法收敛速度慢甚至无法收敛, 因此本文 PAACO 算法中的任务分配概率自适应调整方法仅在迭代前期实施。

3.1 任务分配集中度

笔者首先定义任务分配集中度的概念. 假设在上一代已生成最优路径矩阵中, 对于任务 i , 每只蚂蚁遍历各个资源节点对任务进行一次分配, 设任务 i 分配到资源节点 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 对应的蚂蚁个数依次为 $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{ij}, \dots, \theta_{in}$, 即有 θ_{ij} 只蚂蚁将任务 i 分配到资源节点 j 上, 蚂蚁总数量为 m' , 则任务分配集中度定义为:

$$d_i = \max_{j=1}^n \left(\frac{\theta_{ij}}{m'} \right), \quad (4)$$

即 i 任务与资源节点映射关系 (T_i, R_j) 中对应的蚂蚁数量与总蚂蚁数量比值的最大值.

3.2 任务分配概率自适应调整方法

PAACO 算法中通过判断任务分配集中程度, 引入任务分配概率自适应调整因子对大于任务分配集中度阈值的任务分配概率进行调整, 任务分配概率自适应调整因子定义为:

$$T_{ij} = \begin{cases} c \cdot e^{1-\theta_{ij}/m'}, & d_i > \mu; \\ 1, & \text{else.} \end{cases} \quad (5)$$

其中, μ 表示任务 i 分配到资源节点的集中度阈值, $\mu \in (0, 1)$; c 为常数, 用来控制调整因子变化的幅度. 在上一代生成的最优路径矩阵中, 对于任务与资源映射关系 (T_i, R_j) 中对应的蚂蚁数量 θ_{ij} 越大, 表示蚂蚁对任务 i 分配时越集中于资源节点 j 上, 则调整因子 T_{ij} 值越小, 反之, 调整因子值越大; θ_{ij}/m' 表示映射关系 (T_i, R_j) 中对应蚂蚁个数相对总蚂蚁数量的比值. 笔者通过任务分配概率自适应调整因子对任务分配概率进行调整, 降低映射关系 (T_i, R_j) 中对应蚂蚁数量相对总蚂蚁数量较高的任务分配概率, 增大蚂蚁数量相对总蚂蚁数量较低的任务分配概率, 从而达到降低任务分配集中度的效果, 提高算法的搜索范围, 加快算法的收敛速度.

引入任务分配概率自适应调整因子后的任务分配概率 p_{ij}^k 表示为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{T_{ij} \cdot [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^n T_{ij} \cdot [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & i \in AllowedTask_k; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\eta_{ij}(t)$ 为启发信息, 表示任务被分配到资源节点的期望程度, 令 $\eta_{ij}(t) = P_{R_j}$; α, β 分别为信息

素影响力因子和资源固有属性影响力因子; $AllowedTask_k$ 表示可分配任务列表, 对于已经被分配的任务存放于禁忌表 $Tabu_k$ 中.

运用 PAACO 算法对任务进行分配时, 调整信息素更新公式为:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k, \quad (7)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{F_{time}^k}, & x_{i,j}^k = 1; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_{time}^k 表示第 k 种分配方案的所得任务总完成时间; $x_{i,j}^k = 1$ 表示第 k 种方案中第 i 个任务分配被分配到第 j 个资源节点上.

3.3 基于 PAACO 算法的任务调度流程

根据 PAACO 算法建立的任务调度模型, 算法输入: 任务集合 $TASK$, 资源集合 RE , 蚁群规模 m' , 启发信息影响因子 α , 信息素影响因子 β , 信息素挥发因子 ρ 等参数, 算法输出: 一个大小为 $m \times n$ 的矩阵, 表示任务的分配方案. 蚂蚁根据启发信息及路径信息素含量, 在任务和资源节点构成的网状结构上爬行, 当所有的任务分配完成, 则表示爬行结束. 运用 PAACO 算法进行云任务调度的具体步骤如下:

步骤 1 初始化信息素矩阵, 定义任务分配概率自适应调整方法终止代数为 ND , $ND \leq \sigma \cdot NC_{min}$, ($0 < \sigma \leq 0.5$), 设定算法停滞阈值 $\varepsilon = F_{time}^{NC-\lambda} - F_{time}^{NC}$, 当迭代次数超过最小迭代次数, 且连续迭代 λ 次更新的任务总完成时间差小于阈值 ε , 则终止迭代;

步骤 2 定义可分配任务列表 $AllowedTask$ 、禁忌表 $Tabu$, 给 m' 只蚂蚁分配任务列表;

步骤 3 判断当前迭代次数 NC 是否小于 ND , 是, 则执行步骤 4, 否, 则执行步骤 5;

步骤 4 判断算法是否陷入局部最优, 是, 则根据任务分配集中度阈值引入任务分配概率自适应调整因子, 根据式 (6) 及轮盘赌策略对任务 i 分配资源; 否, 则执行步骤 5;

步骤 5 不引入动态调整因子, 根据任务分配概率及轮盘赌策略对任务 i 分配资源节点;

步骤 6 更新信息素及最优解 $bestF$, 令 $bestF = \min(F_{time}^k)$, 更新当前迭代次数 NC ;

步骤 7 判断是否达到终止条件, 是, 则统计数据, 输出结果, 否, 则执行步骤 2.

4 仿真结果与分析

4.1 实验设计

CloudSim^[14] 仿真平台由澳大利亚墨尔本大学网络实验室提出,平台通过 DatacenterBroker 模拟了一个代理,用户通过在该类中添加自定义算法来实现云任务调度仿真.笔者搭建了 Cloudsim-3.0 仿真平台,在 DataCenterBroker 类中构造 PAACO 任务调度算法,在该平台中创建 Task-Scheduling.java 类,调用 Cloudlet 类及 Vm 类实现对任务属性及资源属性的定义,调用编写的任务调度算法实现对云任务调度的模拟仿真.取 8 组实验数据对算法进行检验,设定任务及资源属性参数如表 1 所示.

表 1 任务及资源参数设置

Tab.1 Task and resource parameter settings

参数名	参数值
任务长度	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8$ MI
任务数量	$250 \times N$, N 为正整数且 $N \in \{1, 2, \dots, 8\}$
资源数量	50
资源性能	$1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ MIPS

4.2 实验分析

为保证实验的有效性,实验结果为算法运行 20 次所得数据的平均值.试验中蚁群数量取 10,参数 α 和 β 在常用范围内取值,运行 PAACO 算法及基本蚁群算法(ACO),可得两种算法均在 $\alpha = 1, \beta = 2$ 时所得实验效果最好;因笔者不讨论信息素挥发因子对算法的影响,故取中间值 $\rho = 0.5$;通过多次实验可见,算法收敛速度较快,实验过程经过 30 次迭代后逐渐收敛,因此将迭代次数设定为 30,算法停滞阈值 $\varepsilon = 10$.本文算法主要通过设定概率自适应调整方法终止代数占算法执行最小代数的比例 σ 及任务集中度阈值 μ ,以实现算法最优.

为逐一验证任务排序方法及概率自适应调整方法的有效性,笔者将仅采用概率自适应调整的蚁群算法命名为 PAACOI 算法.取任务量为 1 000,对参数 σ 及 μ 的取值进行调整,以检验参数值对所提算法的寻优能力及收敛速度的影响.所得任务完成时间及迭代次数如表 2 所示.

由表 2 可知,当 PAACO 算法与 PAACOI 算法的参数值相同时,PAACO 算法所得任务完成时间均优于 PAACOI 算法,说明对任务进行降序排序能有效地缩短任务完成时间.

多次实验可得,当 $\sigma = 0.25, \mu \in [0.3, 0.6]$

时,PAACO 算法与 PAACOI 算法所得任务完成时间及算法的迭代次数均能取得较好值,而当 $\mu = 0.3$ 时,任务完成时间与算法迭代次数均得到最好值.

表 2 任务完成时间及迭代次数

Tab.2 The task completion time and iteration times

参数值	PAACO		PAACOI		
	完成时间/s	迭代次数	完成时间/s	迭代次数	
$\sigma = 0.25$	$\mu = 0.1$	26 655	36	26 771	39
	$\mu = 0.3$	25 737	33	26 351	35
	$\mu = 0.6$	26 397	36	26 463	37
	$\mu = 0.9$	26 519	38	26 562	38
$\mu = 0.3$	$\sigma = 0.35$	26 570	36	26 623	36
	$\sigma = 0.45$	26 716	37	26 789	38

当 $\sigma = 0.25, \mu = 0.1$ 及 $\mu = 0.9$ 时,算法所得任务完成时间及迭代次数均相对较差,此种情况是由于将任务集中度阈值设定过低,不能较好体现任务分配集中程度的差异,过高则不能达到执行概率自适应调整方法条件,故均不利于算法寻优.

当 $\mu = 0.3$ 时, σ 越大,即概率自适应调整方法影响的迭代次数越多,算法表现的效果越不理想,此种情况是由于算法在迭代中期较优的任务分配方案所对应的信息素在逐渐累积,若继续运用所提方法对算法进行调整,将不利于较优分配方案对应的信息素累积,从而导致算法不能收敛到全局最优解.

将本文 PAACO 算法及 PAACOI 算法(参数均取最优值)与 ACO 算法及文献[9]中的 MACO 算法进行对比实验,所得任务完成时间如表 3 所示.

表 3 任务完成时间

Tab.3 The task completion time

任务数量	PAACO	PAACOI	ACO	MACO
250	7 811	7 905	7 960	7 949
500	14 178	14 200	14 384	14 309
750	20 362	20 405	20 719	20 744
1 000	25 737	26 351	26 678	26 638
1 250	32 866	33 129	33 714	33 572
1 500	39 228	39 419	40 020	39 449
1 750	45 372	45 584	45 842	45 634
2 000	52 004	52 093	52 534	52 326

由表 3 数据可知,在任务量为 250 ~ 2 000 时,PAACOI 算法和 PAACO 算法的任务总完成时间均低于 ACO 算法及 MACO 算法,说明 PAACOI 算法能有效地缩短任务总完成时间.而结合了任务排序方法的 PAACO 算法可以更有效地缩短任务完成时间,且在任务量改变的情况下,算法均具

备较好的寻优能力.而MACO算法虽将遗传算法融入到蚁群优化算法的每一次迭代中,增加了种群的多样性,但由于采用的交叉、变异策略对算法的影响力度有限,并不能使算法很好地获得全局最优解.由表3可知,PAACO算法相对ACO算法,任务平均总完成时间降低了1.77%,相对MACO算法平均总完成时间降低了1.27%.

为了验证算法的执行效率,笔者统计了4种算法的收敛代数及执行8个任务集各算法的花费时间.实验结果如表4所示,执行时间如图1所示.

表4 算法收敛代数

Tab.4 Iteration times of algorithm convergence

任务数量	PAACO	PAACO I	ACO	MACO
250	35	35	36	36
500	36	36	39	37
750	35	36	37	37
1 000	33	35	38	38
1 250	36	36	38	37
1 500	37	38	39	39
1 750	35	37	38	38
2 000	36	37	38	37

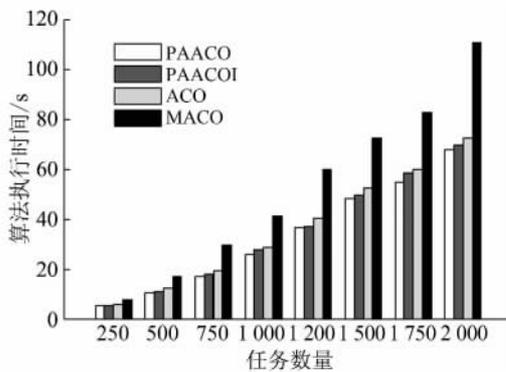


图1 算法执行时间

Fig.1 Execution time of algorithm

由表4可知,本文PAACO算法及PAACO I算法的收敛代数均低于ACO算法及MACO算法,表明任务分配概率自适应调整方法提高了算法的寻优能力,可使算法具备较快的收敛速度.本文PAACO算法相对ACO算法,收敛速度提高了6.60%,相对MACO算法提高了5.35%.

由图1可知,PAACO算法执行时间均低于ACO算法及MACO算法,说明对任务排序,同时采用任务分配概率自适应调整方法能有效地提高算法的执行效率.MACO算法的执行时间最长,是因为该算法将遗传算法融入到蚁群优化算法的每一次迭代中,额外消耗了较多的时间.通过实验对比,本文PAACO算法平均执行时间相对ACO算

法降低了8.84%,相对MACO算法降低了37%.

由于本文PAACO算法、PAACO I算法仅执行效率相对MACO算法优势明显,为验证所提算法的有效性,笔者对各算法所得结果进行统计检验.

根据实验数据可知,任务量的变化对本文所讨论的4种算法的任务完成、迭代次数及算法执行时间无明显影响,故取任务量为1 000,将4种算法均执行50次,对各算法所得的任务完成时间、迭代次数以及执行时间进行分析.在对样本进行统计检验时,需预知样本的分布特征,笔者运用Kolmogorov-Smirnov检验方法,通过SPSS软件计算可得4种算法所得的样本均符合正态分布.

为进一步确定能否运用独立样本t检验方法来检验本文算法所得3项检验样本相对ACO算法及MACO算法所得样本的差异显著性,需分别对由PAACO算法、PAACO I算法相对ACO算法、MACO算法组成的4组实验组进行方差齐性检验.通过SPSS软件计算可知,4组实验组对应的3项指标方差均为齐性,由此表明实验可运用独立样本t检验方法.

假设PAACO算法、PAACO I算法所得3项检验样本相对ACO算法及MACO算法无显著性差异,设定概率显著性水平 $\alpha = 0.05$,通过独立样本t检验方法所得显著性检验值如表5所示.

表5 显著性检验值

Fig.5 Significant test values

算法对比	任务完成时间	迭代次数	算法执行时间
PAACO I vs. ACO	0.449	0.161	0.016
PAACO I vs. MACO	0.580	0.214	0.000
PAACO vs. ACO	0.223	0.032	0.000
PAACO vs. MACO	0.295	0.049	0.000

由表5可知,PAACO I算法相对ACO算法及MACO算法,执行时间样本所得的显著性检验值均小于0.05,因此拒绝原假设,故仅采用概率自适应调整方法的PAACO I算法的执行时间相对ACO算法和MACO算法有显著性差异.

PAACO算法相对ACO算法及MACO算法,迭代次数和算法执行时间有显著性差异,表明将任务排序方法和概率自适应调整方法结合,能更为有效地提高算法的效率.

因此由统计检验结果可得,PAACO算法相对ACO算法、MACO算法,尽管所得任务完成时间没有显著优势,但迭代次数及执行效率的优化程度较为显著,是一种有效的云任务调度方法.

5 结论

笔者针对基本蚁群算法易陷入局部最优的缺

陷,结合云计算任务调度特点,依据任务量大小对任务进行排序,同时引入任务分配概率自适应调整因子,对任务分配集中度过高的任务分配概率进行调整,不仅有效地避免了算法局部收敛,而且改善了算法的执行效率和收敛速度.实验表明,本文 PAACO 算法在执行效率上优于 ACO 算法及 MACO 算法,任务完成时间也在一定程度上有所降低.目前,该算法只在静态任务调度方面得到了验证,对于云计算资源节点失效等不可预见的动态云计算环境中任务调度问题,算法的有效性还需进一步研究探讨.

参考文献:

- [1] ARMBRUST M, FOX A, GRIFFITH R, et al. A view of cloud computing [J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(4): 50–58.
- [2] 田文洪,赵勇.云计算资源调度管理[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 张建勋,古志民,郑超.云计算研究进展综述[J].*计算机应用研究*, 2010, 27(2): 429–433.
- [4] 焦留成,邵创创,程志平.一种求解连续空间约束优化问题的蚁群算法[J].*郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(1): 20–23.
- [5] AL-MAAMARI A, OMARA F A. Task scheduling using PSO algorithm in cloud computing environments [J]. *International journal of grid and distributed computing*, 2015, 8(5): 245–256.
- [6] FU J C, CHEN C C, CHAI J W, et al. Image segmentation by EM-based adaptive pulse coupled neural networks in brain magnetic resonance imaging [J]. *Computerized medical imaging and graphics*, 2010, 34(4): 308–320.
- [7] DORIGO M, BIRATTARI M, STUTZLE T. Ant colony optimization [J]. *Computational intelligence magazine*, IEEE, 2006, 1(4): 28–39.
- [8] MISHRA R, JAISWAL A. Ant colony optimization: A solution of load balancing in cloud [J]. *International journal of web & semantic technology*, 2012, 3(2): 33–50.
- [9] 王永贵,韩瑞莲.基于改进蚁群算法的云环境任务调度研究[J].*计算机测量与控制*, 2011, 19(5): 1203–1204.
- [10] 赵宝江,李士勇,金俊.基于自适应路径选择和信息素更新的蚁群算法[J].*计算机工程与应用*, 2007, 43(3): 12–15.
- [11] NAIMI H M, TAHERINEJAD N. New robust and efficient ant colony algorithms: Using new interpretation of local updating process [J]. *Expert systems with applications*, 2009, 36(1): 481–488.
- [12] ZUKHRI Z, PAPUTUNGAN I V. A hybrid optimization algorithm based on genetic algorithm and ant colony optimization [J]. *International journal of artificial intelligence & applications*, 2013, 4(5): 63–75.
- [13] 黄竞伟,朱福喜,康立山.计算智能[M].北京:科学出版社,2010.
- [14] CALHEIROS R N, RANJAN R, BELOGLAZOV A, et al. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms [J]. *Software: practice and experience*, 2011, 41(1): 23–50.

Task Scheduling Method Based on Probability Adaptive Ant Colony Optimization in Cloud Computing

WANG Junying^{1,2}, YAN Fenfen^{1,2}, CHEN Peng¹, DONG Fangmin^{1,2}, ZANG Zhaoxiang¹

(1. College of Computer and Information, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Intelligent Vision Based Monitoring for Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The basic ant colony algorithm tended to be trapped in local optimum in solving task scheduling problems of cloud computing. A probability adaptive ant colony optimization was proposed. This algorithm ranked the tasks in descending order according to their size, defines the task concentration degree, and introduces the probability adaptive adjustment factor to adjust the assignment probability of over-concentrated resource node. The results showed that the proposed algorithm shortened the task completion time, and had some improvements on convergence speed, compared with the Ant Colony Optimization and Modified Ant Colony Optimization.

Key words: cloud computing; task scheduling; ant colony optimization; probability adaptive

文章编号: 1671-6833(2017)04-0057-08

基于图的概念重现发现与预测

白洋¹, 王志海¹, 孙艳歌^{1,2}

(1. 北京交通大学 计算机与信息技术学院, 北京 100044; 2. 信阳师范学院 计算机与信息技术学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 概念漂移是数据流挖掘中具有挑战性的问题. 当概念漂移发生后, 原有分类模型的分类正确率会显著下降, 因此需要及时发现并调整模型以适应这些改变. 概念重现是概念漂移的特殊情况, 然而已有的算法大多未能充分考虑这种状况. 为此, 提出一种能够处理重现的概念检测方法. 试验结果表明, 该方法能够以较低的延迟和较低的误报率检测到概念漂移, 并且可以识别重现的概念, 很大程度上提升了分类器的分类正确率.

关键词: 数据流; 数据挖掘; 概念漂移; 漂移检测; 概念重现

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.021

0 引言

数据挖掘的基本问题是处理随时间增长的大量数据, 待处理的海量数据都以高速有序的形式到达, 此类数据称为数据流^[1]. 在动态变化和不平稳的环境中, 数据分布会随着时间改变从而产生概念漂移现象^[2]. 在这里概念就是指分类问题中输入变量 X 和目标变量 y 之间的联合概率. 那么, 概念漂移就是指输入变量和目标变量之间联合概率的变化^[3], 如下式所示:

$$P(X^{t_0}, y_1^{t_0}) \neq P(X^{t_1}, y_2^{t_1}). \quad (1)$$

式(1)定义了时间 t_0 和 t_1 之间的概念漂移. 其中可能是 $P(y)$ 发生了改变, 也可能是 $P(X|y)$ 发生了改变. 现实生活中有许多关于概念漂移的例子. 例如, 在垃圾邮件分类问题中, 垃圾邮件的发送者为了避免自己发送的邮件被过滤掉, 会对邮件中的一些关键字进行修改, 从而躲避检测. 或者是邮件的接收者对于某一类邮件的态度的转变, 某类邮件在某段时间被接收者认定为垃圾邮件, 可能过了一段时间之后接收者突然转变对此类邮件的态度, 从而变得愿意接收此类邮件. 又例如, 当预测超市一周的销售额时, 往往会根据广告投入和促销活动等因素进行预测, 但是建立的预测模型

不可能一直都保持较高的预测正确率, 因为销售额可能会受假期等因素的影响. 影响销售行为的因素会随时出现, 因而无法避免. 故而在处理有概念变化的数据时, 要注意当数据流中出现变化时模型的自适应问题. 概念漂移检测能够及时捕捉到数据流的变化, 并在发生变化后更新模型, 使分类模型能够保持较高的分类正确率.

当出现概念漂移现象时, 漂移后产生的概念可能是从未出现过的新概念, 也可能是曾经出现过的概念^[4]. 概念重现^[5]是概念漂移的特殊情况, 它是指一个新概念出现在数据流中, 然后消失一段时间之后再次出现的现象. 在概念重现的情况下, 以前出现过的概念会在将来再次出现, 因此旧的分类模型可以用于将来的分类. 但是现有检测概念漂移的文献大多会忽略这种现象, 它们总是把漂移后产生的概念当做是一个新概念, 没有考虑这个概念是否在过去出现过.

针对这一问题, 笔者首先提出一种概念漂移的检测方法 (distribution-based detection method, DBDM), 并在此基础上提出了一种检测概念重现的方法 (recurrent detection and prediction, RDP), 此方法检验当前是否发生了概念重现, 并有效地提高了分类正确性.

收稿日期: 2016-11-03; 修订日期: 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61572417, 61572005); 北京市自然科学基金资助项目(4142042); 信阳师范学院青年骨干教师资助计划项目(2016GGJS-08).

通信作者: 王志海(1963—), 男, 河南安阳人, 北京交通大学教授, 主要从事数据挖掘和机器学习等方面的研究, E-mail: 14120375@bjtu.edu.cn.

1 相关工作

在数据流的研究领域中,对于概念漂移的处理可分为基于触发的方法和逐渐演化的方法^[6].基于触发的方法利用明确的检测方法来指出概念变化,并根据检测的结果来决定是否更新分类模型.然而逐渐演化的方法不检测变化,这种方法通常会保持一组分类模型,并基于它们的性能定期进行更新.

Gama 等提出的 DDM 算法^[7]通过监控当前模型的错误率来检测变化. Baena-Garcia 等发现 DDM 方法在检测渐变的概念漂移时效果不佳,为此提出了 EDDM 算法^[8],提高了检测渐变概念漂移的效果. ADWIN 方法^[9]中滑动一个固定的检测窗口,存放最近读入的数据,采用指数直方图的变形作为数据结构,检测窗口中的数据变化. Ross 等^[10]提出了 EWMA (exponentially weighted moving average charts) 算法,利用指数加权移动平均控制图 (exponentially weighted moving average charts) 监控错误率,当错误率超过一定阈值,则说明发生概念漂移. Sakthithasan 等^[11]和 Pears 等^[12]提出了 SeqDrift 检测算法,该方法采用蓄水池抽样来进行内存管理,很大程度上提高了在缓慢变化情况下的检测灵敏度.

SEA 算法^[13]是最早利用从数据流中学习得到的分类器集成处理概念漂移的算法,根据简单多数投票做出预测. EB 算法^[14]也是一种集成方法,它利用连续的数据块来创建分类器,根据每个分类器在最后一个数据块上的分类正确率来决定该分类器的权值,它也能处理概念重现的现象. OCBBoost^[15]是一种在线 boosting 算法,它将几种其他的在线 boosting 算法互相联系起来以获得更好的性能. DDD 算法^[16]是基于分类器差异性的动态集成方法,算法中还使用了内部漂移检测来加速自适应. ADACC 算法^[17]是一种主动处理概念漂移现象并且能够处理重现概念的集成方法. OAUE 算法^[18]根据每个基分类器在连续的时间和空间中的错误率来权衡它们的性能. PDSRF 算法提出了一种基于随机森林算法的决策树集成算法来处理概念漂移数据流^[19].

在最新的关于概念重现的文献中, Katakis 等^[20]采用数据流聚类的方法构造和更新分类器的集成,当一批新实例到达,识别这批数据属于哪一个概念,应用对应的分类器来预测实例的类标; Gomes 等^[21]提出一个基于情境感知的数据流学习系统,根据概念和上下文来添加或删除分类器;

Abad 等^[22]提出一个解决概念重现问题的框架,用于垃圾邮件的检测问题.

2 基于数据分布的漂移检测算法

笔者提出的基于数据分布的概念漂移检测算法通过监控不同时间窗口中的数据分布来检测是否有漂移产生,本章主要介绍这种监控数据分布的方法.

2.1 问题描述

在数据流环境中,每到来 M 个数据,就把这 M 个数据与之前的数据之间的分界点看做是一个检测点,并把这 M 个数据看做是一个数据块. 遍历每一个检测点,检验检测点两侧的数据是否来自同一分布. 如果发现它们来自不同的分布,就认为发生了漂移. 用 μ_1 和 μ_2 分别表示检测点左右两侧的总体均值,检验假设 $H_0: \mu_1 = \mu_2, H_1: \mu_1 \neq \mu_2$. 用 $\hat{\mu}_1$ 和 $\hat{\mu}_2$ 分别表示检测点左右两侧的样本均值,那么当 $\Pr(|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2| \geq \varepsilon) > \delta$ 成立时,就拒绝 H_0 ,即认为发生了概念漂移. 其中 $\delta \in (0, 1)$ 是用户定义的显著水平,当 H_0 为真时拒绝 H_0 的概率不超过 δ , ε 是关于 δ 的函数. 通常会设置两个 δ ,分别为 δ_{warning} 和 δ_{drift} ($\delta_{\text{warning}} < \delta_{\text{drift}}$),与之对应的是 $\varepsilon_{\text{warning}}$ 和 $\varepsilon_{\text{drift}}$. 当均值差异超过 $\varepsilon_{\text{warning}}$ 时,就认为当前可能有漂移发生;当均值差异超过 $\varepsilon_{\text{drift}}$ 时,就认为发生了概念漂移.

2.2 基于 Bernstein 不等式的动态阈值设计

接下来要计算阈值 ε . 通常刻画两个分布之间差异的不等式有 Hoeffding 不等式^[23]、Chernoff 不等式^[24]、Bernstein 不等式^[25]等. 其中 Hoeffding 不等式被广泛应用,但是在 Hoeffding 不等式中忽略了方差的作用,这样就使得方差较小时,得到的结果不够精确. Bernstein 公式被用于一些文献中^[9,11-12],它将期望和方差联系起来,因此利用 Bernstein 不等式计算得到的阈值更严谨. 笔者利用它们的推导进行分析. Bernstein 不等式为:

$$\Pr\left(\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n X_i - EX\right| \geq \varepsilon\right) \leq 2\exp\left(\frac{-n\varepsilon^2}{2\sigma^2 + \frac{2}{3}\varepsilon(c-a)}\right) \quad (2)$$

其中, X_1, X_2, \dots, X_n 是相互独立的随机变量, $X_i \in [a, c]$, 由于要讨论的是分类问题,因此取 $a = 0, c = 1$; EX 表示总体均值; σ^2 表示方差. 该不等式反映了随机变量偏离期望的概率的上界. 要控制 H_0 为真时拒绝 H_0 的概率不超过 δ ,只需令

$$\Pr\left[|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2| \geq \varepsilon\right] = \delta. \quad (3)$$

根据布尔不等式,可以得到:

$$\Pr [|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2| \geq \varepsilon] \leq \Pr [|\hat{\mu}_1 - \mu| \geq k\varepsilon] + \Pr [|\hat{\mu}_2 - \mu| \geq (1-k)\varepsilon], \quad (4)$$

其中, k 表示检测点左侧数据占有所有数据的比例. 在式(4)的右边应用式(2)中的 Bernstein 不等式, 并将 $a=0, c=1$ 代入, 得到:

$$\Pr [|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2| \geq \varepsilon] \leq 2\exp\left(\frac{-n_1(k\varepsilon)^2}{2\sigma_1^2 + \frac{2}{3}k\varepsilon}\right) + 2\exp\left(\frac{-n_2[(1-k)\varepsilon]^2}{2\sigma_2^2 + \frac{2}{3}(1-k)\varepsilon}\right), \quad (5)$$

在右侧应用 Bernstein 不等式得到:

$$2\exp\left(\frac{-n_1(k\varepsilon)^2}{2\sigma_1^2 + \frac{2}{3}k\varepsilon}\right) + 2\exp\left(\frac{-n_2[(1-k)\varepsilon]^2}{2\sigma_2^2 + \frac{2}{3}(1-k)\varepsilon}\right) \geq 4\exp\left(\frac{-n_1(k\varepsilon)^2}{2\sigma_1^2 + \frac{2}{3}k\varepsilon}\right), \quad (6)$$

结合式(5)和式(6), 可得到:

$$\Pr [|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2| \geq \varepsilon] \leq 4\exp\left(\frac{-n_1(k\varepsilon)^2}{2\sigma_1^2 + \frac{2}{3}k\varepsilon}\right), \quad (7)$$

为了满足式(2), 结合式(7), 得到:

$$\delta \leq 4\exp\left(\frac{-n_1(k\varepsilon)^2}{2\sigma_1^2 + \frac{2}{3}k\varepsilon}\right). \quad (8)$$

由于左右两侧数据量差异过大会造成对阈值计算的不准确, 因此, 在计算均值和方差时采用分层抽样的方法使两侧数据量相等. 按照一定的比例, 在数据量较大的一侧从每个块中独立地抽取一定数量的数据, 将各块取出的个体合在一起作为样本. 假设检测点左右两侧数据量的比值为 l ($0 < l < 1$), 那么就从数据量较大的一层按比例 l 抽取数据, 即当块的大小为 m 时, 从该块中抽取 $l \times m$ 个数据. 采用分层抽样不仅可以让左右两侧数据量保持一致, 而且还能保证抽样得到的数据样本的结构和整体结构比较相近, 使抽取的数据更具有代表性. 因此 k 值可以用 $1/2$ 替换, 由式(8)可以得到 ε 的表达式为:

$$\varepsilon = \frac{2}{3n_1} \left(\ln \frac{4}{\delta} + \sqrt{\left(\ln \frac{4}{\delta}\right)^2 + 18n_1\sigma_1^2 \ln \frac{4}{\delta}} \right). \quad (9)$$

在 DBDM 中, 检测到一个变化点之前要进行多次检验. 在多重检验问题中, 随着检验次数的增加, 错误地拒绝原假设的可能性就会增加. 现有的检测算法常常会利用 Bonferroni 校正法来避免这个问题, 但是当检验次数较多时, Bonferroni 校正的效果较差. 因此, 笔者对 Sidak 校正法进行一些修改, 用修改后的校正法对显著性水平 δ 进行校

正. 校正后的 δ' 为:

$$\delta' = 1 - (1 - \delta)^{\frac{1}{n}}, \quad (10)$$

其中, n 表示假设检验的次数.

2.3 算法描述

本节主要介绍 DBDM 算法的检测过程, 具体步骤如下所示.

1) Input: S: data stream

2) M: block size

3) $\delta_{\text{warning}}, \delta_{\text{drift}}$

4) Output: true | | false

5) flagWarning = false;

6) for each instance in S do

7) numInstance ++;

8) if numInstance % M = 0 then

9) for each check point P_i do

10) compute mean values μ_1 and μ_2 ;

11) compute drift and warning significant levels

δ'_{drift} and δ'_{warning} using sidak correction;

12) compute drift and warning thresholds $\varepsilon_{\text{drift}}$

and $\varepsilon_{\text{warning}}$;

13) if $|\mu_1 - \mu_2| > \varepsilon_{\text{drift}}$ then

14) delete data which are on the left side of P_i ;

15) if $\mu_1 - \mu_2 < 0$ then

16) return true;

17) break;

18) if $|\mu_1 - \mu_2| > \varepsilon_{\text{warning}}$ then

19) flagWarning = true;

20) return false.

3 概念重现检测与预测算法

笔者提出的 RDP 算法可以发现概念重现这种现象, 该方法利用上文提出的 DBDM 检测算法获取当前数据流的状态, 并根据当前状态做出不同的处理, 最终可以检测到概念重现. 在检测概念重现时利用 k 近邻算法进行比较, 并利用一个带权有向图来预测当前出现的概念最有可能是过去出现过的哪个概念的重现.

3.1 基于图表示的历史概念发现

检测概念重现的方法 RDP 的基本思想是: 每当检测到数据流达到了 Warning 状态之后, 保存一组实例, 并开始训练一个新的分类器作为备用分类器. 当检测到 Drift 状态之后检验这组实例和之前保存的实例是否来自同一概念. 如果它们来自同一概念, 就说明当前概念是一个重现的概念, 那么就之前存储的适用于这个概念的分类器进行分类; 如果不是来自同一个概念, 就说明当前概念是一个

未出现过的新概念,那么将备用分类器和代表此概念的一组实例存储下来.在检查两组实例是否来自同一概念时,在代表当前概念的实例中运用 k 近邻算法找出存储的一组实例中每一个实例的 k 个最近邻,如果这 k 个最近邻中的大多数都和该实例属于同一类别,那么就说明它们是来自同一概念.每次都在存储的实例中挑选一组最有可能的实例跟当前的一组实例进行比较,每个存储的概念被重用的可能性大小用一个图来表示.

在该方法中,把存储的所有概念整体看作是一个图,图中的每个顶点都代表一个概念,顶点中存储着与这个概念相关的一组实例和对应的分类器.每次检测到漂移之后,就把以漂移点之前的概念为弧尾、以漂移点之后的概念为弧头的弧的权值加1.并且在下次漂移发生时,优先挑选以当前概念为弧尾的弧中权值最大的那条弧指向的概念作为下一个备选概念.例如,在图1(a)中,如果当前的概念为概念1,一段时间后发生了漂移,由于

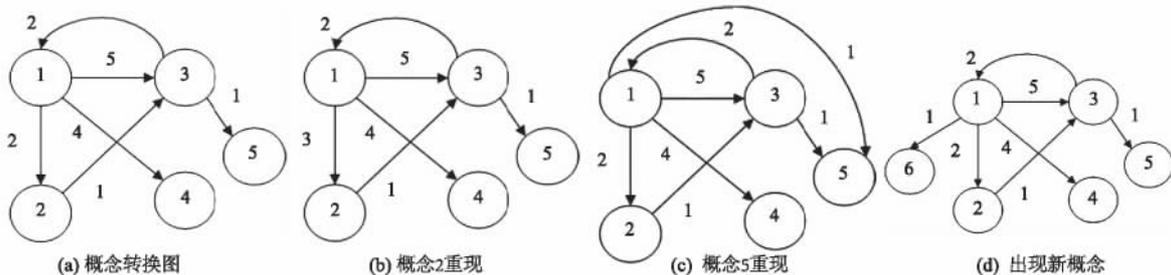


图1 概念图

Fig.1 The concept diagram

3.2 RDP 算法描述

这一部分详细介绍该检测方法,其中 G 表示用来存储概念的图,它存储的是和过去出现过的概念相关的所有实例和对应的分类器; V 为图中的顶点,表示过去出现过的一个概念,它存储与这个概念对应的实例和分类器; $vexnum$ 表示当前 G 中的顶点数; C_n 表示产生漂移后适用于新概念的分类器; B_n 是一组实例,它代表可能出现的新概念; p 表示漂移发生之前的概念在 G 中的序号.如下所示算法2描述 RDP 的具体过程.

- 01) Input: S : data stream
- 02) max: the maximum of nodes in G
- 03) Output: G
- 04) create a network G ;
- 05) for each instance ins in S do
- 06) DBDM(ins);
- 07) if current state is Warning then
- 08) save ins in B_n ;
- 09) train C_n for later use;

以概念1为弧尾的所有弧中,权值最大的是以概念3为弧头的那条弧,接下来是以概念4为弧头的弧,最后是以概念2为弧头的弧.所以依次选择概念3、概念4、概念2作为漂移后的概念,如果不成立,再选择概念5,如果仍不成立,就说明漂移后产生了一个没有出现过的新概念.

因此,最后的结果有3种情况:

1) 概念2、概念3和概念4之中的某一个为漂移之后的概念,假设为概念2,那么就将从概念1到概念2的弧的权值加1,如图1(b)所示.

2) 概念5为漂移之后的概念,那么就在概念1和概念5之间加一条弧,弧的权值为1,如图1(c)所示.

3) 漂移后产生了一个之前没有出现过的新概念6,那么就在图中加入一个顶点表示概念6,并在概念1和概念6之间加一条弧,权值为1,如图1(d)所示.

- 10) elseif current state is Drift then
- 11) for each arc in G whose tail is p
- 12) choose the arc with the maximum weight, it's head is node V_k ;
- 13) if compare (B_n, V_k . instances) then
- 14) $C_n = V_k \cdot C$;
- 15) clear(B_n);
- 16) else
- 17) create a new node to store B_n and C_n ;
- 18) if $vexnum > max$ then
- 19) delete one node in G ;
- 20) insert new node into G ;
- 21) C_n replace the current classifier;
- 22) else
- 23) clear B_n .

4 实验结果及分析

首先验证笔者提出的概念漂移检测方法在处理突变漂移时产生的误报较低,并且能及时检测

到渐变漂移.然后验证笔者提出的检验重现概念的方法能够检测到重复出现的概念,并且能提高分类正确率.实验环境是 Windows7 操作系统,3.3 GHz CPU,4G RAM.程序在 MOA 平台中实现,MOA 是一个开源的架构,它为数据流的在线学习提供实现算法和运行实验的软件环境^[26].

4.1 概念漂移检测算法分析

这一部分的实验验证笔者提出的 DBDM 方法拥有较低的误报率.将 DBDM 方法分别和 DDM^[7]、EDDM^[8]、EWMA^[10] 进行比较.DBDM 方法中设置参数 $\delta_{diff} = 0.1$,块大小设为 200;EWMA 中设置参数 $ARL_0 = 1\ 000$, $\lambda = 0.2$.

首先比较当数据流处于稳定状态时,DDM、EDDM、EWMA 和 DBDM 的误报次数.实验中采用包含 200 000 个实例的服从伯努利分布的稳定的数据流,服从伯努利分布的数据流的均值分别设置为 0.05、0.1、0.3、0.5.每个实验重复 100 次,求出误报次数的均值,结果如图 2 所示.结果显示,在稳定的情况下,DDM 的平均误报次数一直都比较少,且一直在下降,由一开始的 1.89 次降低到最后的 0.19 次;EDDM 平均误报次数随着数据流均值的增长,从一开始的 35.56 次降低到了 9.38 次;EWMA 的平均误报次数最多,且在服从伯努利分布的数据流的均值达到 0.5 之前,一直维持较高的误报次数,但是当均值达到 0.5 时,误报次数突然下降到 0.11;DBDM 的误报次数一直都较少,且一直在下降,随着数据流均值的增长,误报次数从 3.39 次降低到了 0.03 次.在图 2 中,描述 DDM 和 DBDM 的误报次数的线条几乎重合,刚开始 DBDM 的误报次数高于 DDM,但是随着均值的上升,最终 DBDM 的误报次数降低到了 DDM 以下.

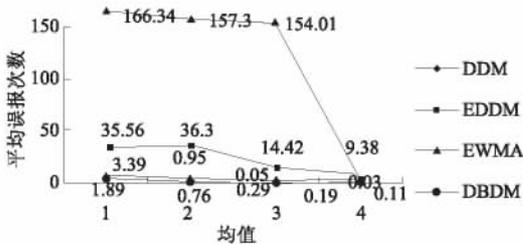


图 2 服从稳定的伯努利分布时的误报
Fig. 2 Average false positive counts on stationary Bernoulli distribution

然后比较在发生突变时检测方法的性能.由于检测到概念漂移后要更新分类器以适应变化后的情况.因此,当误报较高时,就会频繁地更新分类模型,这对资源是一种浪费,在本次实验中,验

证在突变情况下 DBDM 的误报次数.用 MOA 数据流产生器产生服从伯努利分布的数据集,实例的总数为 200 000,前 100 000 个实例服从均值为 0.01 的稳定的伯努利分布,然后均值分别从 0.01 突然上升到 0.05、0.1、0.3、0.5.图 3 展示了每个检测算法的误报次数.结果显示 DBDM 在突变的情况下误报次数较少,且当均值增长值从 0.04 变化为 0.09 时,误报次数从 4.99 次降低到了 3.76 次,随后误报次数又呈上升趋势,但是上升的幅度不大;DDM 和 EDMM 的误报次数都随着均值变化幅度的增大而降低,其中 DDM 的误报次数从 11.93 次降低到了 8.7 次,EDDM 的误报次数从 46 次降低到了 25.17 次,EDDM 的误报次数一直高于 DDM;EWMA 的误报次数最多,但是也随着变化幅度的增长而降低.

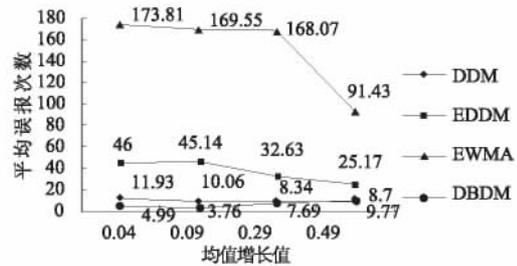


图 3 突变情况下的误报
Fig. 3 Average false positive on abrupt drift

最后比较概念发生渐变时,检测方法的性能.由于渐变的变化很缓慢,没有突变那么明显,因此检测渐变时主要看重的是检测时延,即检测到概念漂移的点与实际发生概念漂移的点之间的实例个数.在这个实验中,实例的总数是 1 000 000 个,前 998 000 个实例是稳定的,均值为 0.0100,从第 998 000 个实例之后,均值分别以 0.000 1、0.000 2、0.000 3 和 0.000 4 为斜率增长,检测时延如图 4 所示.EWMA 在渐变情况下的检测延迟较大,随着斜率的增长虽然检测延迟有所降低,但是降低的不明显;DBDM 的检测延迟一开始较高,然后随着斜率的增长,检测延迟的降低较明显.在实验中,DDM 和 EDMM 在很多情况下不能检测到

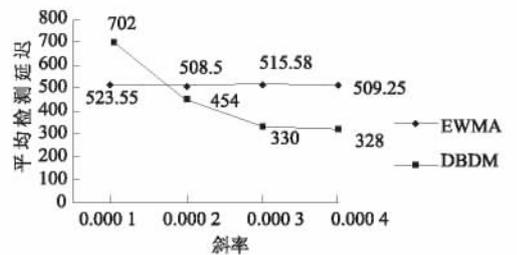


图 4 渐变情况下的检测延迟
Fig. 4 Detection delays on an gradual drift

真正的变化点,因此没有在图中显示它们的检测时延.

4.2 概念重现的发现与分类正确率的提升

在分类器对数据流进行分类时,由于数据流中存在概念漂移现象,分类正确率会受到影响.检测漂移就是为了能及时发现问题变化,然后更新分类模型,以达到提高分类正确率的目的.笔者提出的漂移检测方法能够以较小的延迟和较低的误报率检测到概念漂移,因此,它能够有效地提高分类正确率.接下来的实验就是为了验证这一点,并检验 RDP 是否能够检测到重现的概念.实验中的分类器采用 NaiveBayes,利用 4 个数据集进行验证,最后将 RDP 与几种可从 MOA 中获得源码的处理概念漂移数据流的算法进行比较.

第 1 个是用随机树生成器生成的数据集,一共产生 1 000 000 个实例,该数据集包含 10 个属性,并且包含 4 个重现的漂移,它们均匀地分布在这 1 000 000 个实例之中.

第 2 个是邮件列表数据集,它是一个真实的数据集,包含概念重现的现象.它模拟来自不同主题的邮件信息数据流,连续把信息呈现给用户,然后用户根据自己的兴趣把这些邮件标记为“感兴趣”和“垃圾邮件”.邮件列表数据集包含 1 500 个实例,913 个属性,这些属性是在语料库中至少出现 10 次的单词,还包含 2 个类值^[26].

第 3 个是由超平面生成器生成的数据, d 维空间中的超平面是一个点 x 的集合, x 满足 $\sum_{i=1}^d w_i x_i = w_0$,其中 x_i 是 x 的第 i 个坐标.满足 $\sum_{i=1}^d w_i x_i \geq w_0$ 的实例标记为正,满足 $\sum_{i=1}^d w_i x_i < w_0$ 的实例标记为负.用超平面模拟随时间变化的概念是十分有用的,因为可以通过改变权值的相对大小来改变超平面的坐标和位置^[27].在本次实验中,选择实例数为 1 000 000 个,属性数量为 20,类值的数量为 2,漂移的属性数为 10,每个样本变化的幅度为 0.1.

第 4 个是森林覆盖数据集,它是一个真实数据集,该数据集包含从美国林务局的资源信息系统的不同数据中得到的不同类型的森林的地理描述,数据集中包含 55 个属性,其中有 10 个数值型属性,44 个名称型属性,7 个类值,共 581 012 个实例.

图 5 显示对于随机树生成器生成的数据集,

只利用 NaiveBayes 进行分类以及结合 RDP 进行分类这两种情况下的分类正确率.在这次实验中,一共检测到 7 次概念重现,从图 5 中可以看出,RDP 提高了分类器的分类正确率.

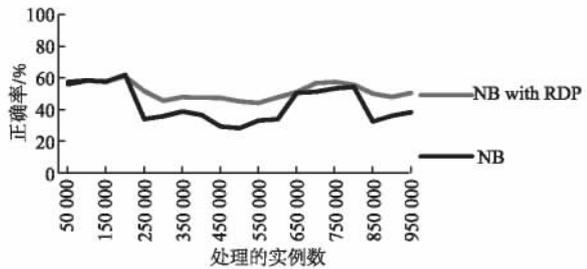


图 5 在随机树生成器生成的数据流上的分类正确率
Fig. 5 Accuracy on random tree dataset

图 6 显示对邮件列表数据集进行分类的分类正确率,可以看到在应用了 RDP 算法后分类正确率有了明显提升.

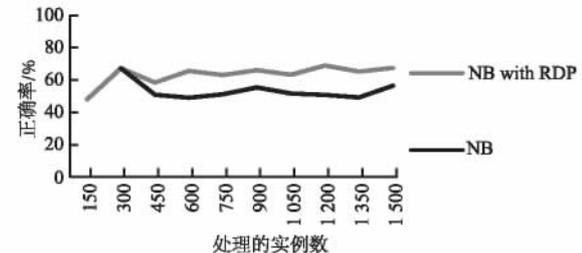


图 6 在邮件列表数据集上的分类正确率
Fig. 6 Accuracy on email list dataset

图 7 显示,在只应用 NaiveBayes 对超平面数据集分类的情况下,分类正确率一直较低,在第 250 000 个实例到 450 000 个实例之间的这一段,分类正确率大幅度下降,说明发生了概念变化,当前的分类器已不适用.应用 RDP 之后,它可以检测到漂移的发生,及时更新分类器,因此可以保持较高的分类正确率,分类正确率几乎都在 80% 以上.

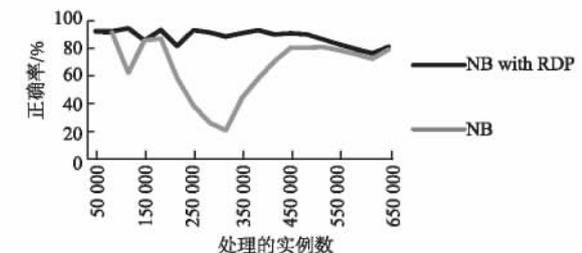


图 7 在超平面生成器生成的数据流上的分类正确率
Fig. 7 Accuracy on hyperplanel dataset

图 8 是对森林覆盖数据集进行分类的情况,从图中可以看出,RDP 对分类正确率的随着时间产生显著性提升.

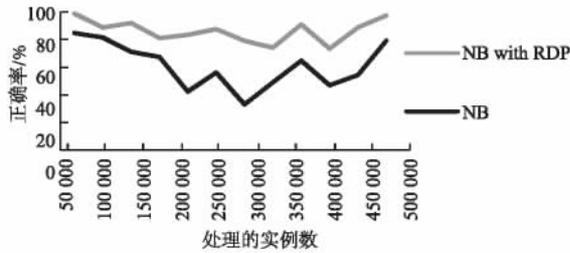


图8 在森林覆盖数据集上的分类正确率

Fig. 8 Accuracy on forest cover dataset

最后将 RDP 算法和 4 种可从 MOA 中获得源码的经典的处理概念漂移数据流的算法 EB^[14]、OCBoost^[15]、ADACC^[17]、OAUE^[18] 进行比较. 将这些算法与 NaiveBayes 分类器结合, 在上述 4 个数据集上比较它们的分类正确率. 表 1 展示了实验结果数据, 其中加粗的数字表示 5 种算法在该数据集上最高的分类正确率.

表 1 5 种算法在 4 个数据集上的分类正确率

Tab. 1 Accuracy of the four algorithms on the five datasets

数据集	EB	OCBoost	ADACC	OAUE	RDP
随机树数据集	50.52	23.42	34.42	49.20	52.49
邮件列表数据集	55.24	60.19	71.72	55.98	65.09
超平面数据集	88.44	87.79	81.59	88.40	90.39
森林覆盖数据集	77.23	46.58	90.82	81.53	87.10

从表 1 中可以看出, RDP 和 ADACC 分别在两个数据集上取得了最高的分类正确率. 在随机树数据集上, RDP 的分类正确率最高, 而 OCBoost 的分类正确率最低; 在邮件列表数据集上, ADACC 的分类正确率最高, EB 的分类正确率最低; 在超平面数据集上, RDP 的分类正确率高于其他 4 个算法, 而 ADACC 在此数据集上的表现最差; ADACC 在最后一个森林覆盖数据上的表现最好, 而 OCBoost 在该数据集上的表现最差. RDP 除了在其中两个数据集上拥有最高的分类正确率之外, 在另外两个数据集的表现也很不错, 而 ADACC 在其中一个数据集上取得了最低的分类正确率, 这说明 RDP 的整体性能优于 ADACC. 由此可以得出一个结论, RDP 能较好地适应概念漂移数据流, 可以及时并且正确地检测到数据流中的概念漂移, 有效地提高分类器的分类正确率.

5 结论

笔者提出了一种概念漂移检测算法, 并在此基础上提出一种检测概念重现的方法, 利用图存储历史概念, 并预测可能重现的概念. 实验结果表

明, 笔者提出的方法能够有效地检测突变漂移和渐变漂移, 并能够发现概念重现, 有效地提高了分类正确率. 下一步希望找到更好的方法减小检测时的时间消耗, 并且希望能够对分类正确率进行进一步提高.

参考文献:

- [1] HENZINGER M R, RAGHAVAN P, RAJAGOPALAN S. Computing on data streams [R]. s. l.: Digital systems research center, 1998: 107 - 118.
- [2] SCHIMMER J, GRANGER R. Incremental learning from noisy data [J]. Machine learning, 1986, 1(3): 317 - 354.
- [3] GAMA J, ZLIOBAITE I, BIFET A, et al. A survey on concept drift adaptation [J]. ACM computing surveys (CSUR), 2014, 46(4): 44 - 80.
- [4] WEBB G I, HYDE R, CAO H, et al. Characterizing concept drift [J]. Data mining and knowledge discovery, 2015, 30(4): 1 - 31.
- [5] WIDMER G, KUBAT M. Learning in the presence of concept drift and hidden contexts [J]. Machine learning, 1996, 23(1): 69 - 101.
- [6] WANG S, MINKU L L, GHEZZI D, et al. Concept drift detection for online class imbalance learning [C]//Neural networks (IJCNN), The 2013 international joint conference on. New York: IEEE, 2013: 1 - 10.
- [7] GAMA J, MEDAS P, CASTILLO G, et al. Learning with drift detection [M]//Advances in artificial intelligence-SBIA 2004. Berlin: Springer, 2004: 286 - 295.
- [8] BAENA-GARCIA M, CAMPO-AVILA J D, FIDALGO R, et al. Early drift detection method [C]//The proceedings of the 4th ECML PKDD international workshop on knowledge discovery from data streams. CA: AAAI, 2006: 77 - 86.
- [9] BIFET A, GAVALDA R. Learning from time-changing data with adaptive windowing [C]//The proceedings of SIAM international conference on data mining. Minneapolis: Amer Stat Assoc, 2007: 443 - 448.
- [10] ROSS G J, ADAMS N M, TASOULIS D. K, et al. Exponentially weighted moving average charts for detecting concept drift [J]. Pattern recognition letters, 2012, 33(3): 191 - 198.
- [11] SAKTHITHASAN S, PEARS R, KOH Y. One pass concept change detection for data streams [C]//Advances in knowledge discovery and data mining. Berlin: Springer, 2013: 461 - 472.
- [12] PEARS R, SAKTHITHASAN S, KOH Y, et al. Detecting concept change in dynamic data streams [J]. Machine learning, 2014, 97(3): 259 - 293.

- [13] STREET W N, KIM Y S. A streaming ensemble algorithm (SEA) for large-scale classification [C]//The proceedings of the 7th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining. New York: ACM, 1993: 377 – 382.
- [14] RAMAMURTHY S, BHATNAGAR R. Tracking recurrent concept drift in streaming data using ensemble classifiers [C]//The 6th international conference on machine learning and applications, ICMEA 2007. CA: IEEE, 2007: 404 – 409.
- [15] PELOSSPF R, JONES M, VOVSHA I, et al. Online coordinate boosting [C]//The 12th international conference on computer vision workshops (ICCV Workshops). New York: IEEE, 2009: 1354 – 1361.
- [16] MINKU L L, YAO X. DDD: A new ensemble approach for dealing with concept drift [J]. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 2012, 24 (4): 619 – 633.
- [17] JABER G, CORNUEJOLS A, TARROUX P. A new online learning method for coping with recurring concepts: the ADACC system [C]//International conference on neural information processing. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 595 – 604.
- [18] BRZEZINSKI D, STEFANOWSKI J. Combining block-based and online methods in learning ensembles from concept drifting data streams [J]. Information sciences, 2014, 265: 50 – 67.
- [19] ZHUKOV A, SIDOROV D, FOLEY A. Random forest based approach for concept drift handling [J]. arXiv preprint, 2016: 1602.04435.
- [20] KATAKIS I, TSOUMAKAS G, VLAHAVAS I. Tracking recurring contexts using ensemble classifiers: an application to email filtering [J]. Knowledge and information systems, 2010, 22(3): 371 – 391.
- [21] GOMES J B, SOUSA P A C, MENASALVAS E, et al. Learning recurring concepts from data streams with a context-aware ensemble [J]. Intelligent data analysis, 2012, 16(5): 803 – 825.
- [22] ABAD M A, GOMES J B, MENASALVAS E. Recurring concept detection for spam filtering [C]//The 17th international conference on information fusion (FUSION). New York: IEEE, 2014: 1 – 7.
- [23] Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables [J]. Journal of the American statistical association, 1963, 58(301): 13 – 30.
- [24] ChernoFF H. A measure of asymptotic efficiency of tests of a hypothesis based on the sum of observations [J]. Annals of mathematical statistics, 1952, 23(4): 493 – 507.
- [25] PEEL T, ANTHOINE S, RALAIVOLA L. Empirical Bernstein inequalities for U-statistics [C]//Advances in neural information processing systems. New York: Curran Associates, 2010: 1903 – 1911.
- [26] BIFET A, HOLMES G, KIRKBY R., et al. MOA: massive online analysis [J]. Journal of machine learning research, 2010, 11: 1601 – 1604.
- [27] HULTEN G, SPENCER L, DOMINGOS P. Mining time-changing data streams [C]//The proceedings of the 7th ACM SIGMOD international conference on knowledge discovery and data mining. New York: ACM, 2001: 97 – 106.

Recurring Concept Detection and Prediction Based on the Graph

BAI Yang¹, WANG Zhihai¹, SUN Yange^{1,2}

(1. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China; 2. College of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang, 464000, China)

Abstract: Concept drift was a challenging problem in stream mining. When the concept drift occurred, the accuracy of the original predictive model may decrease significantly. So it was necessary to put forward a feasible method to detect concept drift. Recurring concept is a special case of concept drift. However, most of existing algorithms have not taken full account of this case. This research proposed an approach to the recurring concept detection problem. Extensive experiment revealed that the method we proposed could detect not only the concept drift with relatively low delay and rate of false positive, but also the recurring concepts. Moreover, the accuracy of the classification would be greatly improved.

Key words: data stream; data mining; concept drift; drift detection; recurring concept

文章编号: 1671-6833(2017)04-0065-04

大规模 MIMO 系统中功率分配算法的能效研究

陆彦辉, 苗盼盼, 杨守义

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了提高大规模 MIMO 下行链路系统的能效, 基站分配给用户的功率不再是平均分配, 通过对能效函数的分析, 得到能效函数是关于用户功率的拟凹函数, 进而提出了一种功率分配算法. 因为大规模 MIMO 的基站天线数比较多, 射频链的损耗不可忽略. 所以建立了同时考虑基站分配给用户的功率和电路功率的新的系统功耗模型, 并在该模型的基础上, 分析用户分配的功率对系统总功耗及能效的影响. 通过分析能效函数关于用户功率的拟凹特性, 提出了一种迭代的功率分配算法. 最后将所提的功率分配算法的能效与用户平均分配功率时的能效进行比较. 仿真结果表明, 所提算法能有效地提高系统的能效.

关键词: MIMO; 能效; 功耗; 功率分配算法

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.022

0 引言

随着移动通信技术的发展, 能效引起了人们的重视. 提高能效不仅有益于减少信道用户的干扰而且可以减少环境污染. MIMO 系统是提高谱效的重要技术之一^[1]. 大规模 MIMO 系统通过增加基站的天线数, 可以显著提高系统的能效和谱效^[2]. 文献[3]证明, 无论是基于完美信道状态信息, 还是不完美信道状态信息, MIMO 系统都可以在能效和谱效上提供很好的折中. 但是基站的天线越多, 系统的复杂度就越高, 射频链的损耗也越大. 所以在分析大规模 MIMO 系统能效时必须考虑射频链的损耗. 文献[4]模型系统功耗同时考虑了传输电路和射频链的功耗. 文献[5]说明了并不是射频链数越多系统的容量就越大.

近年来, 有很多关于 MIMO 系统的能效研究^[6-7], 例如在文献[6]中研究了基于 Alamouti 分集技术的 MIMO 系统中如何提高传感器的能效. 为了提高系统的能效, 无线资源功率分配是提高能效的有效途径之一^[8]. 文献[9]研究了 OFDMA 系统中最优能效功率分配算法. 文献[10]在分布式天线系统中研究了最优能效的功率分配算法. 文献[11]分析了上行多用户的能效, 证明了

能效函数是功率矩阵的拟凹函数, 并利用这一性质提出了迭代的功率分配算法.

基于前人的研究, 笔者为了提高大规模 MIMO 系统的能效, 建立了一种新的系统功耗模型, 分析了用户分配功率对系统总功耗的影响. 在推导出能效的表达式后, 利用文献[11]证明了能效函数的性质, 并根据能效函数的拟凹特性, 提出了迭代的功率分配算法. 仿真结果表明了所提算法的有效性.

1 系统模型

在单小区大规模 MIMO 下行链路系统中, 假设基站有 N 根天线, 接收端有 K 个单天线用户, 系统模型如图 1 所示.

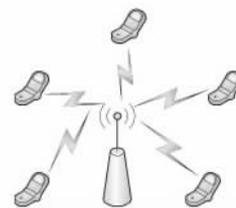


图 1 大规模多用户 MIMO 系统模型图

Fig. 1 System diagram of massive MIMO system

用户端的接收信号为:

收稿日期: 2016-11-30; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271421, 52110295)

作者简介: 陆彦辉(1972—), 女, 河南许昌人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事宽带无线通信理论的研究, E-mail: ieyhlu@zzu.edu.cn.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{y} 和 \mathbf{x} 分别是 $K \times 1$ 的接收和发射信号向量; \mathbf{H} 是 $K \times N$ 的瑞利衰落信道矩阵; \mathbf{Q} 是 $N \times K$ 的预编码矩阵; \mathbf{n} 是 $K \times 1$ 的噪声向量; $\mathbf{P} = \text{diag}\{\sqrt{p_1}, \sqrt{p_2}, \dots, \sqrt{p_K}\}$ 代表分配给每个用户的功率.

在接收端使用线性接收消除用户间的干扰, 因为接收端的设计不是本文的重点, 故笔者使用简单的迫零接收, 即

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{W} \cdot \mathbf{n}, \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = (\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H. \quad (3)$$

使用奇异值分解将信道矩阵分解为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \sum \mathbf{V}^H, \quad (4)$$

其中, \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别是 $K \times K$ 和 $N \times N$ 的酉矩阵; \sum 是 $K \times N$ 的对角矩阵, 即:

$$\sum = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K, 0, \dots, 0\}. \quad (5)$$

假设发射端已知信道状态信息, 执行模态分解, 在发射端用 \mathbf{V} 预处理发射信号, 即令 $\mathbf{Q} = \mathbf{V}$, 然后在接收端用 \mathbf{W} 后处理接收信号. 模态分解图如图 2 所示.

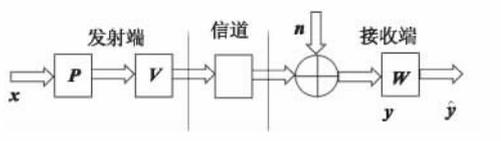


图 2 模态分解图

Fig. 2 Modal decomposition

这样接收信号简化为:

$$\hat{\mathbf{y}} = \sum \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{x} + \hat{\mathbf{n}}, \quad (6)$$

其中, $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{n}$ 是均值为 0 方差为 σ^2 的高斯白噪声.

所以得到用户 k 的信噪比为:

$$\eta_k = \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2}. \quad (7)$$

那么, 系统的总容量为:

$$C = \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2} \right). \quad (8)$$

2 功耗模型

总功耗定义为:

$$p_{\text{sum}} = \frac{p_{\text{out}}}{\alpha} + N \cdot p_c + K \cdot p_r, \quad (9)$$

其中, $\frac{p_{\text{out}}}{\alpha}$ 是功率放大器的功耗, 与发射端输出功率 p_{out} 和功率放大器的系数 α 有关; $N \cdot p_c$ 和 $K \cdot p_r$

是发射端和接收端的射频链的功耗, p_c 和 p_r 分别是发射和接收端每个射频链功耗, 且它们两个的值是独立于输出功率的. 输出功率为:

$$p_{\text{out}} = \sum_{k=1}^K p_k. \quad (10)$$

3 功率分配算法

能效定义为系统的总容量除以总功耗, 所以得到:

$$U = \frac{C}{p_{\text{sum}}} = \frac{\sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2} \right)}{\frac{\sum_{k=1}^K p_k}{\alpha} + N \cdot p_c + K \cdot p_r}. \quad (11)$$

能效函数是关于 \mathbf{P} 的拟凹函数^[11], 故通过能效 U 对功率 p_k 求导, 即可以得到能效最大时用户分配的最优功率. 下面提出一种迭代的功率分配算法求解.

定义

$$f(p_k) = \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2} \right) - U \cdot \left(\frac{\sum_{k=1}^K p_k}{\alpha} + N \cdot p_c + K \cdot p_r \right), \quad (12)$$

对于给定的 U 初值, 上式是关于 p_k 的凸函数, 所以通过对上式求导就可得到此时最优的 p_k , $f(p_k)$ 接近于 0, 为迭代的终止条件. 功率分配算法具体的步骤如下.

步骤 1: 初始化, 对于不同的用户 K , 功率初始

化为 $p_k^0 = \frac{p_{\text{out}}}{K}$, 代入式 (11) 求出此时的 U^0 .

步骤 2: 令 $U = U^0$, 代入式 (12), 得到 $f(p_k)$,

然后令 $\frac{\partial f(p_k)}{\partial p_k} = 0$, 求出 p_k^1 , 代入 (11) 式, 求出此时的 U^1 .

步骤 n : 令 $U = U^{n-1}$, 重复步骤 2, 直到 $f(p_k) < 0.001$ 为止. 此时得到的 p_k 即为用户分配的最优功率.

4 仿真结果

下面用仿真结果来证明算法的有效性. 假设基站带宽是 10 kHz, 发射和接收端每个射频链的功耗均为 100 mW. 噪声功率为 -114 dBW/MHz, 功率放大器的系数取 0.5. 这里定义平均功率分配就是基站输出的功率平均分配给每个用户, 即

$$p_k = \frac{p_{\text{out}}}{K}. \quad (14)$$

图 3 为功率注水算法和平均功率分配算法的功耗比较.从图 3 可以看出,在基站天线数小于 150 时,注水算法的功耗随着基站天线数的增多而减少,在基站天线数大于 150 时,注水算法的功耗随着基站天线数的增多而增加,这是因为当 $N < 150$ 时,注水算法得到的功率比较小,基站天线数对总功耗的影响较小;当 $N > 150$ 时,基站天线数比较大,射频链的功耗比较大,对功耗的影响占主导地位.另外当天线数小于 250 时,注水算法的功耗比平均分配的功耗大,但是当基站天线数增大到 250 后,注水算法的功耗比平均分配的功耗小,这表明在大规模 MIMO 中,笔者提出的功率注水算法功耗小,能效也较高.

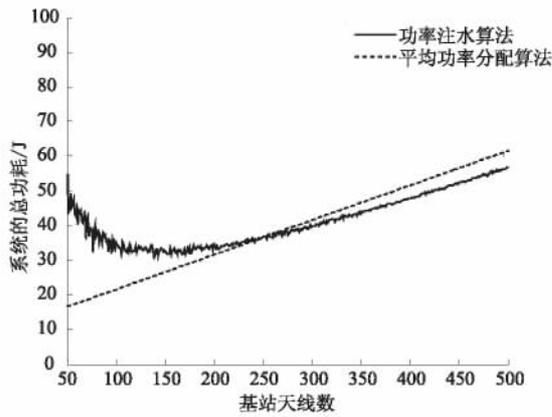


图 3 功率注水算法和平均功率分配的功耗比较

Fig. 3 Total power consumption comparison between power water-filling algorithm and average power allocation

图 4 是当基站天线数为 128 时,功率分配算法和平均功率分配算法的能效比较.可以看出功率注水算法得到的能效高于平均功率分配算法的能效.注水算法得到的分配给每个用户的功率都是最优的,所以和基站输出功率无关,近似为一条直线.

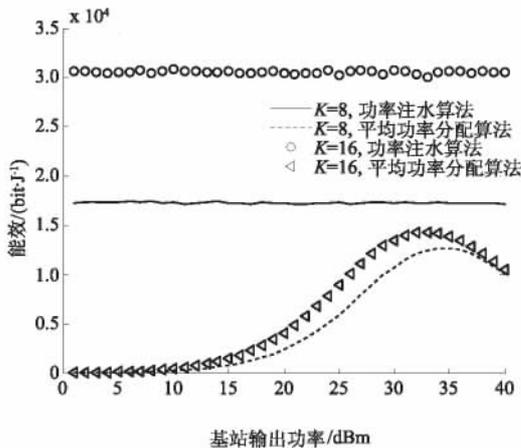


图 4 功率注水算法和平均功率分配算法的能效比较

Fig. 4 Energy efficiency comparison between power water-filling algorithm and average power allocation

而用户平均分配输出功率时,能效先增大后减小,这是因为功耗是随着输出功率的增大而增大,但是当输出功率小于 32 dBm 时,系统容量增加的比功耗的增加快,所以能效增加,当输出功率大于 32 dBm 时,系统容量增加的比功耗的增加慢,所以能效减小.同时可以看出同一种算法中用户数越多能效越大.

图 5 给出了基站天线数、用户数和能效的关系.从图 5 中可以看出,能效随着基站天线数的增加先增大后减小,即存在最优的基站天线数使能效达到最大值.这是因为基站天线数较小时,随着基站天线数的增大,射频链消耗的功耗较小,系统容量增加的多,所以能效增大.但是当基站天线数较大时,射频链的损耗较大,容量增加的少,所以能效减小,且用户数越多系统的能效越大.

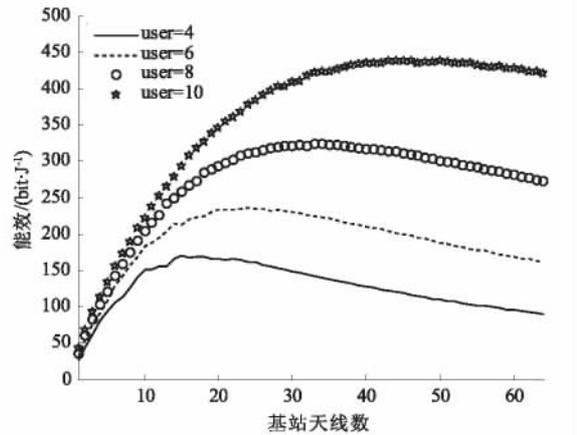


图 5 基站天线数、用户数和能效的关系

Fig. 5 Relationship between energy efficiency, BS antennas and users

5 结论

笔者提出一种迭代的功率分配算法来提高大规模 MIMO 系统的能效.首先建立了一个同时考虑基站输出端分配的用户功率和电路功率的新的功耗模型,并基于该模型,推导能效的表达式,且利用能效函数对用户分配功率的拟凹特性提出了功率分配算法.然后分析了算法对系统的总功耗的影响.笔者对提出的功率算法和平均功率分配的能效进行比较,仿真结果证明了所提的迭代功率分配算法能显著地提高系统的能效.

参考文献:

[1] LEE B M, CHOI J, BANG J, et al. An energy efficient antenna selection for large scale green MIMO systems [C]//2013 IEEE international symposium on circuits

- and systems(ISCAS2013). Beijing: IEEE press,2013: 950 – 953.
- [2] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(4): 1436 – 1449.
- [3] HAMDI R, AJIB W. Joint optimal number of RF chains and power allocation for downlink massive MIMO systems [C] // 2015 IEEE 82nd vehicular technology conference. Boston: IEEE press, 2015: 1 – 5.
- [4] WANG A Y, CHAO S, SODINI C G, et al. Energy efficient modulation and MAC for asymmetric RF microsensor system [C] // Low power electronics and design, international symposium. Huntington Beach: IEEE press, 2001: 106 – 111.
- [5] PEI Y, PHAM T-H, LIANG YC. How many RF chains are optimal for large-scale MIMO systems when circuit power is considered [C] // 2012, IEEE global communications conference. Anaheim: IEEE press, 2012: 3868 – 3873.
- [6] CUI S, GOLDSMITH A, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2004, 22(6): 1089 – 1098.
- [7] KIM E P, SHANBHAG N R. An energy-efficient multiple-input multiple-output (MIMO) detector architecture [C] // 2011 IEEE workshop on signal processing systems(siPs). Beirut: IEEE press, 2011: 239 – 244.
- [8] LI G Y, XU Z, XIONG C, et al. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues [J]. IEEE wireless communications, 2011, 18(6): 28 – 35.
- [9] 毛玉明, 黄晓燕, 冷甦鹏. OFDMA 系统中最优能效功率分配 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7): 1673 – 1679.
- [10] FENG W, CHEN Y, GE N, et al. Optimal energy-efficient power allocation for distributed antenna systems with Imperfect CSI [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2016, 65(9): 7759 – 7763.
- [11] MIAO G. Energy-efficient uplink multi-user MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(5): 2302 – 2313.

Optimal Energy Efficiency Power Allocation Algorithm for Massive MIMO Systems

LU Yanhui, MIAO Panpan, YANG shouyi

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

Abstract: In order to improve the energy efficiency of massive multi-input multi-output (MU-MIMO) downlink systems, the power among users was not allocated equally. The pseudo-concavity of the energy efficiency function with respect to the power of the user allocation was derived through the analysis of energy efficiency function. An optimal power allocation algorithm was proposed. Because of the large number of base station antenna in MIMO, the power consumption of radio frequency chain could not be ignored. Thus a new power assumption model was put forward, while both the power of the user allocation and circuit power consumption were considered. Based on this model, the influence of the power of the user allocation on the total power consumption as well as energy efficiency was analysed. By exploiting the pseudo-concavity of the energy efficiency function with respect to the power of the user allocation, an optimal energy-efficiency power allocation algorithm was proposed. Finally, a detailed energy efficiency performance comparison was made between the proposed power allocation algorithm and the power allocation. The simulation results showed that the proposed algorithm could effectively improve the energy efficiency of the MIMO systems.

Key words: MIMO; energy efficiency; power assumption; power allocation algorithm

文章编号: 1671-6833(2017)04-0069-04

WSN 中基于离散人工鱼群的分簇拓扑优化算法

阎新芳, 张晓丹, 严晶晶, 冯 岩

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对无线传感器网络中的 HCAGG 未综合考虑邻居节点的距离和能量分布, 离簇首节点较远而能量较少的节点易成为盲节点的问题, 提出一种分级簇算法. 该算法引入新的综合权值计算方式, 利用离散人工鱼群算法快速遍历到满足成员节点距其越远能量越多, 反之越少的新簇头, 降低了盲节点出现的概率. 仿真结果表明, 该算法有助于均衡节点能量, 能有效延长网络生存期.

关键词: WSN; 分簇拓扑优化; 离散人工鱼群; HCAGG; 均衡节点能量

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.020

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是由大量传感器节点通过自组织方式构成的无线网络. 节点一次性播洒后, 能量通常不可再生. 因此, 降低网络能量消耗, 延长网络生存期, 成为 WSN 路由协议的首要设计目标^[1-2]. 分簇路由功耗低, 易于维护扩展, 已成为 WSN 路由协议的研究热点^[3-4]. 而分簇拓扑结构^[5-7]的设计是分簇路由的关键. 在分簇拓扑结构设计中, 簇头节点的选举对降低网络能量消耗, 延长网络生存期起着至关重要的作用.

文献[8]提出一种基于梯度的有网关的分簇拓扑算法(hierarchical clustering algorithm based on gradient with gateway, HCAGG), 该算法引入剩余能量和到邻居节点的平均距离构造权值并引入自适应系数动态调节二者所占比重. 但是未考虑邻居节点能量与到簇头节点距离的关系, 使簇内远离簇头节点而能量较低的邻居节点能量过早耗尽而成为盲节点. 文献[9]提出一种粒子群优化的无线传感器网络协议, 该协议综合考虑了节点的剩余能量以及邻居节点的距离和能量分布问题, 并利用粒子群算法的思想快速寻优, 具有一定均衡簇内能量消耗, 延长网络生存期的作用. 但是该协议选举出的簇头节点更侧重于邻居节点距离

和能量分布, 节点本身剩余能量对簇头选举的影响不大. 而簇头节点的能量消耗最大, 簇头节点有可能成为新的盲节点.

因此, 为更好地均衡簇内节点能量消耗, 笔者提出一种基于离散人工鱼群的分簇拓扑优化算法(hierarchical clustering topology optimization based on discrete artificial fish swarm, HCTO-DAFS). 该算法采用分布式与集中式相结合的方式, 按照 HCAGG 算法初步分簇后, 临时簇头将节点及分簇信息发送至基站, 由基站利用离散人工鱼群优化(discrete artificial fish swarm optimization, DAF-SO)算法对簇头进行优化.

1 模型建立和问题描述

笔者采用和文献[8]相同的网络模型和能量模型来计算节点能耗. 由能量模型可知: 邻居节点发送信息的能耗与距离呈指数关系, 而簇头节点负责接收邻居节点信息并将融合后的信息以一跳或多跳的形式传递给基站, 能量消耗较大, 故在簇头优化阶段, 簇头节点的选举要兼顾节点剩余能量和邻居节点能量分布问题, 使选出的簇头节点具有较多的剩余能量, 同时满足距其越远的邻居节点具有较多的能量, 反之较少. 因此, 结合剩余能量定义一种新节点坐标 $X1_i(e_i, x_i, e_i, y_i)$, 新节点坐标使节点的能量、距离

收稿日期: 2016-11-30; 修订日期: 2016-12-25

基金项目: 河南省科技厅基础与前沿研究计划资助项目(152300410023)

作者简介: 阎新芳(1958—), 女, 河南嵩县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事无线传感网等方面研究, E-mail: iexfy-an@zzu.edu.cn.

信息一体化. 对综合权值构建数学模型如下:

$$Y_i = a \frac{e_i}{E_0} + b \frac{\sum_{j=1}^m e_j}{\sum_{j=1}^m \sqrt{(e_j x_j - e_i x_i)^2 + (e_j y_j - e_i y_i)^2}}, \quad (1)$$

其中,

$$b = \frac{e_i}{E_0}; \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{1+b}, \quad (3)$$

式中: E_0 为传感器节点的初始能量; e_i 为第 r 轮的剩余能量; m 为传感器节点 X_i 的邻居节点个数; a, b 为动态权系数, a 在区间 $(0.5, 1)$ 之间单调递增, 随着信息采集轮数的增加, 剩余能量在簇头选举中占的比重越来越大.

同时为保证网络的连通性, 候选簇头节点满足与簇内其他任一成员节点的距离小于通信半径 R , 即若 $X_i(x_i, y_i)$ 为候选簇头, $X_j(x_j, y_j)$ 为 X_i 的邻居节点, 则

$$|X_i - X_j| < R. \quad (4)$$

2 AFSO 算法概述

2.1 AFSO 算法基本思想

在一片水域中, 鱼生存数目最多的地方一般就是本水域中富含营养物质最多的地方. 在迭代过程中, 鱼群通过与周围环境进行信息交互选择觅食、群聚、追尾、随机某一种行为不断调整自己的位置, 从而逐渐聚集到极值点的周围^[10-11]. 全局最优的极值点有两种表现形式: ①全局最优的极值点周围通常聚集较多的人工鱼; ②在寻优过程中, 跟踪记录当前最优个体的状态, 以公告的形式不断更新全局最优解.

2.2 人工鱼行为描述

设人工鱼位置为 X_i , 人工鱼所在位置的食物浓度(即所求问题的适应度函数值)表示为 $Y_i = f(X_i)$, $visual$ 表示人工鱼的感知距离, δ 为拥挤度因子, n 为人工鱼 X_i 邻域内的伙伴数.

1) 觅食行为. 设当前人工鱼为 X_i , 在其感知范围内随机选择另一人工鱼 X_j , 若 $Y_i < Y_j$, 则向该人工鱼移动一步, 否则重新选择另一人工鱼. 若反复尝试若干次后仍不满足, 则执行随机行为.

2) 群聚行为. 设当前人工鱼为 X_i , 探索当前邻域内伙伴的中心位置 X_c , 如果 $Y_c \setminus n > \delta \cdot Y_i$, 表明 X_c 处有较多的食物并且不太拥挤, 则朝伙伴 X_c 方向前进一步, 否则执行觅食行为.

3) 追尾行为. 设当前人工鱼为 X_i , 探索当前

邻域内伙伴中 Y_j 最大的伙伴为 X_j , 若 $Y_j \setminus n > \delta \cdot Y_i$, 表明 X_j 处具有较高的食物浓度并且不太拥挤, 则向 X_j 方向移动一步, 否则执行觅食行为.

4) 随机行为. 在视野范围内随机选择一个状态向该方向移动.

人工鱼 X_i 根据周围环境, 选择执行觅食、群聚、追尾、随机某一种行为, 并对位置进行更新, 不断向最优解靠近, 更新方式如下:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + r[X_j(t) - X_i(t)], \quad (5)$$

式中: r 为 $(0, 1)$ 的随机数.

3 基于 DAFS 的分簇拓扑优化

3.1 算法描述

基于 DAFS 的分簇拓扑优化算法在 HCAGG 分簇的基础上, 利用 DAFSO 算法综合邻居节点的距离和能量信息优化选择簇首, 最后获得最新分簇.

1) 簇的初步形成阶段. 此阶段按照 HCAGG 算法初步分簇并选举临时簇头. 所有节点及分簇信息通过临时簇头发送给基站.

2) 利用 DAFSO 算法优化簇首阶段. 由于传感器节点的分布是离散的, 人工鱼的位置信息无法一一映射到传感器节点上, 因此提出一种离散人工鱼群算法, 具体定义如下:

设某一区域内有 M 个传感器节点, 定义节点状态信息: 1 代表节点已经被人工鱼探索过; 0 代表节点未被探索过. 随机抛洒 N ($N \leq M$) 条人工鱼, 定义人工鱼的位置为距离自己最近且未被探索过的节点的坐标, 从而实现人工鱼与离散节点的一一对应. 如果所有节点均被探索过或达到最大迭代次数, 则搜索结束, 具体步骤如下:

①初始化 N 条人工鱼, 确定其位置, 并将其移动到最近且未被探索过的节点位置.

②每条人工鱼按照式(1)计算其适应度函数.

③人工鱼根据周围环境信息选择执行觅食、追尾、群聚、随机某一种行为, 并按式(5)更新人工鱼位置信息. 算法设置一个公告板, 每条人工鱼执行完某一种行为后与当前公告板上最优的食物浓度值进行比较, 如果优于公告板上的食物浓度值, 则在公告板上更新当前最优的食物浓度值及当前最优节点.

④判断是否达到搜索结束条件, 如果没有, 则转至步骤3), 否则搜索结束, 执行步骤5).

⑤将搜索结束后公告板上节点设为簇头, 完成簇头优化.

3) 簇树形成阶段. 参照 HCAGG 生成簇树的方法, 建立一个基于梯度的带有网关的多级簇树.

3.2 特例分析

假设在 100 m × 100 m 的二维坐标平面内随机抛洒 20 个节点, 基站位置在 (50, 0), 节点初始能量为 0.5 J, 通信半径 $R = 40$ m, $visual = 20$, $\delta = 0.618$. 随机运行 10 次, 取一次做特例分析.

如图 1(a) 为 HCAGG 的分簇效果图, 图 1(b) 为采用本文算法优化后的分簇效果图. 其中方节点表示簇头节点, 圆节点代表簇成员节点.

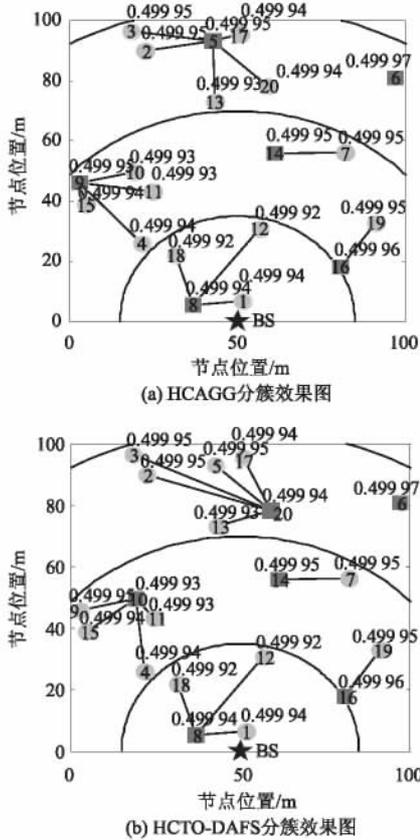


图 1 算法改进前后的分簇对比图
Fig. 1 Comparison chart before and after algorithm optimization

如图 1(a) 所示, 部分距离簇头节点较远的成员节点能量较小, 这些节点易因为能量过早耗尽而成为盲节点. 例如簇头节点 5 所在簇中, 簇成员节点 13 易成为盲节点. 经过优化后, 如图(b) 所示, 重新选择 20 号节点作为簇头节点. 图(b) 与图(a) 对比可以看出: 图(b) 产生的簇头节点满足离簇头节点较近的邻居节点能量较小, 离簇头节点较远的邻居节点能量较大, 簇内能耗比较均衡.

4 性能分析

定义从算法开始运行到第一个节点死亡时所采集的数据总轮数为网络生存期.

4.1 通信半径对生存期的影响

在簇头轮换频率为 1 000 轮/次的情况下进

行仿真. 已知当前网络连通所需的最小通信半径 $R_{min} = 35$ m, 在通信半径为 35 ~ 70 m 区间每隔 5 m 取一个点, 每个点取 10 次仿真的平均值. 则在不同通信半径下, 优化算法 HCTO-DAFS、HCAGG 和文献 [9] 中提出的 PSO 算法的生存期, 如图 2 所示.

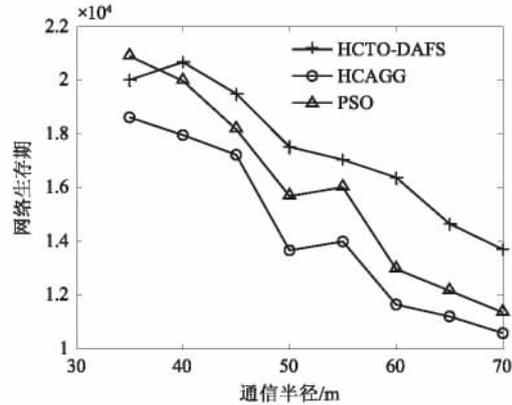


图 2 通信半径对网络生存期的影响
Fig. 2 The effect of communication radius to lifetime

由图 2 可以看出, 3 种算法的生存期都是随着通信半径的增大而减小, 这是因为随着 R 的增大, 节点间进行信息交互的能耗增加, 同时簇成员节点数增加, 簇头节点负担加大. 由此可知, 在保持网络连通情况下, 减小节点发射半径可以延长网络的生存期. 但在通信半径相同时, 优化算法由于更好地均衡了簇内能耗, 故生存期明显优于另两种算法.

4.2 簇头轮换频率对生存期的影响

在通信半径设为 40 m 时, 加入簇头轮换策略对算法进行仿真. 每个点取 10 次仿真平均值. 则不同簇头轮换频率下, HCTO-DAFS 算法、HCAGG 和文献 [9] 中提出的 PSO 算法的生存期如图 3 所示.

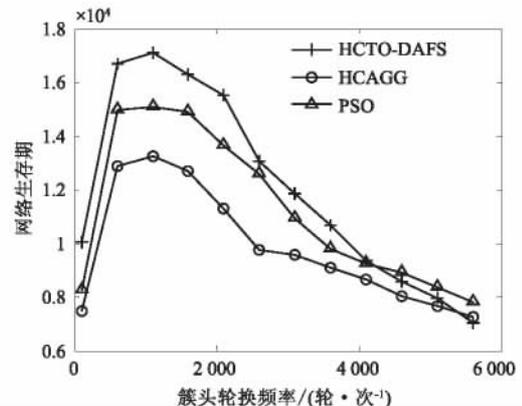


图 3 簇头轮换频率对网络生存期的影响
Fig. 3 The effect of rotation frequency of cluster head on lifetime

由图3可以看出,3种算法的生存期都随着簇头轮换频率呈现先增加后减小的趋势.因此,合理设置簇头节点轮换频率可以延长网络生存期.而在簇头轮换频率相同时,当簇头轮换频率小于4000轮/次时,优化算法HCTO-DAFS更好地均衡了网络能耗,优化后的生存期较另两种算法有明显的优势.但是当簇头轮换频率大于4000轮/次时,优化算法HCTO-DAFS均衡簇内能量消耗效果不明显且簇头负担过重容易成为新的盲节点,相比之下PSO算法具有一定的优势.

5 结论

笔者提出了一种基于离散人工鱼群的WSN分簇拓扑优化算法,该算法在HCAGG算法的基础上提出一种充分考虑簇内邻居节点的能量和距离信息的新的综合权值计算方法,使新选出的簇头节点满足邻居节点距其越远能量越多,反之则能量少,这样使簇内能量消耗更加均衡.同时把基本人工鱼群优化算法改造成适合WSN特点的DAFSO算法,采用分布式与集中式相结合的方式并利用DAFSO思想直接由基站获取最优簇头节点,实现了无线传感器网络的分簇优化,从而有效延长了WSN的生存期.

参考文献:

- [1] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks [J]. *Ad hoc networks*, 2005, 3(3): 325-349.
- [2] AL-KARAKI J N, KAMAL A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey [J]. *IEEE wireless communication*, 2004, 11(6): 6-28.
- [3] KUILA P, JANA P K. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: particle swarm optimization approach [J]. *Engineering applications of artificial intelligence*, 2014, 33: 127-140.
- [4] MAMMU A S K, SHARMA A, HERNANDEZ U, et al. A novel cluster-based energy efficient routing in wireless sensor networks [C]//*Proceeding of 27th IEEE international conference on advanced information networking and application*. Barcelona: IEEE conference, 2013: 41-47.
- [5] WU Y, LIU W B. Routing protocol based on genetic algorithm for energy harvesting-wireless sensor networks [J]. *IET wireless sensor systems*, 2013, 3(2): 112-118.
- [6] 阎新芳, 张汉, 李良, 等. WSN中基于负载均衡的EAMCT-G优化算法[J]. *天津大学学报*, 2012, 45(8): 735-739.
- [7] AN N, YAN X F, ZHU Y F, et al. A virtual backbone network algorithm based on the multilevel cluster tree with gateway for wireless sensor networks [C]//*Proceeding of IET international communication conference on wireless mobile and sensor networks*. Shanghai: IET conference, 2007: 462-465.
- [8] 古晓辉. 无线传感器网络基于梯度的分级簇算法研究[D]. 郑州: 郑州大学信息工程学院, 2013.
- [9] 苏炳均, 李林. 粒子群优化的无线传感器网络仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(9): 150-152.
- [10] ZHOU Y, LIU B. Two novel swarm intelligence clustering analysis methods [C]//*Proceeding of The fifth international conference on natural computation*. Tianjin: IEEE conference, 2009: 497-501.
- [11] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法[D]. 浙江: 浙江大学信息科学与工程学院, 2003.

A Hierarchical Clustering Topology Optimization Algorithm Based on DAFS in WSN

YAN Xinfang, ZHANG Xiaodan, YAN Jingjing, FENG Yan

(School of Information and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To solve the problem in HCAGG that the nodes far away from the cluster head had less energy, and were prone to be blind nodes, a Hierarchical Clustering Topology Optimization based on Discrete Artificial Fish Swarm (HCTO-DAFS) was proposed. The HCTO-DAFS introduced a new comprehensive weights and acquired the new cluster heads. The member nodes would have more energy when they were away from the cluster head. The DAFS could reduce the probability of blind nodes. Simulation experiments demonstrated that this algorithm could efficiently balance the nodes' energy and prolong the network's lifetime.

Key words: WSN; DAFS; hierarchical clustering topology optimization; HCAGG; balance the nodes' energy

文章编号: 1671-6833(2017)04-0073-05

基于 Voronoi 盲区的三维无线传感器网络覆盖优化算法

方 伟, 梅希薇

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 针对三维空间内无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)的覆盖优化问题, 提出了一种基于 Voronoi 盲区的三维无线传感器网络覆盖优化算法(blind-zone centroid-based scheme in three dimensional wireless sensor network area, BCBS-3D). BCBS-3D 算法对随机部署的无线传感器进行 Voronoi 图划分, 依据传感器对应的三维 Voronoi 多面体的覆盖情况构造盲区图, 将三维 Voronoi 盲区重心为候选优化位置, 最大化覆盖监测区域. 仿真结果表明, 在基于 Voronoi 图的情况下, BCBS-3D 算法在覆盖率和平均移动距离方面具有优势.

关键词: 无线传感网; 三维空间; 覆盖优化; 理论节点个数

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.019

0 引言

随着无线传感器网络(WSN)^[1]在更多领域的推广, 仅仅研究其在二维平面中的应用已经不能满足人们对生产生活的需求. 覆盖优化作为 WSN 发展的关键技术之一, 将其二维平面中的研究成果应用到三维空间成为当前研究的一个趋势^[2]. 在二维平面中, 常用基于计算几何的 Voronoi 图划分来设计覆盖优化算法^[3]. 在三维空间中, 可以采用多胞形四面体剖分方式来设计覆盖优化算法. 四面体网格是 Voronoi 图的几何对偶图, 它有严格的数学定义和完备的理论基础.

与二维平面的感知模型相比, 三维均匀区域的覆盖问题可以看成三维球覆盖问题^[4]. Chen 等^[5]研究了三维 Voronoi 单元的数据结构, 依据拓扑信息提出了三维网格剖分方法. Zou 等^[6]提出了虚拟力(virtual forces algorithm, VFA)的概念, 设计了在节点初始随机放置后利用虚拟力完成自动部署的算法. 在 Li 等^[7]提出的 VFA-3D 算法中, 除传统虚拟力外, 还加入了中央万有引力和平衡力以便获得更好的传感器分布. 魏宁等^[8]提出的 TD-VFA 盲区的无线传感器网络覆盖控制部署

策略, 提高了传感器初始随机部署后的覆盖率.

笔者基于前期研究的 Voronoi 图法^[9], 在二维平面中寻找覆盖盲区的优势以及三维球覆盖模型与多胞形四面体的剖分方式, 提出了基于 Voronoi 盲区的三维无线传感器网络覆盖优化算法(BCBS-3D).

1 三维空间 WSN 覆盖优化模型

1.1 问题描述

如图 1 所示, 在大小为 $L \times W \times H$ (长宽高) 的三维平面监测区域 T 内, 随机部署 N 个传感器节点 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_N\}$ ($i \in [1, n]$), s_i 的感知范围是以该节点为圆心, 感知半径为 R_s 、通信半径 $R_c = 2R_s$ 的球形区域, 用位置坐标 $s_i(x_i, y_i,$

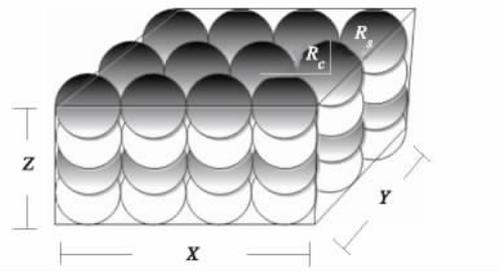


图 1 三维传感器部署

Fig. 1 WSN deployment in 3D area

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61105128, 61170119, 61373055); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20131106, BK20130161); 江南大学自主科研计划重点项目资助项目(JUSRP51410B); 中国博士后基金资助项目(2014M560390)

作者简介: 方伟(1980—), 男, 江苏扬州人, 江南大学副教授, 博士, 主要从事群体智能研究, E-mail: wxfangwei@hotmail.com.

$z_i) \{s_i = \{p \in L \times W \times H \mid ds(p, s_i) \leq R_s\}$ 表示, $ds(p, s_i)$ 为点 p 与 s_i 的欧氏距离, 传感器节点为同构节点(感知半径相同). 当前节点 s_i 与邻居节点^[9] z_i 组成的节点集表示为 $D_i = \{s_i, z_1, z_2, \dots, z_e\}$. 网格点位置记为 $t_j = (x_j, y_j, z_j), j \in [1, t]$, 网格密度影响覆盖率 CR 的精确度.

1.2 基本概念

空间离散化^[10]: 求解覆盖率问题时, 首先在监测区域内构造离散网格单元, 如图 2(a) 将三维感知模型映射到二维平面, 可看到离散的网格单元边界和实际边界. 若离散的网格单元边界上某点与实际给定的边界点重合, 则实际边界条件为离散的网格单元边界条件, 但实际情况下大部分边界点不是实际给定的边界, 需要计算当前传感器节点 s_i 与网格点 t_j 距离 $d(s_i, t_j)$, 若 $d_{s_i} \leq R_s$, 则网格点 t_j 被覆盖, 记为 $g_{t_j} = 1$, 否则 $g_{t_j} = 0$.

网格密度 $deta$: 网格密度为单位面积的网格点数, 反映了网格节点的疏密程度. 如图 2(a), 将以 S 为球心 R 为半径的传感器投影到平面中, 球体体积为 $4\pi R^3/3$, 监测区域是边长为 L 的正方体, 体积为 L^3 , 传感器在监测区域内的覆盖率为 $4\pi R^3/3L^3$, 现将对体积的求解转化为计算在球体内的网格点数. 当空间离散化的网格点数 t 越多, 网格密度越大, 则覆盖率精度越高. 公式 $t = (\frac{L}{l} + 1) \cdot (\frac{W}{l} + 1) \cdot (\frac{H}{l} + 1)$, 表示网格点数与监测区域以及相邻格点间距的关系; 公式 $deta = \frac{t}{L \cdot W \cdot H}$, 表示网格密度随单位面积网格点数的变化关系式, 单位面积下网格点(实线交叉点)上的实心圆个数越多, 则网格密度越大. 图 2(b) 所示的网络点中, 圆弧包围的区域外的 \times 表示不可被传感器感知列; 圆弧包围的区域内的实心圆点表示可被传感器感知列.

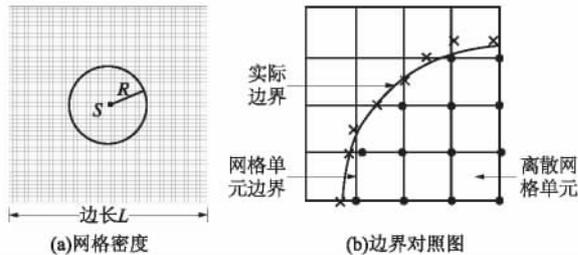


图 2 离散网格单元
Fig. 2 Discrete grid cell

覆盖率 CR : 定义覆盖率为当前传感器覆盖体积与当前网格覆盖情况下的最大覆盖体积的比值, 是网格区域覆盖质量的一个量度, 节点覆盖的总体积取集合概念中的并集. 网格密度不同, 传感

器的覆盖体积不同.

$$CR = \frac{\bigcup_{i=1, \dots, N} A_i}{A} \times 100\% , \tag{1}$$

式中: A_i 为第 i 个节点的覆盖体积; N 为节点的数目; A 为整个目标区域的最大覆盖体积, 本文中 A 的体积用网格点数 t 表示.

移动距离 ds : 表明传感器节点在运行过程中总共移动的距离.

$$ds = \frac{1}{u} \sum_{k=1}^u \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{1i} - y_{2i})^2 + (z_{1i} - z_{2i})^2} , \tag{2}$$

式中: u 表示运行次数; M 表示迭代次数; N 表示网络传感器节点总个数; (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) 和 (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) 分别表示每个传感器节点迭代完成后的位置以及迭代前的初始位置.

2 BCBS-3D 算法

2.1 三维空间 Voronoi 图划分

对三维空间传感器节点集 S 的 Voronoi 图划分是指将空间内任一传感器节点 s_i 与最近节点按特定方式划分空间, 使得每个空间内有且仅有一个传感器节点, 这个多面体空间就是 Voronoi 区域, Delaunay 三角剖分是 Voronoi 图的对偶直线^[11]. Voronoi 图划分给每个节点对应的结构单元划分了最佳形状. 如图 3 所示三维 Voronoi 图: $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7$ 分别为凸胞体的 7 个顶点, $t_{s_1s_2s_3s_4}, t_{s_1s_2s_4s_5}, t_{s_2s_3s_4s_6}$ 分别表示四面体 $V(s_1), V(s_2), V(s_3), f_1, f_2, f_3$ 分别是 Voronoi 单元 $V(s_1)$ 和 $V(s_2), V(s_2)$ 和 $V(s_3), V(s_2)$ 和 $V(s_3)$ 的公共面, 实线 e_1, e_2, e_3 为公共面的共享边(如 e_3 所在的面有 f_1, f_2, f_3), 实线和虚线的交点 v_1, v_2, v_3, v_4 表示外接球球心, 也是 Voronoi 顶点. 按照四面体的访问顺序访问各四面体未访问过的相邻四面体, 构造对应的 Voronoi 图, 直到所有的四面体都被访问过为止, 这样便得到给定点集的三维 Voronoi 图.

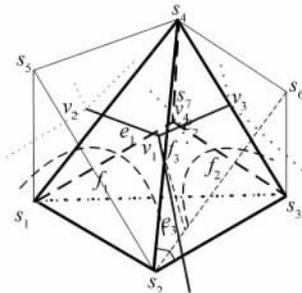


图 3 三维 Voronoi 模型
Fig. 3 3D Voronoi model

2.2 三维 Voronoi 重心

在二维平面中, 设 (P_x, P_y) 为所求面 P 的重

心坐标; x_i, y_i 表示面边界点的横纵坐标; $\{(x_i, y_i) | 0 \leq i \leq p-1\}$ 为面边界上的点, p 为点数, 则多边形重心 (P_x, P_y) 的坐标公式为:

$$P_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{p-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i); \quad (3)$$

$$P_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{p-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i); \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{p-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i). \quad (5)$$

三维 Voronoi 重心算法是对三维序列重心^[11]算法进行的改进: 将三维空间的多面体分为边、面、体3部分. 边区域重心为其中点; 面区域重心将多面体区域的节点按 z 坐标由小到大非递增排序, 求出各区域重心后取平均值, 面区域重心由式(3)和(4)得到; 体区域取其最远两点的中点.

2.3 三维泰森盲区多面体

三维泰森盲区多边形是指在部署过程中移除当前传感器节点后, 根据邻居节点和边界对该节点感知圆盘的覆盖情况, 对未被覆盖部分构造与之相似的多边形. BCBS 算法对此进行改进: 泰森多边形顶点全覆盖时, 盲区顶点为邻居节点与当前感知圆盘^[9]交点, 如图4所示. 虚线表示新的传感器与邻居节点感知圆盘的交点(1、2、3、4)围成的多边形, 图中正中央的实心三角形为盲区多边形形心, 通过比较在不同形心位置的覆盖率来选择最佳部署节点位置; 泰森多边形顶点部分覆盖时, 如图5所示. 盲区顶点为已覆盖顶点的邻居节点与当前感知圆盘交点(3、4、5), 以及未覆盖的顶点(1、2)围成的多边形; 泰森多边形顶点都没被覆盖时, 盲区为当前传感器所在泰森多边形的顶点. 继而通过对盲区形心和伪形心位置的选取, 来提高监测区域的覆盖率.

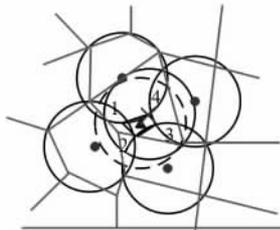


图4 Voronoi 多边形顶点全部覆盖
Fig.4 Full coverage of Voronoi polygon vertices

三维空间的 BCBS-3D 算法对感知盲区的处理方式构造为泰森盲区多面体, 并依据其顶点覆盖情况讨论盲区的形状. 泰森盲区多面体顶点全部覆盖时, 盲区顶点为邻居节点与当前感知球域交点; 部分覆盖时, 盲区顶点为已覆盖顶点的邻居节点与当前感知球域交点以及未覆盖的顶点; 都

未被覆盖时, 盲区顶点为当前传感器所在泰森多面体的顶点. 继而通过对盲区重心和原多面体重心位置的选取来提高监测区域的覆盖率. BCBS-3D 算法方式的优势为通过 Delaunay 三角网将三维 Voronoi 单胞划分成若干不重叠且充满 Voronoi 单胞的四面体, 从而可简单地通过对四面体体积(格点)的计算得到 Voronoi 单胞的体积.

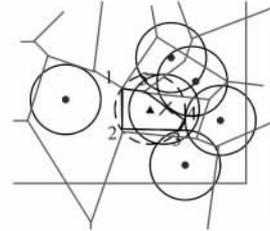


图5 Voronoi 多边形顶点部分覆盖
Fig.5 Partial coverage of Voronoi polygon vertices

如图6~8所示, 传感器节点形成的感知球域之间存在重合、相交、相切, 相离(外离和内含)的关系. 对三维监测区域划分后, 每个传感器节点都有与之对应的三维泰森多面体^[12], 传感器节点在监测区域内自由移动, 划分后的泰森多面体与边界存在约束关系, 可通过检查当前泰森多面体是否超出边界来决定是否对顶点进行修改.

关系1: 如图6(a), 当前节点所在凸胞全部被覆盖, 且存在泰森盲区. 如图6(b), 盲区多面体由交面1、2、3、4构成, 又表示泰森盲区多面体重心位置, 实心三角形表示泰森盲区多面体的重心位置, 优化后节点分布的均匀性得到提高.

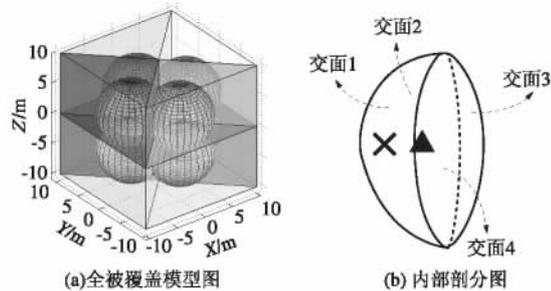


图6 全部被覆盖
Fig.6 Full coverage graph

关系2: 当前节点所在凸胞全都未被覆盖, 则泰森盲区多面体与原泰森多面体相同. 注: 泰森盲区多面体不限于凸多面体, 有时也会产生凹多面体, 所以会出现三维 Voronoi 重心位于多面体之外的情况. 当泰森盲区多面体重心位于泰森多面体以外时, 取原泰森多面体重心.

关系3: 如图7(a), 当前节点所在凸胞部分被覆盖, 且与邻居节点感知球域的交面在边界内, 则存在感知盲区. 如图8(b), 盲区多面体为交面

1、2、3、4 以及未覆盖面 1、2 构成,优化后节点能更快地向盲区移动,覆盖节点自身对应的泰森多面体,提高覆盖效率.

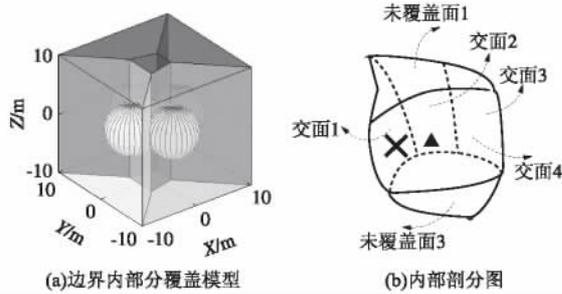


图7 部分被覆盖且交面在边界内

Fig. 7 Partial coverage and intersect surface in the boundary

关系4: 如图8(a), 当前节点所在凸胞部分被覆盖, 且与邻居节点感知球域的交面在边界外, 则存在感知盲区. 如图8(b), 盲区多面体为交面1、2、3、4 以及未被覆盖的当前凸胞(未覆盖面1、2), 其余为边界区域.

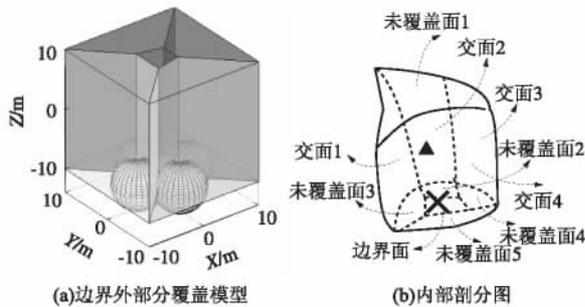


图8 部分被覆盖且交面在边界外

Fig. 8 Partial coverage and intersect surface outside of the boundary

2.4 BCBS-3D 算法描述

根据2.3节三维泰森盲区多面体的4种情况, 提出基于Voronoi盲区的三维无线传感器网络覆盖优化覆盖(BCBS-3D)算法:

步骤1 三维空间内随机部署 N 个传感器结点, 得到传感器节点集 S .

步骤2 计算每个节点 s_i 在当前位置 (x_i, y_i, z_i) 对应的初始局部覆盖率 q_i .

步骤3 构造初始三维空间 Voronoi 图.

步骤4 判断当前凸胞内是否存在盲区.

步骤5 当前节点与邻居节点的节点集 D_i , 对应三维空间内的 Voronoi 集合为 V_k .

步骤6 若为2.3节关系1, 则顶点全覆盖, 转步骤9; 若为关系2, 则盲区多面体与原泰森多面体相同; 若为关系3, 则盲区多面体由交面 f_i 和未被覆盖的当前凸胞构成; 若为关系4, 则盲区多面体由交面 f_i 及未被覆盖的当前凸胞和边界构

成, 进入下一步骤.

步骤7 由三维 Voronoi 重心公式得到 d_i 在盲区 $V(s_i)$ 处的重心 v_i , 计算覆盖率 t_i , 再计算在当前位置的覆盖率 q_i .

步骤8 如果 $q_i \geq t_i$, 则保留当前位置, 转步骤10; 否则用 v_i 替换 d_i , 继续步骤9.

步骤9 暂时删去 v_i , 得到邻居节点 $V'_e = \{v'_1, \dots, v'_e\}$, 对应 Voronoi 多面体 $V(e)$ 集合 $Z'_e = \{z_1, \dots, z_e\}$, 如果 $V(e)$ 内存在盲区, 则根据关系2、3、4中的情况构造盲区, 转步骤7; 否则用 $V(e)$ 重心 v_i 替换 d_i 位置.

步骤10 重复步骤4~9, 直至每个节点都判断一遍是否存在盲区.

步骤11 重复步骤3~10, 直至迭代结束.

3 实验仿真与分析

笔者从 CR 和 ds 两方面研究 BCBS-3D 算法的性能. 用 Matlab 平台进行实验仿真, 监测区域 T 设置为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$. 传感器节点的 R_s 为 3.3 m , 计算可得最多能不重合部署 27 个传感器节点, 对应的理想情况下网格点数占总网格点数比率: 在网格点密度为 0.5 m 情况下是 47.46% , 1.0 m 情况下是 43.53% .

图9表示网格点密度 $grid$ 分别为 0.5 m 和 1.0 m 的条件下, BCBS-3D 与 TD-VFA 算法^[6] 使用 27 个传感器节点随机部署 30 次的结果. 从图9中覆盖率曲线的变化情况可看出, 在相同网格密度下部署实验, BCBS-3D 算法的覆盖率总是优于 TD-VFA 网格点. 在网格点密度 0.5 m 时, TD-VFA 算法最终覆盖率为 89.65% , 而 BCBS-3D 算法是 94.42% , 高出 TD-VFA 算法 4.77% . 在网格

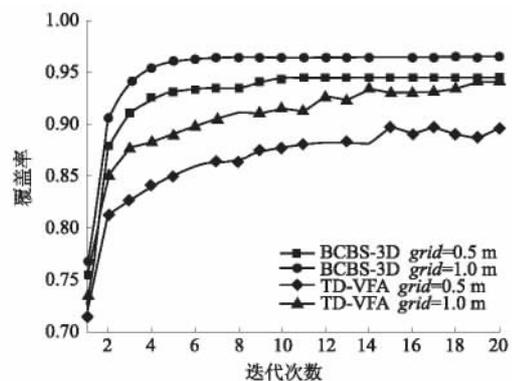


图9 覆盖率曲线

Fig. 9 Coverage rate curve

点密度为 1.0 m 时, TD-VFA 算法最终覆盖率为 94.03% , 而 BCBS-3D 算法是 96.39% , 高出 TD-VFA 算法 2.36% . 由此可见, 网格点密度越高, BCBS-3D 算法的覆盖率优势越明显, 因为 BCBS-3D 算法就是通过从不规则 Voronoi 多面体中所有

网格求重心提高覆盖率的. 图 10 表明 BCBS-3D 算法平均移动距离小于 TD-VFA 算法,这可以减少传感器的移动能耗.

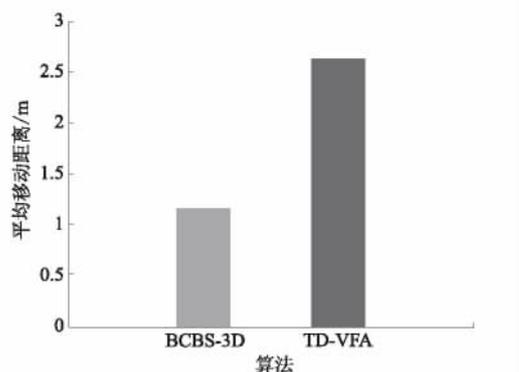


图 10 平均移动距离

Fig. 10 Average distance

4 结论

覆盖优化一直以来都是无线传感器网络中的研究热点,笔者提出的 BCBS-3D 算法将圆覆盖平面问题引申至球体覆盖三维空间,将复杂的体积覆盖转为空间网格点覆盖问题,并对盲区多面体的不同覆盖方式给出了对应的解决措施,再根据三维 Voronoi 重心引出对三维盲区多面体重心的计算,方便了对泰森盲区多面体重心的优化.

参考文献:

- [1] 阎新芳, 严晶晶, 冯岩, 等. WSN 中基于梯度和粒子群优化算法的分簇算法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 33-36.
- [2] ZHSANG L, MA P, JIN M, et al. Research on a fire-fly localization algorithm based on RSSI ranging for 3D wireless sensor networks [J]. Chinese high technology letters, 2016, 26(1): 1-7.
- [3] 贾程, 陈卉卉. 一种单位分解三角形单元及其在动力响应分析中的应用 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(6): 125-128.
- [4] 张磊. 面向无线传感器网络的三维覆盖策略研究 [D]. 南京邮电大学计算机学院, 2013.
- [5] CHEN S, CHENG L, LI M. Autonomic visiting in digital 3D scenes [J]. Earth science informatics, 2016, 9(3): 1-18.
- [6] ZOU Y, CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces [C]//Joint conference of the IEEE computer and communications. San Francisco, CA, USA: IEEE societies, 2003: 1293-1303.
- [7] LI X, LI C, YANG M, et al. Deploying three-dimensional mobile sensor networks based on virtual forces algorithm advances in wireless sensor networks [J]. Communications in computer and in formation science, 2013, 334(7): 204-216.
- [8] 魏宁. 无线传感器网络的三维空间覆盖与目标定位问题研究 [D]. 西安电子科技大学通信工程学院, 2009.
- [9] 方伟, 宋鑫宏. 基于 Voronoi 图盲区的无线传感器网络覆盖控制部署策略 [J]. 物理学报, 2014, 63(22): 128-137.
- [10] 陈斌. 客车车身周围流场数值模拟的空间离散化研究 [D]. 长安大学公路学院, 2000.
- [11] 陈嘉兴, 刘志华. 三维无线传感器网络节点的序列重心定位算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(2): 81-83.
- [12] 林海峰, 刘晓红. 对海洋污染状况预测方法的研究 [J]. 天津航海, 2013(1): 60-62.

Blind-Zone Centroid-Based Scheme in Three Dimensional Wireless Sensor Network Area

FANG Wei, MEI Xiwei

(School of Internet of things Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China)

Abstract: For the problem of coverage optimization in Wireless Sensor Network (WSN), a blind-zone centroid-based scheme in three dimensional area (BCBS-3D) was proposed. In the three-dimensional monitoring region, BCBS-3D partitioned random sensors by Voronoi diagram. According to the coverage of three dimensional Voronoi polyhedron, blind-zone diagram could be constructed clearly. BCBS-3D also regarded the centroid of blind-zone area as the optimal position, so as to maximize the monitoring area. Simulation results showed that BCBS-3D had obvious advantages in coverage rate and distance compared with other algorithms that based on Voronoi diagram.

Key words: wireless sensor networks; three dimension area; coverage optimization; theoretical number of sensors

文章编号: 1671-6833(2017)04-0078-06

风化花岗岩地层隧道衬砌裂损分析与处理研究

孙雁军^{1,2}, 阳军生¹, 张箭¹, 王树英¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410001)

摘要: 围岩风化不仅能改变围岩的矿物成分, 而且能降低其强度, 使得作用于衬砌结构上的围岩压力加大, 导致衬砌开裂, 甚至发生破坏. 新家洞隧道穿越地层为花岗岩地层, 开挖后围岩稳定性好, 按Ⅱ级围岩支护. 但隧道建成2 a后, 隧道衬砌结构出现严重裂损. 为了研究衬砌结构开裂原因, 采用试验手段对裂缝周边混凝土强度及花岗岩的物相成分、力学性质等进行测试. 测试结果表明, 围岩风化、强度降低是导致衬砌开裂的主要原因. 最后, 利用有限元反分析法确定围岩物理力学参数, 并基于此对整治后隧道结构安全性进行评价, 从数值模拟结果和现场实施效果看, 衬砌结构满足强度要求. 研究成果对类似地层中隧道设计与施工具有参考意义.

关键词: 山岭隧道; 衬砌裂损; 数值反演法; 风化花岗岩; 处理措施

中图分类号: U455 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.013

0 引言

岩石受气候、水、生物和结构构造等因素影响, 会发生物理、化学和生物风化. 风化作用会改变岩体矿物成分、微观结构及力学性质等特征, 由此引发一系列工程地质问题^[1-2]. 然而, 不同岩石风化后其工程性质的改变差异较大, 其中, 花岗岩风化后变异尤为剧烈, 这给该地层中隧道建设及安全运营带来了极大的挑战. 因此, 有必要对风化后花岗岩的矿物组分、力学特性等进行研究, 并分析其对工程结构安全性的影响.

已有文献采用试验手段对不同风化程度花岗岩物理力学性质进行了研究. 尚彦军等^[3]对不同级别的风化花岗岩样品进行分析, 找到了化学指标、微观特征与风化程度分级的相关性. 赵永辉等^[4]对弱风化花岗岩进行了流变试验, 掌握了岩石流变基本规律, 并得到相关的流变力学参数. 李铀等^[5]对风干与饱和状态下花岗岩进行室内试验, 对比研究了坚硬和软化状态花岗岩流变特性. 李晓昭等^[6]基于多种测试结果分析了花岗岩风化机理和风化特征, 并讨论了风化后引起的岩土工程问题. 赵旭峰等^[7]分析了围压对强、全风化花岗岩蠕变的影响, 给出了防止隧道失稳破坏的

建议. 陈卫忠等^[8-9]通过强风化花岗岩室内试验, 提出了应变硬化的弹塑性模型, 并成功地应用于工程实际. 李均山等^[10]采用旁压试验对强花岗岩地层进行原位试验, 获得了岩体的物理力学指标.

在研究风化花岗岩对隧道建设影响方面, 张建国等^[11]采用现场监控及数值模拟的手段, 研究了CRD法不同施工工序对围岩变形和结构内力的影响. 张顶立等^[12]研究了浅埋大断面风化花岗岩地层隧道施工中建筑物安全控制. 陈卫忠等^[13]基于流固耦合流变模型, 分析了海底隧道结构长期稳定性.

炎汝高速新家洞隧道穿越地层主要为中风化花岗岩地层, 隧道施工过程中围岩稳定性较好, 但建成后部分里程段出现二衬裂损. 为找出裂缝出现的原因, 笔者采用试验手段对隧道衬砌结构及围岩物理力学性质进行测试, 同时, 基于数值模拟反演出风化后围岩物理力学参数, 对整治后隧道结构安全性进行评价.

1 工程概况

炎汝高速公路新家洞隧道为分离式双向四车道隧道, 隧道最大埋深153 m, 隧道左线里程为ZK46+760-ZK47+577, 总长度817 m, 右线里程

收稿日期: 2016-11-02; 修订日期: 2016-12-28

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0802504)

通信作者: 张箭(1989—), 男, 安徽芜湖人, 中南大学博士生, 主要从事隧道与地下工程方面研究工作, E-mail: zhangj0507@163.com.

YK46 + 750~YK47 + 555, 总长 805 m. 图 1 为隧道右线地质纵断面图, 由图 1 知, 隧道穿越中风化花岗岩地层, 隧道中部地表为天然形成的洼地, 洼地地表覆盖层较薄, 岩体节理裂隙较发育, 地表水常年经过, 埋深最浅处约为 33. 274 m.

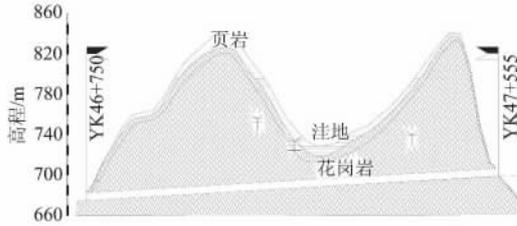


图 1 新家洞隧道右线纵断面图
Fig. 1 Profile of right line of XJD tunnel

实际施工中采用 SF-II a 复合式衬砌, 其支护参数为: 锚网喷支护, 5 cm 厚喷射混凝土, 局部设置 (25 × 25) Φ8 钢筋网、Φ22 药卷锚杆 (长度 2.0 m), 30 cm 厚二衬模筑混凝土.

整个隧道衬砌施工于 2011 年 5 月完成. 施工过程中岩层结构稳定, 风化程度低, 但开挖后的弃渣经光照、雨水等侵蚀, 风化较快, 部分风化岩体手捻易碎, 稳定性极差. 2013 年 7 月施做混凝土路面时二衬出现裂缝, 经全面排查发现, 左线和右线分别有 22 和 16 处衬砌结构裂缝, 主要位于洼地附近, 部分裂缝有渗水或水渍情况. 裂缝主要位于拱顶、拱腰和墙顶处, 其主要分布情况如图 2 所示. 裂缝最严重段位于 YK47 + 088 ~ YK47 + 097 段, 如图 3 所示, 以沿着隧道边墙纵向分布为主, 最大裂缝处宽度约达 5.9 mm. 通过对裂缝应变变化值实时监测表明, 支护结构所受应力未处于稳定, 裂缝仍处于发展中, 给衬砌结构安全带来隐患.

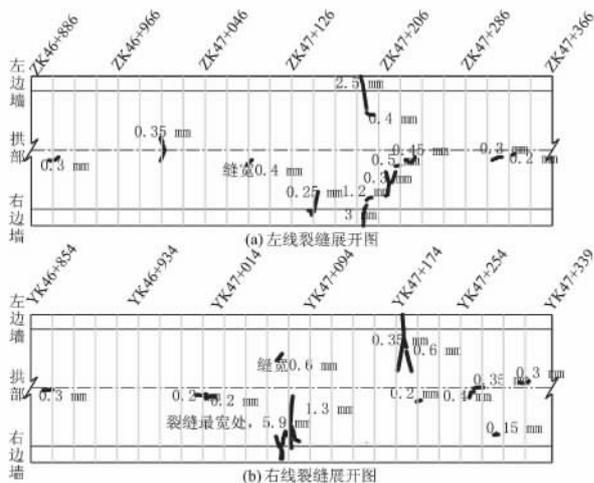


图 2 新家洞隧道裂缝展布图
Fig. 2 Unfolded drawings of cracks in XJD tunnel

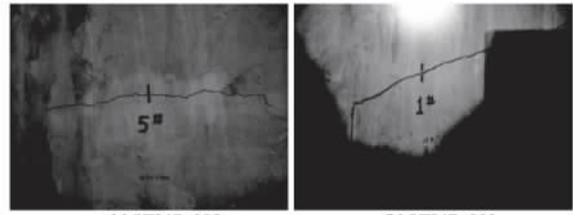


图 3 新家洞隧道二衬裂缝照片
Fig. 3 Cracks in XJD tunnel

2 隧道衬砌裂损原因试验分析

2.1 混凝土强度检测

现场用钻芯机钻取芯样进行衬砌质量综合检测. 检测结果表明, 隧道左右洞二次衬砌的厚度和强度均满足设计要求, 且初期支护与围岩之间无明显空洞, 超挖回填密实.

2.2 围岩实际状况检测

为揭示实际围岩状况, 通过钻孔取芯, 对围岩物理力学性质进行测试. 因 YK47 + 088 ~ YK47 + 097 段衬砌裂损最严重, 故在 YK47 + 093 断面左、右侧布置 2 个钻孔 (钻孔 ZK1 和 ZK2), 并在 YK47 + 201、ZK47 + 210、ZK47 + 186、ZK47 + 146 断面左侧各布置 1 个钻孔 (ZK3 ~ ZK6).

采用 Rigaku D/max2500 全自动 X 射线衍射仪对现场取样的花岗岩进行物相分析, 得到花岗岩的矿物成分及含量如表 1 所示.

由表 1 可知, 围岩风化明显, 除中风化花岗岩外, 还存在强、全风化花岗岩. 中风化花岗岩长石含量最高, 石英次之. 全风化花岗岩微长石含量最高, 而石英和白云母变化幅度较小. 全风化花岗岩长石和高岭石消失, 且产生微长石、绿泥石和蒙脱石, 由于蒙脱石存在, 全风化花岗岩具有弱膨胀性.

选取 YK47 + 093 典型断面分析围岩完整程度和坚硬程度. 笔者以岩石质量指标 (RQD) 反映围岩完整程度, 试验断面边墙左右两侧钻孔 ZK1 和 ZK2 的岩芯 RQD 值均小于 25%, 表明岩体完整性差. 图 4 为取芯芯样图, 花岗岩呈灰白色, 粗粒结构, 块状构造. 端面风化明显, 局部石英脉极发育. 岩芯极破碎, 少量呈短柱状、碎块状, 底部岩芯呈粉末状夹碎块状, 遇水松散.

围岩坚硬程度以岩芯抗压强度表示, 测试结果如图 5 所示, 由图知, 岩芯抗压强度主要在 1.6 ~ 20.9 MPa 之间, 离散性大.

2.3 结果分析

上述试验结果表明, 隧道衬砌结构满足设计要求. 右洞 YK47 + 093 断面左、右侧岩石抗风化

能力差,且差异风化明显,岩体破碎,岩石节理裂隙极发育,围岩的强度及完整性均不好,依据 JTG

D70—2004《公路隧道设计规范》^[14],该断面围岩属于软岩,围岩综合判定为 V 级.

表 1 新家洞隧道不同风化程度花岗岩矿物成分

Tab.1 Mineral compositions of weathered granite for XJD tunnel granite								%
风化	长石类矿物		黏土类矿物			其他		
	长石	微长石	高岭石	伊利石	蒙脱石	石英	白云母	
中风化	51	14.5	4.6	—	—	20	9.9	
强风化	2.4	—	—	5.5	—	87	5.1	
全风化	—	58.4	—	3.8	7.7	17.9	12.2	
特性	具有较高 的抗压 强度	解理面微具 珍珠光泽、 比较脆	呈疏松块状 集合体、吸 水性强、湿 态具有可 塑性	集合体呈 鳞片状、土 状、较高 脆性	吸水易膨 胀、并变成 糊状	具有很高的 抗压强度	风化破碎成极 细的鳞片、有 发育良好的 底面解理、云 母粉还有较好 的滑动性	

其他钻孔揭示的围岩状况稍好,也同样存在花岗岩严重球状风化现象,围岩级别为 V 级. 因此,按照 II 级围岩进行的开挖与支护,不可避免导致衬砌结构失稳破坏.

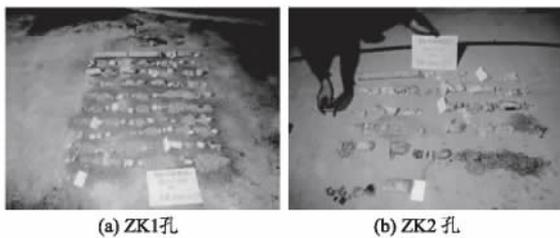


图 4 钻孔 ZK1 和 ZK2 揭示的围岩状况

Fig. 4 Rock state obtained from holes (ZK1 and ZK2)

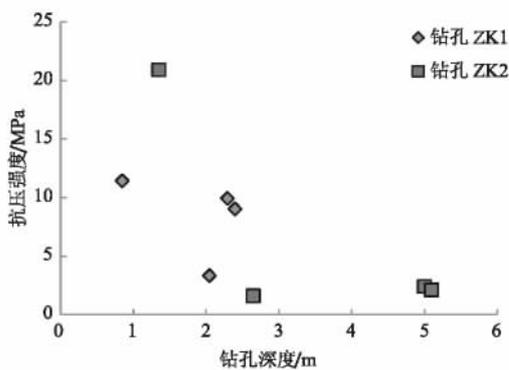


图 5 钻孔 ZK1 和 ZK2 岩芯抗压强度

Fig. 5 Compressive strength obtained from holes (ZK1 and ZK2)

3 基于衬砌开裂的围岩参数反演分析

围岩的风化会引起岩体强度降低,导致衬砌严重开裂、破坏,有必要采取措施进行补强并评价其安全性. 因此,笔者采用 FLAC2D 数值软件,通过反演获取围岩的物理力学参数,并基于此对整治后隧道结构安全性进行评价.

3.1 反演模型建立

选取隧道衬砌开裂严重的 YK47 + 093 典型断面进行分析,该处隧道顶部覆土 35 m. 根据钻探资料和隧道断面尺寸建立平面应变模型,开挖断面 $B = 11.7 \text{ m}$, $H = 8.15 \text{ m}$,计算范围取 100 m (水平) \times 80 m (竖直),水平方向大于 3.5 倍洞径 (足够消除边界条件影响),顶部取至地表. 模型两侧水平约束,底部固定约束,顶部为自由边界,见图 6.

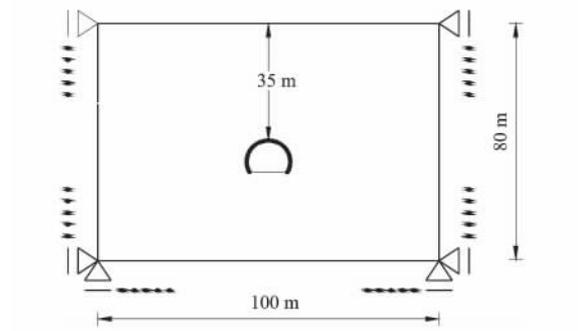


图 6 计算模型示意图

Fig. 6 Schematic of computational model

衬砌开裂段采用 SF-II 型式支护结构,具体为 5 cm 厚喷射混凝土 + 30 cm 厚 C25 模筑混凝土,支护结构物理力学参数见表 2.

表 2 材料参数

Tab.2 Material parameters				
项目	弹性模量 / GPa	重度 / (kN · m ⁻³)	泊松比	厚度 / m
初支	21.0	23	0.2	0.05
二衬	29.5	23	0.2	0.30

围岩采用实体单元模拟,服从 Mohr-Coulomb 屈服准则,支护结构采用 Liner 单元模拟. 数值计

算分为两个阶段:第一阶段,施加重力场及模型边界条件,形成初始地应力场;第二阶段,按照隧道施工工序,开挖及支护。

3.2 衬砌开裂评价指标

数值计算可获得二衬的轴力和弯矩,通过与衬砌结构开裂内力的比较,可判断衬砌结构是否开裂。根据 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》^[14],对于隧道衬砌,从抗裂要求出发,计算出的安全系数 K 值小于 1.0 时,认为结构强度不满足要求,衬砌会出现开裂或破坏。对于素混凝土结构,矩形截面偏心受压构件抗拉强度控制承载能力条件下衬砌安全系数:

$$K \leq \varphi \frac{1.75R_1bh}{6e_0/h-1} \quad (1)$$

式中: R_1 为混凝土的抗拉极限强度, MPa; e_0 为截面偏心距; b 为截面宽度; h 为截面厚度; φ 为构件的纵向弯曲系数。

对于钢筋混凝土,则需先计算受压区高度,根据受压区高度的大小判别大小偏心受压情况并选择相应的计算法则,算出结构设计承载力,从而得到安全系数 K 值,详见 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》^[14],此处不再详述。

3.3 反演结果分析

反演分析表明,当围岩弹性模量 $E = 0.5$ GPa、泊松比 $\mu = 0.35$ 、内摩擦角 $\varphi = 29^\circ$ 、黏聚力 $c = 200$ kPa 时,隧道衬砌拱顶和墙顶处会出现开裂、破坏,这与现场是比较吻合的。隧道衬砌内力计算结果如图 7 所示,其中轴力以受压为正,受拉为负;弯矩以靠围岩侧受拉为正,靠隧道空间侧受拉为负。据图可知,衬砌全环受压,且拱腰处压力最大,其次为拱顶,墙脚压力最小;弯矩也以拱腰处最大(靠围岩侧受拉),拱顶和墙脚弯矩均较小,拱顶靠隧道空间侧受拉。

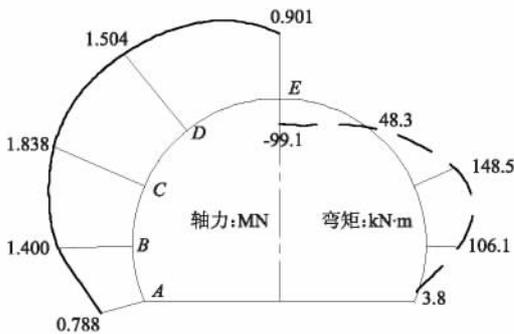


图 7 隧道衬砌内力计算值分布示意图

Fig. 7 Diagram of distribution of computational internal force on tunnel lining

衬砌各特征点安全系数计算值如表 3 所示。由表 3 知,除 A 点外,各特征点安全系数均小于 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》^[14]对混凝土结构的强度安全系数要求(3.6),衬砌强度安全风险大,尤其 C 点和 E 点更小,小于 1.0,故拱顶和墙顶处易出现开裂、破坏。

表 3 隧道衬砌特征点安全系数计算表
Tab. 3 Safety coefficients of several feature points on tunnel lining

特征点位置	轴力/MN	弯矩/(kN·m)	安全系数
A 点墙脚	0.788	3.8	6.41
B 点墙腰	1.400	106.1	1.45
C 点墙顶	1.838	148.5	0.93
D 点拱腰	1.504	48.3	3.52
E 点拱顶	0.901	99.1	0.97

4 隧道整治方案及安全评价

4.1 整治方案

针对新家洞隧道衬砌严重开裂段,现场在拆除原开裂衬砌后,按 SF-Va 型加强衬砌进行了支护。原衬砌拆除前,对围岩采用 6 m 长 $\Phi 42$ 钢管(管壁厚 3.5 mm)进行注浆加固,间距为 60 cm(纵) \times 120 cm(环),按梅花型布置。仰拱内径 $r = 1500$ cm,初支为 I20b 工字钢(纵距 60 cm) + $\Phi 8$ 钢筋网@20 cm \times 20 cm(拱墙) + 27 cm 厚喷射混凝土(仰拱 26 cm);预留变形量为 12 cm;二次衬砌为 50 cm 厚 C25 模筑混凝土。

4.2 衬砌结构安全评价

4.2.1 计算模型及相关材料参数

选取 YK47+093 典型断面,隧顶覆土厚度及模型边界条件见 3.1 节,隧道开挖断面尺寸如 4.1 节所述,对钢管注浆加固区,参考孙钧等的研究成果^[15],围岩弹性模量和黏聚力各提高 30%,其他参数保持不变。根据反演结果最终确定注浆区围岩计算参数:重度 23 kN/m³;弹性模量 0.65 GPa;泊松比 0.35;内摩擦角 29°;黏聚力 260 kPa。

SF-Va 型支护结构力学参数按“等效刚度法”计算:

$$E = E_0 + \frac{S_g \times E_g}{S_c} \quad (2)$$

式中: E 为折算后弹性模量; E_0 为混凝土(或喷射混凝土)弹性模量; S_g 为钢拱架或钢筋截面面积; E_g 为钢材弹性模量; S_c 为混凝土(或喷射混凝土)截面面积。详细的物理力学参数列于表 4。

表4 SF-Va型支护结构物理力学参数

Tab.4 Physical mechanical parameters for the SF-Va type supporting structure

项目	弹性模量/ GPa	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	厚度/ m
初支	26.13	24	0.2	0.27
衬砌	30.10	24	0.2	0.50

4.2.2 结果讨论

采用SF-Va型加强衬砌支护后,隧道衬砌内力计算结果见图8.由图8可知,衬砌全环受压,以墙脚处最大,仰拱和拱顶处最小.弯矩以墙脚处最大,靠围岩侧受拉,仰拱处弯矩也较大,靠隧道空间侧受拉.

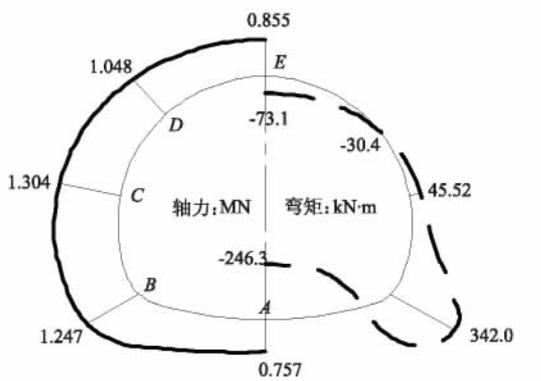


图8 SF-Va型衬砌内力计算值分布示意图

Fig.8 Diagram of distribution of computational internal force on SF-Va type lining

隧道衬砌各特征点安全系数计算值见表5,由表5可知,安全系数最小点位于墙脚处,为2.39,仍大于JTG D70—2004《公路隧道设计规范》对钢筋混凝土结构的强度安全系数要求(2.0).可见,按4.1节方案实施后,可保证隧道衬砌结构的强度安全.

表5 SF-Va型支护结构衬砌特征点安全系数计算表

Tab.5 Safety coefficients of several feature points on SF-Va type lining

特征点位置	轴力/MN	弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	安全系数
A点仰拱	0.757	246.30	2.63
B点墙脚	1.247	342.00	2.39
C点墙顶	1.304	45.52	7.00
D点拱腰	1.048	30.41	8.66
E点拱顶	0.855	73.10	8.74

4.3 现场实施效果

按笔者所述方案对新家洞隧道进行处理后,根据日常检查结果,迄今为止,病害整治段衬砌未再出现开裂、破坏现象,隧道运营情况良好,由此说明笔者所采取的整治措施是可行的,治理效果

也非常明显.

5 结论

笔者通过围岩物理力学试验和数值模拟对新家洞隧道结构开裂原因进行了分析,同时,针对该问题提出相应的整治措施,并对整治后结构安全性进行评价,主要结论如下:

(1) 试验结果和数值模拟表明:新家洞隧道建成后花岗岩发生不同程度风化,围岩矿物成分改变,岩体破碎,强度明显降低,是造成衬砌开裂、破坏的主要原因.

(2) 实施笔者提出的整治方案后,可保证衬砌结构的强度安全,且处理后病害段迄今为止状态良好,说明实施方案合理、有效,可为类似地层隧道设计与施工提供参考.

参考文献:

- [1] DUZGOREN-AYDIN N S, AYDIN A, MALPAS J. Reassessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong [J]. Engineering geology, 2002, 63: 99 - 119.
- [2] 张展毅, 张胜利, 党发宁, 等. 小粒径风化石料填筑堆石坝地震反应分析 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(4): 34 - 38.
- [3] 尚彦军, 吴宏伟, 曲永新. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比——以香港九龙地区为例 [J]. 地质科学, 2001, 36(3): 279 - 294.
- [4] 赵永辉, 何之民, 沈明荣. 润扬大桥北锚碇岩石流变特性的试验研究 [J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 583 - 586.
- [5] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1673 - 1677.
- [6] 李晓昭, 肖琳, 程建军, 等. 润扬大桥风化花岗岩工程特性与影响因素分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1681 - 1688.
- [7] 赵旭峰, 孙钧. 海底隧道风化花岗岩流变试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 403 - 406.
- [8] 陈卫忠, 曹俊杰, 于洪丹, 等. 强风化花岗岩弹塑性本构模型研究(I): 理论模型及参数反演 [J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3207 - 3211.
- [9] 陈卫忠, 曹俊杰, 于洪丹, 等. 强风化花岗岩弹塑性本构模型研究(II): 工程应用 [J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3541 - 3547.
- [10] 李均山, 郭宇. 福建某高速公路隧道强风化花岗岩的旁压试验 [J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 51 - 54.
- [11] 张建国, 王明年, 刘大刚, 等. 海底隧道浅埋暗挖

- 段 CRD 法不同施工工序比较 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 3639-3645.
- [12] 张顶立, 李鹏飞, 侯艳娟, 等. 浅埋大断面软岩隧道施工影响下建筑物安全性控制的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 95-102.
- [13] 陈卫忠, 曹俊杰, 于洪丹, 等. 特殊地质区域海底隧道长期稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2017-2026.
- [14] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范: JTG D70—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [15] 孙钧, 朱合华. 软弱围岩隧洞施工性态的力学模拟与分析 [J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 20-33.

The Effect of Weathered Granites on the Highway Tunnel Lining

SUN Yanjun^{1,2}, YANG Junsheng¹, ZHANG Jian¹, WANG Shuying¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Hunan Expressway Construction and Development Co., Ltd, Changsha 410001, China)

Abstract: Weathering action will not only change the mineral composition of rocks, but also cause significant reduction of rock material strength. As the surrounding rock pressure acting on the lining increases, lining cracks could be developed gradually, and lining destruction even occurs if the cracks are not disposed in time. It could bring adverse effect to the tunnel operation safety. In this paper a case history of the highway tunnel which located in weathered granite was presented. The stability of surrounding rock for the XJD tunnel was relatively good and the linings were constructed according to II-class tunnel lining design during the excavation process. However, the lining cracks appeared after the tunnel had been established. To analyze the reason, some experiments on the physical and mechanical properties of granites with different weathering degrees had been done through core sampling drilling. The mineral compositions of granites were studied using fully automatic X-ray diffractometer, and rock material strengths were also tested. The mechanical properties of lining for the tunnel buried in granites with different weathering degrees were also analyzed by using numerical simulation method. The result comparison between the numerical simulations and experiments showed that the weathering of granite was the main reason to cause the lining cracks. At last, some corresponding treatment measures for the problem were proposed, which could be used as a reference for the similar projects.

Key words: mountain tunnel; damage; inversion technique; weathered granite; treatment measures

(上接第 38 页)

The Research Based on the Improved Artificial Fish Swarm Algorithm and the SVM in the Acoustic Magnetic EAS

DENG Jicai, GENG Yanan

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

Abstract: In order to improve the detection rate of the acoustic magnetic EAS system, and enhance the anti-interference performance, the paper studied a new label detection algorithm that was the combination of the improved artificial fish swarm algorithm (IAFSA) and the support vector machine (SVM). An improved scheme was proposed after analyzing the strengths and weaknesses of the traditional AFSA and SVM. The experimental results showed that the IASFA had the faster rate of convergence and the higher accuracy than AFSA, the genetic algorithm and the particle swarm algorithm; The IASFA-SVM had the higher detection rate, the longer detective distance and the lower rate of false than the traditional magnetic label detection algorithm, and the IASFA-SVM also could meet the requirements of real-time detection.

Key words: artificial fish swarm algorithm; SVM; label detection; detection rate; real-time detection

文章编号: 1671-6833(2017)04-0084-04

悬挂式单轨交通线路适应性研究与分析

刘文龙¹, 徐延海²

(1. 西华大学 汽车与交通学院, 四川 成都 610039; 2. 汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

摘要: 在虚拟样机仿真平台下开展悬挂式单轨车辆动力学性能仿真实验, 以分析多工况条件下线路适应性的变化规律, 空车和重车两种载荷条件与线路适应性之间的影响关系。结果显示: 在直线工况下, 平稳性指标满足 GB/T 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范》的规定, 最大振动加速度符合国际联盟颁布的 UIC—513《铁路运输国际标准》规定, 表明在直线工况下该制式车辆具有较好的线路适应性。在曲线工况下, 导向轮导向力最大值未超过轮胎最大负荷值, 符合车辆安全运行标准。但是, 在重车运行条件下导向力合力较大, 建议降速运行。

关键词: 悬挂式单轨车辆; 动力学; 平稳性; 舒适性; 安全性

中图分类号: U260.2⁺2 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.015

0 引言

悬挂式单轨交通以其车身尺寸小、空间适用性强等特点逐渐成为目前及未来阶段城市轨道交通的研究热点。目前, 德国与日本应用较广泛^[1-2], 但国内尚无实际工程应用。由于该交通系统中车辆在空中运行的特点, 决定了对其线路进行适应性研究成为亟待解决的问题。其中, 文献[3]中 Zboński 通过动力学仿真的方法对车辆曲线通过性能作了分析研究。文献[4]在缓和和曲线线型的研究基础上提出了新的设计方法。以上两个文献所使用的方法由于受限于国内复杂的城市结构和载客量的要求, 并不能全部为国内所采用。文献[5]基于传统铁路车辆轮轨的关系, 对车辆在不同线路上的动力学性能进行了深入研究。但是, 由于悬挂式单轨车辆采用橡胶轮胎而与传统铁路车辆结构不同, 该方法无法真实反映出悬挂式单轨车辆受线路设计的影响。笔者采用动力学方法对某型悬挂式单轨车辆在空车和重车两种状态下表现出的动力学性能进行了研究分析, 为悬挂式单轨交通工程在国内的实际应用提供部分数据上的参考依据。

1 车辆参数

图1是悬挂式单轨交通系统结构简图, 从图1可以看出, 该交通系统中主要由车辆和线路组成。其中, 由开口为780 mm × 1 100 mm的下开口式箱型梁组成线路系统的轨道梁部分^[6-7], 每节车辆由转向架和车体组成, 每个转向架设置有走行轮、导向轮、稳定轮、构架等结构。走行轮通过两个半轴连接在齿轮箱上, 与轨道梁走行面接触并承担整车系统的垂向力, 其中齿轮箱下端通过铰接点与构架连接, 上端与电机固定在一起。导向轮

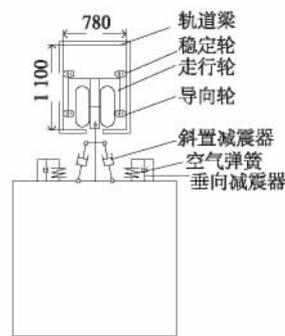


图1 悬挂式单轨交通系统结构简图

Fig. 1 Simple figure of suspension monorail transportation systems

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-30

基金项目: 四川省科技支撑项目(2016GZ0346, 2013GZ0147); 四川省科技计划项目(2015GZ0150); 西华大学创新基金(yejj2016085)

通信作者: 徐延海(1970—), 男, 湖北黄冈人, 西华大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事整车性能测试与仿真等方面的研究, E-mail: xuyanhai@mail.xhu.edu.cn.

在车辆运行过程中主要是使车辆被迫导向.其中,走行轮、导向轮和稳定轮均为实心式橡胶轮胎.为了缓冲车辆运行过程中由横向运动带来的车体晃动,在车体与构架上安装了空气弹簧、横向减震器和垂向减震器.结合以上对悬挂式单轨车辆组成分析,给出车辆技术参数见表1所示.

表1 车辆结构组成参数

Tab.1 The parameter of vehicle structure

mm			
项目	参数	项目	参数
车体长度	10 292	走行轮定距	1 730
车辆高度	3 538	导向轮定距	2 754
车体质量	20 600	稳定轮定距	2 410
车辆定距	6 600	走行轮直径	520
转向架固定轴距	1 370	导向轮直径	280
车体外侧最大宽度	2 300	稳定轮直径	280

2 车辆性能评价标准

2.1 乘坐舒适性指标

参照 UIC—513《铁路运输国际标准》^[8]研究车辆乘坐舒适性的方法.将车辆运行过程中由路面不平度引起的车体最大振动加速度与乘员主观舒适性感觉建立了关系,并将车辆运行过程中横向和垂向最大加速度值以小于 2.5 m/s^2 作为较好动力学性能的评价标准,若超过该指标,证明车辆在该线路上不适宜运行.

2.2 平稳性指标

参照 GB/T 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范》^[9]的规定,评价车辆运行平稳性比较常用的指标是 sperling 平稳性指标.车辆平稳性等级如表2所示,计算公式:

$$W = 7.08 \sqrt{\frac{A^3}{f} F(f)}, \quad (1)$$

式中: W 为平稳性指数; A 为加速度, m/s^2 ; f 为频率, Hz ; $F(f)$ 为频率修正系数.

表2 车辆平稳性等级

Tab.2 Vehicle stability level

平稳性等级	评定结果	平稳性指数 W
一级	优	<2.5
二级	良好	$2.5 \sim 2.75$
三级	合格	$2.75 \sim 3.0$

2.3 安全性指标

悬挂式单轨车辆在通过导向轮被迫转向过程中,导向轮会产生一定的压缩量.但是当存在过大的压缩量时,会导致轮胎快速磨损甚至爆裂引起

运行安全事故.笔者在给出车辆曲线段行驶性能评价时,把轮胎由压缩引起的最大径向力做为评价指标,将仿真过程中轮胎最大径向力与轮胎允许的最大负荷值进行对比分析.当最大径向力小于最大负荷值时,视为曲线通过性能较好;当最大径向力大于最大负荷值时,视为曲线通过性能较差.经查阅 GB/T 16622—1996《实心轮胎系列》得到本次导向轮胎最大负荷值为 24.21 kN .

3 计算模型

3.1 车辆仿真模型

利用多体动力学仿真软件 ADAMS 建立如图2所示的悬挂式单轨交通动力学仿真模型^[10-11].

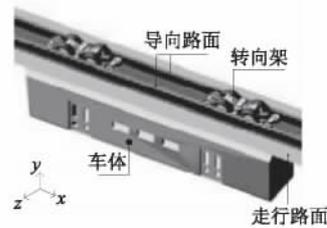


图2 悬挂式单轨车辆仿真模型

Fig.2 The dynamic simulation model of vehicle

3.2 仿真线路

悬挂式单轨车辆曲线通过性能研究时,车辆通过曲线时要考虑离心力,通过曲线时轨道梁对单辆车所能提供的最大离心力公式为:

$$F_{\max} = M_3 \frac{v_{\min}^2}{R_{\min}}, \quad (2)$$

式中: v_{\min} 为最小曲线半径曲线限速, km/h ; R_{\min} 为最小曲线半径, m ; M_3 为单辆编组车辆超载工况质量, kg .

控制在曲线上通过的最大限制速度为:

$$v_{\max} = 3.6 \times \sqrt{\frac{F_{\max} R}{M_2}}, \quad (3)$$

式中: F_{\max} 为通过曲线时轨道梁对单辆车所能提供的最大离心力, kN ; R 为曲线半径, m .

根据我国 CJJ96—2003《地铁限界标准》^[12]规定,假设车辆在缓和曲线上匀速运动,缓和曲线长度计算公式为:

$$L = \frac{v^3}{28R}, \quad (4)$$

式中: L 为缓和曲线长度, m ; R 为圆曲线半径, m ; v 为车辆通过曲线的运行速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

参照文献 [13] 中给出的缓和曲线长度取 5 的整数倍的原则,得到本文缓和曲线长度取值及曲线线路设置见表3、表4所示.

表3 缓和曲线长度取值
Tab.3 Length of transition curve

曲线半径	30	40	50	60	70	80	90	95
最短长度	26.1	30.2	33.7	37.0	40.0	42.7	45.3	46.5
本文选择长度	30.0	35.0	35.0	40.0	40.0	45.0	50.0	50.0

表4 曲线线路设置
Tab.4 Curve line design

线路类型	直线	缓和曲线	圆曲线	线路类型	直线	缓和曲线	圆曲线
R30	100	30	30	R70	100	45	70
R40	100	35	40	R80	100	45	80
R50	100	35	50	R90	100	50	90
R60	100	40	60	R95	100	50	100

4 仿真结果分析

4.1 测量点设置

在评测车辆平稳性指标时,测量车体垂向和横向加速度的传感器设置在车厢乘客区内转向架正下方一侧1 000 mm的B点,为了更准确地对车辆平稳性做出评价,测量点设置增加了驾驶室室内的A点,平稳性各测量点的位置和尺寸如图3所示.

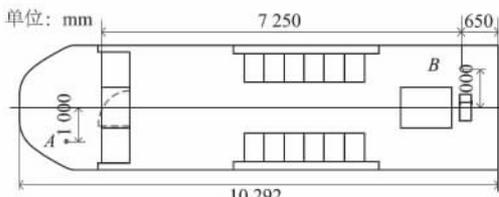


图3 平稳性测量点俯视图

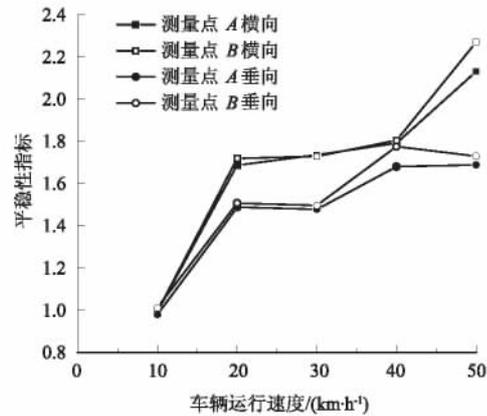
Fig.3 The smoothness of measurement point vertical view

4.2 直线工况

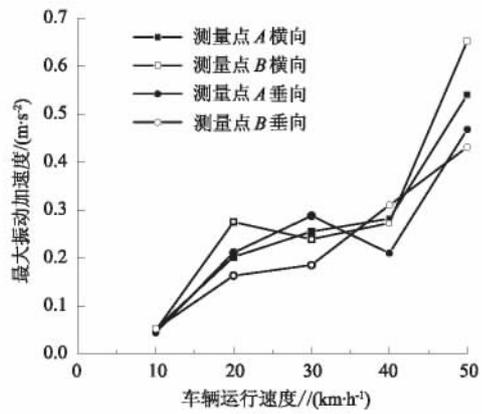
在空车和重车两种条件下,设定车辆速度变化范围为10~50 km/h,从仿真后处理文件中得到两种工况下垂向平稳性 W_z 、横向平稳性 W_y 、垂向最大加速度 z 与横向最大加速度 y .仿真结果参数随车辆运行速度变化如图4、图5所示.分析空车工况下图4(a)、(b)与重车工况下图5(a)、(b)仿真结果中各参数变化可知,两种工况下,直线路段上仿真得到的平稳性指标及最大加速度数值均随车辆运行速度增加逐渐增大,其中,平稳性指标符合GB5599—85标准中一级的标准,最大加速度数值未超过UIC—513《铁路运输国际标准》的规定.

4.3 曲线工况

在空车和重车两种工况下,车辆通过不同的曲线半径时,通过车辆的导向力最大值的变化,分析悬挂式单轨车辆曲线通过时动力学性能.各参数随曲线半径的变化见图6和图7.



(a) 平稳性指标



(b) 最大振动加速度

图4 空车工况下平稳性参数随车辆运行速度变化曲线

Fig.4 Stability parameters change with vehicle speed under empty condition

分析图6和图7中可以看出,在空车工况下,车辆以限速通过曲线,导向力最大值未超过导向轮橡胶轮胎可以提供的最大负荷值;在重车工况下,车辆以限速通过曲线时,导向力最大值未超过导向轮可以提供的最大负荷值,但导向力合力较大,对轨道梁及转向架构架强度要求较高,因此考虑重车工况下列车通过曲线时降速运行.

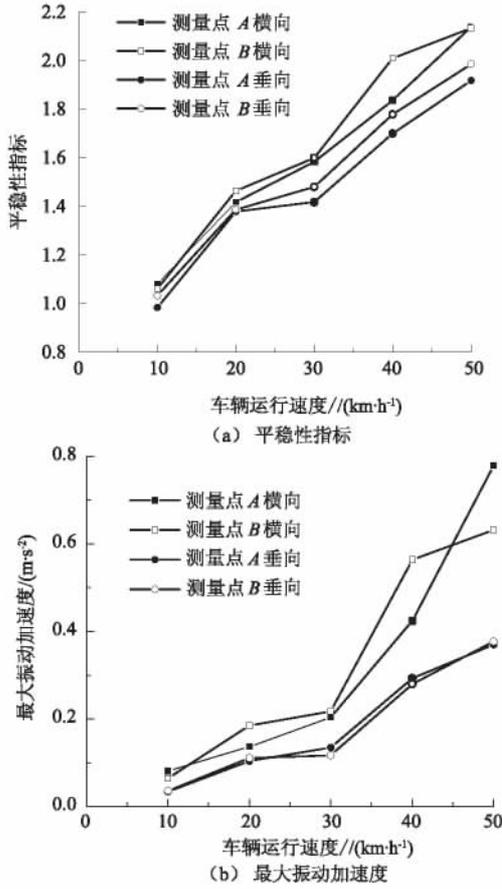


图5 重车工况下平稳性参数随车辆运行速度变化曲线

Fig.5 Stability parameters change with vehicle speed under heavy condition

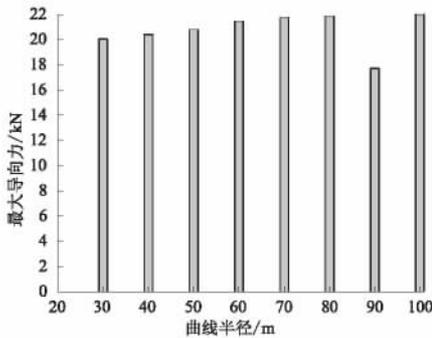


图6 空车工况下导向力变化图

Fig.6 The force of leading guide under empty condition

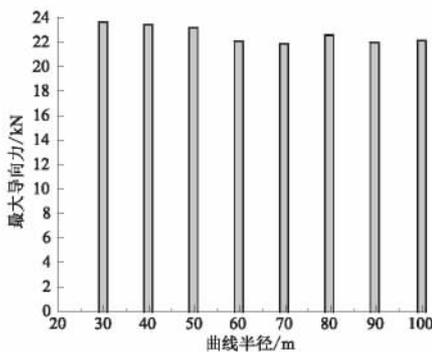


图7 重车工况下导向力变化图

Fig.7 The force of leading guide under heavy condition

5 结论

1) 直线工况下,空车和重车两种条件下均表现出较好的动力学性能.其中,车辆运行平稳性指标和振动加速度最大值均未超过标准取值,都能满足车辆运行平稳性和乘坐舒适性标准.

2) 曲线工况下,在车辆限速通过曲线条件下,空车和重车车辆系统中导向轮受力均超过最大负荷值.但是,重车条件下的导向力值接近最大负荷值,不能完全满足车辆安全运行的标准,建议在该条件下降速通过.

3) 文中得到的动力学性能参数均为多体动力学软件仿真得到,由于仿真模型的建立与实际车辆存在偏差,所以,对于动力学性能参数需要进一步完善模型,做出研究分析.

参考文献:

- [1] GUTAREVYCH V. A mathematical model study of suspended monorail [J]. Transport problems, 2012, 7 (3): 62 – 66.
- [2] 铃木康夫. 千叶都市新型独轨 URBANFLYER 0 系列车的概要 [J]. 铁道车辆技术(日), 2013, 190: 24 – 31.
- [3] ZBOINSKI K. Dynamical investigation of railway vehicles on a curved track [J]. European journal of mechanics-A/solids, 1998, 17(6): 1001 – 1020.
- [4] MIYAGAKI K, ADACHI M, SATO Y. Analytical study on effects of form in transition curve [J]. National geographic adventure, 2004, 41(S): 657 – 666.
- [5] JIN Y, ISHIDA M, NAMURA A. Experimental simulation and prediction of wear of wheel flange ecomer [J]. Wear, 2011, 271(12): 259 – 267.
- [6] 鲍玉龙. 悬挂式单轨交通系统车桥耦合振动仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学桥梁与隧道工程学院, 2015.
- [7] 蒋咏志, 王月明, 谢倩. 一种悬挂式单轨转向架结构方案及分析 [J]. 机车电传动, 2015(6): 56 – 59.
- [8] 国际铁路联盟. 评定与铁路车辆中振动有关的旅客舒适性导则: UIC—513 [S]. 北京: 国际铁路联盟标准, 1977
- [9] 铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范: GB/T 5599—1985 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.

(下转第 93 页)

文章编号: 1671-6833(2017)04-0088-06

在役钢筋混凝土 T 形梁桥承载能力的模糊随机评估法

翟科玮¹, 杜朝伟², 郑凤玺³, 郑元勋⁴

(1. 洛阳市农村公路管理处, 河南 洛阳 471000; 2. 河南省交通运输厅 公路管理局, 河南 郑州 450012; 3. 商丘市公路管理局, 河南 商丘 476000; 4. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对中小跨径 T 形梁桥的特点, 提出了一种模糊随机的上部结构承载能力综合评估方法. 根据现场检测结果对承载能力评定的各因素指标进行随机模拟, 应用模糊综合评定方法得到各分项验算系数和承载能力的概率分布, 进而计算得到具有一定保证率的承载能力评定结果. 通过对某公路钢筋混凝土简支 T 梁桥的计算, 验证了该方法的可行性, 且研究结果可为公路桥梁的承载力评定和维修管理提供参考.

关键词: T 形梁桥; 承载能力; 模糊综合评价; 概率分布; 保证率

中图分类号: U447; U448.16; TU312 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.014

0 引言

早期修建的公路桥梁以中小型桥梁为主, 普遍存在着等级低、设计荷载低、施工质量差、缺乏管养等问题, 在建成通车后会发生不同程度的老化、破损和裂缝, 其实际承载力逐年降低. 并且由于设计规范的变更, 早期建设的桥梁结构建设标准低, 在运营过程中存在较严重的超限现象; 近年来经济的发展使得交通量逐年增大, 但由于监管困难, 车辆超载及车辆改装等原因导致超限问题突出, 使得按新标准建设的桥梁也不堪重负, 造成桥梁结构损伤、材料劣化和疲劳病害严重^[1-2]. 这些因素使得桥梁不可避免地出现耐久性损伤, 抗力退化, 服役过程中结构的安全性和可靠性不断降低, 使桥梁在没达到设计寿命前就已经达到使用寿命, 危桥的数量逐年增多, 使得大部分危旧桥梁在农村公路上超期服役^[3].

目前, 在役桥梁承载能力的评定方法是依据桥梁主要技术指标的检测结果和相应评定标准进行评估, 是确定的“定值评估法”^[1,4-6], 计算得到的桥梁承载能力是确定值, 没有概率的概念. 在承载能力评估中由于检测方法、测点位置的不同及主观因素等会导致检测指标的随机不确定性, 因此, 病害指标是随机变量^[7-9], 且检测指标的分级

评定具有一定的模糊性. 由于构件的材料性能和截面几何参数的不确定性使得基于检测结果的承载能力是一个随机变量^[10]. 常规的“定值评估法”对在役桥梁结构承载能力评定忽略了影响因素的随机性和分级评定的模糊性, 使得评估结果易受主观影响、可靠性低.

笔者在已有评估方法^[4]基础上把影响桥梁承载能力评估的因素指标按照随机变量进行考虑, 应用 Monte Carlo 随机模拟和模糊综合评定方法得到在役钢筋混凝土 T 形梁桥上部结构承载能力的概率分布, 进而得到具有一定保证率的承载能力评定结果.

1 桥梁承载能力的评估

根据现行规范^[4], 桥梁的承载能力按下式评定:

$$M_R = R(f_d, \xi_c, a_{dc}, \xi_s, a_{ds}) Z(1 - \xi_e). \quad (1)$$

式中: M_R 为在役桥梁截面实际抗力; Z 为承载能力检算系数; ξ_e 为承载能力恶化系数; ξ_c 为混凝土截面折减系数; ξ_s 为钢筋截面折减系数. 计算得到的承载能力是一个确定的值, 是“定值评估法”.

由于实际中分项检算系数的影响因素是随机变量, 因此, 分项检算系数也是不确定的随机变

收稿日期: 2016-09-30; 修订日期: 2016-11-19

基金项目: 河南省交通运输厅科技项目(2014k37-2)

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

量.另外,由式(1)计算得到的桥梁抗力也是服从某一分布的随机变量,因此,得到满足某一保证率的承载力值更符合实际情况.

2 在役公路桥梁承载能力的模糊随机评估体系

桥梁承载能力分项验算系数的取值直接影响承载能力的评估结果,笔者对在役桥梁承载能力的评估,实际上是以承载能力分项验算系数为评估对象,以桥梁检测指标为因素集,建立桥梁承载能力综合模糊评估体系.在评估过程中将影响分项验算系数的检测指标作为随机变量,根据实测的分布特征进行随机模拟,采用模糊综合评定方法得到分项验算系数的概率分布,进而由公式(1)得到具有一定保证率的在役钢筋混凝土上部结构的承载能力.

2.1 在役公路桥梁的检测指标

对于中小型的公路桥梁,在承载能力评定时,检测设备有限,不便测量自振频率,因此,检测指标中去掉了现行《规程》^[4]中自振频率这一项,其对应的权重被分配到其它指标上去.同时,引入裂缝长度这一指标并将现行《规程》^[4]中的缺损状况检测改为3项指标来反映:裂缝宽度、裂缝长度对截面尺寸的比值和表面损伤率.公路桥梁的主要检测指标改为:上部结构裂缝宽度 u_1 、裂缝长度与截面最小尺寸比值 u_2 、混凝土结构表面损伤率 u_3 、混凝土强度系数 u_4 、混凝土碳化系数 u_5 、混凝土保护层厚度系数 u_6 、氯离子含量 u_7 、混凝土电阻率 u_8 、混凝土锈蚀电位 u_9 、构件表面风化率 u_{10} 、构件表面混凝土剥落最大深度与构件最小尺寸的比值 u_{11} .

2.2 检测指标的 Monte Carlo 模拟

由于现场病害检测指标具有随机性,且现场检测数据有限,因此,根据现场检测结果的分布特征采用 Monte Carlo 法进行随机模拟.笔者根据现场检测结果利用参数估计和 K-S 假设检验分析统计其分布规律作为 Monte Carlo 法仿真的概率模型,模拟产生大量服从其概率分布的随机数,用于研究分项检算系数和承载能力的概率分布.

2.3 承载能力分项检算系数的模糊综合评估

根据现行《规程》^[4],对桥梁承载能力评估需要计算承载能力检算系数 Z 、承载能力恶化系数 ξ_e 、混凝土截面折减系数 ξ_c 和钢筋截面折减系数 ξ_s ,由于影响这些分项检算系数的因素是随机的,因此,分项检算系数也是随机的.检测指标的分级

模糊性使得分项检算系数的技术状况评定需要采用模糊综合评定理论^[10]进行计算.模糊综合评定理论已经应用到在役结构的耐久性评估、健康监测以及可靠度评估和维修加固等复杂的实际工程中^[11-12].评定过程为:

1) 确定公路桥梁的评估对象 $\{U_1, U_2, U_3\} = \{\text{承载能力检算系数 } Z, \text{承载能力恶化系数 } \xi_e, \text{混凝土截面折减系数 } \xi_c\}$.

2) 确定每个评估对象的影响因素集 U_i ,即: $U_i = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,其中, u_i 为评估对象的影响因素.

桥梁承载能力检算系数 Z 的因素集为 $U_1 = \{\text{裂缝宽度 } u_1, \text{裂缝长度与截面尺寸比值 } u_2, \text{混凝土结构表面损伤率 } u_3, \text{混凝土强度系数 } u_4\}$.

承载能力恶化系数 ξ_e 的因素集为 $U_2 = \{\text{裂缝宽度 } u_1, \text{裂缝长度与截面尺寸比值 } u_2, \text{结构表面损伤率 } u_3, \text{混凝土强度系数 } u_4, \text{混凝土碳化系数 } u_5, \text{保护层厚度系数 } u_6, \text{氯离子含量 } u_7, \text{混凝土电阻率 } u_8, \text{钢筋锈蚀电位 } u_9\}$.

混凝土截面折减系数 ξ_c 的因素集为 $U_3 = \{\text{构件表面损伤率 } u_3, \text{混凝土碳化系数 } u_5, \text{构件表面材料风化 } u_{10}, \text{构件表面混凝土剥落深度与损伤部位截面最小尺寸比值 } u_{11}\}$.

3) 建立每个因素的评价集 V_i .由于因素集 U_i 中各元素 u_i 具有一定的模糊性,对于评估集内每一个因素指标的评估等级向量可写成 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}\}$,其中, m 表示评估等级种类数.根据文献[4, 14-15]把影响因素按其技术状况分为良好、较好、较差、差、严重5种情况,对应的评定等级为I、II、III、IV、V级,即评估等级向量 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, v_{i4}, v_{i5}\}$.

4) 在因素集 U 与评价集 V_i 基础上,由单因素集模糊评价可得到对应因素集的评价矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times 5}$,即

$$R = \begin{bmatrix} R | u_1 \\ R | u_2 \\ \dots \\ R | u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{n5} \end{bmatrix}_{n \times 5} \quad (2)$$

其中, r_{ij} 表示因素 i 的评价集 v_i 中对 j 等级的隶属程度,可通过因素的隶属函数计算得到.

5) 确定各检测指标 u_i 的隶属函数 $\mu(u_i)$.桥梁的主要检测指标有数值型变量(如:裂缝宽度、电阻率等)和定性评定的影响因素(如:构件表面

材料风化程度等),对不同类型因素指标采用不同的方法进行等级评价.由于检测指标具有分级模糊性,笔者对桥梁病害数值型变量的等级划分采用梯形隶属函数,如图1所示, u_4 、 u_6 、 u_8 、 u_9 取图中括号中的等级.再按模糊划分原则,确定影响因素集 U 中各影响因素指标 u_i 的限值和模糊分级,如表1所示.

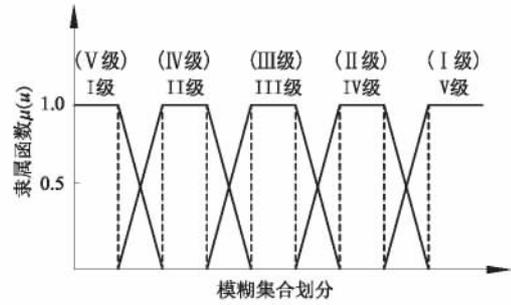


图1 隶属函数
Fig.1 Membership function

6) 确定因素集对应的权重集. $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0$.

表1 评价指标模糊等级划分
Tab.1 The fuzzy hierarchy of evaluation index

指标	I级(V级)	II级(IV级)	III级(III级)	IV级(II级)	V级(I级)
u_1	[0, 0.05]	[0.062 5, 0.075]	[0.125, 0.175]	[0.225, 0.612 5]	[1.00, +∞]
u_2	[0, 0.3 3]	[0.395, 0.46]	[0.54, 0.62]	[0.700, 0.725]	[0.75, +∞]
u_3	[-∞, 0]	[1.875, 3.75]	[6.25, 8.75]	[11.25, 15.625]	[20.0, +∞]
u_4	[0, 0.85]	[0.874, 0.895]	[0.916, 0.937]	[0.958, 0.979]	[1.00, +∞]
u_5	[0, 0.3]	[0.4, 0.5]	[0.7, 0.9]	[1.1, 1.3]	[1.5, +∞]
u_6	[0, 0.55]	[0.607, 0.664]	[0.721, 0.778]	[0.835, 0.892]	[0.95, +∞]
u_7	[0, 0.15]	[0.237 5, 0.325]	[0.475, 0.625]	[0.775, 0.888]	[1.0, +∞]
u_8	[0, 5.00]	[6.875, 8.75]	[11.25, 13.75]	[16.25, 18.125]	[20, +∞]
u_9	[-∞, -500]	[-462.5, -425]	[-375, -325]	[-275, -237.5]	[-200, +∞]
u_{10}	微风化	弱风化	中度风化	较强风化	严重风化
u_{11}	[-∞, 0]	[0.007 5, 0.015]	[0.025, 0.035]	[0.045, 0.075]	[0.10, +∞]

注: u_4 、 u_6 、 u_8 、 u_9 取表头括号中的等级.

依据相关规范和不同因素对在役桥梁上部结构承载力影响程度,通过影响因素间两两对比,并结合层次分析法和专家建议,给出各因素集对应权重集 W 的建议值:

- a) 因素集 U_1 的权重集 $W_1 = (0.2, 0.2, 0.2, 0.4)$;
- b) 因素集 U_2 的权重集 $W_2 = (0.08, 0.08, 0.16, 0.05, 0.20, 0.12, 0.15, 0.05, 0.11)$;
- c) 因素集 U_3 的权重集 $W_3 = (0.30, 0.35, 0.10, 0.25)$;

7) 计算被评估对象的模糊综合评估等级向量 B ,由下式即可分别计算承载力分项系数的评估等级向量 B :

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_5). \quad (3)$$

8) 计算模糊综合评定值.为充分考虑评估等级向量 B 包含的信息,突出优势等级,计算 B 的“凝聚值”作为被评估对象的综合评定值 D :

$$D = \frac{\sum_i^m b_i^2 \cdot v_i}{\sum_i^m b_i^2}, \quad (4)$$

式中: v_i 表示与 B 中元素 b_i 对应的评定等级.根据式(4)可计算出桥梁各分项检算系数的综合技术状况评定值 D ,利用插值法即可计算得到 Z 、 ξ_c 以及 ξ_c 的值^[4].

2.4 承载能力分项检算系数的概率分布

由于影响因素是随机变量,因此,在此基础上通过模糊综合评价和插值得到的技术状况评定值 D 和分项检算系数也是随机变量,且通过分析认为分项检算系数概率分布模型均服从正态分布.

钢筋截面折减系数 ξ_s 无法通过实际检测和模糊综合评价获得,由于钢筋锈蚀程度分布是随机的,因此,对于被评估的在役公路桥梁,不同位置钢筋的锈蚀率导致的钢筋截面折减系数可认为是一个随机量,假设服从正态分布,其均值 μ 可由桥梁损伤状况按规范^[4]规定选取,对于变异系数 δ ,为减少模拟误差,建议选用范围为 0.05 ~ 0.15.

3 桥梁承载能力的概率分布

在考虑了桥梁诸多病害指标的随机性和评估等级划分模糊性的基础上,参考现行规范^[4]把病害指标对承载能力影响效应定义为承载能力分项

验算系数,进而通过式(1)计算损伤后桥梁结构的承载能力,得到承载能力的概率分布,继而可计算具有一定保证率的在役钢筋混凝土桥梁承载能力评估值。

4 工程算例——钢筋混凝土简支T梁桥

4.1 桥梁概况

某在役农村普通钢筋混凝土桥梁,其上部结构为4孔20m装配式钢筋混凝土简支T梁,其中每孔跨有横梁5根,桥全长64.04m,桥面为连续结构,上部结构横剖面图如图2所示,混凝土设计

强度C25,主筋采用Ⅱ级钢筋,主梁配筋图如图3所示,经复核原截面设计承载能力(按85规范^[13]计算) $M_0 = 2\,196.57\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。简支T梁主要病害概况:混凝土保护层剥落较深,钢筋外露且锈蚀严重,电阻率在 $10\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 以下;腹板两侧中度风化;跨中发现多处横向锈胀裂缝,裂缝宽度在 $0.5\sim 1.3\text{ mm}$ 之间,且裂缝长度与截面尺寸比值达到 0.6 以上;混凝土碳化较严重,氯离子含量达到 $0.6\%\sim 0.7\%$,混凝土测各区平均强度换算值均在 $21\sim 23\text{ MPa}$ 。

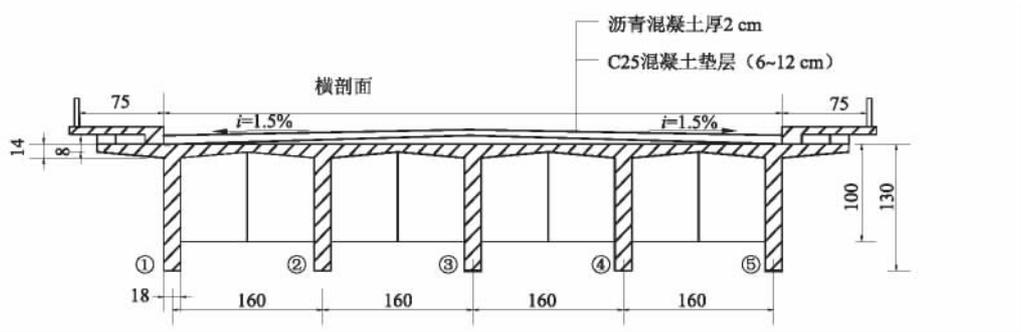


图2 上部结构横剖面

Fig.2 The section of upper structure

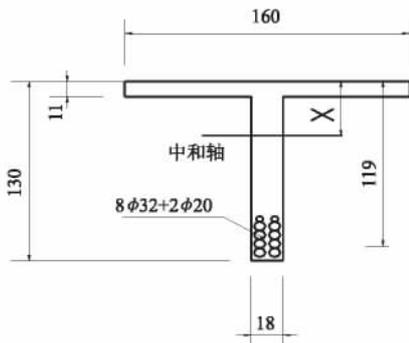


图3 主梁配筋图

Fig.3 The reinforcement figure of girder

4.2 计算结果分析

1) 对该桥病害检测指标进行统计和相应分布假设检验分析后,确定各自的概率模型,对该桥上部结构承载能力建立基于 Monte Carlo 法的模糊综合评估模型. 经过 10 000 次随机模拟计算,得到服从正态分布的承载能力分项验算系数和综合评定值 D 的统计参数 (μ, δ) ,如表 2 所示. 根据实际检测结果,认为主梁钢筋截面折减系数 ξ 服从 $\mu = 0.90, \delta = 0.15$ 的正态分布。

2) 承载能力评估结果分析. 根据该桥梁简支 T 梁承载能力分项验算系数的计算结果和规范^[14]提供的公路桥梁结构材料性能以及截面几何参数的统计参数,对式(1)经过 10 000 次随机模拟,并对计算结果进行 K-S 假设检验,认为该桥

主梁正截面抗弯承载能力近似服从 $M_R \sim \text{LN}(7.764\,5, 0.274\,9)$ 的对数正态分布,如图 4 所示,概率分布函数 $F_R(r)$ 为:

$$F_R(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}0.274\,9} \int_{-\infty}^r \frac{1}{r} \exp \left[-\frac{(\ln r - 7.764\,5)^2}{2(0.274\,9)^2} \right] dr. \quad (5)$$

当取不同保证率时,其截面抗弯承载能力 M_R 和损失率如表 3 所示。

表 2 分项验算系数和 D 值的统计参数

Tab.2 The subentry coefficient and statistics parameters of D value

分项验算系数	正态分布参数 (μ, δ)	综合评定值 $D(\mu, \delta)$
承载能力检验系数 Z	(0.906 3, 0.010 5)	(3.937 7, 0.024 1)
承载能力恶化系数 ξ_c	(0.088 0, 0.060 3)	(3.759 9, 0.028 3)
混凝土截面折减系数 ξ_s	(0.871 0, 0.018 9)	(3.738 0, 0.055 0)

由表 2 可看出,各分项系数的综合评定值 D 的均值 μ 均接近 4,根据规范^[4]可判断该桥上部结构总体技术状况为 4 类,即差状态与该桥病害检测结果吻合.同时,该桥上部结构原设计承载能力(按 85 规范^[13])为 $M_0 = 2\,196.57\text{ kN}\cdot\text{m}$,而由

表3可看出承载力下降严重,当取95%的保证率时,抗弯承载力为1 542.7 kN·m,承载力损失29.68%;当取90%的保证率时,抗弯承载力为1 708.3 kN·m,承载力损失22.1%,属于4类桥承载力下降的范围,该桥梁需要进行大修和加固来保证其安全性.算例表明笔者提出的基于概率分布的承载力评估方法对在役钢筋混凝土桥梁上部结构承载力评估是可行的.

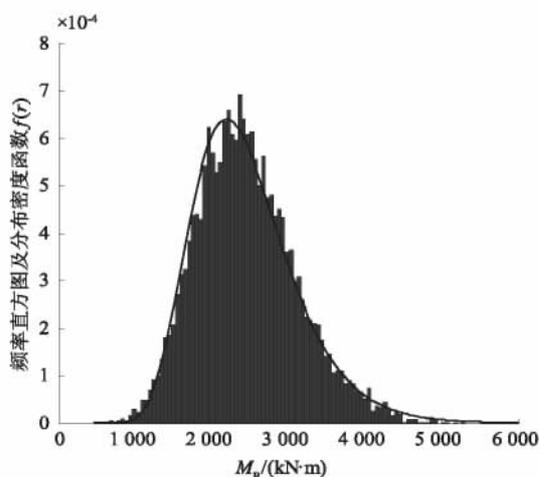


图4 M_R 近似对数正态概率分布图

Fig. 4 The approximate lognormal probability distribution figure of M_R

表3 不同保证率 M_R 和损失率

Tab. 3 Different reliability M_R and loss rate

保证率/%	抗弯承载力 $M_R/(kN \cdot m)$	损失率/ %
95.0	1 542.7	29.68
92.5	1 634.4	25.50
90.0	1 708.3	22.10

5 结论

笔者提出的基于 Monte Carlo 法和综合模糊评价理论的桥梁上部结构承载力评估方法能够从概率的角度进行承载力评估,更客观地反映桥梁的承载力,为桥梁的维修管理提供参考.

1) 方法考虑了在役公路桥梁的特点,检测指标的选取适合于中小跨径公路桥梁的检测.

2) 考虑了检测指标的随机不确定性和分级模糊性,上部结构承载力的计算更符合实际.将检测指标按其服从的概率分布进行 Monte Carlo 随机模拟既能够解决现场检测数据不足的问题,也能够反映实际指标的随机性.模糊综合评价理论较好地解决了检测指标在等级评定时的主观影响,使承载力的评定更客观.

3) 由于检测指标的随机性决定了承载能力分项检算系数的随机性,进而使计算得到的上部结构的实际承载能力是近似服从对数正态分布的随机变量,通过对承载力的概率分布的分析可得到对应于不同保证率的承载力.提出方法为公路桥梁的检测和管理具有重要的参考价值,公路桥梁的管理者可以根据不同保证率的上部承载力选择合适的日常维修方案和限载标准.

参考文献:

- [1] 张新志. 钢筋混凝土旧桥承载力评估方法研究[J]. 公路, 2013(1): 274-277.
- [2] 仲岗. 农村公路旧桥加固后评价方法研究[D]. 西安: 长安大学交通学院, 2010.
- [3] 宗周红, 任伟新, 郑振飞. 既有桥梁承载力评估方法[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 147-152.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载力检测评定规程: JTG/T J21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [5] 李海涛. 基于模糊层次分析的连续梁桥健康状态的评估[J]. 公路工程, 2012, 37(2): 26-28.
- [6] MELHEM H C, SENAKA A. Bridge condition rating using an eigenvector of priority settings[J]. Microcomputers in civil engineering, 1996, 11: 421-432.
- [7] 赵卓, 滕海文, 徐爱. 杭州湾跨海大桥 70m 箱梁结构寿命随机分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 59-69.
- [8] 屈文俊, 陈道晋. 混凝土碳化的随机模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 577-581.
- [9] 王华琪, 赵鸣, 李杰, 等. 混凝土强度统计数据的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 864-865.
- [10] 李士勇. 工程模糊数学及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 101-108.
- [11] TARIGHAT A, MIYAMOTO A. Fuzzy concrete bridge deck condition rating method for practical bridge management system[J]. Expert systems with applications, 2009, 36(10): 12077-12085.
- [12] KIM Y M, KIM C K, HONG G H. Fuzzy set based crack diagnosis system for reinforced concrete structures[J]. Computers and structures, 2007, 85(23): 1828-1844.
- [13] 交通部公路规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTJ 023—85[S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.
- [14] 交通部公路规划设计院. 公路工程结构可靠度设计同一标准: GB/T50283—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

Load Bearing Capacity of Existing Highway RC T Beam Bridge Based on Fuzzy Stochastic Comprehensive Evaluation

ZHAI Kewei¹, DU Chaowei², ZHENG Fengxi³, ZHENG Yuanxun⁴

(1. Rural Highway Administration Bureau of Luoyang, Luoyang 471000, China; 2. Highway Administration Department of Transportation of Henan Province, Zhengzhou 450012, China; 3. Highway Administration of Shangqiu, Shangqiu 476000, China; 4. School of Hydraulics and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A comprehensive evaluation method of bearing capacity was proposed for highway T beam bridge based on fuzzy stochastic theory. Factor indexes of load bearing capability were produced by stochastic simulation according to on-site test data. Then the probability distribution of the bearing capacity partial check coefficients and the load bearing capacity were obtained by fuzzy comprehensive evaluation theory. Finally the load bearing capacity with certain guarantee rate was figured out. An example of reinforced concrete (RC) T type beam bridge was analyzed and the feasibility of the proposed method was demonstrated. The results provided reference for highway bridge bearing capacity evaluation and repair management.

Key words: beam bridge; load bearing capacity; fuzzy comprehensive evaluation; probability distribution; guarantee rate

(上接第87页)

[10] 岑少起,潘筱,秦东晨,等. ADAMS在汽车操纵稳定性仿真中的应用研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006,27(3): 55-58.

[11] 王福天. 车辆系统动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社,1994.

社,1994.

[12] 中华人民共和国建设部. 地铁限界标准: CJJ96—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[13] 高明. 城市轨道交通主要技术标准研究[D]. 北京交通大学道路与铁道工程学院,2011.

Simulation Research and Analysis on the Adaptability of Suspended Monorail Transport Line

LIU Wenglong, XU Yanhai

(1. School of Transportation and Automotive Engineering, Xi Hua University, Chengdu 610039, China; 2. Sichuan Key Laboratory of Automotive Control and Safety, Chengdu 610039, China)

Abstract: Dynamics performance of suspension monorail vehicles was tested in virtual prototyping simulation platform to analyze the changing law of line adaptability under multiple operating conditions and the relationship between line adaptability and load conditions (empty and heavy). Test results showed that in linear conditions, the index of stability conformed to the regulations of "Railway vehicles-Specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test" (GB/T 5599-1985); The maximum vibration acceleration conformed to the regulations of "the international standard of railway transportation" (UIC-513), which was promulgated by the international union of Railways. These results showed that the standard vehicle had good adaptability in linear conditions. In curve conditions, the maximum guiding force did not exceed the maximum load value and conformed to the safety operation standard, but the composition guiding forces of heavy vehicle was bigger than the safety operation standard, so the vehicle speed should be slow down.

Key words: suspended monorail; dynamics; comfortableness; stationarity; security

文章编号: 1671-6833(2017)04-0094-03

关于凸极小化的 Douglas-Rachford 分裂方法的一个注

康倍倍, 董云达, 王亚丽

(郑州大学 数学与统计学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 在一个实的无穷维 Hilbert 空间中, 研究关于凸极小化的 Douglas-Rachford 分裂方法. 假设目标函数中的 f 和 g 均为闭的真凸函数, 并且 f 的梯度是 Lipschitz 连续的. 分析了 Douglas-Rachford 分裂方法的弱收敛性, 其中邻近参数可以变化并且上界与 f 的梯度的 Lipschitz 常数有关.

关键词: 凸极小化; Douglas-Rachford 分裂方法; 邻近参数; 弱收敛性

中图分类号: O221.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.023

0 引言

设 H 为一个实的无穷维 Hilbert 空间, 假设 $f, g: H \rightarrow \mathbf{R} \cup \{+\infty\}$ 是闭的真凸函数, 并且 f 还是连续可微的. 考虑下面的凸极小化问题:

$$\min_{x \in H} f(x) + g(x).$$

该问题在优化、控制、管理以及信息科学中有着极为广泛的应用. 在适当的条件下, 相应的最优性条件:

$$0 \in \nabla f(x) + \partial g(x). \quad (1)$$

Douglas-Rachford 分裂方法^[1-2] (以后简称 DR 方法) 是解决此问题的一个经典方法. 任取 $z^0 \in H, \lambda > 0$, 相应的迭代格式为:

$$\begin{aligned} x^k &= (I + \lambda \nabla f)^{-1}(z^k); \\ y^k &= (I + \lambda \partial g)^{-1}(2x^k - z^k); \\ z^{k+1} &= z^k + y^k - x^k, \end{aligned}$$

此时, z^k 弱收敛于 $\bar{z} \in H$, 且 $\bar{x} = (I + \lambda \nabla f)^{-1}(\bar{z})$ 是问题(1)的解.

最近, 在 f 的梯度是 L -Lipschitz 连续的条件, Davis^[3] 证明了当 $\lambda < \kappa/L$ ($\kappa \approx 1.24698$) 时,

$f(y^k) + g(y^k) - f(x^*) - g(x^*) = o(1/k)$, 成立, 其中 x^* 是问题(1)的一个解点.

在本文中, 笔者讨论 DR 方法的等价形式^[2,4]: 任取 $x^0 \in H$, 相应的迭代格式:

$$\begin{aligned} x^k - \lambda_k \nabla f(x^k) &\in (I + \lambda_k \partial g)(\bar{x}^k); \quad (2) \\ x^{k+1} + \lambda_k \nabla f(x^{k+1}) &= \bar{x}^k + \lambda_k \nabla f(x^k). \quad (3) \end{aligned}$$

其中, $\lambda_k > 0$ 被称为邻近参数, 它在每次迭代中可

以有所变化.

笔者主要证明了若邻近参数序列同时满足:

$$\sum_{k=0}^{+\infty} \lambda_k^2 = +\infty, 0 < \lambda_k \leq \sqrt{2}/L,$$

则 $\{x^k\}$ 弱收敛于问题(1)的一个解点.

对比于 Davis 的工作, 在每次迭代中, 允许邻近参数有所变化, 并且其上界更优.

1 预备知识

在这一节中, 给出几个重要的引理.

引理 1 若 ∇f 是 L -Lipschitz 连续的, 即存在某个常数 $L > 0$, 使得

$$\|\nabla f(x) - \nabla f(y)\| \leq L \|x - y\|, \forall x, y \in H,$$

则有

$$f(x) \leq f(y) + \langle x - y, \nabla f(y) \rangle + \frac{L}{2} \|x - y\|^2, \quad (4)$$

$$\frac{1}{L} \|\nabla f(x) - \nabla f(y)\|^2 \leq \langle x - y, \nabla f(x) - \nabla f(y) \rangle, \quad (5)$$

其中性质(5)由 Baillon 等^[5] 最早提出.

引理 2^[4] 考虑任一极大单调算子 $T: H \rightarrow H$. 假设 $\text{dom}T$ 中的序列 $\{x^k\}$ 弱收敛于某一点 x , 并且 H 中的序列 $\{s^k\}$ 强收敛于某一点 s , 若 $s^k \in T(x^k)$ 对于每一个都成立, 则 $s \in T(x)$.

引理 3^[6] 若 $\{a_k\}, \{b_k\}, \{c_k\}$ 均为正数序列, 并且满足:

收稿日期: 2016-10-25; 修订日期: 2016-11-18

通信作者: 董云达(1969—), 男, 河南原阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事最优化方面的研究, E-mail: ydong@zzu.edu.cn.

$$\begin{aligned} b_{k+1} &\leq b_k; \\ \sum c_k &= +\infty; \\ a_{k+1}^2 &\leq a_k^2 - c_k b_k, \end{aligned}$$

则有 $\lim_{k \rightarrow \infty} b_k = 0$.

2 主要结果

在这一节中, 主要研究 DR 方法的弱收敛性.

定理 4 设 \mathbf{x}^* 为问题 (1) 的任一解点, $\{\mathbf{x}^k\}$ 和 $\{\bar{\mathbf{x}}^k\}$ 是由 DR 方法所产生的的序列, 则有

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^*\|^2 &\leq \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^*\|^2 - \\ &2\lambda_k(f(\bar{\mathbf{x}}^k) + g(\bar{\mathbf{x}}^k) - f(\mathbf{x}^*) - g(\mathbf{x}^*)) - \\ &\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2 - \left(\frac{2}{\lambda_k L} - \lambda_k L\right) \cdot \\ &\|\lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^k)\|^2. \end{aligned} \quad (6)$$

证明: 由式 (2) 可得

$$\lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^k) \in \partial g(\bar{\mathbf{x}}^k).$$

则由次微分的定义可得, 对 $\forall \mathbf{x}$, 有

$$g(\mathbf{x}) \geq g(\bar{\mathbf{x}}^k) + \langle \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}^k, \lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^k) \rangle. \text{ 即}$$

$$g(\bar{\mathbf{x}}^k) \leq g(\mathbf{x}) + \langle \bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}, \lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^k) \rangle. \quad (7)$$

因 ∇f 是 L-Lipschitz 连续的, 故由引理 1 中式 (4) 可得

$$\begin{aligned} f(\bar{\mathbf{x}}^k) &\leq f(\mathbf{x}^{k+1}) + \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})^T(\bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^{k+1}) + \\ &\frac{L}{2} \|\bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2. \end{aligned} \quad (8)$$

又由

$$f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}^{k+1}) + \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})^T(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{k+1}),$$

即

$$f(\mathbf{x}^{k+1}) \leq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})^T(\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}), \quad (9)$$

则式 (8) 与式 (9) 相加可得

$$\begin{aligned} f(\bar{\mathbf{x}}^k) &\leq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})^T(\bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}) + \\ &\frac{L}{2} \|\bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2. \end{aligned} \quad (10)$$

再由式 (7) 与式 (10) 相加可得

$$\begin{aligned} f(\bar{\mathbf{x}}^k) + g(\bar{\mathbf{x}}^k) - f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x}) &\leq \frac{L}{2} \|\bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2 + \\ &\langle \bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}, \lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^k) + \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) \rangle, \end{aligned}$$

从而

$$\begin{aligned} &2\lambda_k(f(\bar{\mathbf{x}}^k) + g(\bar{\mathbf{x}}^k) - f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x})) \leq \\ &2 \langle \bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}, \mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k - \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^k) + \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) \rangle + \\ &\lambda_k L \|\bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2 = 2 \langle \bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}, \mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1} \rangle + \lambda_k L; \\ &\|\lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^k)\|^2 = 2 \langle \mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}, \mathbf{x}^k - \\ &\mathbf{x}^{k+1} \rangle + 2 \langle \bar{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^{k+1}, \mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1} \rangle + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\lambda_k L \|\lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^k)\|^2 = \\ &\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}\|^2 - \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2 - \|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}\|^2 - \\ &2\lambda_k \langle \nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}), \mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1} \rangle + \\ &\lambda_k L \|\lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^k)\|^2 \leq \\ &\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}\|^2 - \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2 - \|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}\|^2 - \\ &2\lambda_k \frac{1}{L} \|\nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})\|^2 + \\ &\lambda_k L \|\lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^k)\|^2 = \\ &\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}\|^2 - \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|^2 - \|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}\|^2 - \\ &\left(\frac{2}{\lambda_k L} - \lambda_k L\right) \|\lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \lambda_k \nabla f(\mathbf{x}^k)\|^2. \end{aligned}$$

故, 令 $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ 即可得式 (6).

定理 5 若邻近参数序列同时满足

$$\sum_{k=0}^{+\infty} \lambda_k^2 = +\infty, 0 < \lambda_k \leq \sqrt{2}/L, \quad (11)$$

则由 DR 方法所产生的迭代点序列 $\{\mathbf{x}^k\}$ 弱收敛于问题 (1) 的一个解点.

证明: 设 \mathbf{x}^* 为问题 (1) 的任一解点, 则由命题 4 知式 (6) 成立, 即

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^*\|^2 &\leq \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^*\|^2 - 2\lambda_k(f(\bar{\mathbf{x}}^k) + g(\bar{\mathbf{x}}^k) - \\ &f(\mathbf{x}^*) - g(\mathbf{x}^*)) - \lambda_k^2 \|\lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1})\|^2 - \\ &\left(\frac{2}{\lambda_k L} - \lambda_k L\right) \lambda_k^2 \|\nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \nabla f(\mathbf{x}^k)\|^2. \end{aligned}$$

由假设条件 (11) 知 $\frac{2}{\lambda_k L} - \lambda_k L \geq 0$, 从而

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^*\|^2 &\leq \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^*\|^2 - \\ &\lambda_k^2 \|\lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1})\|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

令 $b_k = \min_{i=1,2,\dots,k} \{\|\lambda_i^{-1}(\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^{i+1})\|^2\}$; $c_k = \lambda_k^2$, 再由引理 3 和假设条件 (11) 可知 $b_k \rightarrow 0$. 这意味着序列 $\{\|\lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1})\|\}$ 中存在一个子列 $\{\|\lambda_{k_j}^{-1}(\mathbf{x}^{k_j} - \mathbf{x}^{k_j+1})\|\}$ 收敛于 0.

由式 (6) 可得 $\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\| \rightarrow 0$. 因为 ∇f 是 L-Lipschitz 连续的, 所以

$$\begin{aligned} \|\nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})\| &\leq L \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\| \rightarrow 0, \\ \text{从而整个序列} \{\nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})\} &\text{以范数收敛于 0. 结合式 (3) 知,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k) &= \lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}) + \nabla f(\mathbf{x}^k) - \\ &\nabla f(\mathbf{x}^{k+1}), \text{ 则有} \end{aligned}$$

$$\|\lambda_{k_j}^{-1}(\mathbf{x}^{k_j} - \bar{\mathbf{x}}^{k_j})\| \rightarrow 0. \quad (13)$$

另一方面, 由式 (3) 和假设条件 (11) 知,

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k\| &= \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1} + \lambda_k(\nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}))\| \leq \\ &\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\| + \lambda_k \|\nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})\| \leq \\ &\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\| + \frac{\sqrt{2}}{L} \|\nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\mathbf{x}^{k+1})\| \leq \\ &(1 + \sqrt{2}) \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\| \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (14)$$

接下来,我们来证明迭代点序列 $\{\mathbf{x}^k\}$ 的弱收敛性.首先,由式(12)知,序列 $\{\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^*\|\}$ 是非负递减的,从而极限存在.这意味着序列 $\{\mathbf{x}^k\}$ 是有界的.显然,序列 $\{\mathbf{x}^{k_j}\}$ 也是有界的,从而存在子列 $\{\mathbf{x}^{k_{j_l}}\}$,使得 $\{\mathbf{x}^{k_{j_l}}\}$ 弱收敛于 \mathbf{x}^∞ .结合式(14)知, $\{\bar{\mathbf{x}}^{k_{j_l}}\}$ 也弱收敛于 \mathbf{x}^∞ .其次,由式(2)知,

$$\lambda_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \bar{\mathbf{x}}^k) - (\nabla f(\mathbf{x}^k) - \nabla f(\bar{\mathbf{x}}^k)) \in (\nabla f + \partial g)(\bar{\mathbf{x}}^k).$$

沿着 k_{j_l} 取极限,并结合 $\nabla f + \partial g$ 的极大单调性、式(13)、式(14)和引理2可得:

$$0 \in (\nabla f + \partial g)(\mathbf{x}^\infty),$$

即 \mathbf{x}^∞ 为问题(1)的一个解点.至于迭代序列弱聚点的唯一性的证明,读者可参考文献[4].证毕.

3 结论

笔者对于凸极小化式(1)的DR方法,研究了邻近参数可以变化的情形,并且在保证全局弱收敛性的前提下,揭示了邻近参数的上界与式(1)中相应梯度的Lipschitz常数的内在关系.至于邻近点算法的 $o(1/k)$ -收敛率,可以参考文献[6].作为其特例的DR方法的情形,可以参考文献[3, 7].如何将笔者工作运用于压缩感知^[8],则是一个值得探讨的研究课题.

参考文献:

[1] LIONS P L, MERCIER B. Splitting algorithms for the

sum of two nonlinear operators [J]. SIAM journal on numerical analysis, 1979, 16: 964 - 979.

- [2] ECKSTEIN J, BERTSEKAS D P. On douglas-rachford splitting method and the proximal point algorithm for maximal monotone operators [J]. Mathematical programming, 1992, 55(3): 293 - 318 .
- [3] DAVIS D. On the design and analysis of operator splitting schemes [D]. Ph. D dissertation, UCLA, 2015.
- [4] DONG Y D, FISCHER A. A family of operator splitting methods revisited [J]. Nonlinear analysis, 2010, 72: 4307 - 4315.
- [5] BAILLON J B, HADDAD G. Quelques propriétés des opérateurs anglebornés et n-cycliquement monotones [J]. Israel journal of mathematics, 1977, 26: 137 - 150.
- [6] DONG Y D. The proximal point algorithm revisited [J]. Journal of optimization theory and applications, 2014, 161: 478 - 489.
- [7] DONG Y D. Douglas-Rachford splitting method for semidefinite programming [J]. Journal of applied mathematics and computing, 2016, 51(1): 569 - 591.
- [8] 张红梅,温荟然,张向利,等. 基于压缩特征的稀疏表示运动目标跟踪 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 21 - 26.

A Note on Douglas-Rachford Splitting Method for Convex Minimization

KANG Beibei, DONG Yunda, WANG Yali

(School of Mathematics and Statistics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In a real infinite-dimensional Hilbert space, Douglas-Rachford splitting method for convex minimization was studied. If f and g in the objective function were closed, proper convex, and the f 's gradient was Lipschitz continuous, then the method's weak convergence was analyzed. Our analysis allowed the corresponding proximal parameters to vary from iteration to iteration and their upper bound relied on Lipschitz constant of f 's gradient.

Key words: convex minimization; Douglas-Rachford splitting method; proximal parameter; weak convergence