

- 中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1671-6833

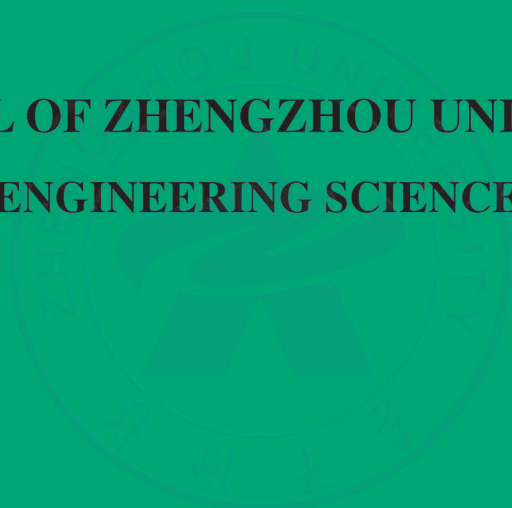
CN 41-1339/T

CODEN ZDXGAN

# 郑州大学学报

## 工学版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY  
ENGINEERING SCIENCE



# 2018.3

第39卷 第3期

Vo1.39 No.3

2018年5月出版

ISSN 1671-6833



# 郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY  
ENGINEERING SCIENCE

## 编 委 会

### 特邀编委：

申长雨( 中国科学院院士)

何季麟( 中国工程院院士)

张孟杰( 新西兰惠灵顿维多利亚大学)

刘炯天( 中国工程院院士)

金耀初( 英国萨里大学)

Kay Chen Tan ( 香港城市大学)

### 编委会主任：

邵国胜( 郑州大学)

### 编委(按姓氏笔画为序)：

王亚明( 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( 中原工学院)

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)

赵明皞( 郑州大学)

高丹盈( 河南工程学院)

唐 珂( 南方科技大学)

梁 静( 郑州大学)

韩一帆( 郑州大学)

臧双全( 郑州大学)

## 目 次

### 安全工程

- 科学层面的安全定义及其内涵、外延与推论 ..... 吴 超, 杨 冕, 王 秉( 1 )
- 含添加剂细水雾熄灭醇类火焰的有效性实验研究 .....  
..... 梁天水, 李润婉, 张单单, 王宗莹, 钟 委, 赵 军( 5 )

### 控制工程与计算机技术

- 基于观测器的网络控制系统均方指数稳定控制器设计 ..... 刘艳红, 杨东伟( 10 )
- 进化算法在大规模优化问题中的应用综述 ..... 梁 静, 刘 睿, 瞿博阳, 岳彩通( 15 )
- 数据驱动的发展式头脑风暴优化算法综述 ..... 程 适, 陈俊风, 孙奕菲, 史玉回( 22 )
- 基于光流共生矩阵的人群行为异常检测 ..... 曾庆山, 宋庆祥, 范明莉( 29 )
- 求解柔性作业车间调度问题的细菌算法对比及改进 ..... 吴秀丽, 张志强( 34 )
- 基于二次聚类的主动脉弓分割方法 ..... 陈中中, 杨亚茹, 张建飞, 王倩倩, 朱惠玉( 40 )

### 航空航天技术

- 基于非结构化月面复杂环境下 SLAM 技术研究进展 ..... 王依乔, 张 伟( 45 )
- 基于改进人工蜂群算法的多无人机协同任务规划 ..... 刘广瑞, 王庆海, 姚冬艳( 51 )
- 含扁率的希尔型三体系统太阳帆悬浮轨道设计 ..... 宋 明, 和兴锁, 闫业毫, 和东生( 56 )

### 机械工程

- 基于补充总体局部均值分解的轴承故障诊断方法 ..... 任子晖, 渠 虎, 王 翠, 陈 明( 62 )
- 装载机工作装置载荷测试样本长度确定方法 ..... 万一品, 宋绪丁, 陈乐乐( 67 )
- 1 m 口径空间相机主望远镜组件设计 ..... 卢晓明, 贾建军, 周成林, 方勇勇, 谢 永( 72 )
- 乘用车驻车制动自动装调系统研究 ..... 宋景芬, 夏 伟, 邓小禾, 何耀华( 77 )

### 材料工程及其他

- 基于 FBG 传感的 CFRP 层合板低速冲击响应监测 ..... 胡业发, 王 彬, 张锦光, 宋春生, 徐仕伟( 82 )
- 大型竖式还原罐壁面温度分布特性研究 ..... 车玉思, 王成铎, 孙玉福, 杨沛胥, 张少军( 87 )
- 突发饮用水污染下的水阀和消防栓的调度研究 ..... 邹 露, 颜雪松, 胡成玉( 93 )

**CONTENTS**

**【Safety Engineering】**

- Safety Definition, Intension, Extension and Inferences from Scientific View .....  
..... **WU Chao, YANG Mian, WANG Bing** ( 1 )
- Experimental Study on the Effectiveness of Alcohol Fire Extinguishing by Water Mist Containing Additives .....  
..... **LIANG Tianshui, LI Runwan, ZHANG Dandan, WANG Zongying, ZHONG Wei, ZHAO Jun** ( 5 )

**【Control Engineering & Computer Science and Technology】**

- Observer-Based Mean Square Exponential Stabilization of Networked Control Systems .....  
..... **LIU Yanhong, YANG Dongwei** ( 10 )
- A Survey of Evolutionary Algorithms for Large Scale Optimization Problem .....  
..... **LIANG Jing, LIU Rui, QU Boyang, YUE Caitong** ( 15 )
- Developmental Brain Storm Optimization Algorithms: From a Data-driven Perspective .....  
..... **CHENG Shi, CHEN Junfeng, SUN Yifei, SHI Yuhui** ( 22 )
- Detection of Human Behavior Anomaly Based on the Optical Flow Co-occurrence Matrix .....  
..... **ZENG Qingshan, SONG Qingxiang, FAN Mingli** ( 29 )
- The Comparison and Improvement of Bacterial Algorithms for Flexible Job Scheduling Problem .....  
..... **WU Xiuli, ZHANG Zhiqiang** ( 34 )
- Segmentation Method of the Aortic Arch Based on Quadratic Clustering .....  
..... **CHEN Zhongzhong, YANG Yaru, ZHANG Jianfei, WANG Qianqian, ZHU Huiyu** ( 40 )

**【Aerospace Engineering】**

- A Survey of Simultaneous Localization and Mapping on Unstructured Lunar Complex Environment .....  
..... **WANG Yiqiao, ZHANG Wei** ( 45 )
- Multi-UAV Cooperative Mission Planning Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm .....  
..... **LIU Guangrui, WANG Qinghai, YAO Dongyan** ( 51 )
- Design of Displaced Orbits for Solar Sail in Hill's Restricted Three-body Problem with Oblateness .....  
..... **SONG Ming, HE Xingsuo, YAN Yehao, HE Dongsheng** ( 56 )

**【Mechanical Engineering】**

- Research on Fault Diagnosis Method of Bearing Based on Complementary Ensemble Local Mean Decomposition .....  
..... **REN Zihui, QU Hu, WANG Cui, CHEN Ming** ( 62 )
- Study on Method for Determining Load Sample Length of the Loader Working Device .....  
..... **WAN Yipin, SONG Xuding, CHEN Lele** ( 67 )
- Component Design on Telescope with 1 m-Caliber Space Camera .....  
..... **LU Xiaoming, JIA Jianjun, ZHOU Chenglin, FANG Yongyong, XIE Yong** ( 72 )
- Research on Parking Brake Automatic Tuning System of Passenger Cars .....  
..... **SONG Jingfei, XIA Wei, DENG Xiaohe, HE Yaohua** ( 77 )

**【Materials Engineering and others】**

- Monitoring of CFRP Laminates under Low Velocity Impact Based on FBG Sensors .....  
..... **HU Yefa, WANG Bin, ZHANG Jinguang, SONG Chunsheng, XU Shiwei** ( 82 )
- Research of Wall Temperature Distribution of Large Vertical Reduction Pot .....  
..... **CHE Yusi, WANG Chengduo, SUN Yufu, YANG Peixu, ZHANG Shaojun** ( 87 )
- Research on Dispatching Algorithm of Valves and Hydrants under Sudden Drinking Water Pollution .....  
..... **ZOU Lu, YAN Xuesong, HU Chengyu** ( 93 )

# 科学层面的安全定义及其内涵、外延与推论

吴超, 杨冕, 王秉

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 为给出科学层面的“安全定义”, 从安全科学学的高度补充并完善刘潜先生提出的安全定义, 提出新的安全定义: “安全是一定时空内理性人的身心免受外界危害的状态”。基于此, 分析新的安全定义的内涵与外延, 并运用严谨的逻辑工具, 推导出其他安全科学基础概念的定义。结果表明, 由新的安全定义可推理演绎形成完整的安全科学概念群, 这是其他现有的安全定义所不能实现的。

**关键词:** 安全科学; 安全; 新定义; 内涵; 外延; 推论

**中图分类号:** X91

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.002

## 0 引言

定义是对于一种事物的本质特征或一个概念的内涵和外延的确切而简要的说明。学科的元定义可揭示其学科本质, 彰显其学科核心, 演绎其学科体系, 意义十分重大。但定义在不同学科中的重要性并非一样, 定义的唯一性越高, 其重要性越强。安全学科属于交叉综合学科, 安全科学研究者可基于不同视角阐释同一定义, 导致学科定义的唯一性不高, 统一定义的难度极大。早在1996年, 曾庆南<sup>[1]</sup>就指出“现在到了需要给安全概念下定义的时候了, 客观上已经有了这种需要”, 但学界至今仍未明确安全的定义, 且争议颇多。鉴于安全科学的理论研究源于对“安全”一词的定义, 若此元概念都不确切、不简明, 即可视为安全科学无根基, 安全科学理论研究更是无从谈起, 因此, 探讨并统一安全定义极为重要。

多年来, 国内外研究者对“安全”下了较多定义, 对其梳理, 可以概括出两个层面: ①社会层面的安全定义<sup>[2-5]</sup>; ②生活生产层面的安全定义, 如文献<sup>[6-13]</sup>。无论是从社会层面还是生活生产安全层面提出的安全定义, 它们共同的缺点是看不出安全概念的核心是人, 内容缺少心理安全或心理伤害的比重, 体现不出科学性和普适性。因此, 这些定义无法演绎出更多的外延乃至整个安全学科体系。

我国安全界的前辈之一刘潜给出的安全定义, 笔者认为比较具有科学性和普适性。刘潜将安全定义为: “安全是人的身心免受外界因素危害的存在状态(或称健康状况)及其保障条件。”<sup>[14]</sup>该定义特征显著, 有别于其它定义, 更重要的是该定义能够表达安全的内涵并有可能演绎出安全的外延及安全学科的体系。刘潜本人对该定义曾做过多次改动, 但笔者认为还需要对该定义做进一步完善, 原因包括: 该定义过于宽泛, 对人和时空都未限定; 一句话中还用了括号加以说明不够简洁; “存在状态”已经包含了其“保障条件”, 没有必要保留它; 对“安全”一词下定义之后并没有做更系统的深入分析。

## 1 安全新定义的内涵

基于上述分析, 笔者把刘潜的定义修改为: “安全是指一定时空内理性人的身心免受外界危害的状态(Safety is an existence condition that rational person's body and mind are not harmed by external factors in a certain time and space)。”新定义的内涵包括:

(1) 新的安全定义对时间和空间进行了限定。不同时期、不同地区、不同国家等对安全状态的认同度有很大的不同, 没有时空的限定谈安全将会产生混乱。在新的安全定义中加入“一定时空”表明安全是随时空的迁移而变化的。

收稿日期: 2017-10-12; 修订日期: 2017-12-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51534008)

作者简介: 吴超(1957—), 男, 广东揭阳人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事安全科学与工程领域研究, E-mail: wuchao@csu.edu.cn.

(2) 新的安全定义强调安全以人为本. 定义中用理性人是为了表达安全是以大多数正常人为本. 由此也可以推出, 个别非正常人和正常人在非理性状态时, 均不属于安全定义中所指的理性人. 另外, 定义中没有将物质与人并列是基于物质是在人之下的东西, 也就是说任何有形和无形的物质均是在人的安全之下的.

(3) 新的安全定义指出人受到的危害一定是来自外界, 把安全与人自身的生老病死区别开来, 人自身的生老病死不是安全科学的课题, 而是医学和生命科学等学科的课题, 这一点也把安全科学与医学和生命科学区别开来. 若一个人完全没有受到外界危害而自认为很不安全, 这类人肯定属于非正常人或是精神病人.

(4) 新的安全定义指出人受到外界因素的危害可分为三类: 一是身体受到危害, 对身体的伤害一般与人的距离较近, 而且是较短时间的, 身体的伤害痊愈后, 还可以留下心理创伤; 二是心理受到危害, 对心理的伤害可以是与人的距离很远, 而且可能是长期连续的伤害; 三是两种危害的同时作用与交互作用. 由此推出, 仅仅注意到人的身体危害是不科学的, 心理危害有时更加突出.

(5) 有价值物质的损失必然是人不希望看到的现象, 物质损失对人危害可归属为对人心理的伤害. 因此, 新的安全定义间接反映了物质损失的危害情况. 有价值的非物质文化损失和精神摧残等同样是对人的一种伤害, 理应归属于对人心理的伤害, 在新的安全定义中也可以表达出来.

(6) “外界”系指人-物-环、社会、制度、文化、生物、自然灾害、恐怖活动等各种有形无形的事物, 因此新的安全定义可以涵盖大安全的问题; 同时也表达了人的安全一定是与外界因素联系在一起的, 不能孤立地谈安全. 由此可以推出, 安全实际上一定是存在于一个系统之中, 讨论安全需要以系统为背景, 需要具有系统观.

(7) “人的身心免受外界危害”自然包括了职业健康或职业卫生问题, 即新的安全定义包含了职业健康或职业卫生, 不需要像其它安全定义一样对职业健康或职业卫生做专门注解.

(8) 由新的安全定义可看出: 安全科学的研究对象是关于保障人的身心免受外界危害的基本规律及其应用.

## 2 安全新定义的外延

(1) 新的安全定义可指明“降低外界因素对

人的危害程度”的3条主要途径: ①从免受外界因素对“身”的危害出发防控外界的不利因素, 这类因素主要是物因所致, 包括自然物和人造物, 其控制主要靠与安全有关的自然科学技术; ②从免受外界因素对“心”的不利影响出发防控外界的不利因素, 若仅是人的因素, 则更多依靠与安全相关的社会科学来解决; ③上述2类问题的复合和交互作用, 这类因素更加复杂, 包括人的因素和物的因素及2者的复合作用, 需依靠与安全有关的自然科学和社会科学的综合作用才能解决. 上述3条防控途径又可进一步用于建立安全模型, 并构建安全学科体系.

(2) 外界对“身”的危害往往有时空限制, 只要脱离特定的时空范围就可避开. 从免受外界因素对“身”的危害出发, 需研究构筑各类安全保障的条件, 包括自然和人为灾害的防范, 确保系统内人的安全; 同时也需对人进行安全教育, 使人自身有安全意识、知识和技能等, 能够辨识外界危险因素或有效应对各种伤害.

(3) 外界对“心”的危害是没有时空限制的, 可随时随地长时间影响或伤害个体或群体. 若从避免外界因素对“心”的伤害出发, 这需涉及政治稳定、社会和谐、文化繁荣、气候宜人、防灾减灾和保险机制健全、个人物质财产无损等宏观层面的问题, 同时也涉及人自身安全观念、安全心理和安全文化素养等内容.

(4) 外界对人的危害更多情况是对“身”和“心”同时造成伤害或交互造成伤害. 上述(2)和(3)中所阐述的保障“身”与“心”免受伤害的所有内容应当同时进行. 由此看出, 安全学科无疑是涉及广泛的综合学科.

(5) 如果用一个数值来表达系统在某一时空的安全状态, 这个数值一定是个平均值, 是大多数理性人所感知的安全数值的平均值; 既然是平均值, 那么每一个具体的理性人认为安全的数值一定与平均值有偏差, 但偏差必须限定在允许的范围内, 此时系统的安全标准趋于一致.

(6) 理论而言, 若某个体认为的安全数值与平均值有较大偏差, 就可将此个体归属为非正常人, 由此亦可照此原则辨识过于小心谨慎的人或过于放纵冒险的人, 可对人群进行分类和界定. 若系统中部分个体认为的安全数值远远超出平均安全数值, 则此系统的安全标准很难趋于一致.

(7) 系统中存在过于小心谨慎的人或是过于

放纵冒险的人,对系统的经济可靠运行都是不利的. 这类人越多,系统也越不安全可靠,或者说系统越危险. 为保障系统安全可靠,这类偏离安全允许数值的个体(或构成的群体)是安全管理的重要对象. 具体解决办法有: ①把这类人剔出系统,使系统内人群的安全标准趋于一致,这是简单可靠的方法,但由于安全人性决定了正常人在不同时空里也会变成非正常人甚至变成恐怖分子,因此这种方法实际上是一种理想化且不太可行的方法; ②纠正这类人的安全认知偏差,这需用到多种

方法,实施过程比较困难.

(8) 按照新的安全定义,借助逻辑工具,可构建安全模型,进而构建安全学科体系,形成安全学科的研究方向,促进安全专业的学科建设和开展安全科学研究,也可指导具体系统的安全管理工作.

3 安全新定义的推论

(1) 根据新定义及相关定义,可以推论出一系列安全科学的基础定义,见表1.

表1 由新的安全定义推论而来的安全科学基础定义及其逻辑表达

Tab.1 Basic definitions of safety science and their logical expressions from the new safety definition					
编号	概念	符号	定义	逻辑表达	
1	安全	$S$	安全是指一定时空内理性人的身心免受外界危害的状态.	$S = \{x \mid x \in L, L \leq 0\}$ , 式中, $x$ 为人的身心状态, $L$ 为危害.	
2	危害	$L$	危害是指一定时空内理性人的身心受到外界损害的状态.	$L = f(x_1, x_2)$ , 式中, $x_1$ 为人员伤亡; $x_2$ 为心理创伤.	
3	危险	$D_1$	危险是指一定时空内理性人的身心可能受到外界危害的状态.	$D_1 = k \cdot L, 0 < k < 1$ .	
4	风险	$R$	风险是指一定时空内理性人的身心受到外界危害的可能性 $P_L$ 及其严重度 $C_L$ .	$R = P_L \cdot C_L$ .	
5	事故	$A$	事故是指一定时空内理性人的身心已经受到外界危害的结果.	$x \in A \mapsto \forall x: L(x)$ .	
6	隐患	$D_2$	隐患是可能造成一定时空内理性人身心危害的外界因素.	$D_2 = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}, L \subseteq \neq D_1$ .	
7	危险源	$H$	危险源是确定能够造成一定时空内理性人身心危害的外界因素.	$x \in H \mapsto \forall x: D_1(x)$ .	
8	重大危险源	$BH$	重大危险源是在特定时空里存在着确定的可以使人身心受到重大危害的外界因素.	$x \in BH \mapsto \forall x: D_1(x), R > k_0$ , $k_0$ 为临界值.	

按表1的例子类推,还可以推论出更多的安全学科新定义或新概念. 由表1也看出,新的安全定义威力很大,便于用其描述安全科学中其他的定义,而且具有逻辑性,可以运用逻辑工具进行表达.

(2) 根据新定义,可以对安全学科中各分支学科的概念进行定义,例如,“安全教育学”是以保障一定时空内理性人的身心免受外界危害为目标的教育学. 通用的定义表达式为“安全  $X$  是以保障一定时空内理性人的身心免受外界危害为目标的  $X$ ”,其中  $X$  的取值见式(1):

$$X =$$

技术	科学	人性	人性学	法规	法学	...
工程	系统学	心理	心理学	管理	管理学	...
观	哲学	行为	行为学	经济	经济学	...
伦理	伦理学	教育	教育学	文化	文化学	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋱

(1)

(3) 根据新定义,可以推论出各行业安全术语的定义,例如,“农业安全”是指人们在从事农业活动时,其身心免受外界危害的状态. 通用的定义表达式为“ $Y$  安全是指人们在从事  $Y$  活动时,其身心免受外界危害的状态”,需补充说明的是“ $Y$  活动的工艺技术装备安全应主要归属于  $Y$  技术”,例如,农业活动的工艺技术装备安全应主要

归属于农业技术,商业活动的金融安全应主要归属于金融财务.其中  $Y$  的取值见式(2):

$$Y = \begin{bmatrix} \text{职业} & \text{生产} & \text{工业} & \text{化工} & \text{矿业} & \text{冶金} & \cdots \\ \text{建筑} & \text{农业} & \text{交通} & \text{商业} & \text{信息} & \text{互联网} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}. \quad (2)$$

(4) 根据新定义,可以推论出各类行业安全科学术语的定义,例如,“农业安全科学”是在农业活动中保障人的身心免受外界危害的基本规律及其构成的知识体系.通用的定义表达式为“ $Z$ 安全学是在  $Z$  活动中保障人的身心免受外界危害的基本规律及其构成的知识体系”.其中  $Z$  的取值见式(3):

$$Z = (\text{职业} \text{ 生产} \text{ 工业} \text{ 农业} \text{ 商业} \text{ 交通} \text{ 信息} \text{ 互联网} \cdots). \quad (3)$$

(5) 根据新定义,还可以推论出安全科学原理的内涵.“原理”是自然科学和社会科学中具有普遍意义的基本规律,是在大量观察、实践的基础上,经过归纳、概括而得出的结论,既能指导实践,又必须接受实践的检验.因此,“安全科学原理”是使人的身心免受外界危害的具有普遍意义的基本规律.首先,研究“人的身心免受危害”所总结出的普遍性规律可称为“安全生命科学原理”;其次,“外界因素”主要包括自然因素、技术因素和社会因素(将自然因素和技术因素分开是由于考虑到“天然”和“人工”的差异性),因此研究“避免外界因素的危害”所总结出的普遍性规律可分别称为“安全自然科学原理”、“安全技术科学原理”及“安全社会科学原理”;第三,“人的身心”免受“外界因素”的危害构成了涉及上述生命、自然、技术、社会四个因素的系统,从系统角度研究保障人的身心免受外界危害所得到的普遍性规律称之为“安全系统科学原理”.综上,“安全科学原理”包括了“安全生命科学原理”、“安全自然科学原理”、“安全技术科学原理”、“安全社会科学原理”和“安全系统科学原理”<sup>[15]</sup>.

## 4 结论

(1) 安全是一定时空内理性人的身心免受外界危害的状态.物质安全是处于人的安全之下的,物质损失实际上是对人造成心理伤害.新的安全定义更加突出了人是安全概念的本质与核心,具

有科学性和普适性,其内涵和外延十分丰富,可以衍生出许多重要的安全学科基本定义或概念,具有重大意义.

(2) 由新的安全定义与现有其他安全定义的重要区别和最大优势是:借助数理逻辑工具,可以从新的安全定义推理演绎整个安全科学的概念群,从而构建出安全科学的学科体系,为开展安全学科建设提供指导,这是现有其他安全定义所不能实现的.

## 参考文献:

- [1] 曾庆南. 安全概念的定义探析[J]. 安全, 1997, 18(3): 40-43.
- [2] WALT M S. The origins of alliance (cornell studies in security affairs) [M]. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1990.
- [3] ULLMAN R H. Redefining security [J]. International Security, 1983, 8(1): 129-159.
- [4] 安东尼·吉登斯. 现代性与自我认同[M]. 北京: 北京三联书店, 1998: 16.
- [5] BUZAN B. People, state and fear: An agenda for international security studies in the post-cold war era [M]. Boulder, CO: Lynne Rienner, 1991: 3.
- [6] 刘跃进. “安全”及其相关概念[J]. 江南社会学院学报, 2000, 2(3): 17-23.
- [7] 隋鹏程, 陈宝智. 安全原理与事故预测[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [8] 肖爱民. 安全系统工程学[M]. 北京: 中国劳动出版社, 1992.
- [9] 徐德蜀. 安全科学与工程导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [10] 张景林, 林柏泉. 安全学原理[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2013.
- [11] 罗云, 许铭. 公共安全科学公理与定理初探[J]. 中国公共安全(学术版), 2012(3): 16-19.
- [12] 傅贵, 杨春. 安全学科的重要名词及其管理意义讨论[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(6): 145-148.
- [13] 毛海峰. 论“安全”及“安全性”的概念[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(4): 62-66.
- [14] 刘潜. 安全科学和学科的创立与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 122.
- [15] 吴超, 杨冕. 安全科学原理及其结构体系研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(11): 3-10.

(下转第28页)



# 含添加剂细水雾熄灭醇类火焰的有效性实验研究

梁天水, 李润婉, 张单单, 王宗莹, 钟 委, 赵 军

(郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 为探究含不同添加剂细水雾熄灭醇类火焰的效果, 对含不同浓度尿素、钾盐、FC-4 添加剂的细水雾分别开展灭火实验. 结果表明: 同等条件对比含不同浓度尿素细水雾的平均灭火时间, 含 1% 尿素细水雾熄灭酒精火焰时间最短, 与纯水相比灭火时间减少率达到了 44.63%; 含  $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$  细水雾熄灭酒精火和煤油火的平均灭火时间均为最小, 灭火时间减少率分别达到了 31.35%、73%; 含  $KHCO_3$  的细水雾熄灭酒精火和煤油火的平均灭火时间最大, 灭火时间减少率分别为 6.75%、57.56%. 由此对比可得, 含钾盐细水雾熄灭煤油火比酒精火的效果要好. 在复合添加剂中, 含 0.05% 的 FC-4、1% 的尿素和  $0.2 \text{ mol/L } K^+$  浓度的  $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$  的细水雾熄灭酒精火的平均灭火时间最短, 灭火时间减少率也达到了 87.90%, 灭火效果显著. 对比上述分析可知, 含复合添加剂细水雾的酒精灭火效果更好, 可以实现有效灭火.

**关键词:** 酒精; 细水雾; 尿素; 钾盐; 复合添加剂

**中图分类号:** X932

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.004

## 0 引言

醇类燃料不仅燃烧清洁、大幅度降低有害物质的产生, 而且来源也十分广泛, 煤制甲醇、生物质乙醇的应用更使得醇类燃料发展成为新型代用燃料. 但随着醇类燃料的广泛应用, 由此引发的火灾也越加频繁. 而细水雾在熄灭酒精火方面具有一定的效果<sup>[1]</sup>, 加入添加剂后又可以大大提升细水雾的灭火性能, 实现高效灭火.

近些年, 国内外对于细水雾的研究主要集中在含有添加剂的细水雾熄灭碳氢火方面. Wu 等<sup>[2]</sup>在油池火与木垛火实验中指出, 添加无机盐、氟表面活性剂可以分别提高细水雾的化学、物理灭火性能. Joseph 等<sup>[3]</sup>综合性地对比了几种常用添加剂细水雾的灭火效率, 结果指出:  $NaCl$ 、 $KCl$  或  $KHCO_3$  的庚烷火灭火效果最好,  $MnCl_2$ 、 $ZnCl_2$  和  $CuCl_2$  次之, 而  $(NH_4)_2HPO_4$ 、 $(NH_2)_2CO$  和  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$  的灭火效果最差. Huang 等<sup>[4]</sup>发现含有不同类型添加剂的细水雾在熄灭汽油火时, 对灭火时间的影响大小表现为: 碳氢表面活性剂 > 螯合剂 > 氟碳表面活

性剂 > 乳化剂 > 防燃剂 > 增稠剂 > 防冻剂. 而余明高等<sup>[5]</sup>和赵乘寿等<sup>[6]</sup>从均相反应、异相反应角度对含添加剂细水雾的灭火效果进行了分析, 认为添加剂会在水中解离成相应的离子来参与燃烧链式反应, 并通过不断夺走燃烧链所需的载体  $OH^-$  和  $H^+$ , 以达到熄灭火焰的目的.

酒精作为水溶性燃料, 其灭火过程中会表现出不同于碳氢燃料燃烧时所产生的灭火机理, 而相关灭火机理研究甚少. 目前研究多集中在细水雾熄灭酒精火实验及其相关方面. 秦俊等<sup>[7]</sup>最先利用三维 LDV/APV 系统有效测量出了细水雾发生器的雾场特性参数, 证明了细水雾熄灭煤油火和酒精火的可行性. 张笑男等<sup>[8]</sup>首次在机械通风条件下对细水雾抑制酒精火展开了研究, 并指出施加细水雾后抑制了酒精燃烧放热, 有效阻隔了热辐射, 降低了总热流值. 邓思玉等<sup>[9]</sup>曾在小尺度灭火模型中指出, 当预燃时间为 30 s、喷雾压力为 2 MPa、火源设定为 100 g 时, 酒精火和汽油火的灭火时间达到了 63 s 和 36 s, 影响酒精火、汽油火熄灭的关键因素分别是细水雾喷雾压力和预

收稿日期:2017-10-11; 修订日期:2017-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51404215); 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2012-KF01)

作者简介:梁天水(1981—), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 从事火灾科学与消防技术研究, E-mail: Liangt-sh@zzu.edu.cn.

燃时间. 而从北华等<sup>[10]</sup>指出含添加剂细水雾熄灭烷烃火的效果要比酒精好. 因此, 为了更好地探究细水雾在熄灭醇类火焰过程中所发生的化学反应, 开展含添加剂细水雾熄灭醇类火焰的灭火性能研究就很有必要. 为了探究含添加剂细水雾熄灭酒精火焰的灭火效果, 笔者选取尿素、钾盐、FC-4 作为细水雾的添加剂, 研究在小尺度灭火模型中各组细水雾熄灭酒精火焰的化学灭火效果, 并对各添加剂在灭火过程中所发挥的效用进行分析.

## 1 实验装置

实验装置由高压氮气瓶、储水罐(容积10 L)、圆形油盆、热电偶、喷头及软管等构成. 具体布置如图1所示. 燃料试样选用直径为10 cm、深度6 cm的油盆盛装, 油盆距地面0.8 m, 喷头竖直向下, 位于油盆正上方1 m, 工作压力为1 MPa. 在不锈钢盆内布置 $T_0$ 热电偶, 用来测量燃料温度; 在火源表面中心处布置 $T_1$ 热电偶, 然后沿着表面中心线向上每隔5 cm布置一个热电偶, 共布置 $T_0 \sim T_8$ 个热电偶, 测量数据通过模块由电脑收集处理. 每次所用的无水酒精燃料试样均为300 mL, 预燃时间20 s. 实验时环境温度为25℃, 相对湿度为30%.

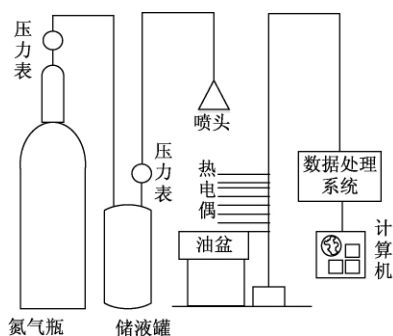


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

在实验过程中, 采用1 MPa工作压力下直径10 cm的油盆. 由于细水雾灭火过程中存在火焰吹熄的现象<sup>[11]</sup>, 实验时也发生了这种现象, 火焰在细水雾施加瞬间熄灭. 因此, 为了确保测得数据的准确性, 瞬间熄灭的实验结果被剔除(小于1 s), 并通过多次实验来选取5组有效实验数据进行讨论.

## 2 结果与讨论

### 2.1 含尿素添加剂细水雾实验分析

选取纯水和质量分数分别为0.5%、1%、2%、3%尿素细水雾进行酒精灭火实验, 同时将含

各种添加剂的细水雾与纯水细水雾的灭火时间进行对比, 得出灭火时间减少率, 具体如图2所示.

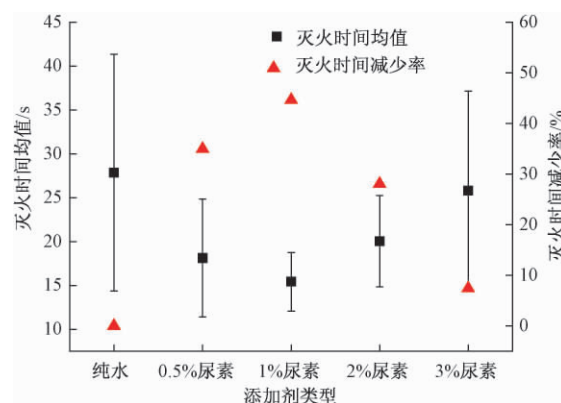


图2 含尿素细水雾熄灭酒精火灭火时间

Fig.2 The extinguishing alcohol fire time of water mist containing urea

根据灭火时间均值分布可知, 在0~1%的尿素浓度范围内, 细水雾扑灭酒精火的效果是随着浓度的升高而提升的. 这是由于加入添加剂后, 降低了雾滴的平均蒸发速率, 而且速率还随着添加剂浓度的增加而不断下降<sup>[12]</sup>. 但是随着尿素浓度的进一步提高, 灭火效果变化并不明显, 而在1%尿素浓度时灭火时间最短, 为15.42 s.

灭火时间标准差情况反映出的细水雾灭火时间的稳定性与灭火时间均值的变化规律相近, 通过对比不同尿素浓度下细水雾与纯水的灭火时间减少率可知: 当尿素添加量为1%时系统灭火时间减少率最大, 为44.63%, 灭火效果最好. 分析实验中热电偶温度变化情况可知, 在30 s左右施加细水雾后, 各位置热电偶温度下降都比较快, 特别是10 cm处热电偶的温度变化最明显, 具体如图3所示. 可以看出, 含1%尿素的细水雾灭火时的火焰温度下降斜率最大, 温度抑制效果最好.

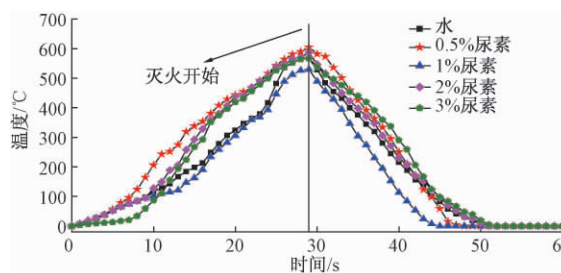


图3 10 cm处细水雾灭火过程中火焰温度变化情况

Fig.3 The changes of flame temperature in water mist fire extinguishing process at 10 cm

在施加细水雾灭火的整个过程中, 酒精火焰形态变化如图4所示. 施加细水雾后, 池火得到有



图 4 灭火过程中酒精火焰形态变化

Fig. 4 Change of alcohol flame shape in the process of fire extinguishing

浓度尿素细水雾的灭火时间变化呈现为“V”形,分析原因如下.

在低浓度尿素细水雾灭火过程中,由于无水酒精火焰温度高,尿素分解快,会发生化学反应: $(\text{NH}_2)_2\text{CO}=\text{NH}_3+\text{HNCO}$ , $\text{HNCO}+\text{H}_2\text{O}=\text{NH}_3+\text{CO}_2$ ,产生助燃物质  $\text{NH}_3$ . 但此时细水雾中尿素的含量较少,产生的  $\text{NH}_3$  对火焰的作用,远远低于因尿素颗粒较小、分解速度加快所造成的细水雾与酒精火焰间的湍流效应,这也就表现为灭火时间的减少. 而随着尿素浓度的增加,细水雾中尿素颗粒增大,分解速度会逐渐降低,这使得尿素细水雾的湍流效应可能会逐渐趋于稳定,但是产生的  $\text{NH}_3$  含量却会增加,即在尿素质量分数为 1% 的细水雾的湍流作用最显著,灭火时间为最短. 而当尿素浓度继续增加时,分解产物  $\text{NH}_3$  会大量增加,所带来的助燃作用就会超过细水雾与酒精火焰的湍流效应,进而使得灭火时间增加,这也与 Joseph<sup>[3]</sup> 的实验结果类似. 因此,在后续含尿素细水雾灭火实验中,应选择较低浓度的尿素添加剂.

此外,在整个灭火过程中,尿素热分解也会吸收大量的热量,降低燃烧反应温度;尿素的体积膨胀系数大约为 1 400,尿素产生的化学动力学作用也会在一定程度上促进火焰熄灭.

2.2 含有钾盐添加剂的细水雾实验分析

分别配制含  $\text{K}^+$  浓度为 0.2 mol/L 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{KHCO}_3$  和  $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$  添加剂的细水雾,以酒精、煤油为燃料,分别重复多次实验,实验结果如表 1 所示.

根据钾盐细水雾的灭火时间均值数据可知,不管是酒精火还是煤油火, $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$  细水雾的平均灭火时间均为最短,分别为 19.12 s、9.72 s,灭火时间减少率分别达到了 31.35%、73%; $\text{KHCO}_3$  细水雾的平均灭火时间最长,分别为 25.96 s、15.28 s,灭火时间减少率分别为 6.75%、57.56%. 由此可知:含钾盐细水雾熄灭煤油火比酒精火的

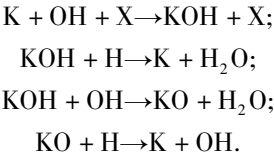
表 1 含钾盐细水雾的灭火时间

Tab. 1 The extinguishing alcohol fire time of water mist with potassium

燃料	添加剂 类型	灭火时间 均值/s	灭火时间 标准差/s	灭火时间 减少率/%
酒精	$\text{K}_2\text{CO}_3$	24.73	3.06	11.20
	$\text{KHCO}_3$	25.96	3.42	6.75
	$\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	19.12	4.15	31.35
煤油	纯水	36.0	14.63	—
	$\text{K}_2\text{CO}_3$	13.64	2.98	62.11
	$\text{KHCO}_3$	15.28	1.96	57.56
	$\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	9.72	1.76	73

平均灭火时间短,灭火时间减少率高,基本上都超过了 50%,灭火效应良好. 由灭火时间标准差可知,含钾盐细水雾熄灭煤油火的稳定性要比酒精火好.

含钾盐细水雾在熄灭酒精火的过程中,溶解在细水雾中的  $\text{K}^+$  均会捕捉醇类、烃类燃料燃烧所产生的 O、H 和 OH 自由基,使得燃烧链式反应中断,燃烧终止.



然而,文献 [13] 的研究表明,尽管酒精和煤油的燃烧过程和产物基本相同,但在燃烧初始阶段,酒精火焰会产生大量含氧基,而煤油火焰中仅有微量的含氧基存在,这使得自由基含量分布出现差异. 即自由基含量分布在煤油、酒精火焰中分别为  $\text{H} > \text{O} > \text{OH}$ <sup>[14]</sup>,  $\text{OH} > \text{O} > \text{H}$ <sup>[15]</sup>. 因此,含钾盐细水雾熄灭酒精火的效果比煤油火差的原因可能为:

(1) 同酒精火相比,煤油火中含有大量的 H 自由基,而 H 自由基又具有相对较强的扩散性与活性,可加快燃料燃烧的化学反应速率,进而加剧碱金属  $\text{K}^+$  捕捉自由基的反应,使得煤油火更容易熄灭.

(2) 燃烧火焰产生的自由基会与  $K^+$  碰撞而使得链式反应中断, 即  $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$ , 但此放热过程并不需要消耗活化能. 而在灭火过程中, 随着细水雾的施加, 会降低系统温度, 加快了反应的右向进行, 加速断链反应, 进而减少  $H$  自由基直至火焰熄灭, 因此, 煤油火更容易被熄灭.

### 2.3 含复合添加剂的细水雾灭火实验分析

FC-4 是一种氟碳表面活性剂, 可以显著降低溶剂的表面张力<sup>[16]</sup>; 且在上述实验中可以发现, 含 1% 尿素细水雾、钾盐细水雾均具有较好的灭火效果, 因此, 将质量分数 0.05% 的 FC-4、1% 的尿素分别与各种含有 0.2 mol/L  $K^+$  浓度的钾盐组成复合型添加剂来进行灭火实验, 结果如表 2 所示.

表 2 含复合添加剂细水雾熄灭酒精火的灭火时间

Tab.2 The extinguishing alcohol fire time of water mist with compound additives

灭火添加剂	平均灭火时间/s	灭火时间标准差	灭火时间减少率/%
FC-4	5.78	0.490 0	79.25
尿素 + FC-4	5.26	0.990 0	81.13
尿素、 $KHCO_3$ 、FC-4	4.23	0.848 1	84.81
尿素、 $K_2CO_3$ 、FC-4	3.85	0.861 8	86.17
尿素、 $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$ 、FC-4	3.37	0.879 0	87.90

根据实验结果可知, 含复合添加剂细水雾的灭火时间减少率都达到 80% 左右, 均显示出一定的火焰抑制效果. 当单一添加 FC-4 时, 细水雾的灭火效应就得到有效提高, 再添加尿素、钾盐后, 又缩短了灭火时间, 且规律与含钾盐细水雾灭火实验基本一致. 其中, 由尿素、 $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$ 、FC-4 组成的复合型添加剂细水雾的平均灭火时间最短, 为 3.37 s, 灭火时间减少率也达到了 87.90%, 显示出较好的灭火效果.

综合实验结果可知, 含有复合添加剂细水雾的灭火效果要远比单一添加剂好. 结合上述含尿素细水雾灭火实验可知, 加入质量分数为 1% 的低浓度尿素能够在一定程度上提高细水雾灭火的湍流效应. 这是由于尿素颗粒可以从低辐射火焰中吸收更多的热量, 并在火焰附近分解; 又因为尿素热分解率较高, 在较高温度下酒精火焰将产生较强的湍流, 进而抑制火焰燃烧; 而且尿素在高温下受热分解, 需要吸收大量的热量, 降低了燃烧反应温度, 提高细水雾的灭火性能. 文献[17]曾指出, 效果最好的添加剂是钾化合物, 灭火过程中发挥主要灭火作用的产物为 KOH, 而且也指出草酸钾添加剂的灭火效果要比其他钾盐更好, 这与实

验结果相符. 而在复合添加剂中加入钾盐, 溶解的  $K^+$  会捕捉  $H$  和  $OH$  自由基, 不仅中断燃烧链式反应, 还会产生 KOH 等灭火物质, 进而抑制火焰燃烧. 氟碳表面活性剂不仅在高温下极其稳定, 还能在较低浓度下显著降低体系的表面张力<sup>[18]</sup>, 而这正好可以缓解因钾盐和尿素的添加而提高了溶液表面张力的不利影响, 进而提高细水雾的产雾量. 因此, 在复合添加剂中加入 FC-4 氟碳表面活性剂, 不仅能够改善细水雾的雾化性能, 提高产雾量, 还可以隔绝空气和燃料蒸汽、冷却燃料温度、降低蒸发速率以及可燃蒸汽量, 实现快速高效地灭火. 也正是由于尿素、钾盐及 FC-4 三者的相互作用, 才使得含复合添加剂细水雾的灭火效果更好.

### 3 结论

将尿素、钾盐、FC-4 作为细水雾的添加剂, 来探究各组细水雾在酒精灭火实验中所发挥的效用, 结论如下:

(1) 与其他含有不同浓度尿素细水雾相比, 含质量分数 1% 尿素细水雾具有较好的酒精灭火效果. 这是因为尿素的添加, 增强了细水雾与酒精火焰的湍流效应, 而在 1% 尿素细水雾的湍流效应最显著, 从而表现出良好的灭火效果.

(2) 含钾盐细水雾熄灭煤油火比酒精火的平均灭火时间短, 灭火时间减少率高. 这是由于煤油燃烧会比酒精燃烧产生更多活性更高的  $H$  自由基, 不仅加速了断链反应  $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$  的右向进行, 而且更易被  $K^+$  捕获而中断燃烧链式反应, 使得煤油火焰比酒精火更易被扑灭.

(3) 含质量分数 0.05% 的 FC-4、1% 的尿素和  $K^+$  浓度为 0.2 mol/L 的  $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$  的复合添加剂细水雾具有较好的酒精灭火效果. 这主要是因为: 通过尿素受热分解可以吸收大量热量来降低酒精燃烧反应温度; 钾盐以及尿素高温分解产物与维持燃烧的自由基反应来抑制酒精火焰燃烧; FC-4 覆盖在酒精表面起到降低液体酒精的蒸发速率、隔绝可燃物等作用, 最终实现含复合添加剂细水雾的有效灭火.

### 参考文献:

- [1] LIANG T S, LIU M J, WEI X L, et al. An experimental study on the interaction of water mist with vertical/horizontal spray flame [J]. Procedia engineering, 2014, 84: 543 - 552.

- [2] WU B B, LIAO G X. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive [J]. *Procedia engineering*, 2013, 62: 317–323.
- [3] JOSEPH P, NICHOLS E, NOVOZHLOV V, et al. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist [J]. *Fire safety journal*, 2013, 58(6): 221–225.
- [4] HUANG Y S, ZHANG W C, DAI X J, et al. Study on water-based fire extinguishing agent formulations and properties [J]. *Procedia engineering*, 2012, 45(2): 649–654.
- [5] 余明高, 郝强, 段玉龙, 等. 含氯化钴添加剂细水雾灭火有效性的实验研究 [J]. *火灾科学*, 2007, 16(2): 81–85.
- [6] 赵乘寿, 宫聪, 汪鹏, 等. 含磷酸二氢铵细水雾灭火有效性研究 [J]. *消防科学与技术*, 2011, 30(9): 822–824.
- [7] 秦俊, 王喜世, 廖光焯, 等. 细水雾发生及抑制液体火焰的实验研究 [J]. *量子电子学报*, 2003, 20(3): 370–374.
- [8] 张笑男, 王喜世, 周洋, 等. 机械通风条件下细水雾抑制酒精火的试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(5): 154–159.
- [9] 邓思玉, 杨克, 纪虹, 等. 细水雾抑制受限空间汽油与酒精火的研究 [J]. *消防科学与技术*, 2016, 35(10): 12–16.
- [10] 丛北华, 毛涛, 廖光焯. 含 NaCl 添加剂细水雾对不同燃料池火灭火性能的实验研究 [J]. *热科学与工程*, 2004, 3(1): 65–70.
- [11] LIANG T S, LIU M J, LIU Z L, et al. A study of the probability distribution of pool fire extinguishing times using water mist [J]. *Process safety & environmental protection*, 2014, 93(4): 240–248.
- [12] 刘江虹, 廖光焯. 含添加剂细水雾熄灭甲烷/空气火焰的研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(10): 1240–1244.
- [13] 张志远, 郑建军, 黄佐华, 等. 不同初始条件下乙醇-空气预混合气层流燃烧火焰结构分析 [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2011, 25(1): 36–40.
- [14] 刘静忱. 航空煤油数值模拟替代燃料的反应动力学研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学动力与能源工程学院, 2013.
- [15] 唐华浩, 孙俊, 李格升, 等. 乙醇预混层流火焰结构的模拟研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2009(2): 66–69.
- [16] KOSHIBA Y, IIDA K, OHTANI H. Fire extinguishing properties of novel ferrocene/surfynol 465 dispersions [J]. *Fire safety journal*, 2015, 72: 1–6.
- [17] ZHANG T W, HAN Z Y, DU Z M, et al. Application of thermal mechanism to evaluate the effectiveness of the extinguishment of  $\text{CH}_4$ /air cup-burner flame by water mist with additives [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2016, 41(33): 15078–15088.
- [18] 赵春霞, 徐卡秋, 唐聪明. 氟碳表面活性剂及其在消防领域中的应用 [J]. *日用化学工业*, 2004, 34(6): 377–380.

## Experimental Study on the Effectiveness of Alcohol Fire Extinguishing by Water Mist Containing Additives

LIANG Tianshui, LI Runwan, ZHANG Dandan, WANG Zongying, ZHONG Wei, ZHAO Jun

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

**Abstract:** In order to investigate the effect of water mist containing different additives on the alcohol extinguishing fire, extinguishing experiments were carried out on water mist with different urea concentrations, potassium salt and FC-4 additives. The average fire extinguishing time of water mist with different concentrations of urea was compared under the same conditions. Comparing with water mist, water mist containing 1% urea extinguished the alcohol fire in the shortest time, the extinguishing time reduction rate reached 44.63%. Water mist with  $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  extinguished alcohol and kerosene fire in the minimal average extinguishing time, the extinguishing time reduction rate of fire suppression were 31.35%, 73% respectively. Water mist with  $\text{KHCO}_3$  extinguished alcohol and kerosene fire in the maximal average extinguishing time, and reduction rates were 6.75%, 57.56% respectively. Water mist containing potassium extinguishing kerosene fire effect was better than to alcohol fire by contrast. Of all the compound additives, Water mist containing 0.05% FC-4, 1% urea and  $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  with 0.2 mol/L  $\text{K}^+$  extinguished the alcohol fire in the shortest time. And the extinguishing time reduction rate of fire suppression was 87.90%, the effect of fire suppression was remarkable. Compared with the above analysis, water mist containing compound additives was the better in alcohol extinguishing fire effect, and can realize extinguishing fire effectively.

**Key words:** alcohol; water mist; urea; potassium salts; compound additives



# 基于观测器的网络控制系统均方指数稳定控制器设计

刘艳红, 杨东伟

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对具有随机时延、状态难以测量等问题的网络控制系统, 提出一种基于状态观测器的均方指数稳定控制器设计方法. 使用变采样周期的方式将网络控制系统离散化, 将系统建模为马尔科夫跳变系统, 然后设计了基于状态观测器的反馈控制器, 证明了闭环系统的均方指数稳定性, 通过求解线性矩阵不等式给出了观测器和控制器反馈增益设计方法. 仿真结果验证了所提设计方法的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 变采样周期; 马尔科夫模型; 观测器; 均方指数稳定

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.020

## 0 引言

网络控制系统是具有分布式结构的闭环控制系统, 通过网络按照一定传输协议通讯. 但是网络传输过程中普遍存在时延和数据丢包等现象, 导致系统性能下降甚至不稳定. 目前国内外研究人员针对网络控制系统的稳定性分析和控制问题开展了大量研究工作. 文献[1-2]研究了马尔科夫跳变系统的稳定性, 并给出了系统稳定的必要条件, 设计了状态反馈控制器. 文献[3-4]研究了具有传感器到控制器、控制器到执行器两类时延的网络控制系统的稳定性分析问题, 采用 Lyapunov 方法给出了系统稳定的条件, 但所采用的时延模型未能很好地刻画网络时延的特性. 文献[5-7]利用变采样周期方法研究了包含传感器到控制器时延的网络控制系统问题, 设计了状态反馈控制器, 但计算量较大且没有考虑控制器的实现问题, 难以应用于实际网络控制系统. 文献[8]研究了一类具有随机网络诱导时延的控制系统  $H_\infty$  滤波器问题, 但是未考虑传感器到控制器随机采样时延. 文献[9]针对线性时变网络控制系统, 通过将系统离散化设计了稀疏状态观测器, 并分析了系统的稳定. 文献[10]针对随机时延采用时延预测补偿的方式提高系统对参考输入信号的跟随性能, 但对稳定控制问题没有进行研究.

本文研究基于状态观测器的网络控制系统的均方指数稳定控制问题. 首先通过变采样周期将系统转化为离散化系统, 并将传感器到控制器的时延建模为马尔科夫过程, 较为准确地描述了网络时延的特性; 然后设计了基于观测器的反馈控制器, 分析了闭环系统的均方指数稳定性; 最后利用 Schur 补引理将观测器和控制器设计转换为线性矩阵不等式的求解问题, 给出了反馈控制增益及观测器增益的求解方法. 数值算例和网络环境下车摆系统的均方指数稳定控制仿真结果验证了笔者所提出的控制器设计方法的有效性.

## 1 问题描述

图1所示为单边双通道网络控制系统.

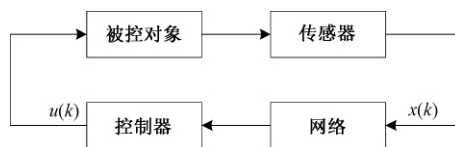


图1 网络控制系统结构

Fig.1 Structure of network control system

系统满足以下条件<sup>[11]</sup>:

- (1) 控制器、执行器与被控对象之间以及传感器与被控对象之间采取直接连接方式, 无网络诱导时延.
- (2) 传感器与控制器之间采用网络连接方

收稿日期:2017-04-20; 修订日期:2017-06-18

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

作者简介:刘艳红(1970—), 女, 河南孟州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事复杂系统分析与控制研究, E-mail: liuyh@zzu.edu.cn.

式,网络时滞仅仅存在于传感器与控制器之间.

被控对象的动态模型为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$  为系统状态;  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$  为控制输入;  $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^c$  为系统输出.

对系统进行变采样周期采样,采样周期由网络时延决定,即  $T_k = d_k$ ,将传感器到控制器的时延  $d_k \in (\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n)$  建模为马尔科夫链,其转移概率矩阵满足:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{bmatrix},$$

式中:  $\lambda_{rs}$  为系统时延  $d_k$  从时延  $\tau_r$  跳变到时延  $\tau_s$  的概率,  $\sum_{s=1}^n \lambda_{rs} = 1$ , 其中  $r, s \in (1, 2, 3, \dots, n)$ . 则系统(1)的离散化模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_k(T_k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_k(T_k) \mathbf{u}(k); \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k), \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_k$  是时刻  $k$  的变采样周期;  $\mathbf{A}_k(T_k) = e^{\mathbf{A}T_k}$ ;  $\mathbf{B}_k(T_k) = \int_0^{T_k} e^{\mathbf{A}s} \mathbf{B} ds$ ;  $\mathbf{x}(k)$ 、 $\mathbf{u}(k)$  和  $\mathbf{y}(k)$  分别为  $k$  时刻系统状态、输入和输出的采样值.

由于系统状态不易直接测量,考虑如下基于状态观测器的反馈控制:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}_k(T_k) \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}_k(T_k) \mathbf{u}(k) + \mathbf{F}_k(\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k); \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k); \\ \mathbf{u}(k) = \mathbf{K}(T_k) \hat{\mathbf{x}}(k), \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\hat{\mathbf{x}}$  为观测器的状态;  $\hat{\mathbf{y}}$  为状态观测器输出;  $\mathbf{F}_k$  为观测器增益;  $\mathbf{K}(T_k)$  为控制器反馈增益.

状态观测器误差向量  $\mathbf{e}_k(k) = \mathbf{x}_k(k) - \hat{\mathbf{x}}_k(k)$  满足:

$$\mathbf{e}_k(k+1) = \mathbf{A}(T_k) \mathbf{e}_k(k) - \mathbf{F}_k \mathbf{C} \mathbf{e}_k(k). \quad (4)$$

定义增广状态向量  $\mathbf{z}(k) = [\mathbf{x}^T(k) \ \mathbf{e}^T(k)]^T$ , 则闭环系统可以表示为:

$$\mathbf{z}(k+1) = [\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{C}}] \mathbf{z}(k), \quad (5)$$

式中:  $\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} \end{bmatrix}$ ,  $\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix}$ ,  $\bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix}$ .

本文的目的是设计基于观测器的反馈控制器,使得闭环系统均方指数稳定,即存在  $\alpha \in (0, 1)$  和  $\beta > 1$ , 使得系统满足<sup>[12]</sup>:

$$E\{\|\mathbf{z}(k)\|^2\} < \beta \alpha^k \|\mathbf{z}(0)\|^2. \quad (6)$$

## 2 控制器增益与稳定性分析

**定理1** 如果存在矩阵  $\mathbf{P}(\tau_i) = \mathbf{P}^T(\tau_i) > 0$  满足:

$$(\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{C}})^T \sum_{s=1}^n \lambda_{rs} \mathbf{P}(\tau_s) (\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{C}}) - \mathbf{P}(\tau_r) < 0, \quad \tau_r \in d_k, \quad (7)$$

则闭环系统(5)均方指数稳定.

**证明** 选择 Lyapunov 函数

$$V(\mathbf{z}(k)) = \mathbf{z}^T(k) \mathbf{P}(\tau_r) \mathbf{z}(k), \quad (8)$$

则

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(k), k\} &= E\{\mathbf{z}^T(k+1) \mathbf{P}(\tau_r) \mathbf{z}(k+1) | \mathbf{x}(k)\} - \\ &\mathbf{z}^T(k) \mathbf{P}(\tau_r) \mathbf{z}(k) = \mathbf{z}^T(k) ((\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{C}})^T \cdot \\ &\sum_{s=1}^n \lambda_{rs} \mathbf{P}(\tau_s) \times [\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{C}}] - \mathbf{P}(\tau_r)) \mathbf{z}(k). \end{aligned} \quad (9)$$

由条件(7)可得  $E\{\Delta V(k), k\} < 0$ , 故存在  $0 < a_k < 1$ , 使得

$$E(V(\mathbf{z}(k+1)), k+1) < a_k V(\mathbf{z}(k)), k, \text{ 即}$$

$$E(V(\mathbf{z}(1)), 1) < a_1 V(\mathbf{z}(0)), 0,$$

$\vdots$

$$E(V(\mathbf{z}(k)), k) < a_k V(\mathbf{z}(k-1)), k-1.$$

选择  $\alpha = \max\{a_1, \dots, a_k\}$ , 则有

$$E(V(\mathbf{z}(k)), k) < \alpha^k V(0). \quad (10)$$

此外,注意到:

$$\begin{aligned} \lambda_{\min} \mathbf{P}(i) \mathbf{z}^T(k) \mathbf{z}(k) &\leq \mathbf{z}^T(k) \mathbf{P}(i) \mathbf{z}(k) \leq \\ &\lambda_{\max} \mathbf{P}(i) \mathbf{z}^T(k) \mathbf{z}(k), \end{aligned} \quad (11)$$

有

$$E(\|\mathbf{z}(k)\|^2) < \beta \alpha^k \|\mathbf{z}(0)\|^2. \quad (12)$$

其中,  $\beta = \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{P}(i))}{\lambda_{\min}(\mathbf{P}(i))}$ , 故闭环系统均方指数稳定.

下面通过 Schur 补引理<sup>[13]</sup> 将反馈增益的求解问题转化为线性矩阵不等式的求解问题.

**定理2** 如果存在适当维数的矩阵

$$\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{n \times n}, \mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{m \times n},$$

使得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}^{-1}(\tau_r) - \mathbf{N} - \mathbf{N}^T & \mathbf{N}^T \mathbf{J}^T(\tau_r) \\ \mathbf{J}(\tau_r) \mathbf{N} & -\mathbf{D} \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

则闭环系统(5)均方指数稳定,且控制器与观测器增益可由  $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \mathbf{N}^{-1} \bar{\mathbf{C}}^{-1}$  确定. 其中

$$\mathbf{P}(\tau_r) \in \mathbb{R}^{n \times n}, \mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n^2 \times n^2},$$

$$\mathbf{J}(\tau_r) \in \mathbb{R}^{n^2 \times n}, \mathbf{J}(\tau_r) \mathbf{N} = \sqrt{\pi_{rs}} (\bar{\mathbf{A}} \mathbf{N} + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{Y}),$$

$$\mathbf{J}(\tau_r) = [\sqrt{\lambda_{r1}} [\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{C}}]^T, \dots,$$

$$\sqrt{\lambda_m} [\bar{A} + \bar{B}G\bar{C}]^T]^T$$

$$D = \text{diag}\{P^{-1}(\tau_1), P^{-1}(\tau_2), \dots, P^{-1}(\tau_n)\}.$$

证明 式(13)左右两边分别乘以  $[J(\tau_r), I]$  和  $[J(\tau_r), I]^T$ , 可得

$$[J(\tau_r), I] \begin{bmatrix} P^{-1}(\tau_r) - N - N^T & N^T J^T(\tau_r) \\ J(\tau_r)N & -D \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} J^T(\tau_r) \\ I \end{bmatrix} = [J(\tau_r)P^{-1}(\tau_r) - J(\tau_r)N^T \quad J(\tau_r)N^T J^T(\tau_r) - D] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} J^T(\tau_r) \\ I \end{bmatrix} = J(\tau_r)P^{-1}(\tau_r)J^T(\tau_r) - D < 0. \quad (14)$$

根据 Schur 补引理,有

$$\begin{bmatrix} -P(\tau_r) & J^T(\tau_r) \\ J(\tau_r) & -D \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

从而有

$$J^T(\tau_r)D^{-1}J(\tau_r) - P(\tau_r) < 0. \quad (16)$$

将

$$J(\tau_r) = [\sqrt{\lambda_{r1}} [\bar{A} + \bar{B}G\bar{C}]^T, \dots, \sqrt{\lambda_{rn}} [\bar{A} + \bar{B}G\bar{C}]^T]^T,$$

$$D = \text{diag}\{P^{-1}(\tau_1), P^{-1}(\tau_2), \dots, P^{-1}(\tau_n)\}$$

代入式(16), 可得

$$(\bar{A} + \bar{B}G\bar{C})^T \sum_{s=1}^n \lambda_{rs} P(\tau_s) (\bar{A} + \bar{B}G\bar{C}) - P(\tau_r) < 0.$$

根据定理 1 可知闭环系统均方指数稳定.

### 3 仿真

#### 3.1 数值算例

考虑下面网络控制系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -20 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 640 \end{bmatrix} u(t); \\ y(t) = [1 \quad 0] x(t), \end{cases}$$

转移概率矩阵:  $\begin{bmatrix} 0.855 & 0.145 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,

离散化系统动态方程参数为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.0899 \\ 0 & -0.8182 \end{bmatrix}; \quad B_1 = \begin{bmatrix} 29.0909 \\ 58.1818 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.0949 \\ 0 & -0.9040 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} 30.4761 \\ 30.4761 \end{bmatrix}.$$

根据定理 2, 通过求解线性矩阵不等式可得控制器和观测器增益分别为:

$$K_1 = [-0.0128 \quad 0.0077];$$

$$K_2 = [-0.0164 \quad 0.0133];$$

$$F_1 = [0.1095 \quad -0.8391]^T;$$

$$F_2 = [0.0971 \quad -0.9052]^T.$$

假设初始状态  $x(0) = [0 \quad 2]^T$ , 为了验证本文方法的有效性, 与文献[14]中基于固定采样周期的控制器进行仿真比较, 仿真结果如图 2~图 5 所示. 从仿真结果可以看出, 利用马尔科夫方法对时延建模, 并采用笔者所提出的基于变采样周期观测器反馈控制策略, 能够有效降低网络诱导时延对被控系统的影响, 系统状态  $x_1$  和  $x_2$  的超调量减小, 响应速度快, 且观测器误差能够在较短时间内收敛到 0, 验证了在随机网络诱导时延作用下本文控制器的有效性.

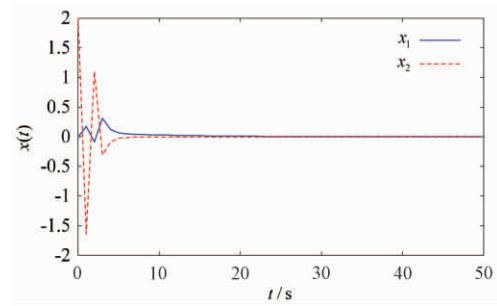


图 2 基于本文控制器的状态响应曲线

Fig.2 State response under the proposed controller in this paper

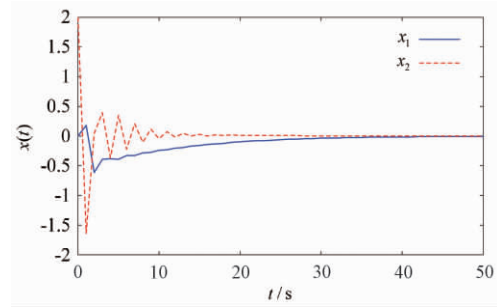


图 3 基于固定采样周期方法的状态响应曲线

Fig.3 State response under constant sampling method

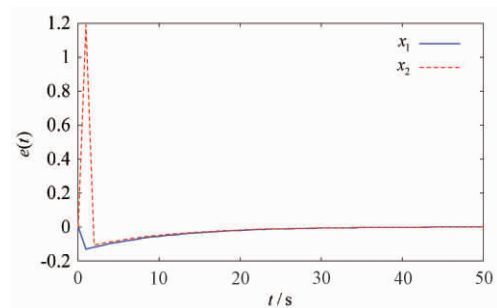


图 4 状态观测器误差响应曲线

Fig.4 Response of the state observer error

#### 3.2 网络环境下车摆系统稳定控制

笔者忽略小车所受的摩擦力且不计空气阻



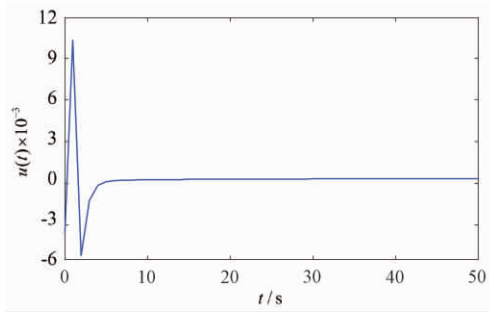


图5 控制输入曲线

Fig. 5 Response of the control input

力,网络环境下车摆系统的动态控制方程可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m^2 gl^2}{q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{mgl(M+m)}{q} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(I+ml^2)}{q} \\ 0 \\ \frac{ml}{q} \end{bmatrix} u;$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix},$$

式中:  $\mathbf{x}(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$  为状态变量,  $x_1, x_2, x_3$  和  $x_4$  分别为小车水平位移、速度、倒立摆角度和角速度; 输入  $u$  为作用在小车上的力;  $m=1$  kg, 为小车质量;  $M=0.5$  kg, 为摆杆质量;  $q=I(M+m)+Mml^2$ ;  $l=1$  m, 为摆杆长度.

传感器到控制器的采样时延  $d(k) \in (0.1, 0.2)$ , 其转移概率矩阵为:  $\begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix}$ .

根据定理 2, 可得使得系统均方指数稳定的反馈控制器和观测器增益分别为:

$$\mathbf{K}_1 = [1.6048 \ 4.396 \ -68.1567 \ -24.3340];$$

$$\mathbf{K}_2 = [1.3608 \ 2.8447 \ -43.4151 \ -15.0494];$$

$$\mathbf{F}_1 = [0.1026 \ 0.0166 \ 0.0017 \ 1.0503]^T;$$

$$\mathbf{F}_2 = [0.0045 \ 0.0684 \ 0.2135 \ 1.2053]^T.$$

仿真结果如图 6~10 所示. 从仿真结果可以看出, 采用本文方法设计的控制策略能够使车摆系统在受到传感器到控制器随机网络时延时避免出现大幅度震荡, 系统状态均能够快速收敛到平衡状态, 验证了控制器方案的有效性.

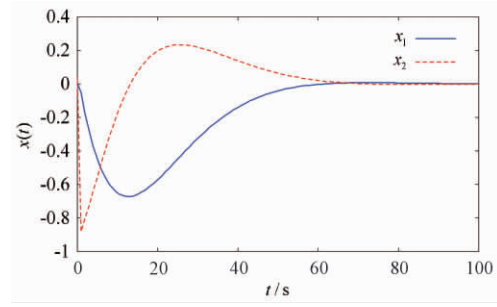


图6 小车响应曲线

Fig. 6 Response of the state of the vehicle

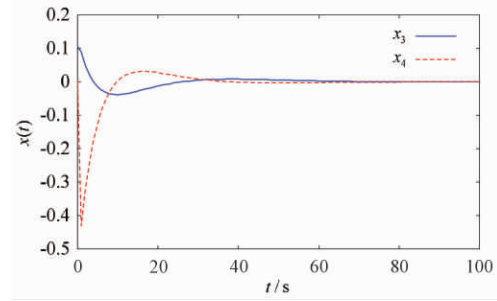


图7 倒立摆响应曲线

Fig. 7 Response of the state of the inverted pendulum

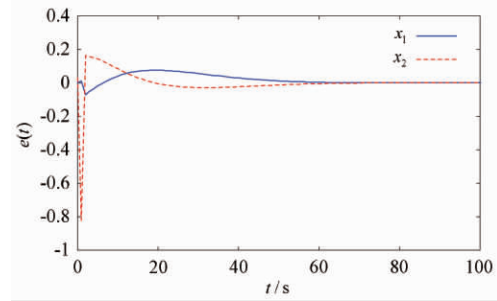


图8 状态观测器误差响应曲线

Fig. 8 Response of the state observer error

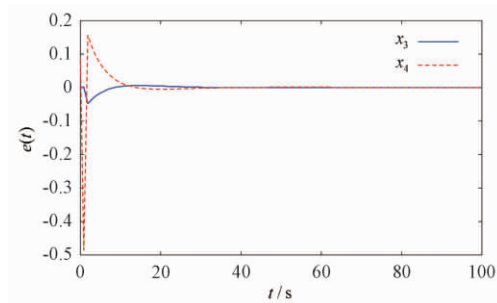


图9 状态观测器误差响应曲线

Fig. 9 Response of the state observer error

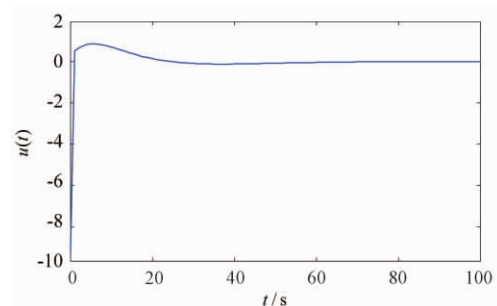


图10 控制输入曲线

Fig. 10 Response of the control input

## 4 结论

笔者对基于状态观测器的网络控制系统均方指数稳定控制问题进行研究. 首先采用变周期采样将系统离散化并建模为马尔科夫跳变系统; 然后设计了状态观测器和反馈控制器, 证明了闭环系统的稳定性; 最后采用 Schur 补引理把观测器和控制器增益矩阵的求解问题转化为线性矩阵不等式的求解问题. 仿真结果验证了笔者所提控制方案的有效性.

## 参考文献:

- [1] XIAO N, XIE L H, FU M Y. Stabilization of markov jump linear systems using quantized state feedback [J]. *Automatica*, 2010, 46(10): 1696–1702.
- [2] 赵立英, 窦立亚, 刘贺平. 具有时变时滞的变采样周期网络控制系统的稳定性分析 [J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(8): 1123–1127.
- [3] SHI Y, YU B. Output feedback stabilization of networked control systems with random delays modeled by Markov chains [J]. *IEEE transactions on automatic control*, 2009, 54(7): 1668–1674.
- [4] JI M M, LI Z J, YANG B, et al. Stabilization of markov jump linear systems with input quantization [J]. *Circuits, systems, and signal processing*, 2015, 34(7): 2109–2126.
- [5] 于水情, 李俊民. 变采样周期网络控制系统的量化状态反馈控制 [J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(7): 814–817.
- [6] CLOOSTERMAN M B G, HETEL L, WOUW N V D, et al. Controller synthesis for networked control systems [J]. *Automatica*, 2010, 46(10): 1584–1594.
- [7] TRUONG D Q, AHN K K. Robust variable sampling period control for networked control systems [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2015, 62(9): 5630–5643.
- [8] 张端金, 刘雪, 范鑫. 基于 Delta 算子时变时延网络控制系统的  $H_\infty$  滤波 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37(2): 10–14.
- [9] RAZEGHI – JAHROMI M, SEYEDI A. Stabilization of networked control systems with sparse observer controller networks [J]. *IEEE transactions on automatic control*, 2015, 60(6): 1686–1691.
- [10] 刘艳红, 罗永平, 刘言兴. 基于改进型 JGPC 的网络系统随机时延补偿 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35(1): 30–33.
- [11] 王欣, 康宇, 尚伟科. 一类基于双通道网络的离散 Markov 跳跃系统的鲁棒控制 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2013, 43(4): 278–286.
- [12] XU Y, SU H Y, PAN Y J. Output feedback stabilization for markov-based nonuniformly sampled-data networked control systems [J]. *Systems & control letters*, 2013, 62(8): 656–663.
- [13] XIONG J L, LAM J. Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss [J]. *Automatica*, 2007, 43(1): 80–87.
- [14] 邢伟, 孙阳, 戴良萃. 基于观测器的时延网络控制系统稳定性 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(4): 457–465.
- [15] 桑英军, 范媛媛, 徐才千. 单级倒立摆控制方研究 [J]. *控制工程*, 2010, 17(6): 743–745.

## Observer-Based Mean Square Exponential Stabilization of Networked Control Systems

LIU Yanhong, YANG Dongwei

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

**Abstract:** In order to tackle the stochastic time delay and state measurement obstacle in networked control systems, an observer-based mean square exponential stabilization controller was proposed in this paper. Firstly, the considered networked system was discretized by variable-period sampling and was modelled as a Markov jump system. Then, an observer and feedback controller was constructed. The mean square exponential stability of the closed loop system was shown. The observer and feedback gain was given by solving linear matrix inequalities. Simulation results demonstrated the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** network control system; variable-period sampling; Markov model; observer; mean square exponential stability

# 进化算法在大规模优化问题中的应用综述

梁 静<sup>1</sup>, 刘 睿<sup>1</sup>, 瞿博阳<sup>2</sup>, 岳彩通<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)

**摘 要:** 针对大规模问题的特点, 对已有的大规模进化算法进行了简单的分析, 主要介绍算法的初始化方法、不分组策略、静态分组策略、动态分组策略、自适应分组策略、大规模优化算法测试函数集以及算法结果的对比等方面; 侧重描述优化算法的搜索策略、更新策略、突变策略和协同进化策略, 并列出了大规模优化算法测试函数集的特点及优化算法的评价方法; 最后, 给出了目前大规模优化问题的几个研究难点。

**关键词:** 大规模优化问题; 进化算法; 协同进化; 种群初始化; 基准测试函数

**中图分类号:** TP18

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.016

## 0 引言

当今很多优化问题已经从简单问题发展成为复杂问题. 许多科学和工程应用问题都可以设计成大规模优化问题来进行求解, 例如: 大型电力系统、大量的资源调度问题、大规模交通网络的车辆路径规划等. 然而随着优化问题越来越复杂, 一些经典的算法已经不能满足实际需要. 最近几年进化优化在许多实值和组合优化问题上取得了很大的成功, 但是大多数的随机优化算法都会遭受“维数灾难”. 因此, 近些年学者们利用进化算法进行了多种有价值的尝试, 并且针对大规模优化问题组织了专题会议, 如 Special Session on Evolutionary Computation for Large Scale Global Optimization, 设计了新的测试函数、建立了相关的网站, 并且在 IEEE Transactions on Evolutionary Computation、Information Sciences、Soft Computing、Applied Soft Computing 等优秀期刊也刊登了对于大规模问题的研究进展, 显示出此研究领域的重要性.

## 1 数学表述

大规模优化问题可以用式(1)表述:

$$\min/\max F(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), x \in X. \quad (1)$$

式中,  $X \subseteq \mathbb{R}^n$  表示可行解集;  $n$  表示搜索空间的维数 (即决策变量的个数);  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$  表示决策变量;  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$  则表示一个从  $n$  维空间映射

到一维适应度值  $F(x)$  的实值非连续性目标函数. 在大规模设置中决策变量的个数  $n$  一般大于 100<sup>[1]</sup>, 通常达到 1 000 维以上.

## 2 解决方法

在算法开始阶段, 文献[2]给出了针对大规模问题的初始化方法, 可以更加有效地寻找极点. 而对于算法的主体部分, 一般来说主流的策略可以分为两大类: 协同进化策略和不分组策略. 协同进化策略是由分治策略进化而来, 主要思想是把大规模复杂问题分解成单变量或低维简单问题逐一解决; 而不分组策略是运用一些特殊的策略或联合其他有效的算法来改进它们在解决大规模问题时的性能.

### 2.1 种群初始化方法

种群初始化方法主要包括以下 5 类: 随机方法、定值设定法、两步式方法、混合方法和具体应用法. 随机生成是最常用的方法, 然而, 在面对大规模优化问题 (决策变量超过 100) 时, 这种初始化方法效果不佳. 文献[2]主要列出了一些不同初始化方法的对比研究.

在随机方法中, 比较常用的是使用随机数产生器随机生成. 而定值设定法则比较偏向于在搜索空间中产生均匀分布的点, 在缺乏问题先验知识的情况下, 一个比较均匀的种群可以促进算法在迭代早期的探索能力. 近些年, 两步式初始化方

收稿日期:2017-05-04; 修订日期:2017-08-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61673404, 61473266)

作者简介:梁静(1981—), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事进化计算理论与应用研究,  
E-mail: liangjing@zzu.edu.cn.

法在研究中较为常用,此方法分为前期产生初始点,后期根据条件改进这些点.混合方法一般来说是一些基础方法的组合.具体应用法则是指根据一些特殊的实值问题专门设计的初始化方法.文献[3]给出了现在常用的8种初始化方法(与DE算法相结合)的测试结果,使用的测试函数是CEC'2008<sup>[4]</sup>.

## 2.2 不分组策略

学者们一般根据算法在不同阶段的特性设置不同的策略来解决低维问题,所以,针对大规模优化问题改进这些策略是一种比较常用的方法.

### 2.2.1 子代产生策略

一般来说,每种进化算法都有固定的子代产生策略.但是,对于大规模问题,使个体广泛分布在高维空间中比较困难.在每次迭代过程中,算法不断的收敛,因此下一代的学习策略很重要,不仅要向好的方向进化还要在搜索空间中广泛探索.文献[5]提出了反向学习策略,这种产生策略具有空间的导向性,可以增加种群的多样性,因此将其融入DE算法来解决大规模优化问题.文献[6]提出了基于广义反向学习的DE算法,该算法用广义反向学习方法(generalized opposition-based learning, GOBL)产生子代个体,用DE算法对产生的个体进行优化.图1表示4个不同的广义反向学习的模型,其中, $x$ 是当前解, $x^*$ 是反向解.

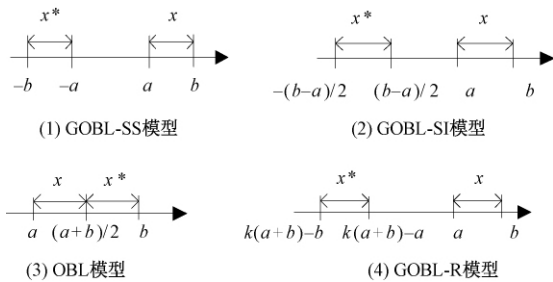


图1 4个不同的广义反向学习模型

Fig.1 Four different GOBL models

图1分别表示了文献[6]中所使用的4个GOBL模型,其中 $a$ 表示搜索空间的下界, $b$ 表示搜索空间的上界,而GOBL-R模型是上述模型的一般表达式.当 $k=0$ 时,是GOBL-SS模型;当 $k=1/2$ 时,是GOBL-SI模型;当 $k=1$ 时,是OBL模型.这些模型用于产生新个体并与原始个体混合进行选择.

### 2.2.2 新的变异策略

JADE是Zhang于2009年提出把变异策略和外部存档策略相结合的自适应方法<sup>[7]</sup>.在无存档策略中,突变向量用式(2)产生:

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{i,g} + F_i \cdot (\mathbf{x}_{\text{best},g}^p - \mathbf{x}_{i,g}) + F_i \cdot (\mathbf{x}_{r1,g} - \mathbf{x}_{r2,g}), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}_{i,g}$ 表示第 $g$ 代第 $i$ 个个体; $r1, r2$ 是从集合 $\{1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, NP\}$ 中均匀抽取的两个不同的整数;把当前种群按适应度值从大到小排列,从前 $p\%$ 的个体中随机抽取一个作为 $\mathbf{x}_{\text{best},g}^p$ ,并且 $p \in (0, 100]$ ;  $F_i$ 是由 $\mathbf{x}_i$ 决定的突变因子.

笔者在比较当前种群时,发现劣解可以为种群进化方向提供有用的信息.定义 $\mathbf{A}$ 为劣解归档集; $\mathbf{P}$ 为当前种群;有存档的突变策略“DE/current-to-pbest/1”的突变向量用式(2)产生时, $\mathbf{x}_{r2,g}$ 是从 $\mathbf{P} \cup \mathbf{A}$ 中随机选择的个体.

文献[8]则给出了针对大规模全局优化的连续差分进化邻域搜索算法(sequential differential evolution enhanced by neighborhood search, SDENS),此算法主要分为两部分:①针对每个个体通过局部和全局邻域搜索策略产生两个实验个体;②从当前个体和两个新产生的实验个体中选取合适的一个作为新的当前个体.局部和全局邻域搜索策略在文献[8]中是一种突变策略.

一般来说,DE/target-to-best/1突变策略(如式(3)所示)主要着重于开发(exploitation),即所有的个体都会向同样的最优值 $\mathbf{X}_{\text{best}}$ 移动,这样就造成算法收敛过快<sup>[9]</sup>.Das等在文献[9]中改进了DE/target-to-best/1突变策略,提出了两个突变策略:局部邻域和全局邻域.

$$\mathbf{V}_{i,G} = \mathbf{X}_{i,G} + F \cdot (\mathbf{X}_{\text{best},G} - \mathbf{X}_{i,G}) + F \cdot (\mathbf{X}_{r1,G} - \mathbf{X}_{r2,G}), \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{best},G}$ 表示在当前代 $G$ 种群的最优位置; $r1, r2 \in \{1, 2, \dots, N_p\}$ ,且 $i \neq r1 \neq r2$ .

局部邻域突变中最优位置是小邻域中的最优位置,不是全部种群的最优.改进后的模型表示如式(4):

$$\mathbf{L}_{i,G} = \mathbf{X}_{i,G} + \alpha \cdot (\mathbf{X}_{n\text{-best},G} - \mathbf{X}_{i,G}) + \beta \cdot (\mathbf{X}_{p,G} - \mathbf{X}_{q,G}), \quad (4)$$

式中:下标 $n\text{-best}_{i,G}$ 表示 $\mathbf{X}_{i,G}$ 邻域的最优个体;邻域大小是 $k$ ;  $p, q \in [i-k, i+k]$ 且 $p \neq q \neq i$ .个体会向其相应邻域的最优点靠近,特殊点的吸引力减弱,这样就避免陷入局部最优.

全局邻域突变在原始DE/target-to-best/1突变策略中加上了 $\alpha$ 和 $\beta$ 这两个比例因子,如式(5)所示:

$$\mathbf{G}_{i,G} = \mathbf{X}_{i,G} + \alpha \cdot (\mathbf{X}_{\text{best},G} - \mathbf{X}_{i,G}) + \beta \cdot (\mathbf{X}_{r1,G} - \mathbf{X}_{r2,G}). \quad (5)$$

针对这两个突变策略,文献[9]采用一个权

重  $w \in (0,1)$  合并成一个新的突变策略,如式(6)所示:

$$V_{i,G} = w \cdot G_{i,G} + (1 - w) \cdot L_{i,G} \quad (6)$$

### 2.2.3 自适应策略

自适应策略可以适应多种类型的测试函数集,对于全局优化的问题比较有效,但是此策略一般都局限在低维问题中. 所以 Yang 在文献[10]中针对大规模优化问题对自适应策略进行了扩展,提供了更加广泛的参数自适应方案,提出了广义自适应差分进化算法(generalized adaptive DE, GaDE). 一般的自适应策略可以被分为两类:基于启发式规则的和基于概率分布规则的. 基于启发式规则的策略一般会引进一些新的参数,而且这些参数在某些情况下设置比较困难, JDE 和 DE-GL 算法就是用的此类策略. 而 SaDE、SaNSDE 和 JADE 则属于基于概率分布的自适应方法. 在这类算法中,不同的参数值是根据某一概率分布随机产生的,在进化操作和选择过程之后,好的参数值将作为下一次进化的分布规律被记录下来,用于产生更好的解. 文献[10]中提出的自适应方式用的是第二类基于概率分布的策略. 对于一个给定的进化算法,假设它有一个基于个体且非常敏感的参数  $A \in [A_{\min}, A_{\max}]$ , 同时此参数需要在进化过程中调整. 对于大规模优化问题,自适应策略不仅用在算法的参数调节上,在 2.3 节的分组策略中也有应用.

### 2.2.4 局部搜索策略

文献[11]把基于局部搜索的动态多种群粒子群优化算法(dynamic multi-swarm particle swarm optimizer with local search, DMS-L-PSO) 扩展到大规模问题上,并取得了良好的效果. DMS-PSO 是根据邻域结构把大种群分成很多小种群,这些小种群利用不同的重组策略被频繁重组,在频繁重组的过程中,种群不断交换它们之间的信息. 而局部搜索策略是解决大规模优化问题的一种有效方法,主要加强算法的局部搜索能力.

把局部搜索策略加入 DMS-PSO 算法中:

- ①每  $L$  代,根据小种群适应度值进行排序,利用准牛顿法根据局部最优解抽取小种群的前 25%;
- ②在搜索算法的结尾,利用准牛顿法更改当前的最优解.

### 2.2.5 新的进化策略

在解决大规模优化问题上,除了在原有的算法中加入新的策略,Cheng 等也提出了一些新的群集智能算法用于解决此类问题. 文献[12]提出了社会

学习的粒子群优化算法(social learning particle swarm optimization algorithm, SL-PSO),不同于经典的粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)利用历史信息(包括整个种群的最优位置 global best 和每个粒子的历史最优位置 personal best)更新粒子,新算法则是粒子向当前种群中比它优秀的个体学习,具体的学习方式如图 2 所示.

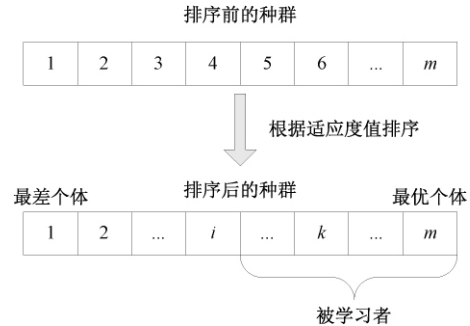


图 2 SL-PSO 的种群排序及学习行为

Fig. 2 Swarm sorting and behavior learning in SL-PSO

首先,对当前种群按适应度值排序,如果要更新第  $i$  个粒子,就向比第  $i$  个粒子好的个体(即图 2 中的被学习者)和平均位置学习. 而文献[13]则提出了竞争学习算法(competitive swarm optimizer, CSO),即随机从当前种群中抽取两个个体比较适应度值,失败者向胜利者学习,胜利者并不学习直接进入下一次循环,如图 3 所示.

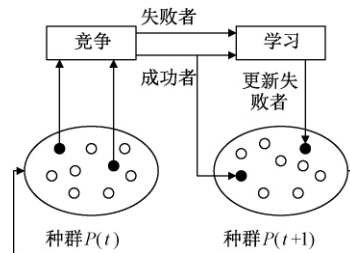


图 3 CSO 的一般构架

Fig. 3 The general idea of CSO

### 2.2.6 小种群搜索策略

文献[14]介绍了小种群搜索策略(minimum population search, MPS),这个策略主要是针对多模态问题. 为了提高 MPS 在解决多模态问题时的性能,文献[15]使用了阈值收敛(threshold convergence, TC)方法来完成有序无偏的探索(exploration). MPS 使用了相对较小的种群来提高可扩展性,种群越小,循环的代数越多,评价次数的利用率越高. 如果种群大小  $n$  小于问题维数  $d$ ,将其种群定义为  $n-1$  维超平面. 新解要严格按照所定义的超平面产生. 在 MPS 中,每个种群成员用

式(7)的方式初始化:

$$\mathbf{S}_k = (rs_1 \cdot bound/2, rs_2 \cdot bound/2, \dots, rs_i \cdot bound/2, \dots, rs_n \cdot bound/2), \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{S}_k$  是第  $k$  个粒子;  $rs_i$  是介于  $-1$  到  $1$  之间的随机数;  $bound$  是维数上界.

阈值按式(8)更新:

$$min\_step_i = \alpha \cdot diagonal \cdot ([FEs - k]/FEs)^\gamma, \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  是主要空间对角线的分数;  $FEs$  是总评价次数;  $k$  是使用过的评价次数;  $\gamma$  是控制阈值衰减率的参数(注:  $max\_step_i = 2 \cdot min\_step_i$ ).

根据式(9)用父代产生子代:

$$trial_i = x_i + F_i \cdot (x_i - x_c) + O_{step\_i} \cdot orth, \quad (9)$$

式中:  $x_i$  和  $x_c$  分别是父代中的个体及父代的中心点;  $F_i$  是范围为  $[-max\_step, max\_step]$  均匀分布的随机数. 为了确保产生的新试探解在阈值范围之内, 增加了正交算子.

在大规模优化问题中, 由于增加了维数, MPS 的种群也会增加, 而这些增加的种群会使评价次数的有效利用率降低. 为了增加这一利用率, MPS 的种群大小将会动态减小如式(10)所示:

$$pop\_size_i = init\_pop \cdot ((FEs - k)/FEs). \quad (10)$$

### 2.3 分组策略

分组策略是指将原始的大规模问题分解成一系列小且简单的子问题, 用分别优化独立子问题的方式解决. 这种被称为分治策略最早是由 Descartes 在文献[16]中提出的, 后来 Potter 在文献[17]中介绍了分组策略在大规模问题的求解方法, 设计了协同进化(cooperative coevolution, CC)算法来改进标准遗传算法的性能.

协同进化策略在早期是静态分组的, 分组并不会改变, 但是这种方法在解决不可分或部分可分问题时主要依赖于在初始化时的分组情况, 性能很不稳定, 所以在改进该策略时使用动态分组方法, 包括随机动态分组和学习动态分组.

#### 2.3.1 基于静态分组的协同进化算法

Potter 在文献[17]中提出了协同进化遗传算法(cooperative coevolutionary genetic algorithms, CCGAs), 但是 CCGA-1 和 CCGA-2 只在最高为 30 维的问题中测试. 2004 年 Frans 等在文献[18]中将该策略和粒子群优化算法(PSO)相结合, 提出了 CPSO-SK 和 CPSO-HK. CPSO-SK 将维数分为  $K$  组, 每组的维数是  $[n/K]$ , 用 PSO 算法对每组的维数进行更新. 虽然 CPSO-SK 可以跳出次优解, 但是在一些测试函数中收敛过快, 为了使算法同

时具有 PSO 的开发能力, CPSO-HK 把这两种算法结合起来, 一部分使用 CPSO-SK 算法, 将 CPSO-SK 算法的最优解随机赋给用 PSO 优化的种群, 条件满足时停止.

#### 2.3.2 基于动态分组的协同进化算法

对于不可分问题来说, 静态分组效率十分低. 在不可分的测试函数中, 决策变量存在着一些相互关系(正相关或负相关), 如果把这些相互关联的决策变量一直分在一个组内, 结果并不能收敛到最小.

##### 2.3.2.1 随机动态分组

Yang 于 2008 年在文献[19]中提出了新的协同进化(cooperative coevolution, CC)框架, 同时还加上了自适应权重策略. 其中, 新的 CC 框架设计成动态改变群体结构, 这种设计增加了相互关联决策变量分在一起优化的几率. 此框架的主要思想是将  $n$  维的目标向量分成  $m$  个  $s$  维的子部分(假设  $n = m \cdot s$ ), 使用 EA 算法对子部分进行优化; 自适应权重策略则是将每个子部分都设置一个权重, 用某一算子对权重进行优化.

文献[20]对文献[19]中的算法进行了改进, 提出了新的多层协同进化算法(multilevel CC algorithm, MLCC), 通过使用一个分解池来使分组的大小和目标函数联系的更加紧密. MLCC 算法可以自适应选择合适的相互作用层次而不用考虑目标问题和优化阶段的特点; 文献[7]介绍的 JADE 算法也使用了分组策略和权重优化的方法来寻找更加精确的解决方案. 同时, 这种解决方法可以加入其他的优化算法来改进它们在大规模优化问题中的性能. Li 在文献[21]中同样将随机分组的协同进化策略与自适应权重用在 PSO 中, 提出了 CCPSO 算法, 并且于次年提出了 CCPSO2 算法, 完善了 CCPSO 算法, 使其在 2 000 维的问题中也有很好的性能.

##### 2.3.2.2 基于学习的动态分组

虽然动态随机分组策略对于静态分组来说在解决决策变量相关性问题上比较有优势, 但是决策变量的相关性并不能完全地区分出来. 为了解决不可分问题并且减少决策变量之间的相互关联, Ray 在 2009 年提出 CCEA-AVP(自适应可变分区的协同进化算法, cooperative coevolutionary algorithm with adaptive variable partitioning). 该算法的过程类似于标准的 EA 算法, 首个  $M$  (一般设为 5) 次迭代包含所有的变量. 在下一次迭代中, 使用前 50% 的个体计算关联矩阵, 并且将变量分

成多个子种群.当变量之间的相关系数大于一个阈值时就被分到预先定义的一个子种群中,之后的每次迭代都把变量按其相关性分组.

文献[22]给出了辨识变量之间的相互关系的一个简单方法,“best”是目前的最优解,“new”是使用CC算法优化第*i*维后的最优个体,“rand”是随机从种群中选择的个体.根据这3个向量产生新的个体,如式(11)所示:

$$\begin{aligned} x_j &= \begin{cases} \text{new}_i, & \text{if } j = i; \\ \text{best}_j, & \text{otherwise,} \end{cases} \\ x'_j &= \begin{cases} \text{new}_i, & \text{if } j = i; \\ \text{rand}_k, & \text{if } j = k; \\ \text{best}_j, & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

若 $f(x')$ 比 $f(x)$ 的适应度值好,则维数*i*和*j*相互关联的概率增加.

Omidvar在文献[23]中引入了向量 $\Delta = \{\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2, \dots, \bar{\delta}_n\}$ (其中*n*表示维数),粗略估计相互关联的变量在同一区间的指标,然后基于相应 $\delta$ 的值对决策变量进行排序,根据预先定义的分组长度对决策变量分组,使用文献[19]中的方法对每组进行优化.文献[24]介绍了另一种基于学习的维数分组方法,确定决策变量是否可分,理论定义如下所示:

定义:粒子 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的优化函数是 $f(x)$ ,若变量 $x_i$ 和 $x_j$ 可分,其他变量为 $\forall c = (\dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots)$ ,且满足 $\forall x_i, x'_i \in S, \forall x_j \in S$ .如果 $f(\alpha) \leq f(\beta)$ ,则 $\forall x'_j \in S, f(\alpha') \leq f(\beta')$ ,其中 $\alpha = (\dots, x_i, \dots, x_j, \dots), \beta = (\dots, x'_i, \dots, x_j, \dots), \alpha' = (\dots, x_i, \dots, x'_j, \dots), \beta' = (\dots, x'_i, \dots, x'_j, \dots), x_i \neq x'_i, x_j \neq x'_j$ ;如果上述条件不满足,则 $x_i$ 和 $x_j$ 不可分.上面定义判断两个变量之间是否可分.但是,在实际问题中使用上面的定义,计算代价太大,所以文献[24]提出了快速独立搜索策略,若 $(f(\alpha) - f(\beta)) \cdot (f(\alpha') - f(\beta')) < 0$ ,则相应的变量不可分. Mahdavi在文献[25]中提出了使用*k*聚类分组的方法,将决策变量分成了不同的低维水平.

### 3 测试函数

为了对比算法的性能,一般用统一的测试函数来测试.文献[4]介绍了针对大规模优化问题的CEC'08专题会议函数测试集. CEC'10专题会议上的大规模优化算法测试集<sup>[4]</sup>则包含20个测试函数.为了更好地代表实际问题范围广泛的

特性及对于基于分组的优化算法提供更加完备的测试,提出了CEC'13的测试函数集.与CEC'10的区别在于:CEC'10编写的不可分子部分的大小是均等的;而CEC'13则根据实际问题使不可分子部分的大小不均等,其相应变量的贡献度也会有所区分,并且不可分子部分也会有所覆盖,另外还具有病态、对称破裂及不规则等属性. CEC'13中包含了15个测试函数,这些测试函数均有平移和旋转特性.

### 4 算法对比

测试函数为CEC'08和CEC'10中的测试函数,主要测试的维数是1000维,使用评价次数记录测试结果.在对比算法时保证最大评价次数相同,对算法的优化结果进行对比.

采用CEC'08测试集的主要有CODE、sep-CPM-ES、CSO、CCPSO、DECC-G、CDECC、MTS、CCPSO2、EPUS-PSO、DMS-PSO、MLCC.文献[21]中将算法CSO、CCPSO2、MLCC、sep-CMA-ES、EPUS-PSO、DMS-PSO进行了对比,并且采用了T检验方法对结果进行了统计. DMS-PSO可以准确地找出 $f_1$ 和 $f_5$ 的全局最优,其他5个函数的测试结果却没有CSO好.在与MLCC比较时,对于函数 $f_4$ 测试结果显示,MLCC明显优于CSO,而测试函数 $f_4$ 是shifted Rastrigin function,具有十分多的局部最优解,MLCC中针对每组的优化使用的是微分进化变异的方法.而CCPSO2的收敛性是这几个算法中最快的. sep-CMA-ES和EPUS-PSO在CEC'08的测试结果相比来说并不好.文献[21]同样是采用T检验来显示测试结果,因为CCPSO中含有一些用户自定义的参数,所以文献中对每个参数进行了测试,总的来说,除了函数 $f_1, f_2$ 和 $f_3$ ,CCPSO2的性能要比DECC-G的好.文献[24]直接列出了CDECC和MTS在CEC'08上的测试结果,并使用Friedman检验了算法之间是否具有显著性差异,其置信度为0.05.测试结果表明CDECC在函数 $f_6$ 和 $f_7$ 中结果比较好,在 $f_3, f_4$ 和 $f_5$ 没有MTS性能好,但是两者没有显著性差异.

使用CEC'10测试函数集主要有DECC-DG、MOFBVE、DECC-DML、DECC-G、DECC-D和MLCC等算法.文献[23]主要对比了DECC-DML、DECC-G、DECC-D和MLCC算法的测试结果,DECC-DML算法在20个测试函数结果中有14个函数的表现比DECC-G和DECC-D好,在与MLCC的比较中有12个函数的测试结果比较好,并

且在文献[23]中使用多次运行的成功率来显示算法的性能. 文献[25]主要是 DECC-DG 和 MOFBVE 的对比, MOFBVE 算法的 7 个测试函数结果比 DECC-DG 优秀, 但是在函数  $f_{11}$  和  $f_{16}$  中 DECC-DG 结果比较好.

## 5 结论

笔者主要总结了几个大规模优化的常用方法, 解决大规模问题主要面临以下难点: 搜索空间随着变量增加以指数形式扩大; 问题的特性随着维数的增加变得更难, 例如单峰问题可能会转变为多峰问题; 算法在解决问题时花费的代价十分大; 对于协同进化策略来说, 变量之间是否可分是主要的问题.

(1) 分组优化问题. 协同进化策略是解决大规模问题的主要方法, 但是, 决策变量之间是否可分限制了协同进化策略计算, 虽然使用学习的方式来判断是否可分, 但是该方法的代价随着变量的增多而迅速加大.

(2) 全部可分和全部不可分问题. 在大多基准测试函数集中, 都有全部可分或不可分问题, 这些问题使用一般协同进化方法效果并不明显. 对于全部可分问题, 显然对每维单独优化比较好; 但是对于不可分问题, 变量的分组方式仍然是一个难题.

(3) 不平衡的测试函数. 在实际问题中, 一般都会遇到子部分分布的不平衡特性, CEC'13 大规模优化问题测试集中就针对该特性设计了测试函数.

(4) 更加高维的问题. 在上述算法中, 测试任务一般是 1 000 维的, 大规模优化方法可扩展性是未来研究工作的一个至关重要的要求.

## 参考文献:

- [1] MAHDAVI S, SHIRI M E, RAHNAMEYAN S. Meta-heuristics in large-scale global continues optimization: a survey [J]. Information sciences, 2015, 295: 407 - 428.
- [2] RAHNAMEYAN S, TIZHOOSH R, SALAM M M A. A novel population initialization method for accelerating evolutionary algorithms [J]. Computers & mathematics with applications, 2007, 53(10): 1605 - 1614.
- [3] KAZIMPOUR B, LI X, QIN A K. Initialization methods for large scale global optimization [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Cancun: Springer, 2013: 2750 - 2757.
- [4] TANG K, YAO X, SUGANTHAN P N, et al. Benchmark functions for the CEC'2010 special session and competition on large scale global optimization [R]. Hefei: Nature inspired computation and applications laboratory, USTC, China, 2009.
- [5] RAHNAMEYAN S, TIZHOOSH R, SALAM M M A. Quasi-oppositional differential evolution [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Tokyo: Springer, 2007: 2229 - 2236.
- [6] WANG H, WU Z, RAHNAMEYAN S. Enhanced opposition-based differential evolution for solving high-dimensional continuous optimization problems [J]. Soft computing, 2011, 15(11): 2127 - 2140.
- [7] ZHANG J, SANDERSON A C. JADE: adaptive differential evolution with optional external archive [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2009, 13(5): 945 - 958.
- [8] WANG H, WU Z, RAHNAMEYAN S, et al. Sequential DE enhanced by neighborhood search for large scale global optimization [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Shanghai: Springer, 2010: 1 - 7.
- [9] DAS S, ABRAHAM A, CHAKRABORTY U K, et al. Differential evolution using a neighborhood-based mutation operator [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2009, 13(3): 526 - 553.
- [10] YANG Z, TANG K, YAO X. Scalability of generalized adaptive differential evolution for large-scale continuous optimization [J]. Soft computing, 2011, 15(11): 2141 - 2155.
- [11] ZHAO S Z, LIANG J J, SUGANTHAN P N, et al. Dynamic multi-swarm particle swarm optimizer with local search for large scale global optimization [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Washington: Springer, 2008: 3845 - 3852.
- [12] CHENG R, JIN Y. A social learning particle swarm optimization algorithm for scalable optimization [J]. Information sciences, 2015, 291(6): 43 - 60.
- [13] RAN C, JIN Y. A Competitive swarm optimizer for large scale optimization [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 45(2): 191 - 204.
- [14] BOLUFE R A, FIOL G S, CHEN S. A minimum population search hybrid for large scale global optimization [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Sendai: Springer, 2015: 1958 - 1965.
- [15] MONTGOMERY J, CHEN S. A simple strategy for maintaining diversity and reducing crowding in differential evolution [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vienna: Springer, 2012: 692 - 2699.



- [16] DESCARTES R. Discourse on method [J]. Elizabeth haldane & g. r. t. ross the philosophical works of des-cartes, 1998, 10( 1991) : 11 – 25.
- [17] POTTER M A, JONG K A D. A cooperative coevolutionary approach to function optimization [C] //International Conference on Parallel Problem Solving from Nature. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994: 249 – 257.
- [18] FRANS V D B, ENGELBRECHT A P. A cooperative approach to particle swarm optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2004, 8 ( 3) : 225 – 239.
- [19] YANG Z, KE T, XIN Y. Large scale evolutionary optimization using cooperative coevolution [J]. Information sciences, 2008, 178( 15) : 2985 – 2999.
- [20] YANG Z, TANG K, YAO X. Multilevel cooperative coevolution for large scale optimization [C] //2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Washington: Springer, 2008: 1663 – 1670.
- [21] LI X, YAO X. Tackling high dimensional nonseparable optimization problems by cooperatively coevolving particle swarms [C] //2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vienna: Springer, 2009: 1546 – 1553.
- [22] WEICKER K, WEICKER N. On the improvement of coevolutionary optimizers by learning variable interdependencies [C] //IEEE Congress on Evolutionary Computation. Washington: Springer, 1999( 3) : 1627 – 1633.
- [23] OMIDVAR M N, LI X, YAO X. Cooperative co-evolution with delta grouping for large scale non-separable function optimization [C] //IEEE Congress on Evolutionary Computation. Shanghai: Springer, 2010: 1 – 8.
- [24] GE H, SUN L, YANG X, et al. Cooperative differential evolution with fast variable interdependence learning and cross-cluster mutation [J]. Applied soft computing, 2015, 36: 300 – 314.
- [25] MAHDAVI S, RAHNAMAYAN S, SHIRIM E. Multilevel framework for large-scale global optimization [J]. Soft computing, 2017, 21( 14) : 4111 – 4140.

## A Survey of Evolutionary Algorithms for Large Scale Optimization Problem

LIANG Jing<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>1</sup>, QU Boyang<sup>2</sup>, YUE Caitong<sup>1</sup>

( 1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electric and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of large-scale problems, large-scale optimization algorithms were grossly analyzed. This paper introduced some methods for large-scale problems. The methods included the initialization method, decomposition strategy, updating strategy and so on. This paper mainly focused on the search strategy, update strategy, mutation strategy and cooperative coevolution. Meanwhile, the characteristics of large-scale optimization algorithm testing function set and evaluation method were listed. Finally, the future research directions were given.

**Key words:** large scale optimization problem; evolutionary algorithm; cooperative coevolution; population initialization; benchmark function

文章编号:1671-6833(2018)03-0022-07

## 数据驱动的发展式头脑风暴优化算法综述

程 适<sup>1</sup>, 陈俊风<sup>2</sup>, 孙奕菲<sup>3</sup>, 史玉回<sup>4</sup>

(1. 陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710119; 2. 河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022; 3. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119; 4. 南方科技大学 计算机科学与工程系, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 头脑风暴优化(brain storm optimization, BSO) 算法是一种新兴的群体智能优化方法, 以众人集思广益解决问题为原型, 抽取其中解决问题的模式, 将其抽象为智能优化算法. 介绍了头脑风暴优化算法的优化算子和基本原理, 在对基本头脑风暴优化算法和目标空间中的头脑风暴优化算法比较的基础上, 对头脑风暴优化算法的研究现状, 包括群体多样性、求解不同类型问题和实际应用的研究现状进行了全面的综述. 最后对头脑风暴优化算法有待进一步研究的问题进行了展望.

**关键词:** 头脑风暴优化算法; 发展式群体智能; 收敛操作; 发散操作

**中图分类号:** TP18

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.003

### 0 引言

头脑风暴优化(brain storm optimization, BSO) 算法是一种新的群体智能优化算法<sup>[1-2]</sup>. 这种算法的特点是将群体智能优化方法和数据挖掘/数据分析的方法进行了融合, 以数据分析的方法为基础去选择相对较好的解. 通过对待求解问题中大量解的数据进行分析, 根据待求解问题特征与算法优化过程中生成解集合的分布情况, 建立待求解问题解的结构(landscape), 在待求解问题与算法的关联基础上, 更好地求解问题. BSO 算法通过聚类/分类方法分析解集合构成, 基于解的分布生成新解, 经过迭代求解, 具有求解过程不依赖数学模型的特点. 作为一类启发式的随机算法, 群体智能算法将最优化问题视作在解空间(solution space) 上的搜索最优值的搜索问题, 通过启发式信息来指导搜索过程.

对于群体智能优化算法, 通过改变算法的参数设置, 可以控制算法的收敛和发散操作; 而头脑风暴优化算法能将收敛和发散操作同时嵌入到算法的每一步迭代操作中, 体现了群体智能优化与数据挖掘的结合. 在传统的群体智能优化算法中,

每一个群体的解, 都被引导向解空间中更好的解变化. 最好的解就是优化的目标, 而在新的算法中, 将所有的解视为整体. 每一个个体既是问题的一个解, 也是一个数据(data), 为解空间中的一个样例(sample). 而通过对解集合的变化分析, 可以得到解空间中优秀解的分布情况, 或者解空间中解的“峰值”的多寡.

头脑风暴优化算法于 2011 年提出, 算法模拟了一种人类集思广益求解问题的集体行为, 也就是头脑风暴过程<sup>[1-3]</sup>. 分类是自然选择的过程, 将群体分解为具有不同性质的集合. BSO 算法中的解集合被分到不同的簇中, 通过对一个解或两个解的组合进行变异(mutation) 来生成新的解集合. 头脑风暴优化算法是一种典型的发展式群体智能算法, 具有两种主要算子: 收敛算子与发散算子. 在搜索空间中, 对解集合不断地进行收敛和发散操作, 可以获得“足够好”的优化解. 在头脑风暴优化算法中, 解集合被聚集到几个簇中, 通过对簇中心或其他现存解的变异来生成新解. BSO 算法的一个显著特性是其发展势能(capacity developing)<sup>[4]</sup>, 即在搜索中的自适应过程.

近年来, 头脑风暴优化算法得到了学术界的

收稿日期:2017-09-18; 修订日期:2017-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403121, 61773119, 61703256, 61771297); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201703062)

作者简介:程适(1983—), 男, 陕西汉中人, 陕西师范大学讲师, 博士, 主要从事群体智能算法研究, E-mail: cheng@snnu.edu.cn.

广泛关注,但由于算法提出时间较晚,目前的研究成果比较分散.基于此,笔者将针对BSO算法及其最新研究成果进行较全面的综述,并指出未来值得关注的研究方向.

## 1 头脑风暴优化算法

### 1.1 研究背景

头脑风暴方法是指将一些人聚集起来,对单个人难以解决的问题进行集思广益,从而产生解决问题的灵感.在这一过程中,重要的不是这些想法一时的正误,而是不断提出新的想法,并在这些想法的基础上继续扩展,最终找到解决问题的方法.头脑风暴优化算法借鉴了这一过程中的核心思想:延后评判、大胆假设、交叉借鉴以及以量取胜,通过大量的设想,最终极大可能性产生一个优秀的问题解决方案.算法在优化测试函数上取得了良好的效果.这种新算法结合了群体智能算法与数据挖掘方法的优势,将群体智能优化算法中的每个解视为一个数据点,通过对数据点的聚类,找到问题的最优解.

### 1.2 基本头脑风暴优化算法

BSO算法借鉴了人群的求解问题时集思广益的集体行为,即头脑风暴过程.算法中的每一个个体在这里代表一个潜在的问题的解,通过个体的演化和融合进行个体的更新,这一过程与人类头脑风暴的过程相似.算法的初始实现过程很简单:

(1) 产生 $n$ (种群大小)个待求解问题的解(个体),然后用聚类算法将这 $n$ 个个体分为 $m$ (预先设定的参数)类,通过评估这 $n$ 个个体,将每一类中的个体进行排序,选出每一类内最优的个体作为该类的中心个体;

(2) 随机选中一个类的中心个体,按概率大小确定它是否被一个随机产生的个体所替代;

(3) 进行个体的更新过程,通过某一种方式产生新个体.

基本BSO算法具有概念简单,易于实现的特点,笔者给出了BSO算法的基本流程.在算法中,存在3种基本算子:解集合聚类、新解生成和新解选择算子<sup>[5]</sup>.

头脑风暴优化算法基本流程如下:

步骤1 初始化:随机生成 $n$ 个初始个体(初始解),并分别计算 $n$ 个个体的适应度值.

步骤2 如未找到“足够好”的解或未达到预先设定的最大迭代次数,重复以下步骤:

1) 解集合聚类:通过聚类算法将 $n$ 个个体聚类到 $m$ 个簇中;

2) 生成新解:随机在一个或两个簇中选择解去生成新的解个体;

3) 新解选择:将新的生成解与相同编号的原有解进行比较,存储拥有好的适应值的解,作为新解进入迭代.

步骤3 计算 $n$ 个个体的函数值.

在BSO算法求解中,解集合被收敛到数个簇中,通过对簇中一个解或两个解的组合进行变异生成新解,将新的生成解与相同编号的原有解进行比较,存储拥有好的适应值(fitness value)的解并作为新解进入迭代.当生成的新解距离已知最优解较近时,算法倾向于开发能力;而当新解随机生成或基于两个簇生成时,算法强化了探索能力.

BSO算法是一种将搜索空间不断缩减的算法,通过不断迭代,最终所有解将聚集到有限的簇中.这些簇对应着待求解问题的局部最优解.拥有较好适应值的解所包含的信息,在簇间进行不断传递.算法随机产生初始解,首先对解空间进行探索,在不断地迭代后,对探索(exploration)和开发(exploitation)达到一个平衡状态.

#### 1.2.1 解集合聚类

对解集合进行聚类的目的是将解集合收敛到一些小的搜索区域.BSO算法可以使用不同的聚类方法,在最初的BSO算法中,使用了 $k$ -均值( $k$ -means)聚类算法.聚类是将相似个体分到同组的过程.在机器学习中,聚类分析也被称为无监督学习(unsupervised learning). $N$ 个数据点作为输入,将 $N$ 个点分组到不同的类别中.在分组过程中,通过点之间的相似度计算,可以得到数据中所包含的有用信息.在BSO算法中,解集合分布在整个搜索空间中,可以通过解集合的分布情况来揭示待求解问题的结构(landscape).

算法使用了 $k$ -means聚类将 $n$ 个解聚类到 $m$ 个簇中,通过聚类将解集合分为不同的类别.通过聚类操作,可以对搜索区域进行“精益求精”.经过多次迭代后,所有的解以大的几率被聚类到一个小的搜索区域.概率参数 $p_{\text{clustering}}$ 用来控制使用随机解替换聚类中心的概率,可以防止算法过早的收敛,并有助于解跳出局部极值.

#### 1.2.2 新解生成

算法随机选择一个或两个类别来生成新解,一个新的个体可以基于一个或多个已有个体进行生成.在初始的BSO算法中,概率参数 $p_{\text{generation}}$ 被

用来确定新解是基于一个现有解,或两个现有解的组合来生成. 从一个聚类簇中生成新解,可以对一个搜索区域进行精细搜索,算法集中于开发的能力. 对应地,基于两个或多个聚类簇生成的新个体可能距离原有的簇中心很远,在这种情况下,算法更集中于探索的能力.

概率参数  $p_{\text{oneCluster}}$  和概率参数  $p_{\text{twoCluster}}$  分别用来控制在一个簇或者两个簇的情况下,选择簇中心或普通解(非簇中心)来生成新解. 在一个簇生成新解中,通过簇中心或簇中解生成新解,可以控制算法的开发区域;而在多个簇生成新解中,新解基于多个解的信息,可以保持算法的群体多样性.

根据公式(1)和(2)生成新的解:

$$x_{\text{new}}^i = x_{\text{old}}^i + \xi(t) \times N(\mu, \sigma^2); \quad (1)$$

$$\xi(t) = \text{logsig}\left(\frac{0.5 \times T - t}{k}\right) \times \text{rand}(), \quad (2)$$

式中:  $x_{\text{new}}^i$  和  $x_{\text{old}}^i$  分别表示解  $x_{\text{new}}$  和  $x_{\text{old}}$  的第  $i$  维度值;  $N(\mu, \sigma^2)$  为基于正态分布的随机数;  $\text{rand}()$  是一个函数,用来生成在  $[0, 1)$  区间随机数;  $x_{\text{old}}$  的值为当前解集合中一个解或两个解的组合;参数  $T$  是最大迭代次数;  $t$  为当前迭代次数;  $k$  是控制  $\text{logsig}(\cdot)$  函数的系数,用来改变  $\xi(t)$  的搜索步长,进而用来平衡算法的收敛速度. 传递函数  $\text{logsig}(\cdot)$  定义如公式(3)所示:

$$\text{logsig}(a) = \frac{1}{1 + \exp(-a)}. \quad (3)$$

### 1.2.3 新解选择

新解选择是将具有较好适应值的解保存在解集合中. 新解生成后,具有较好函数适应值的解通过选择策略被保存,而聚类生成新解策略为群体带来新的解,可以保持解集合的群体多样性.

### 1.3 目标空间的头脑风暴优化算法

在初始的 BSO 算法中,在每一次迭代中的聚类算法需要消耗大量计算资源,降低了求解的效率. 为了提高计算效率,目标空间的头脑风暴优化算法(brain storm optimization in objective space, BSO-OS)使用了一个简单的基于适应值的分类方法,将解集合分为精英类与普通类. 分类算法代替了聚类算法. 对现有解进行分析,有效地利用了目标空间的求解信息<sup>[6]</sup>.

基本 BSO 算法与目标空间 BSO 算法的区别在于新解生成策略. 在基本 BSO 算法中,解集合被聚类到不同的簇中;而在目标空间 BSO 算法中,根据解的函数值的优劣,解集合被分为两类:

精英解和普通解.

## 2 研究现状

一个好的群体智能优化算法,应具有实现简单、求解速度快的特点. 现有 BSO 算法的研究多集中在理论分析、算法改进和算法应用等方面,其中包括:

(1) 算法的理论分析,包括多样性分析和参数分析;

(2) 改进算法的搜索效率,例如,加快解集合的收敛速度;

(3) 应用头脑风暴优化算法求解多种优化问题,例如多目标优化问题,多模态优化问题;

(4) 应用头脑风暴优化算法求解实际优化问题.

### 2.1 算法分析

BSO 算法概念简单,目前算法分析的初步成果包括:不同参数设置对算法搜寻性能的影响分析<sup>[7]</sup>;BSO 算法中的解聚类现象研究;在优化过程中对平均聚类数目进行观测<sup>[8]</sup>;BSO 算法群体多样性定义与观测<sup>[8-9]</sup>;算法收敛性分析<sup>[10]</sup>;解集合部分解重新初始化的方法也被用来保持解群体的多样性,协助解跳出局部极值<sup>[9]</sup>. 部分初始化的目的是为了增强算法跳出局部极值的能力,并保持算法的搜索能力. BSO 算法是一种发展式群体智能方法,发展式群体智能框架也被用来分析 BSO 算法,收敛和发散两种操作分别对应着发展式群体智能框架中的发展势能和学习能力<sup>[11-12]</sup>.

### 2.2 算法改进

为了求解不同类型的优化问题,需改进 BSO 算法的求解性能. 基于算法的 3 个算子,研究者们提出了不同的改进策略,这些改进可以简单地分为 3 个类别:解集合聚类、新解生成和混合算法<sup>[11]</sup>.

#### 2.2.1 解集合聚类

在初始 BSO 算法中采用了  $k$ -means 聚类算法,算法需要数次迭代才能对解集合进行分组. 为了提高算法的计算效率,不同的分组策略被用来替换原始 BSO 算法中的  $k$ -means 聚类算法. 这些分组策略包括:简单分组方法(simple grouping method, SGM)<sup>[13]</sup>;近邻传播聚类(affinity propagation clustering)<sup>[14]</sup>;  $k$ -medians 聚类算法;随机分组策略(random grouping strategy);全局最优(global-best)BSO 算法<sup>[15]</sup>.

对于一个优化问题,目标个数往往明显少于求解变量的数目,即目标空间的维度明显小于解空间的维度.通过在目标空间进行分组<sup>[6]</sup>,相比于在解空间的操作,可以极大地减少计算负担.在目标空间 BSO 算法中,根据目标空间的适应值,所有解被分到不同类别.

不同于其他算法,在目标空间的头脑风暴优化算法中,聚类算法被替换为一个简单的分类操作.基于函数值的排序,解集合被简单分为两类:精英解类(解具有较好的函数值)与普通解类(非精英解)<sup>[6]</sup>.基于精英解类或普通解类的一个或两个解生成新解.将分组操作放在目标空间,可以极大地减少了计算负担,有助于将 BSO 算法应用于高效求解大规模优化问题.

### 2.2.2 新解生成

对新解生成进行改进,也可以改善 BSO 算法的搜索效率.为了高效求解不同类型的问题,算法需要自适应地利用优化中的实时搜索信息.在新解的生成方面,也存在着大量的研究工作:修改搜索步长和新解生成方式,搜索步长可以根据解集合的动态范围进行调整;依据一个批处理模式(batch-mode)生成新解,并在下一次迭代中自适应地进行选择;当所有解被聚类到一个小的搜索范围时,对部分解进行重新初始化来生成新解,可以保持算法的群体多样性;将混沌操作(chaotic operation)应用于部分解的生成中,来增强全局搜索能力并避免陷入局部最优;为了自适应地在搜索中改变聚类中簇的数目,单个或多个簇的结构信息被用来创建新的解集合<sup>[14]</sup>.在基于讨论机制的 BSO 算法中,加入了簇内部和簇间的讨论,用来控制算法的全局和局部搜索特性<sup>[16]</sup>.

### 2.2.3 混合算法

头脑风暴优化算法已被用来解决多种实际应用问题.为了解决这些特定领域的问题,提出了多种具有新的算子的 BSO 算法,例如闭环(closed-loop) BSO 算法<sup>[17]</sup>;基于捕食者-猎物模型的 BSO 算法<sup>[18]</sup>;量子行为(quantum-behaved) BSO 算法<sup>[19]</sup>等.

在群体智能优化算法中,混合算法(hybrid algorithms)可以极大地改进单个算法的在特定问题上的优化性能.将算法进行混合的目的是为了结合不同算法的优势,同时改善单个算法搜索的局限性.基于 BSO 算法的混合算法被应用于不同类型的问题,例如,BSO 与模拟退火(simulated annealing)算法求解连续优化问题;与差分演化(dif-

ferential evolution)算法结合应用于人工神经网络(artificial neural network).其他与 BSO 算法的混合的算法包括:基于教学算法(teaching-learning-based algorithm);离散的粒子群优化(discrete particle swarm optimization)算法.

### 2.3 求解不同类型问题

在基本的 BSO 算法中,BSO 算法被用来求解单目标优化问题<sup>[1-2]</sup>,然而,经过一些调整,BSO 算法也可被用来求解其他类型的问题,例如多目标优化问题<sup>[3]</sup>;多模态优化问题<sup>[20]</sup>等.多模态优化与多目标优化的目的都是寻找一组最优解,而不是单个最优解.在 BSO 算法中,将解集合分为不同的类别,理想状态下不同类别可以对应搜索空间中的不同极值.通过这种 BSO 算法内在特征,可以提高算法在多个最优解问题上的性能.

多模态优化,即求解多模态优化问题(multimodal optimization problem),其目标是在算法的一次搜索过程中,尽可能多地寻找到多个极值(包括全局最优和局部最优),并将这些极值保持到搜索结束.由于待求解个数的不确定性、解分布的不确定性等特征,决定了多模态问题的复杂性.

多目标优化,即求解多目标优化问题(multiobjective optimization problem),其目标是在算法的一次搜索过程中,尽可能满足几个目标函数的要求.不同的目标函数对变量可能存在着相互冲突的要求,因此,各个目标函数通常不会同时达到最优.这就使得多目标问题不存在单目标问题意义上的“最优解”,而只存在一组满足“帕累托最优(pareto optima)”条件的解.头脑风暴优化算法已被设计用来求解多目标优化问题<sup>[3]</sup>.

与传统多目标优化方法不同的是,头脑风暴优化算法可以直接利用目标空间的信息.在目标空间中聚类生成簇,对于每个目标,解集合可以在每次迭代<sup>[3]</sup>或者目标空间进行聚类.在大多数目标上表现优异的解将被保留进入下一次迭代,而其他解将随机被选择进入下一次迭代以保持解集合的群体多样性.

### 2.4 群体多样性

群体多样性(population diversity)分析:影响群智能算法性能的重要因素是算法“探索”(exploration)和“开发”(exploitation)能力的平衡性,而算法的群体多样性是衡量算法探索和开发状态的重要指标.对群体多样性进行观测,多样性在瞬

态的值描述算法当时的运行状态,而多样性值的变化趋势描述了算法的整体求解过程.如何合理地定义群体多样性,正确地表征算法执行时解集合的运动过程,这对于头脑风暴优化算法有着重要的意义.

### 2.5 实际应用

头脑风暴优化算法被用来解决多种实际问题,其中可以分为以下几类.

(1) 电力系统问题:求解目标是为电力系统中的设备找到最优的位置和设置. BSO 算法被用来求解电力系统中的不同类型问题,例如考虑风电的经济调度问题;最优 FACTS 配置;电力调度问题,最优潮流求解问题.

(2) 航空领域设计问题: BSO 算法被应用于求解航空领域的多个问题,例如卫星编队优化重构问题<sup>[17]</sup>; Loney 电磁问题<sup>[19]</sup>; 直流无刷电机效率问题<sup>[18]</sup>; 多无人机编队飞行的滚动时域控制; F/A-18 舰载机自动着陆系统; 代理路由和光传感器任务问题等.

(3) 无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 优化问题: 基于无线传感器网络,物理世界将变成一种信息系统,不同类型的传感器连接构建成一个网络,信息可以在网络间不断交互,大规模和长期的无线传感器网络将会产生大量的数据,如何分析这些数据将是一个研究难题. BSO 算法也应用到了无线传感器网络问题中,如传感器网络部署问题上的应用<sup>[14]</sup>; 最优覆盖问题; 全区域覆盖问题等.

(4) 金融优化问题: 金融优化问题常被建模为组合优化问题. 为了求解离散问题, BSO 算法需采用新的编码策略. 头脑风暴优化算法和基于头脑风暴优化算法的支持向量回归 (v-SVR) 被分别应用于股票指数预测问题.

(5) 其他优化问题: 大规模和分布式资源中心的节能问题常被建模为多目标问题, 能耗和执行时间是两个优化目标. 一种多目标 BSO 算法被用来解决网络系统的多目标能量优化问题. 此外, BSO 算法被应用于解决多种问题, 其中包括方程组问题; 基于 BSO 算法的 SAR 图像去噪声方法; 基于 BSO 优化算法求解短期风速预测问题; 配煤优化问题研究; 图像检索问题; 图像融合问题; 数据分类问题; 非线性方程问题; 推荐系统中的矩阵分解问题; 频谱感知问题; 离散调度问题; 训练隐马尔科夫模型进行转录因子结合位点分析; 投资组合优化问题.

## 3 研究方向

### 3.1 理论分析

头脑风暴优化算法有 3 个算子, 现有解聚类/分类、新解的生成和解的选择. 分析算子的参数的不同设置, 增加或者改变算子, 对算法的求解效率和优化效果的影响. 建立算子与不同求解问题之间的联系, 观测和控制头脑风暴优化算法的优化过程.

### 3.2 算法改进

现有的算法改进基本集中在原有解的聚类步骤. 在初始的算法中,  $k$ -means 聚类算法被用来对原有解的分布进行分析, 由于  $k$ -means 算法需要多次迭代, 新的聚类算法被用来提高算法的效率. 在基于目标空间的 BSO 算法中, 基于适应值的分类算法替换了聚类算法对现有解进行分析, 极大地提高了算法的效率. 解集合具有更多相似性, 就可以被分到一个类别中, 这种相似性在解空间可以用解间的距离来度量, 在目标空间可以用相似的适应度来度量. 在初始的 BSO 算法中, 就采用了解空间的距离度量, 而在目标空间的 BSO 算法中, 采用了适应度来度量. 对于高维度问题, 例如现有的大数据分析问题、大规模优化问题及复杂系统分析问题等, 都需要算法可以高效地在短时间内处理大量数据. 将 BSO 算法应用到大规模问题上来求解大数据分析问题, 也需要研究新的度量方式来提高算法的效率.

### 3.3 求解不同类型的优化问题

实际系统的复杂性日益增加, 新类型的优化问题不断增加, 为算法的求解带来了新的困难. 多模态多目标优化问题 (multimodal multiobjective optimization problem) 就是一种新型的优化问题. 这种问题结合了多模态问题和多目标问题的难点, 多个解在解空间中拥有相同的适应值, 如何找到尽可能多解, 同时在目标空间的“帕累托前沿”拥有更好的分布, 都增加了问题的求解难度. 将 BSO 算法应用于各种新型问题, 可以检验 BSO 算法的在新问题上的泛化能力.

### 3.4 实际应用问题

大部分的实际应用问题, 都可以建模为一个优化问题进行求解. 如何选择合适的求解变量, 建立恰当的目标函数模型, 是解决问题的首要难题. 将 BSO 优化算法, 或者更广泛地将群体智能优化算法应用于求解不同类型的实际应用问题<sup>[21]</sup>, 对群体智能优化算法的发展将大有裨益.

## 4 结论

在群体智能优化算法中,随机生成一个可行解的集合,通过集合内解的竞争和交互,不断迭代生成新解,最终收敛于满足要求的极值解.算法的性能往往通过在测试函数集(benchmark functions)上的结果来评判,缺乏对算法运行过程中的动态分析.群体智能算法中的每个个体,代表在解空间中的一个解,这些个体亦可以视为解空间中的一个数据点.通过对这些数据点的分布情况进行分析,算法可以学习问题的结构,更有针对性地解决问题.

笔者对头脑风暴优化算法的发展历程,发展现状和未来研究方向进行了综述.头脑风暴优化算法是一种新型的群体智能优化方法,算法将数据分析应用到优化的过程中,结合了群体智能和数据分析的优势.在头脑风暴优化算法中,每个个体不仅是待求解问题的一个解,也是解空间的一个数据采样,可以用来揭示解空间的结构.该算法通过将群体智能算法与数据分析方法进行有机融合,结合两种方法的优势,最终达到高效求解问题的目的.

## 参考文献:

- [1] SHI Y. Brain storm optimization algorithm [C] // Proceedings of Second International Conference on Swarm Intelligence (ICSI 2011). Chongqing, China: Springer, 2011: 303–309.
- [2] SHI Y. An optimization algorithm based on brainstorming process [J]. International journal of swarm intelligence research (IJSIR), 2011, 2(4): 35–62.
- [3] SHI Y, XUE J, WU Y. Multi-objective optimization based on brain storm optimization algorithm [J]. International journal of swarm intelligence research (IJSIR), 2013, 4(3): 1–21.
- [4] SHI Y. Developmental swarm intelligence: Developmental learning perspective of swarm intelligence algorithms [J]. International journal of swarm intelligence research (IJSIR), 2014, 5(1): 36–54.
- [5] CHENG S, SHI Y, QIN Q, et al. Solution clustering analysis in brain storm optimization algorithm [C] // Proceedings of The 2013 IEEE Symposium on Swarm Intelligence (SIS 2013). Singapore: IEEE, 2013: 111–118.
- [6] SHI Y. Brain storm optimization algorithm in objective space [C] // Proceedings of 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2015). Sendai, Japan: IEEE, 2015: 1227–1234.
- [7] ZHAN Z H, CHEN W N, LIN Y, et al. Parameter investigation in brain storm optimization [C] // Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Swarm Intelligence (SIS 2013). Singapore: IEEE, 2013: 103–110.
- [8] CHENG S, SHI Y, QIN Q, et al. Maintaining population diversity in brain storm optimization algorithm [C] // Proceedings of 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2014). Beijing, China: IEEE, 2014: 3230–3237.
- [9] CHENG S, SHI Y, QIN Q, et al. Population diversity maintenance in brain storm optimization algorithm [J]. Journal of artificial intelligence and soft computing research (JAISCR), 2014, 4(2): 83–97.
- [10] ZHOU Z, DUAN H, SHI Y. Convergence analysis of brain storm optimization algorithm [C] // Proceedings of 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2016). Vancouver, Canada: IEEE, 2016: 3747–3752.
- [11] CHENG S, QIN Q, CHEN J, et al. Brain storm optimization algorithm: A review [J]. Artificial intelligence review, 2016, 46(4): 445–458.
- [12] CHENG S, SUN Y, CHEN J, et al. A comprehensive survey of brain storm optimization algorithms [C] // Proceedings of 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2017). Donostia/San Sebastián, Spain: IEEE, 2017: 1673–1644.
- [13] ZHAN Z H, ZHANG J, SHI Y H, et al. A modified brain storm optimization [C] // Proceedings of the 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2012). Brisbane, Australia: IEEE, 2012: 1969–1976.
- [14] CHEN J, CHENG S, CHEN Y, et al. Enhanced brain storm optimization algorithm for wireless sensor networks deployment [C] // Proceedings of 6th International Conference on Swarm Intelligence (ICSI 2015). Beijing, China: Springer, 2015: 373–381.
- [15] EL-ABD M. Global-best brain storm optimization algorithm [J]. Swarm and evolutionary computation, 2017, 37: 27–44.
- [16] YANG Y, SHI Y, XIA S. Advanced discussion mechanism-based brain storm optimization algorithm [J]. Soft computing, 2015, 19(10): 2997–3007.
- [17] SUN C, DUAN H, SHI Y. Optimal satellite formation reconfiguration based on closed-loop brain storm optimization [J]. IEEE computational intelligence magazine, 2013, 8(4): 39–51.
- [18] DUAN H, LI S, SHI Y. Predator-prey brain storm optimization for DC brushless motor [J]. IEEE transac-

- tions on magnetics, 2013, 49(10): 5336–5340.
- [19] DUAN H, LI C. Quantum-behaved brain storm optimization approach to solving Loney's solenoid problem [J]. IEEE transactions on magnetics, 2015, 51(1): 1–7.
- [20] CHENG S, QIN Q, CHEN J, et al. Brain storm optimization in objective space algorithm for multimodal optimization problems [C] // Proceedings of 7th International Conference on Swarm Intelligence (ICSI 2016). Bali, Indonesia: Springer, 2016: 469–478.
- [21] 孙晓燕, 朱利霞, 陈杨, 等. 基于可能性条件偏好网络的交互式遗传算法及其应用 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 36(6): 1–5.

## Developmental Brain Storm Optimization Algorithms: From a Data-driven Perspective

CHENG Shi<sup>1</sup>, CHEN Junfeng<sup>2</sup>, SUN Yifei<sup>3</sup>, SHI Yuhui<sup>4</sup>

(1. School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. College of IOT Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China; 3. School of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 4. Department of Computer Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** For swarm intelligence algorithms, each individual in the swarm represented a solution in the search space, and it also could be seen as a data sample from the search space. Brain storm optimization (BSO) algorithm was a new and promising swarm intelligence algorithm, which simulated the human brainstorming process. Through the convergent operation and divergent operation, individuals in BSO were grouped and diverged in the search space/objective space. In this paper, the development history, and the state-of-the-art of the BSO algorithms were reviewed. Every individual in the BSO algorithm was not only a solution to the problem to be optimized, but also a data point to reveal the landscape of the problem. Based on the survey of brain storm optimization algorithms, more analyses could be conducted to understand the function of BSO algorithm and more variants of BSO algorithms could be proposed to solve different problems.

**Key words:** brain storm optimization; developmental swarm intelligence; convergent operation; divergent operation

(上接第4页)

## Safety Definition, Intension, Extension and Inferences from Scientific View

WU Chao, YANG Mian, WANG Bing

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to give a more scientific “safety definition”, the safety definition proposed by Mr. Liu Qian was supplemented and perfected under the guidance of safety scientology. And based on this, the new safety definition that “safety is an existence condition that rational person's body and mind are not harmed by external factors in a certain time and space (named after Liu-Wu's safety definition)” was proposed. Accordingly its denotation and connotation was analyzed. Meanwhile, definitions of other basic concepts in safety science were deduced by rigorous logical tools. The results showed that the new safety definition could be used to reason and form the complete concepts group of safety science and these functions were much better than other existing safety definitions.

**Key words:** safety science; safety; new definition; intension; extension; inference



# 基于光流共生矩阵的人群行为异常检测

曾庆山, 宋庆祥, 范明莉

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对传统基于图像纹理特征进行人群行为异常检测算法倾向于描述人群图像纹理的变化而非人群运动行为的实际情况, 导致检测性能较差的问题, 提出一种反映人群运动行为真实情况的特征提取方法. 首先通过 Lucas-Kanade 光流算法提取人群视频光流信息, 并建立光流幅值共生矩阵与光流方向共生矩阵, 然后通过共生矩阵提取角二阶距、对比度、熵、相似度等特征, 并将其与光流幅值均值合并组成特征向量训练支持向量机, 最后判断人群行为是否异常. 仿真结果表明, 本文的特征提取方法更加深化地处理了光流法提取的人群运动信息, 具有较好的人群异常行为识别性能.

**关键词:** 人群行为异常检测; 光流法; 光流共生矩阵; 支持向量机

**中图分类号:** TP751.1

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.032

## 0 引言

近年来, 公共场所人群安全问题日益频发, 应用智能监控技术进行安全管理, 并在群体性安全事件发生初期自动检测识别并预警, 是当前计算机视觉领域的研究热点. 人群行为异常检测算法主要通过视频预处理、特征提取、模型构建等步骤从监控视频中检测识别异于平常的人群行为. 近些年来, 国内外研究人员在人群行为异常检测问题上提出了许多经典的算法, 从算法理论基础的角度来说, 大致可以分为两类: (1) 基于人群运动轨迹的检测算法<sup>[1-3]</sup>, 如文献[2]通过建立正常人群行为轨迹的隐马尔科夫模型(HMM)进行人群行为异常检测; (2) 基于底层特征的检测算法<sup>[4-10]</sup>, 如文献[4]通过提取视频的三维时空梯度特征并对其进行 HMM 模型训练, 进行人群行为异常检测.

第一类算法在人群稀疏无遮挡的情况下效果不错, 然而在中高密度存在人群相互遮挡的情况下效果不佳; 第二类算法在一定程度上避免了因人群相互遮挡对算法性能的影响, 但仍存在一些问题. 如文献[7]通过构建混合时空动态纹理特征(MTSDT)进行人群行为异常检测, 然而 MTSDT 本质上基于图像纹理, 更倾向于描述人群图像纹

理的变化而非人群运动行为的实际情况, 因此以其作为人群行为异常检测的判别特征, 将会影响到人群行为异常检测的正确率.

针对传统基于图像纹理特征来检测人群行为异常所造成的偏差, 笔者提出一种人群运动行为状态的特征提取方法, 即通过建立光流幅值共生矩阵与光流方向共生矩阵来提取人群运动信息空间分布特征, 并基于此进行人群行为异常检测. 首先采用 Lucas-Kanade<sup>[11]</sup> 光流法提取视频中人群的运动信息, 在此基础上构建光流幅值共生矩阵和光流方向共生矩阵, 通过共生矩阵提取角二阶距、对比度、熵、相似度等特征, 并与光流值均值合并作为特征向量训练支持向量机(support vector machine, SVM), 进行人群行为异常检测. 通过构建视频光流共生矩阵提取人群运动行为光流分布纹理特征, 能够有效描述人群运动行为状态, 最后通过实验验证了本文算法并取得了较好的检测性能.

## 1 人群行为异常检测

### 1.1 光流法

1950年由Gibso首先提出的光流(optical flow)法是运动图像分析的重要方法. 当物体在运动时, 对应像素点的亮度模式在图像上会做相应

收稿日期:2017-04-22; 修订日期:2017-08-25

基金项目:河南省科技厅科技攻关计划项目(162102310167)

作者简介:曾庆山(1963—),男,湖北武汉人,郑州大学教授,博士,主要从事控制理论与控制工程、智能控制等, E-mail: qszeng@126.com.

运动,这种图像亮度模式的表现运动就是光流.由于其映射了目标的运动信息,观察者可以用其来确定目标的运动情况,与其它运动估计算法如块匹配法相比能够提取较为精细化的物体运动信息.

假设  $f(x, y, t)$  是时刻  $t$  图像上坐标点为  $(x, y)$  的灰度值,假设  $(x, y)$  的直接邻域在时间间隔  $d_t$  内被平移了某个微小的距离  $(d_x, d_y)$ , 根据泰勒公式像素点的微小运动可表示为:

$$f(x + d_x, y + d_y, t + d_t) = f(x, y, t) + f_x d_x + f_y d_y + f_t d_t + o(\delta^2), \quad (1)$$

式中:  $f_x, f_y, f_t$  为偏导数,如果  $d_x, d_y, d_t$  非常小,那么式(1)中的高阶项可以忽略不计.又假设像素点的微小运动不改变其灰度值,如式(2)所示:

$$f(x + d_x, y + d_y, t + d_t) = f(x, y, t). \quad (2)$$

合并式(1)与式(2)则有光流约束方程:

$$-f_t = f_x \frac{d_x}{d_t} + f_y \frac{d_y}{d_t}. \quad (3)$$

设速度矢量为  $(\mu, \nu)$ , 令  $\mu = \frac{d_x}{d_t}, \nu = \frac{d_y}{d_t}$  则光流方程可表示为:

$$f_x \mu + f_y \nu = -f_t. \quad (4)$$

## 1.2 光流共生矩阵及特征提取

### 1.2.1 光流幅值共生矩阵及特征提取

利用 Lucas-Kanade 光流算法提取视频中人群运动光流值,其光流值彩色图像如图1所示.在相似人群密度情况下,对比不同人群行为状态光流值彩色图像纹理特征,可以发现当人群行为正常时,如图1(c)所示其光流值彩色图像纹理比较平滑,对比度较低;当人群发生逃散行为时,如图1(d)所示其光流值彩色图像纹理比较尖锐,对比度较高.笔者根据这个现象,提出建立光流值共生矩阵,对其进行统计计算提取人群运动行为特征.

通过对灰度图像纹理特征提取方法灰度共生矩阵<sup>[12]</sup>的研究,笔者提出建立光流幅值共生矩阵来提取人群运动速度大小空间分布特征.首先利用 Lucas-Kanade 光流算法提取视频中人群运动光流值,为降低计算复杂度,将光流值按照模值大小分成16个等级,将等级值替换光流值建立新的光流矩阵,并按照构建灰度共生矩阵的方法建立光流幅值共生矩阵.

在一个光流幅值矩阵中随机的选择点  $(i, j)$  与点  $(i + a, j + b)$  形成一个点对,按照其对应光流值等级如图2进行统计.遍历矩阵中所有点并按照指定水平距离  $a$  与垂直距离  $b$  两两组合成一个

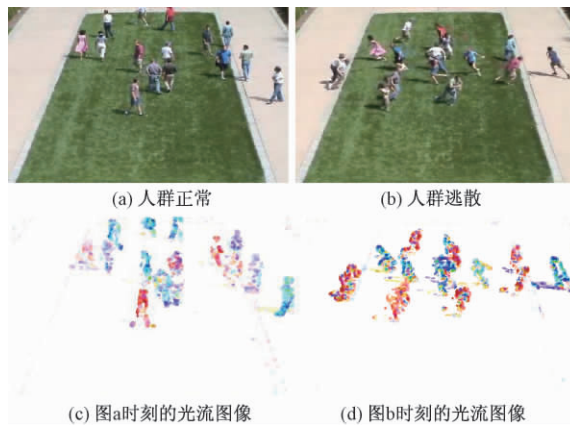


图1 光流图像示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical flow image

点对,进行统计建立光流幅值共生矩阵.光流幅值共生矩阵在本质上是指定距离与角度的像素光流幅值的联合直方图,取不同的  $a$  和  $b$  值可以改变指定的距离与角度参数值.如图2所示,左图为光流幅值矩阵,其光流值按照模值大小分成4个等级.设指定距离为1,方向为水平方向,从光流矩阵中统计由光流值1变化到光流值1的点对数,总计1次,则右图光流幅值共生矩阵第一行第一列值记为1.

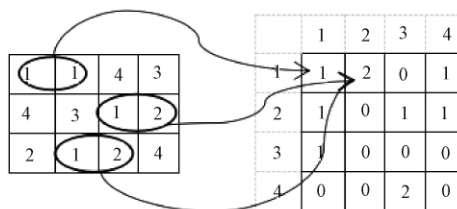


图2 光流共生矩阵建立示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical flow and the co-occurrence matrix

本文通过提取光流幅值共生矩阵角二阶距、对比度、熵与相似度等统计特征,表征人群运动行为状态的光流值空间分布特征.其特征计算方法如下所述,式中:  $i$  代表光流共生矩阵元素的行数;  $j$  代表其所在的列数;  $d$  代表计算光流共生矩阵时所采用的两像素之间距离;  $\theta$  代表两者之间的角度;  $p(i, j)$  代表共生矩阵概率值.

角二阶矩  $E$  是光流幅值共生矩阵所有元素值的平方和,可以表征光流幅值矩阵光流值分布的均一程度.角二阶矩越大,光流幅值共生矩阵元素分布就越集中,其计算如式(5)所示:

$$E = \sum_{i,j} p(i,j)^2. \quad (5)$$

对比度  $C$  反映图像的清晰度和沟纹的深浅程度.当人群行为正常时,其相应光流幅值矩阵纹

理的沟纹浅,其对比度小;当人群行为异常如逃散时,其对应光流幅值矩阵纹理的沟纹深,其对比度大.其计算如式(6)所示:

$$C = \sum_{i,j} (i-j)^2 p(i,j). \quad (6)$$

根据信息论理论,可以用熵来表征信息的不确定程度.当人群处于逃散状态时,与人群正常行为状态相比光流值分布更加混乱,人群运动行为为正常情况光流值分布均匀.利用光流幅值共生矩阵熵值  $S$  来描述人群运动行为的混乱程度,光流幅值空间分布越混乱,熵值就越大.其计算如式(7)所示:

$$S = - \sum_{i,j} p(i,j) \log p(i,j). \quad (7)$$

除了角二阶距、对比度、熵之外,为了更好地表征人群在逃散过程中所表现出的从众性,引入相似度的特征,它是共生矩阵元素在行或列方向上的相似度  $X$  的度量,其计算如式(8)所示:

$$X = \sum_{i,j} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j) p(i,j)}{\sigma_i \sigma_j}. \quad (8)$$

式中:  $\sigma_i, \sigma_j$  是共生矩阵的方差;  $\mu_i, \mu_j$  是共生矩阵的均值.

$$\sigma_i^2 = \sum_{i,j} p(i,j) (i - \mu_i)^2; \quad (9)$$

$$\sigma_j^2 = \sum_{i,j} p(i,j) (j - \mu_j)^2; \quad (10)$$

$$\mu_i = \sum_{i,j} i \cdot p(i,j); \quad (11)$$

$$\mu_j = \sum_{i,j} j \cdot p(i,j). \quad (12)$$

通过统计研究发现,人群行为发生骚乱、逃散等异常情况时,比人群正常行为状态下运动速度要高,光流值可以很好的反映人群运动速度.因此光流幅值矩阵均值大小可作为判断人群行为异常的一个很重要的特征,其计算如式(13)所示:

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} f(i,j). \quad (13)$$

### 1.2.2 光流方向共生矩阵及特征提取

当人群遇到突发意外事件时,在逃散过程中往往因场景的不同不仅伴随着人群运动速度大小的特定变化,人群运动方向空间分布纹理也会发生变化.比如在室外空旷场景中,人群在遇到突发事件时往往会选择逃离事件中心位置,虽然具体方向不定,但是因为人群行动有着从众性,运动方向相似度较高,如图3(a)所示.而在室内人群遇到突发事件时,与室外四散情况不同的是,往往会最快逃向出口方向,方向明确,如图3(b)所示.笔者通过构建光流方向共生矩阵并提取其统计特征

来表征不同人群行为状态下光流方向的空间分布关系.



图3 不同场景中人群行为异常

Fig.3 Abnormal crowd behavior in different scenes

首先将平面上  $360^\circ$  按照  $45^\circ$  的间隔分成 8 个区间,即  $D = \{ [-\pi, -3/4\pi), [-3/4\pi, -1/2\pi), [-1/2\pi, -1/4\pi), [-1/4\pi, 0), (0, 1/4\pi), [1/4\pi, 1/2\pi), [1/2\pi, 3/4\pi), [3/4\pi, \pi] \}$ . 设  $D_i$  代表第  $i$  个区间,  $i$  取值为  $\{1, 2, 3, \dots, 8\}$ , 其中不包含  $0^\circ$ , 即背景部分. 将属于  $D_i$  区间的光流方向标记为  $i$ , 背景相应的像素点方向标记为 0, 建立与视频图像相应的光流方向矩阵, 然后利用与光流幅值共生矩阵相同的方法建立光流方向共生矩阵.

通过对光流方向共生矩阵进行统计计算, 提取角二阶距、对比度、熵与相似度等特征, 描述不同人群行为状态下运动方向的空间分布关系.

### 1.3 SVM 分类器介绍

SVM 是一种基于统计学习理论的新型机器学习方法, 在解决小样本、非线性和高维度的模式识别问题中具有明显优势<sup>[13]</sup>. 人群行为异常检测作为一种典型的小样本、非线性模式识别问题, SVM 是一种比较合适的特征分类方法. 笔者通过构建光流幅值共生矩阵和光流方向共生矩阵, 提取角二阶距、对比度、熵与相似度等人群运动信息空间分布特征, 与光流矩阵幅值均值合并组成特征向量, 然后对其进行预处理与归一化处理, 最后对已标定好的视频数据提取特征并训练 SVM 分类器, 使用测试视频数据来验证本文所提出人群行为异常检测算法的检测性能.

### 1.4 实验步骤

针对传统基于图像纹理特征的人群行为异常检测算法性能较差的问题, 笔者提出一种基于人群运动信息空间分布特征的人群行为异常检测算法, 即通过建立光流幅值共生矩阵与光流方向共生来提取人群运动行为的整体特征, 并结合光流幅值均值, 组成合并特征向量训练 SVM 作为分类器进行检测人群行为异常状态, 其步骤如下:

(1) 采用 Lucas-Kanade 光流法提取监控视频



人群运动的光流信息,建立光流幅值矩阵与光流方向矩阵。

(2) 分别建立光流幅值共生矩阵与光流方向共生矩阵,并提取其特征即二阶距、对比度、熵、相似度,与光流幅值矩阵均值合并组成特征向量,大小为  $1 \times 9$ 。

(3) 因视频受摄像器材抖动、光照突变的影响会使所提取的特征产生噪声。笔者采用中值滤波方法对特征进行滤波处理,减少噪声影响。

(4) 由于原始特征的分度度较低,会影响分类结果,笔者通过式(14)对特征进行预处理。设  $Cd_i$  为预处理之后的特征,  $C_i$  为预处理之前的特征值,其中  $\bar{C}$  为通过随机选取一部分测试集正类特征的均值,然后通过式(15)对处理后的特征进行归一化处理:

$$Cd_i = (C_i - \bar{C})^2; \quad (14)$$

$$Cg_i = Cd_i / \max(Cd). \quad (15)$$

(5) 将视频随机分成训练集与测试集,利用训练集数据训练 SVM 分类器模型,然后利用训练好的 SVM 分类器模型对测试集视频进行人群行为异常检测,验证算法性能。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验数据库与评判标准

为了测试本文算法的有效性,选取人群行为异常检测算法测试标准数据集,即美国明尼苏达大学 UMN 数据库中的相关视频序列进行测试。UMN 数据库视频基于 3 个不同的背景进行拍摄,共包含 11 个不同情境的人群逃散事件视频段,共有 6 369 帧正常帧数,1 072 帧异常帧数。

为了评估人群异常行为检测算法的实用性,笔者利用 ROC(receiver operating characteristic curve)下的面积  $AUC$ (area under ROC curve)作为评判标准, $AUC$  通常介于 0.5~1,其值越大说明算法性能越好。其中 ROC 曲线是以真阳性率  $tpr$  为纵坐标,假阳性率  $fpr$  为横坐标绘制的曲线,利用 ROC 曲线能很容易观察出算法的分类识别性能。

### 2.2 实验结果与分析

笔者对数据库 UMN 中 3 个场景 11 段视频的人群异常行为进行了检测,首先随机选取一部分视频作为训练集,另一部分视频作为测试集。然后对本文算法进行验证,每种场景的 ROC 曲线如图 5 所示。图 5 表明:本文算法对不同场景能够很好地进行人群异常行为检测。

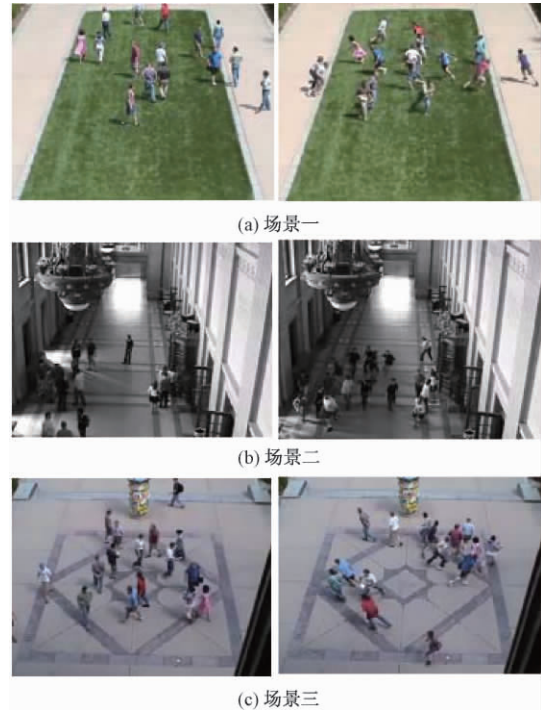


图 4 UMN 数据集

Fig. 4 UMN data set

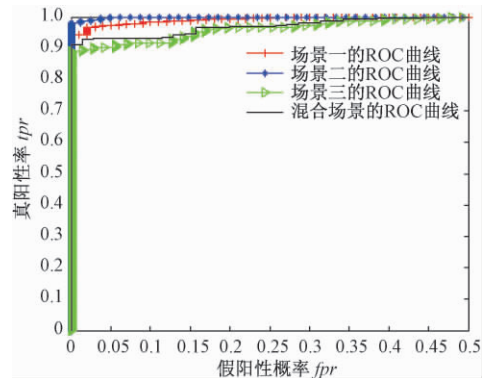


图 5 UMN 数据集中 3 种场景的异常检测 ROC 曲线

Fig. 5 Anomaly detection ROC curve of three scenes in UMN data set

表 1 UMN 视频库不同场景不同方法  $AUC$  对比

Tab. 1 Comparison of  $AUC$  results with different methods on the UMN data set

方法	场景	$AUC$
Social Force <sup>[10]</sup>	混合场景	0.960 0
Optical Flow <sup>[10]</sup>	混合场景	0.840 0
D-IncSFA <sup>[15]</sup>	混合场景	0.969 2
STVV <sup>[16]</sup>	混合场景	0.930 0
Sparse Scene2 <sup>[14]</sup>	场景一	0.995 0
	场景二	0.975 0
	场景三	0.964 0
本文方法	场景一	0.996 3
	场景二	0.999 4
	场景三	0.979 0
	混合场景	0.983 8

计算得出3种场景下ROC曲线下面积AUC值,分别为0.996 3、0.999 4、0.979 0;在3种场景中各选一部分帧做训练集,另一部分做测试集,仿真得到AUC为0.983 8.将本文的检测算法与其他几种检测算法进行对比,分别是光流法 Social Force<sup>[10]</sup>、社会力模型 Optical Flow<sup>[10]</sup>、稀疏重构 Sparse Scene2<sup>[14]</sup>、深度增量慢特征分析网络 D-IncSFA<sup>[15]</sup>、时空语境分析 STVV 方法<sup>[16]</sup>.如表1所示,与其他算法相比,本文算法性能较优,在不同场景下取得了更好的人群行为异常检测效果.

### 3 结束语

笔者介绍了一种描述人群运动行为真实情况的运动图像纹理特征提取方法.该方法通过图像光流值建立光流幅值共生矩阵与光流方向共生矩阵,然后提取人群运动统计特征,利用SVM作为分类器进行训练,最后通过训练完成的模型对人群行为异常做出判断.实验结果显示,该算法在检测人群异常事件时具有比较理想的检测结果,与其他算法相比性能较优.

### 参考文献:

- [1] ZHAN B, MONEKOSSO D W, REMAGNINO P, et al. Crowd analysis: a survey [J]. Machine vision and applications, 2008, 19(5): 345–357.
- [2] ZHANG T, LU H, LI S Z. Learning semantic scene models by object classification and trajectory clustering [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2009). Miami, FL, USA: IEEE, 2009: 1940–1947.
- [3] MA R, LI L, HUANG W, et al. On pixel count based crowd density estimation for visual surveillance [C]//2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Singapore: IEEE, 2004, 1: 170–173.
- [4] KRATZ L, NISHINO K. Anomaly detection in extremely crowded scenes using spatio-temporal motion pattern models [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(2009). Miami, FL: IEEE, 2009: 1446–1453.
- [5] 逯鹏,梁玉,陈树伟.基于角点动能的视频群体异常行为检测[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(3):20–24.
- [6] 逯鹏,张利亚,黄石磊,等.基于稀疏超完备的异常行为检测算法[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(6):72–76.
- [7] MAHADEVAN V, LI W, BHALODIA V, et al. Anomaly detection in crowded scenes [C]//2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). San Francisco, CA: IEEE, 2010: 1975–1981.
- [8] 胡斌斌,涂铮铮,郑爱华,等.基于单元格运动特征的人群异常检测[J].计算机应用与软件,2014,31(8):157–159.
- [9] 杜鉴豪,许力.基于区域光流特征的异常行为检测[J].浙江大学学报(工学版),2011,33(7):1161–1166.
- [10] MEHRAN R, OYAMA A, SHAH M. Abnormal crowd-behavior detection using social force model [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL: IEEE, 2009: 935–942.
- [11] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc. 1981: 674–679.
- [12] 郑红,李钊,李俊.灰度共生矩阵的快速实现和优化方法研究[J].仪器仪表学报,2012,33(11):2509–2515.
- [13] 陈刚,王宏琦,孙显.基于核函数原型和自适应遗传算法的SVM模型选择方法[J].中国科学院大学学报,2012,29(1):62–69.
- [14] CONG Y, YUAN J S, LIU J. Abnormal event detection in crowded scenes using sparse representation [J]. Journal of pattern recognition, 2013, 46(7): 1851–1864.
- [15] HU X, HU S, HUANG Y, et al. Video anomaly detection using deep incremental slow feature analysis network [J]. Iet computer vision, 2016, 10(4): 258–265.
- [16] LI N, WU X, XU D, et al. Spatio-temporal context analysis within video volumes for anomalous event detection and localization [J]. Neurocomputing, 2015, 155(5): 309–319.

(下转第39页)

文章编号:1671-6833(2018)03-0034-06

# 求解柔性作业车间调度问题的细菌算法对比及改进

吴秀丽, 张志强

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为充分探讨细菌系列算法求解离散优化问题的能力, 针对柔性作业车间调度问题, 采用细菌趋化算法、细菌群体趋化算法、细菌进化算法、细菌群游算法和细菌觅食优化算法进行求解。首先建立了以完成时间为目标的柔性作业车间调度问题模型, 然后用5种细菌算法进行求解, 数值试验结果表明: 细菌觅食算法的寻优能力最强。接着, 进一步对细菌觅食算法进行了改进, 针对其关键操作设计了数十种算子, 最终得到优化能力最强的算法结构和算子组合。最后的数值实验表明, 改进的细菌觅食算法寻优能力及稳定性大幅提升, 体现出非常好的全局开发能力和局部搜索能力。

**关键词:** 柔性作业车间调度; 细菌趋化算法; 细菌群体趋药性算法; 细菌觅食算法; 细菌群游算法; 细菌进化算法

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.018

## 0 引言

生产调度对于提高制造企业运作效率、降低成本具有举足轻重的作用, 该问题也是典型的优化难题, 吸引了众多学者开展研究。近年来, Brukcer等<sup>[1]</sup>提出了柔性作业车间调度问题(flexible job shop scheduling problem, FJSP)。FJSP包含两个子问题: 路由问题和调度问题, 分别表示工序的机器分配问题和调度问题。FJSP将机器柔性引入传统job-shop调度模型, 更接近于实际生产调度环境, 增加了调度灵活性, 但问题复杂度也相应增加, 传统数学方法难以在有限时间内求解, 因此众多学者采用智能优化算法研究该问题<sup>[2-3]</sup>。

细菌算法作为一个较为新颖的算法, 受到了学者的广泛关注。细菌算法都是基于细菌的生物特性来实现的: 其一是基于细菌觅食过程; 其二是基于细菌进化过程。前者由于对细菌觅食过程的拆解和侧重, 衍生出一系列其它算法, 如细菌趋化算法、细菌群体趋化算法、细菌群游算法和细菌觅食算法等; 后者发展出细菌进化算法。

细菌趋化算法最初由 Bremermann等<sup>[4]</sup>提出, 后经 Müller等<sup>[5-6]</sup>进一步地研究与综合, 提出了细菌趋化(bacterial chemotaxis, BC)算法。

该算法是优化领域的一种新的仿生学进化算法, 其利用细菌对环境中的引诱剂的应激反应行为来进行函数优化。国内最早研究BC算法的是李威武等<sup>[7]</sup>, 他提出细菌群体趋药性算法(bacterial colony chemotaxis, BCC)。细菌觅食优化算法(bacterial foraging optimization algorithm, BFO)最初由 Passino<sup>[8]</sup>2002年提出, 借鉴了大肠杆菌在觅食过程中的趋化、群聚、繁殖和消除-扩散等运动特性, 设计了优化算法。在此基础上, Tang等<sup>[9]</sup>提出细菌群游算法(bacterial swarming algorithm, BSA), Chu等<sup>[10]</sup>提出快速细菌群游算法(fast bacterial swarming algorithm, FBSA)。Nawa等<sup>[11]</sup>提出了细菌进化算法(bacterial evolutionary algorithm, BEA)。

笔者设计了多种算法结构并进行对比实验, 以确定算法的不同特性对问题的影响, 并将其中性能最佳的细菌觅食算法作为主要研究对象, 在其基础上进行改进和集成, 以得到一个寻优能力更强的改进细菌觅食算法(IBFO)。

## 1 柔性作业车间调度问题建模

### 1.1 问题描述

FJSP问题可以这样描述:  $n$ 个工件在 $m$ 台机

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-07-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学项目(51305024, 71301054)

作者简介: 吴秀丽(1977—), 女, 河南鹤壁人, 北京科技大学副教授, 博士, 主要从事制造过程智能优化调度算法研究, E-mail: wuxiuli@ustb.edu.cn.

器上加工,每个工件有多道工序,工序顺序是预先确定的,每道工序可由多台机器加工,不同机器对同一工序的加工时间并不相同. 调度过程中主要解决两个子问题: 一是机器分配问题; 二是工件排序问题. 调度目标是通过机器分配和工序排序而优化某个(些)目标,如完工时间为优化目标.

此外,加工过程还要满足约束条件: ①所有机器在  $t=0$  时刻都可用; ②所有工件在  $t=0$  时刻都可被加工; ③所有工件的工艺计划都是固定不变的; ④工序在可用机器上的加工时间是确定的; ⑤每个工件在固定时刻只能在一台机器上加工,且一旦开始加工不能中断; ⑥加工是非抢占式的.

## 1.2 模型建立

建模所用变量如下:

$n$ ——工件总数;

$m$ ——机器总数;

$n_i$ ——工件  $i$  的工序总数;

$i, h$ ——工件号索引,  $i, h = 1, 2, \dots, n$ ;

$j, g$ ——工序号索引,  $j, g = 1, 2, \dots, n_i$ ;

$k$ ——机器号索引,  $k = 1, 2, \dots, m$ ;

$O_{ij}$ ——工件  $i$  的第  $j$  道工序;

$O_{ijk}$ ——工序  $O_{ij}$  选择在机器  $k$  上加工;

$p_{ijk}$ ——工序  $O_{ij}$  选择在机器  $k$  上加工所耗费的时间;

$S_{ij}$ ——工序  $O_{ij}$  的可用机器集合,  $S_{ij} \subset \{1, 2, \dots, m\}$ ;

$C_{ij}$ ——工序  $O_{ij}$  的完工时间;

$C_{\max}$ ——调度方案的最大完工时间 Makespan;

$X_{ijk}$ ——决策变量, 若  $X_{ijk} = 1$  表示工序  $O_{ij}$  选择在机器  $k$  上加工  $O_{ijk}$ , 否则  $X_{ijk} = 0$ ;

$Y_{hgij}$ ——决策变量, 若  $Y_{hgij} = -1$  表示工序  $O_{hg}$  为  $O_{ij}$  相邻的前一道工序;  $Y_{hgij} = 1$  表示工序  $O_{hg}$  为  $O_{ij}$  相邻的后一道工序;  $Y_{hgij} = 0$  表示  $O_{hg}$  和  $O_{ij}$  为不相邻的两道工序.

通常情况下, 高效快速地完成生产任务是绝大多数生产企业追求的第一目标, 因此设定优化目标函数是最大完工时间, 即

$$\min C_{\max} = \min(\max(C_{ij})). \quad (1)$$

s. t.

$$C_{ij} - C_{i(j-1)} \geq p_{ijk} X_{ijk}, j = 2, 3, \dots, n_i; \quad (2)$$

$$(C_{ij} - C_{hg} - p_{ijk}) X_{hgk} X_{ijk} \frac{Y_{hgij}}{2} (Y_{hgij} - 1) + (C_{hg} - C_{ij} - p_{hgk}) X_{hgk} X_{ijk} \frac{Y_{hgij}}{2} (Y_{hgij} + 1) \geq 0,$$

$$\forall (h, g), (i, j), k; \quad (3)$$

$$\sum X_{ijk} = 1, k \in S_{ij}, \forall i, j; \quad (4)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}; \quad (5)$$

$$Y_{hgij} \in \{-1, 0, 1\}. \quad (6)$$

其中, 式(1)是目标函数; 式(2)是工艺约束; 式(3)是机器约束; 式(4)限定一道工序只能在一台机器上独立完成; 式(5)和式(6)限定决策变量的取值范围.

## 2 细菌系列算法性能比较

为了求解 FJSP, 必须建立该问题模型与算法的映射关系, 采用基于工序的编码方式<sup>[12]</sup>来实现, 并依据活动化调度方式生成具体的调度方案.

为了对比细菌系列算法与其他进化算法的性能, 对 FJSP 的标准问题 Kacem<sup>[13]</sup> 的 5 个标准算例和 Brandimarte<sup>[3]</sup> 的 10 个标准算例进行实验, 并与最新的研究成果进行对比分析. 平均离差率为一个衡量算法寻优能力的指标:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_i - F_{io}}{F_{io}}, \quad (7)$$

式中:  $M$  为平均离差率;  $n$  为试验算例数目;  $i$  为试验号;  $F_i$  为试验  $i$  的试验最优值;  $F_{io}$  为试验  $i$  的目前最优值.

这些算法具有不同的参数, 笔者在保证各算法具有可比性的前提下综合考虑各个参数的经验值<sup>[4-11]</sup>, 得到细菌系列算法的参数见表 1.

表 1 细菌算法的参数

Tab.1 Parameters of bacterial algorithms

算法	参数	取值	算法	参数	取值
BC	迭代代数	5 000	BEA	迭代代数	100
	邻域个数	50		种群规模	20
BCC	迭代代数	100	BEA	克隆体个数	20
	种群规模	50		基因段个数	2
	趋化次数	50	BEA	感染次数	10
BSA	种群规模	50		种群规模	50
	趋向次数	100	BFO	趋向性次数	50
	转基因次数	50		复制次数	5
	转基因概率	0.7		驱散次数	20
				驱散概率	0.8

计算对比如表 2 和表 3 所示. 可以看出, 对于 Kacem 算例, 各算法达到最优值的成功率均为 100%; 对于 Brandimarte 算例, BC、BEA 和 BSA 成功率为 40%, BCC 为 50%, BFO 为 60%. 并且对于 Brandimarte 算例, 各个算法的离差率均较低, 说明各算法性能都较好; BFO 的平均离差率最低, 说明其性能最好, 其次依次为 BCC、BSA、BEA、

BC. 考虑成功率和平均离差率的结果,5 种算法的性能排序为  $BC < BEA < BSA < BCC < BFO$ .

表 2 Kacem 算例计算结果

Tab. 2 Results for Kacem benchmarks

(工件, 机器)	最优 <sup>[14]</sup>	BC	BCC	BEA	BSA	BFO
(4,5)	11	11	11	11	11	11
(8,8)	14	14	14	14	14	14
(10,7)	11	11	11	11	11	11
(10,10)	7	7	7	7	7	7
(15,10)	11	11	11	11	11	11
成功率	—	100%	100%	100%	100%	100%

表 3 Brandimarte 算例计算结果

Tab. 3 Results for Brandimarte benchmarks

(工件, 机器)	最优 <sup>[14]</sup>	BC	BCC	BEA	BSA	BFO
(10,6)	40	40	40	40	40	40
(10,6)	26	28	26	28	27	26
(15,8)	204	204	204	204	204	204
(15,8)	60	66	63	67	66	60
(15,4)	172	177	174	177	174	173
(10,15)	58	63	62	62	60	60
(20,5)	139	144	141	142	141	141
(20,10)	523	523	523	523	523	523
(20,10)	307	307	307	307	307	307
(20,15)	197	223	223	221	218	218
成功率/%	—	40.00	50.00	40.00	40.00	60.00
平均离差率/%	—	4.60	2.77	4.49	3.06	1.61

### 3 细菌觅食算法改进设计

由对比实验可知,细菌觅食算法性能最优,因此在细菌觅食算法的基础上,试验多种优化算子,以求得到性能更优的算法.细菌觅食算法三大操作中,趋向性操作对算法影响的显著性最高,其次是驱散操作,而复制操作最低.因此,笔者着重进行了趋向性操作算子和驱散操作算子的优化试验,通过改变其操作算子的操作方式,试验不同算子的寻优能力.

为保证试验的可靠性,遵循单一变量的试验原理,在每改变一个算子操作方式后均进行单独试验,其他试验条件不变.试验过程中涉及主要参数设置如表 4 所示.

#### 3.1 驱散操作改进

(1) 随机驱散. 细菌觅食算法原始的驱散方式是以一定概率随机产生个体.

(2) 基于工件驱散. 借鉴基于工件的编码方

表 4 试验参数设置

Tab. 4 Parameters configuration

参数名称	参数值
种群规模	10
趋向性操作次数	30
复制操作次数	3
驱散(迁徙)操作次数	5
驱散(迁徙)概率	0.7
试验次数	10

式,以工件进行编码,解码过程中优先排完一个工件所有工序才进入下一个工件的排序.

(3) 基于最长工件驱散. 优先加工总加工时间最长的工件. 由于 FJSP 存在机器选择的问题,无法确切知道每道工序在哪台机器上加工以及加工时间是多少. 因此,采用其可用机器的加工时间求均值的方式来衡量该工件的平均加工时间,通过比较每个工件每道工序平均加工时间的和,可以找到加工时间最长的工件,优先安排其所有工序.

(4) 基于最短工件驱散. 与基于最长工件的驱散方式原理相同,仅将最长工件换成最短工件.

对 4 种不同的驱散方式进行试验,试验结果见表 5. 由表 5 可知,基于工件驱散方式表现最优.

表 5 驱散试验结果

Tab. 5 Results for disperation test

驱散操作方式	10 组试验均值
随机驱散	149.5
基于工件驱散	149.1
基于最长工件驱散	149.9
基于最短工件驱散	149.4

#### 3.2 趋向性操作改进

BFO 的趋向性操作包括群体自身寻优和基于最优个体的群体寻优两个过程,两个过程分别体现了细菌的趋化特性和群聚特性.

##### 3.2.1 最优个体自身寻优

个体表现优秀是因为其对各个工件的排列顺序更加合理,而每个工件的第一道工序又起到决定性作用. 因此,最优个体自身寻优方式为保留不同工件的第一道工序的相对位置信息,其他工序随机重排.

##### 3.2.2 个体自身寻优

①交换变异: 随机产生两个位置,交换位置信息. ②移码变异: 随机产生一个位置和一个距离  $s$ ,将该位置信息向右移动距离  $s$ ; 如果超过最后一个位置则转到第一个位置继续. ③反转变异: 随机产生两个位置,将两个位置之间的信息逆序排列.



④插入变异: 随机产生两个位置, 将第一个位置的信息插入到第二个位置之后. ⑤位移变异: 随机产生3个位置, 将前两个位置之间的信息插入到第3个位置之后.

### 3.2.3 基于最优个体寻优

(1) 次序交叉: 随机产生两个交叉位置, 将最优个体交叉点之间的信息片段复制给普通个体a, 并剔除普通个体的交叉点之外与最优个体交叉点之间冲突的信息, 得到b; 复制普通个体交叉点之间的位置信息, 得到c; 将c中的位置信息从第二交叉位置开始依次填入b中的空缺位置得到最终个体e.

(2) 基于位置的交叉: 随机产生多个位置点, 将最优个体位置点的信息复制给普通个体a, 得到b; 依次剔除普通个体a中与最优个体位置点的信息冲突的部分, 得到c; 将c中的位置信息依次填入b个体中的空缺位置得到最终个体e.

(3) 基于顺序的交叉: 随机产生一个二进制表, 将最优个体与二进制表中为1的对应位置的位置信息复制给普通个体a, 得到b; 依次剔除普通个体a中与最优个体位置点的信息冲突的部分, 得到c; 将c中的位置信息依次填入b中的空缺位置得到最终个体e.

(4) 线性次序交叉: 随机产生两个交叉位置, 将最优个体交叉点之间的信息片段复制给普通个体a, 得到b; 依次剔除普通个体a中与最优个体信息片段冲突的位置部分, 得到c; 将c中的位置信息依次填入b中的空缺位置得到最终个体e.

(5) 局部调度交换交叉: 在最优个体和普通个体a中分别随机产生两个交叉位置(交叉位置间长度可不同), 将最优个体交叉点之间的信息片段填充到普通个体交叉点之间, 保留普通个体交叉点外位置信息, 得到b; 在交叉点外, 依次剔除(或增补)b中与交叉位置信息片段冲突(多或者少位置信息)的位置部分得到c; 整理即得到最终个体e.

(6) 优先级保存交叉: 产生一个由0和1组成的随机序列, 0对应的位置取最优染色体的信息, 1对应的位置取普通个体a的信息, 每个位置信息选取的时候保证取到信息不与之前信息冲突; 最后得到最终个体为b.

(7) 优先操作交叉: 随机选择一个优先操作集合, 将最优个体的优先操作集合的位置信息复制给普通个体a, 得到b; 剔除普通个体中该优先

操作集合, 将剩余位置信息依次填入b空缺位置, 得到最终个体c.

### 3.2.4 改进设计数值实验.

(1) 是否增加最优个体自身寻优试验. 对增加最优个体寻优过程的BFO进行10组试验, 平均值为148.9, 没有增加该过程的试验值为149.5. 经过比较可见, 增加最优个体自身寻优过程, 有利于增加算法的寻优能力.

(2) 个体自身寻优试验. 对细菌觅食算法的个体自身寻优过程进行10组试验, 由表6中第2列可知, 个体自身寻优过程中采用反转变异, 有利于增加算法的寻优能力.

表6 10组群体自身寻优试验试验均值

Tab.6 Results for 10 tests of the population optimization

寻优方式	个体自身寻优均值	最优个体自身寻优均值
原变异方式	150.0	149.8
交换变异	147.7	148.0
移码变异	148.2	148.6
反转变异	146.9	148.3
插入变异	149.0	148.9
位移变异	148.0	148.8

(3) 最优个体自身寻优试验. 对BFO的最优个体自身寻优过程进行10组试验, 由表6中第3列可知, 最优个体自身寻优过程中采用交换变异有利于增加算法的寻优能力.

(4) 基于最优个体的群体寻优试验. 对BFO基于最优个体的群体寻优试验过程进行10组试验, 由表7可知, 基于最优个体的群体寻优过程中, PBX、LOX及POX有利于增加算法寻优能力.

表7 基于最优个体的群体寻优试验

Tab.7 Results for population optimization based on the best chromosome

寻优方式	10组试验均值
原交叉方式	148.9
次序交叉(OX)	149.4
基于位置的交叉(PBX)	148.5
基于顺序的交叉(OBX)	149.0
线性次序交叉(LOX)	148.5
局部调度交换交叉(PSXX)	149.8
优先级保存交叉(PPX)	150.0
优先操作交叉(POX)	148.6

综合考虑趋向性操作改进的试验结果, 可以得出结论: 增加最优个体的寻优过程, 有利于算法寻优; 在寻优初期, 适宜进行反转变异; 待群体染色体达到一定的优秀程度, 适宜进行交换变异; 对于交叉操作, 适宜进行PBX、LOX和POX.

### 3.3 算法最佳配置及参数

根据以上试验数据和 BFO 的参数配置,确定 IBFO 的配置:①基于工件驱散方式,②增加最优个体自身寻优,③普通个体自身寻优方式为反转变异,④最优个体自身寻优方式为交换变异,⑤基于最优个体的寻优方式为基于位置的交叉,⑥种群规模为 50,趋向性操作次数  $N_c$  为 50,复制操作次数  $N_{re}$  为 5,驱散(迁徙)操作次数  $N_{ed}$  为 20,驱散(迁徙)概率  $P_{ed}$  为 0.7.

### 3.4 数值实验

为了对比 IBFO 与其他进化算法的性能,应用 IBFO 对 Kacem<sup>[13]</sup> 算例和 Brandimarte<sup>[3]</sup> 系列进行实验,结果见表 8 和 9,可以看出 IBFO 以 90% 的成功率找到最优解,且平均离差率最低,证明 IBFO 算法的优越性能.因此,6 种算法排名为 BC < BEA < BSA < BCC < BFO < IBFO.

表 8 Kacem 算例计算结果

Tab.8 Results for Kacem Benchmarks

算例	(工件,机器)	IBFO	成功率/%
Kacem 1	(4,5)	11	100
Kacem 2	(8,8)	14	
Kacem 3	(10,7)	11	
Kacem 4	(10,10)	7	
Kacem 5	(15,10)	11	

表 9 Brandimarte 算例计算结果

Tab.9 Results for Brandimarte Benchmarks

算例	(工件,机器)	(LB,UB)	IBFO	成功率/%	平均离差率/%
MK01	(10,6)	(36,42)	40	90	0.76
MK02	(10,6)	(24,32)	26		
MK03	(15,8)	(204,211)	204		
MK04	(15,8)	(48,81)	60		
MK05	(15,4)	(168,186)	172		
MK06	(10,15)	(33,86)	58		
MK07	(20,5)	(133,157)	139		
MK08	(20,10)	(523,523)	523		
MK09	(20,10)	(299,369)	307		
MK10	(20,15)	(165,296)	212		

## 4 结论

针对 FJSP,建立了优化模型,提出了 BC、BEA、BSA、BCC 和 BFO,并进行了数值实验和分析.结果表明,5 种算法稳定性、改进空间和寻优能力存在一定差异.其中,BFO 表现最为优异,因此对其进行了改进,针对其关键操作设计了多种优化算子,最终得到优化能力最强的算法结构和算子组合.数值实验表明,改进的细菌觅食算法的

寻优能力及稳定性大幅提升,体现出非常好的全局开发能力和局部搜索能力,能高效求解 FJSP.

## 参考文献:

- [1] BRUCKER P, SCHLIE R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines [J]. Computing, 1990, 45 (4): 369-375.
- [2] 王书锋,肖小城,冯冬青.求解 Job-shop 问题的改进混合离散粒子群优化算法[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(4):44-47.
- [3] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search [J]. Annals of operations research, 1993, 41(3): 157-183.
- [4] BREMERMAN H. Chemotaxis and optimization [J]. Journal of the franklin institute, 1974, 297(5): 397-404.
- [5] MÜLLER S, AIRAGHI S, MARCHETTO J, et al. Optimization algorithms based on a model of bacterial chemotaxis [C] // Proceedings of the 6th International Conference Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animats. Paris, France: Springer, 2000: 375-384.
- [6] MÜLLER S D, MARCHETTO J, AIRAGHI S, et al. Optimization based on bacterial chemotaxis [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6 (1): 16-29.
- [7] LI W, WANG H, ZOU Z, et al. Function optimization method based on bacterial colony chemotaxis [J]. Journal of circuits and systems, 2005, 10(1): 58-63.
- [8] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. Control systems IEEE, 2002, 22(3): 52-67.
- [9] TANG W J, WU Q H, SAUNDERS J R. A bacterial swarming algorithm for global optimization [C] // 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007). Singapore: IEEE, 2007: 1207-1212.
- [10] CHU Y, MI H, LIAO H, et al. A fast bacterial swarming algorithm for high-dimensional function optimization [C] // 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2008). Hong Kong, China: IEEE, 2008: 3135-3140.
- [11] NAWA N E, FURUHASHI T. Fuzzy system parameters discovery by bacterial evolutionary algorithm [J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 1999, 7(5): 608-616.
- [12] 吴秀丽,孙树栋,余建军,等.多目标柔性作业车间调度优化研究[J].计算机集成制造系统,2006,12(5):731-736.
- [13] KACEM I, HAMMADI S, BORNE P. Approach by localization and multi-objective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems [J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics

part C: application & reviews, 2002, 32: 408 – 19.  
 [14] LI J Q, PAN Q K, GAO K Z. Pareto-based discrete artificial bee colony algorithm for multi-objective flexi-

ble job shop scheduling problems [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2012, 55: 1159 – 1169.

## The Comparison and Improvement of Bacterial Algorithms for Flexible Job Scheduling Problem

WU Xiuli, ZHANG Zhiqiang

( School of Mechanic Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The article aimed to fully explore the ability of bacterial algorithm and its varieties for solving the discrete optimization problems. The bacterial chemotaxis algorithm( BC) , bacterial colony chemotaxis algorithm( BCC) , bacterial evolutionary algorithm( BEA) , bacterial swarming algorithm( BSA) and bacterial foraging optimization algorithm( BFO) are designed to solve the flexible job scheduling problem. Firstly, the model of the flexible job scheduling problem was formulated. Then the five algorithms were designed to solve the benchmark instances. The results showed that the BFO outperformed the others. Furthermore, a strategy to improve the BFO was proposed. More than ten optimization operators were designed and compared. Finally, the best structure of the improved BFO was built. The numerical experiments showed that the proposed BFO balanced the exploration and the exploitation very well and could solve FJSP effectively.

**Key words:** flexible job scheduling problem; bacterial chemotaxis algorithm; bacterial colony chemotaxis algorithm; bacterial evolutionary algorithm; bacterial swarming algorithm and bacterial foraging optimization algorithm

( 上接第33 页)

## Detection of Human Behavior Anomaly Based on the Optical Flow Co-occurrence Matrix

ZENG Qingshan, SONG Qingxiang, FAN Mingli

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

**Abstract:** The traditional anomaly detection algorithm for human behavior that based on image texture features tended to describe the change of human image texture rather than the actual situation of human motion behavior. Its detection performance was not so good. In this paper, a method of feature extraction was proposed to reflect the real situation of human motion behavior. Firstly, the optical flow information was extracted by Lucas-Kanade optical flow algorithm, and the co-occurrence matrix and optical flow direction co-occurrence matrix were established. Then, the characteristics of two order distance, contrast, entropy and similarity are extracted by the co-occurrence matrix, and then combined them with the mean value of optical flow to form a feature vector to train the support vector machine ( SVM) . Finally, this algorithm was used to determine whether the crowd had abnormal behavior. The simulation results showed that the feature extraction method in this paper had more in depth processing of the crowd motion information provided by the optical flow method. Compared with the mainstream algorithm, it has a better recognition performance.

**Key words:** crowd behavior anomaly detection; optical flow; optical flow co-occurrence matrix; support vector machine

## 基于二次聚类的主动脉弓分割方法

陈中中<sup>1</sup>, 杨亚茹<sup>1</sup>, 张建飞<sup>1</sup>, 王倩倩<sup>1</sup>, 朱惠玉<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省生产力促进中心, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 提出一种基于均值漂移和层次聚类的二次聚类图像分割算法(MSHC), 在CIE(LUV)颜色空间中, 首先运用均值漂移算法实现图像的平滑及初步聚类, 然后将结果中每个区域的均值作为第二次聚类的初始值, 对图像进行层次聚类处理至满足预定效果为止。最后, 将图像中主动脉所在类的均值作为区域生长的种子点, 完成目标提取。该MSHC算法分割效果良好, 易于重建主动脉弓三维模型, 且模型立体感强, 可清晰展现其空间三维结构。

**关键词:** 均值漂移; 层次聚类; 二次聚类; 主动脉弓; 三维重建

**中图分类号:** TP399

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.025

### 0 引言

体内流场的监测与评估对于观测动脉粥样硬化、主动脉夹层、动脉瘤等心血管疾病具有重要作用, 而建立人体主动脉弓三维模型对于血液动力学研究有指导意义, 但就目前的医学测量手段而言, 由于人体胸主动脉几何形状的复杂性, 仅依靠医疗器械来实现三维模型建立较为困难, 只有通过图像处理的方法才得以实现。

基于彩色空间特性的分割一般采取区域分割和聚类的方法来实现<sup>[1]</sup>。其中, 模糊聚类法对彩色图像的色相饱和度进行处理, 能够快速实现聚类中心的初始化<sup>[2]</sup>; 均值漂移法在图像平滑、分割及物体跟踪处理中都得到了较好的结果<sup>[3]</sup>; 基于小波分析的 $k$ -means聚类分割对骨髓细胞图像的分割效果良好, 改善了传统算法误分割、过分割等问题<sup>[4]</sup>; 分水岭与区域生长算法结合起来用于彩色图像分割, 该算法能够充分利用分水岭和区域生长算法的优势<sup>[5]</sup>。然而模糊聚类算法需要预先定义模糊隶属度函数且处理图像复杂噪声较多的图像时, 边缘多呈现出毛刺状, 易产生大量孤立点<sup>[6]</sup>; 均值漂移算法的准确性易受图像中目标区域大小的影响; 分水岭算法中目标的标记提取会影响图像分割效果;  $k$ -means算法中聚类数的设定需要先验知识, 若选取不当分割效果会很差; 区域生长法种子点的选取决

定了目标物能否完整分割。

笔者针对彩色人体切片图像, 提出了一种基于二次聚类的图像分割方法, 通过均值漂移和层次聚类算法完成图像分割处理, 以期获得良好的分割效果, 建立精确的主动脉弓三维模型。

### 1 算法分析

#### 1.1 均值漂移算法

均值漂移算法(meanshift)本质上是一个自适应的梯度上升搜索峰值的方法, 不需要任何先验知识, 数据集中的每一点都可作为初始值, 对任意形状分布的数据都有效, 运用它进行图像分割时, 能在保留图像基本特性的基础上将图像分割成一些子区域, 减少图像中基本的实体数目<sup>[7-8]</sup>。均值漂移算法目标函数表示为:

$$M(x) \equiv \frac{\sum_{i=1}^n G_H(x_i - x) w(x_i) (x_i - x)}{\sum_{i=1}^n G_H(x_i - x) w(x_i)}, \quad (1)$$

式中:  $G(x)$  表示任意一个单位核函数, 核函数决定了采样点  $x_i$  与核中心点  $x$  之间的相似性度量;  $w(x_i) \geq 0$  表示相应样本点  $x_i$  的权重值; 均值漂移算法的收敛点为局部密度极大值点。

假设每个区域用  $C_i (i = 1, 2, \dots)$  表示, 每个区域对应点的颜色向量表示为  $\mathbf{X}_{Ci} = (\overline{x_{1i}}, \overline{x_{2i}},$

收稿日期:2017-04-02; 修订日期:2017-07-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAI11B08-2-02)

作者简介:陈中中(1973—),男,河南洛阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事快速成型(包括人体器官的计算机三维重建技术)等方面研究,E-mail:zzchen@zzu.edu.cn.

$x_{3i}$ ), 则区域间的色差为  $d(C_i, C_j) = \|X_{C_i} - X_{C_j}\|^2$ .

### 1.2 层次聚类算法

层次聚类法(hierarchical clustering)是将每一个区域的特征看作是一个类,不同类之间的距离可以有不同的计算方式,根据计算得到的类间距参数合并两个最接近的类,重复此过程,直到结果满足条件为止. 根据不同类间距的计算方法不同,分为最小距离法、最大距离法、组平均聚类法和ward法<sup>[9-10]</sup>.

随机选取20个二维点的样本数据,如图1所示,运用最小距离法、最大距离法、组平均法以及ward法对样本数据进行处理,如表1所示. 采用欧氏距离计算方法,获得不同的处理结果,如图2所示.

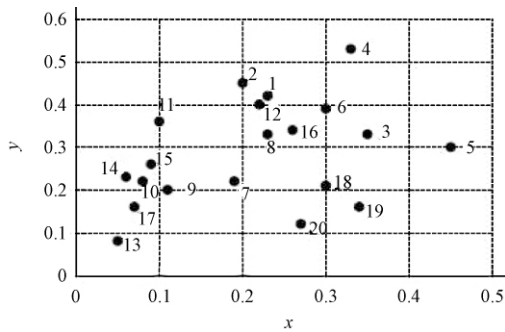


图1 样点数据

Fig.1 Sample data

表1 样本数据和层次聚类算法

Tab.1 Sample data and hierarchical clustering method

样本数据	算法
P1(0.23,0.42)	
P2(0.20,0.45)	$d_{\min}(C_i, C_j) = \min_{x \in C_i, y \in C_j} \ x - y\ $
P3(0.35,0.33)	$d_{\max}(C_i, C_j) = \max_{x \in C_i, y \in C_j} \ x - y\ $
P4(0.33,0.53)	
P5(0.45,0.30)	$d_{\text{avg}}(C_i, C_j) = \frac{1}{n_i n_j} \sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_j} \ x - y\ $
.....	
P18(0.30,0.21)	$d_{\text{ward}}(C_i, C_j) = \sqrt{\frac{n_i n_j}{n_i + n_j} \ u_i - u_j\ }$
P19(0.34,0.16)	
P20(0.27,0.12)	

表1中,类 $C_i, C_j$ 表示meanshift算法聚类后得到的两个区域,其颜色向量分别为 $X_{C_i}, X_{C_j}$ ,大小和均值分别为 $n_i, u_i, n_j, u_j$ .

最小距离法和最大距离法会因为两个区域中的极端点而使聚类结果出现错误;组平均法和ward法是对整个区域中的所有点进行数据处理,得到的结果能反映两类之间的相似度. 笔者采用组平均法对图像进行第二次聚类处理.

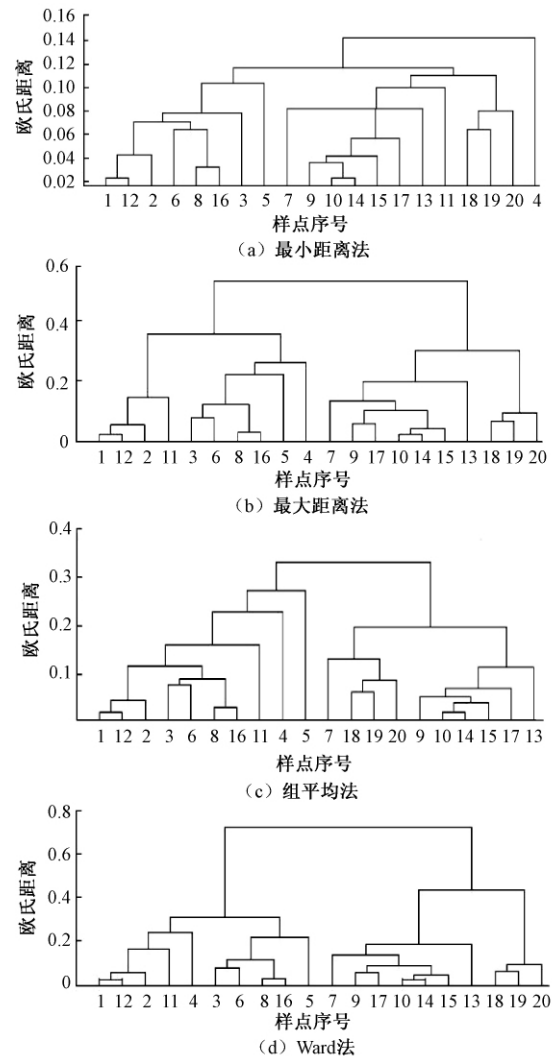


图2 不同算法的结果

Fig.2 Result of different methods

### 1.3 二次聚类算法

笔者提出基于均值漂移算法和层次聚类算法的二次聚类算法(MSHC),最后利用种子区域生长法实现对主动脉弓的分割提取,具体算法步骤,如图3所示.

## 2 实验结果

### 2.1 实验对象

所用的人体数据来源于美国国立医学图书馆可视人计划男性数据集,共1878人体切片图像,如图4所示. 每张图像像素 $2048 \times 1216$ ,体元大小 $0.33 \text{ mm} \times 0.33 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$ . 重建主动脉弓所需要的图像为胸腔部分的161张图像并将其按顺序编号0~160.

### 2.2 图像预处理

考虑到某些外在因素,比如成像设备晃动,会造成图像的偏移,在进行切片成像时,会预先

设定一个定位杆,在重建血管前需要对选取的图像参照定位杆进行配准.用 Matlab 记录每张图像定位杆的偏移量并绘出偏移曲线,如图 5 所示.对定位杆进行配准,配准前后定位杆对比效果,如图 6 所示.

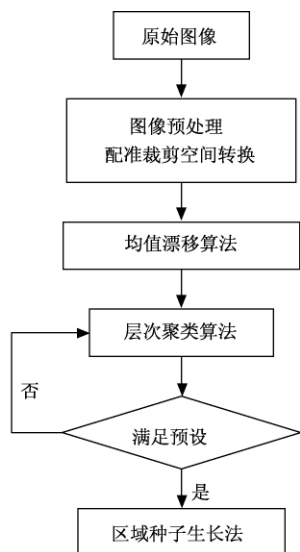


图 3 算法流程图

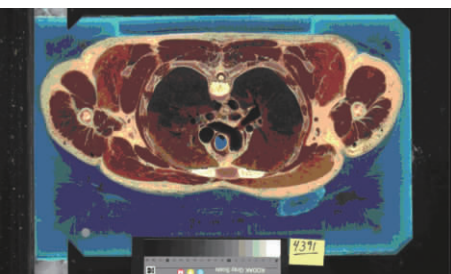


图 4 人体切片图像样本

Fig. 4 Image of human slice

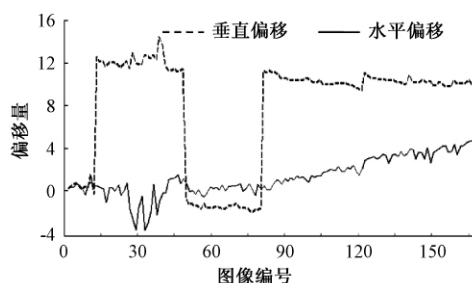


图 5 定位杆偏移曲线

Fig. 5 The curve of locating rod offset

由于 RGB 颜色空间将色调、亮度、饱和度 3 个量放在一起表示,通过欧氏距离计算得到的与同一点色差值相同点的颜色很可能不同,在进行颜色分离时容易造成误分离.  $L^* U^* V^*$  是一种均匀颜色空间,如果用一个三维向量  $X_i = (x_{1i}, x_{2i}, x_{3i})$  表示彩色图像中的一个像素点,则像素点

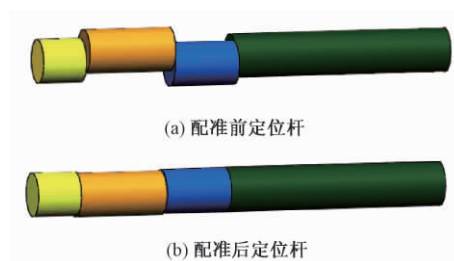


图 6 配准前后

Fig. 6 Before registration and after registration

的色差为  $d_{ik} = \|X_i - X_k\|^2$ . 因此可用于测量小的色差,以提高图像分割的效果.

将 RGB 颜色空间先转换为 XYZ 颜色空间,如公式 (2) 所示,再由 XYZ 颜色空间转换为  $L^* U^* V^*$  颜色空间,如公式 (3) 所示<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} X = 0.4124R + 0.3576G + 0.1805B; \\ Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B; \\ Z = 0.0193R + 0.1192G + 0.9505B, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L^* = \begin{cases} 116(Y/Y_n)^{\frac{1}{3}} - 16, & Y/Y_n > (6/29)^3; \\ (29/3)^3(Y/Y_n), & Y/Y_n \leq (6/29)^3, \end{cases} \\ U^* = 13L^*(U' - U'_n), \\ V^* = 13L^*(V' - V'_n). \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中: } U' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, V' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}.$$

式中:  $R, G, B, X, Y, Z, L^*, U^*, V^*$  分别为 RGB、XYZ、 $L^* U^* V^*$  颜色空间的色度矩阵.

## 2.3 实验对比

为了验证本文算法的有效性,选取部分组织结构复杂的图像进行不同分割算法处理.在 MATLAB 环境中对 34#、42#、49#、66# 的图像分别进行模糊聚类算法 (FCM)、 $k$ -means 聚类算法 ( $k=4$ ) 以及本文聚类算法 (MSHC) 分割处理,如图 7 所示.算法效果判断依据是能否获得完整主动脉轮廓以及是否利于进一步的后续处理.其中图 (b) FCM 算法结果中存在大量孤立点,不便于区域生长法的进行;图 (c)  $k$ -means 算法结果不理想,主动脉弓部分存在过分割现象,且图像中存在大量孤立点;图 (d) MSHC 算法结果较满意,主动脉部分分割完整,且边缘平滑.综合分析这 3 种聚类算法结果,可以发现 FCM 算法和  $k$ -means 算法分割结果中的组织整体性差,而本文提出的算法分割结果较为满意.

## 2.4 主动脉弓三维重建

对原图像进行剪裁,截取主要部分进行分割处理.图像处理结果如图 8 所示,其中图 8(a) 为



meanshift 算法结果,图 8 (b) 为 hierarchical clustering 算法结果,图 8 (c) 为区域生长处理结果,图 8 (d) 为特定区域填充结果.

将最终结果导入医学软件 3D-DOCTOR 中,

进行阈值分割,并对其进行表面重建,获取原始的主动脉弓三维模型. 用 Geomagic 软件对模型进行网格优化,如图 9 所示.

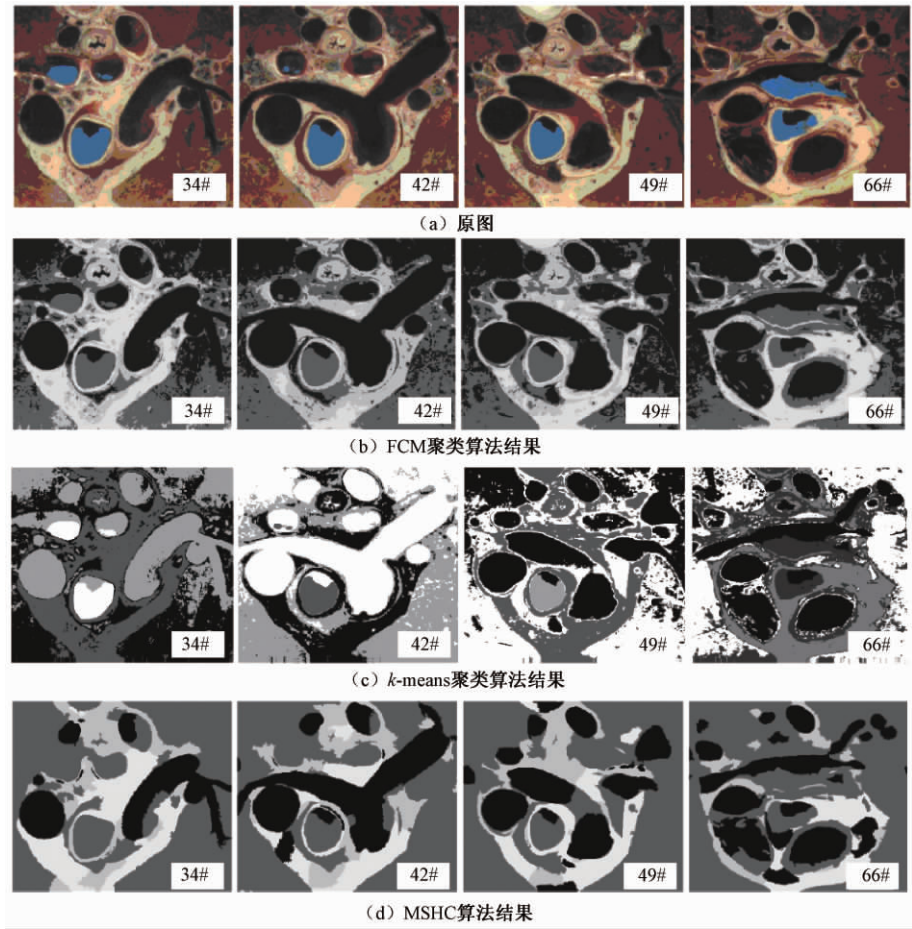


图 7 不同算法处理结果  
Fig. 7 Result of different methods

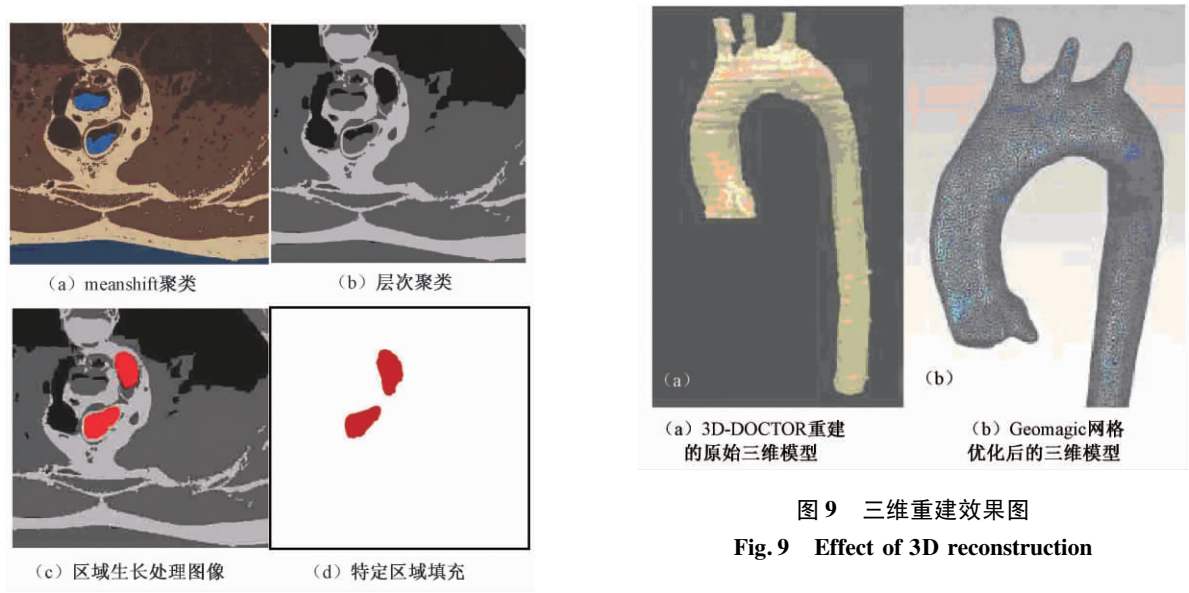


图 8 算法每步的处理结果  
Fig. 8 Each step of method processing result

图 9 三维重建效果图  
Fig. 9 Effect of 3D reconstruction

3 结束语

笔者通过对彩色图像分割及主动脉弓三维重

建的研究,完成了应用二次聚类算法(MSHC)对人体切片图像的分割处理,并建立了主动脉弓三维模型.该模型立体感强,三维效果逼真,可清晰展现其空间三维结构,对于血液动力学的直观研究具有重要意义:一方面在微创介入手术中帮助医生选择合理的导管介入路径与方式,为医生提供介入手术训练平台,提高介入手术的安全与效率;另一方面,血液动力学的研究为血管狭窄等血管疾病的预测及诊断提供了一定的研究基础.

### 参考文献:

- [1] 林开颜,吴军辉,徐立鸿.彩色图像分割方法综述[J].中国图像图形学报,2005,10(1):1-10.
- [2] RAJABY E, AHADI M, AGHAEINAI S H, et al. Robust color image segmentation using fuzzy c-means with weighted hue and intensity [J]. Digital signal processing, 2016, 5(1): 170-183.
- [3] COMANICIU D, MEER P. Meanshift: A robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2002, 24(24): 603-619.
- [4] 苏士美,吕雪扬.骨髓细胞图像的小波变换与  $k$ -means 聚类分割算法[J].郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4): 15-18.
- [5] 杨家红,刘杰,钟坚成,等.结合分水岭与自动种子区域生长的彩色图像分割算法[J].中国图像图形学报, 2010, 15(1): 63-68.
- [6] LIU L X, TAN G Z, SOLOMAN M S, et al. Color image segmentation using meanshift and improved ant clustering [J]. Journal of central south university, 2012, 19(4): 1040-1048.
- [7] WANG Ping, LEE D, GRAY AG, et al. Fast meanshift with accurate and stable convergence [J]. Journal of machine learning research proceedings track, 2007, 2(2): 604-611.
- [8] 周晨曦,梁循,齐金山.基于约束动态更新的半监督层次聚类算法[J].自动化学报,2015,41(7): 1253-1263.
- [9] 许晓丽.基于聚类分析的图像分割算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学机械工程学院,2012.
- [10] OHKURA K, NISHIZAWA H, OBI T, et al. Unsupervised image segmentation using hierarchical clustering [J]. Optical review, 2000, 7(3): 193-198.
- [11] 陈中中,张建飞,杨亚茹,等.建立反映心脏内部各腔室结构的数字化三维模型[J].中国组织工程研究, 2014, 49(18): 7967-7973.

## Segmentation Method of the Aortic Arch Based on Quadratic Clustering

CHEN Zhongzhong<sup>1</sup>, YANG Yaru<sup>1</sup>, ZHANG Jianfei<sup>1</sup>, WANG Qianqian<sup>1</sup>, ZHU Huiyu<sup>2</sup>

(1. Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Productivity Promotion Center, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A twice clustering method(MSHC) was proposed based on meanshift and hierarchical. Firstly, in the CIE(LUV) color space, meanshift method is used for the first clustering to realize image smoothing and initial clustering. Then, the mean of each region was used as the initial value for the second clustering. And hierarchy clustering was used for the second clustering, which would be stopped until the clustering effect reached the expected effect. Finally, the mean of the aorta region was used as the seed point in the region growing, and the image segmentation was finished. The MSHC method could improve the efficiency and effect of image segmentation, and the aortic arch model had a strong visualizing and realistic sense, which could clearly show the three-dimensional structure.

**Key words:** meanshift; hierarchical clustering; twice clustering; aortic arch; 3D reconstruction



# 基于非结构化月面复杂环境下 SLAM 技术研究进展

王依乔, 张 伟

(中国科学院大学 空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

**摘 要:** 综述了非结构化月面复杂环境下同时定位与地图构建(SLAM)领域的最新研究进展,重点介绍和总结了视觉SLAM的特征提取方式,以及基于EKF、PF滤波器的SLAM方法和基于图优化的3种主流SLAM方法,并对SLAM技术面临的挑战做了深入的研究,最后对未来发展方向进行了展望.研究表明:在非结构化复杂环境下多传感器融合SLAM、多机器人协作SLAM、主动SLAM及结合人工智能技术等前沿性课题已取得一定的研究成果,但在完善方法模型、相关分支问题研究及语义地图创建等方面仍待突破,应作为下一步的重点研究方向.

**关键词:** 同时定位与地图构建; 特征提取; 基于滤波器; 图优化; 非结构化环境

**中图分类号:** V476.3; TP242.6 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.001

## 0 引言

在我国的月球探测任务中,月球车月面巡视是一项重要的内容,其主要作用是在月球表面进行自主漫游并利用科学仪器完成对月面环境的直接探测.月面环境属于非结构化环境,具有松软的月壤层,月球探测车为了保证在地形复杂恶劣的地表形态中顺利完成探测工作,必须具有智能感知的移动系统,以及良好的自主避障性能<sup>[1]</sup>,即月球车可以在不需要地面干预的情况下利用自身系统算法进行路径规划,并结合自身的自主避障功能安全到达目标点并完成相应的任务.

月面环境比陆地环境更加困难的重要原因环境本身的复杂性和不确定性.目前大多成熟的地面机器人定位技术并不适用于月球车的定位<sup>[2]</sup>,在环境场景复杂且未知的月面环境下,月球车的定位和地图创建应该综合考虑,这就是同时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)问题. SLAM技术是指机器人在未知环境从一个未知位置开始移动,在移动过程中根据传感器获得的信息和自身位姿估计进行定位,同时在定位的基础上增量地构建周围环境地图并辅助机器人自定位,两者是相辅相成的过程,从而实现机器人的自主定位和地图构建<sup>[3]</sup>.

SLAM的思想最早由Smith与Self等人提出,其理论意义和应用价值逐渐引起了众多学者的关注<sup>[4]</sup>.

SLAM技术需要利用传感器来感知场景信息,尽管在地面机器人上应用激光等传感器的手段更为简单,但是由于月球车的工作环境特征复杂,且难以事先预测,存在很多局限.视觉作为最接近于人类感知的方式,通过单目、双目或RGB-D摄像机感知周围场景,定位精度仅依靠视觉输入信息,能够精确估计本体6个自由度(3个方向的位置和姿态)的运动参数变化,成本较低,并且不受倾斜、下陷等因素的影响<sup>[5]</sup>,具有定位精度高、信息量大、灵活性高等优点,随着近年来视觉图像处理技术的快速发展,使得视觉SLAM的优势逐渐突出,成为月球车定位技术的首选.

然而,视觉SLAM仍然具有其局限性,相机存在由于光照变化、表面纹理缺乏和快速运动引起图像模糊等因素引起的误差,许多研究者对以上问题进行了研究并获得不错的结果.典型的有Klein等人基于BA(bundle adjustment)提出的实时SLAM算法,即并行跟踪和构图算法(parallel tracking and mapping, PTAM)<sup>[6]</sup>, Engel等人采用直接的方法构建大范围内的半稠密地图,即LSD-SLAM(large-scale direct-SLAM)<sup>[7]</sup>,以及近年来逐

收稿日期:2017-11-20; 修订日期:2017-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11603057)

通信作者:张伟(1976—),男,山西晋城人,中国科学院大学研究员,博士,主要从事电子与信息技术的研究, E-mail: zhangwei@csu.ac.cn.

渐引起广泛关注的 RGB-D SLAM 和 ORB-SLAM (oriented bried-SLAM) 等. RGB-D SLAM 由 Endres 等人于 2014 年提出<sup>[8]</sup>, 该算法采用的 RGB-D 摄像机可以在获取环境彩色信息( rgb) 的同时也直接获取深度信息( depth). ORB-SLAM 是 2015 年由 Mur-Artal 等人提出的基于关键帧的 SLAM 算法<sup>[9]</sup>, 该系统选用 ORB 特征进行提取匹配以及稀疏地图的创建, 系统分为视觉里程计、地图创建、回环检测 3 个线程, 是目前主流算法中精度最高的单目 SLAM 算法. Cadena 等回顾了 SLAM 方法中关键性概念或者技术, 如表 1 所示<sup>[10]</sup>.

表 1 SLAM 方法关键性技术的研究者  
Tab.1 Key technology researcher of SLAM

年份	关键性事件	研究者
2008	基于滤波器的方法	Aulinas, et al
2008	视觉 SLAM	Neira, et al
2011	SLAM 后端	Grisetti, et al
2011	可观测、一致性、收敛性	Dissanayake, et al
2012	视觉里程计	Scaramuzza, et al
2016	多机器人协作 SLAM	Saeedi, et al
2016	视觉位置识别	Lowry, et al

SLAM 技术体现了移动机器人的自主能力, 如今 SLAM 技术在大规模、非结构化复杂环境下仍存在问题. 笔者基于视觉 SLAM 前沿的研究基础, 对月面非结构化复杂环境下的 SLAM 技术进行分析与综述, 对目前的 SLAM 特征提取方式、主流方法进行了归纳总结, 分析讨论了视觉 SLAM 在月面环境下正面临的难点问题与不足, 并指出了未来的发展趋势和方向.

## 1 月面环境特征提取方式

在一个 SLAM 过程中, 月球车在登陆月球表面后, 首先通过视觉系统获取月面图像信息, 用摄像机来做导航和探索, 读取数据并且进行特征提取, 根据获取的信息把特征地标在三维地图中重建出来. 通过对图像序列中前后两帧数据进行匹配处理, 结合闭环检测减小累积误差, 从而得到移动机器人的位姿估计及周围环境的地图信息.

月面环境属于非结构化环境, 纹理特征较为单一, 灰度变化较不明显, 完全依靠像素梯度搜索的直接法 SLAM 并不适用, 因此本文主要分析基于特征的位姿估计 SLAM 方法.

在月球车的定位中, 为了保证后续匹配和位姿估计的准确性, 特征点的选取具有关键性因素.

特征点应具有较好的稳定不变性与鲁棒性, 以及良好的特征定位准确性. 比如对光照变化不敏感, 并且在图像旋转、平移和尺度变化的情况下具有稳定性. 根据采用特征的不同, 可对视觉 SLAM 方法进行重新分类, 目前应用比较普遍的匹配技术主要为基于几何特征的匹配, 包括线/边缘特征以及基于点特征的匹配等.

### 1.1 基于线/边缘特征的方法

图像的线和边缘部分是指灰度变化明显的边缘或不连续的区域, 边缘特征集中了图像的大部分有效数据, 具有丰富的几何信息, 普遍存在于结构化环境中. 这类特征对于光线、视角等变化表现较为稳定, 相比于点特征更易于提取且能有效减少特征数量, 从而降低算法复杂度. Eade 等通过 Canny 检测器提取出图像的边缘特征, 用 egelets 表达特征信息, 从而提升算法的稳定性<sup>[11]</sup>. 然而, 在非结构化环境下, 简单的边缘、线等特征通常难以被观测, 线与边缘的不确定性以及边缘匹配问题往往会给 SLAM 技术带来挑战.

### 1.2 基于点特征的方法

点特征在视觉 SLAM 中应用广泛, 相比于其他特征, 点特征在保留图像重要特征的同时, 具有对遮挡相对鲁棒、识别性好、提取速度快等特点. 在基于点特征的视觉 SLAM 中, 关键是能够提供稳定性高的图像特征点. 经典的特征点检测算子有: MSER、SIFT、SURF、STAR、FAST、ORB 等.

SIFT 特征由 Lowe 等提出<sup>[12]</sup>, 对光照变化以及图像的尺度变化、平移、旋转、缩放等具有较强的稳定不变性与鲁棒性, 是适用于月面匹配比较理想的特征. 文献 [13-14] 在视觉 SLAM 研究中使用了 SIFT 特征, 然而 SIFT 特征也存在一些局限性, 由于计算量较大, 时间复杂度高, 所以有时不能保证实时性.

SURF 特征是 SIFT 算法的改进, 其特征速度更快且具有更好的稳定性, 它在视觉 SLAM 系统中也获得较广泛的应用<sup>[15]</sup>.

BRIEF<sup>[16]</sup> 使用二进制流作为关键点特征, 与 SURF 特征相比具有更快的速度. ORB 特征是 FAST 特征与 BRIEF 描述符的结合, FAST 特征具有较快的检测速度, 且 BRIEF 描述符是二进制串, 所以 ORB 特征方法缩减了匹配速度, 并且具有稳定性和较好的抗干扰性, 在满足视觉 SLAM 系统实时性的同时提升了定位精度.

### 1.3 基于混合特征的方法

有一些研究者致力于研究特征之间的关联和

约束关系,将不同检测子和描述符配合应用于检测特征,也都取得了不错的效果.孙凤池等将Harris affine检测子与SIFT描述子融合检测图像特征,完成闭环检测任务<sup>[17]</sup>.李海丰等提出了一种新的将点、线、平面特征融合应用的SLAM算法——PLP-SLAM<sup>[18]</sup>.

## 2 同时定位与地图构建方法

SLAM本质上是一个状态估计问题,优化后端分为滤波器和优化方法两类.基于滤波器的方法出现较早,根据后验概率表示方式的不同可以分为多种基于滤波器的方法,典型的有扩展卡尔曼滤波器(extended-kalman filter, EKF)和粒子滤波器(particle filter, PF).

### 2.1 基于扩展卡尔曼滤波的SLAM技术

基于EKF的SLAM技术主要依据递归贝叶斯状态估计理论,EKF-SLAM具有很好的收敛性,经典的有Davison等提出的一种基于扩展卡尔曼滤波器的实时单目SLAM系统(MonoSLAM)<sup>[19]</sup>.传统的EKF方法具有局限性,在非线性情况下不能保证全局最优,容易造成误差累积.为了提升EKF-SLAM算法的实时性和鲁棒性,曹军等基于EKF-SLAM,提出了一种新算法,使状态在经过校正后更快速地接近真实值<sup>[20]</sup>.许亚朝等通过引入滤波收敛判断系数并调整增益矩阵,从而抑制了滤波的发散问题,提高了精度、实时性和稳定性<sup>[21]</sup>.

### 2.2 基于粒子滤波的SLAM技术

PF-SLAM(particle filter SLAM)利用粒子滤波等滤波器实现,PF作为一种非参数化滤波器适用性更普遍,主要步骤包括状态检测、更新权值和重采样等.PF-SLAM在高维空间的概率分布需要大量的粒子,Doucet等提出了一种基于Rao-blackwellized粒子滤波器的算法——RBPF-SLAM,将系统状态分为采样和解析两部分,从而降低了算法的复杂度<sup>[22]</sup>.基于RBPF,Montermerlo等提出了具有代表性的FastSLAM方法<sup>[23]</sup>,有机地将粒子滤波器与卡尔曼滤波器集成在一起,鲁棒地解决了数据关联的问题.宋宇等提出平方根容积Rao-blackwellised SLAM算法,采用容积律计算SLAM中的非线性函数高斯权重积分,减小了SLAM非线性模型线性化的误差、提高了SLAM的精度<sup>[24]</sup>.

### 2.3 基于图优化的SLAM技术

SLAM技术逐步应用于解决大规模环境下的

定位与建图问题,研究热点逐渐转为非线性优化的SLAM方法,目前应用最广泛的代表为基于图优化的SLAM(graph-based SLAM)方法.相比于只考虑前后两帧图像变化的基于滤波器的方法,基于图优化的方法考虑全局变量,获取所有的观测信息,从而估计移动机器人的位姿及完整地图.图优化方法由Lu与Milio提出,通过构建位姿图(pose graph)解决机器人的位姿估计问题.图由节点和边组成,节点表示移动机器人的位姿或路标,边表示传感器测得的节点之间的约束关系.通过对节点的位置进行优化,使其最优的满足边所表示的约束关系,优化的结果即为机器人的运动轨迹<sup>[25]</sup>.图优化方法考虑全局变量信息,在定位精度上相比于滤波器的方法有很大的提升,获得了更好的建图效果,是目前大规模环境下的主流研究方法.具有代表性的算法包括PTAM(parallel tracking and mapping)、ORB-SLAM等,在大场景中均获得了较好的效果.该类方法将SLAM问题划分为前端(SLAM front-end)和后端(SLAM back-end)两个部分.前端类似于视觉里程计,目的是构建位姿图,后端是基于图的非线性优化.

Gutmann和Konolige在Lu与Milios的研究基础上进一步提出了高效的基于图优化的增量式SLAM算法<sup>[26]</sup>,主要由顺序数据关联、环形闭环检测以及图优化三部分组成,算法框架如图1所示.在前端部分,顺序数据关联是指相邻图像帧间的匹配及相对姿态估计问题,环形闭环检测的目的是根据数据判断机器人是否回到之前到达过的区域;在后端部分,由于观测噪声以及累积误差的引入,通过观测信息配准得到的位姿图往往不具备一致性.

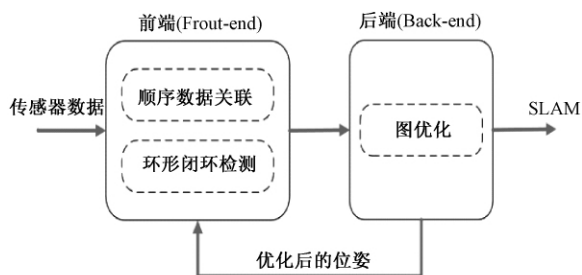


图1 基于图优化的SLAM框架

Fig.1 Framework of graph-based SLAM

## 3 月面环境下SLAM面临的挑战

### 3.1 感知信息的不确定性问题

在复杂的月面环境中,由于月球表面存在大量的月尘与月障,在沙质环境中SLAM技术难以

提取足够的特征点进行跟踪,特征点位置变化会影响系统稳定性,如何描述感知信息的不确定性给月球车漫游带来巨大的挑战,因此需要提高 SLAM 技术对不收敛问题的鲁棒性等问题。

### 3.2 大规模环境下的视觉 SLAM 问题

大规模环境下 SLAM 技术面临的主要难题是由于计算量太大而无法保证算法实时性的问题,首要解决办法就是减少计算量并降低算法的复杂度。常用的解决方法有利用分层或分块处理的方法。吴勇等<sup>[27]</sup>提出了一种收缩无迹卡尔曼滤波器(shrink unscented kalman filter, S-UKF)的方法,在大规模环境 SLAM 实验中获得了良好的实时效果。

### 3.3 非结构化环境下的 SLAM 问题

非结构化环境下特征和路标难以被提取描述,其不确定性也会提高对环境采样的需求量,从而增加 SLAM 的计算量。Zhou 等<sup>[28]</sup>针对非结构化未知环境,使用摄像机和激光传感器融合的方式,提出一种算法使得机器人可以从传感器获取的数据中自动选择具有最大信息量的观测数据,从而在非结构化环境中采样得到大量数据。

### 3.4 动态环境下的视觉 SLAM 问题

目前大多 SLAM 方法都是基于静态环境的假设,并且对于环境是有先验知识的,而在例如月球车等实际应用中,所处的环境是未知动态环境,包括静态物体以及动态物体,动态物体会影响传感器数据的获取,增加了 SLAM 技术的结构复杂性以及不准确性,因此对 SLAM 算法提出了更高要求。

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室计算机视觉组研发的 RD\_SLAM(robust dynamic SLAM)算法可以在动态环境下自适应的建模,从而在保证实时性的前提下,有效地检测出动态物体的颜色和结构等变化,实现了机器人的自定位与地图构建<sup>[29]</sup>。Lopez 等<sup>[30]</sup>将视觉传感器与激光传感器融合,用 SIFT 特征进行匹配识别,通过激光测距进行运动目标定位,实现了在未知环境中动态物体的识别和定位。

## 4 SLAM 主要发展趋势与研究热点

### 4.1 多传感器融合

复杂场景下 SLAM 应用时,单一传感器往往具有局限性。通常环境变化不会对所有传感器产生影响,为了更有效地获取环境信息,提高 SLAM 系统的鲁棒性,需要融合多个传感器的数据信息,以实现月球车的自主导航功能。

目前应用广泛的研究方法是将惯性测量单元

(internal measurement unit, IMU) 与摄像机相结合,这样的 SLAM 称为 VIN(visual-aided inertial navigation)。摄像机可以获得更丰富的信息量,IMU 获得相对准确位姿估计的时间更少,视觉传感器与激光传感器的互补能够获得更好的结果。Murartal 等将摄像机获取的数据和 IMU 数据融合后,用 ORB-SLAM 进行摄像机姿态追踪,实验结果表明相比于单一使用摄像机的 SLAM 方法,摄像机结合 IMU 的定位方法能够更有效地降低系统误差,获得精确性更高的实验结果<sup>[31]</sup>。

### 4.2 多机器人协作

单机机器人由于自身处理能力的局限性,在大规模复杂环境下很难高效地构建周围环境地图,多机器人互相协调可以提高探测的有效性与准确性。梁建等针对复杂动态环境下多机器人 SLAM 问题,提出利用计算智能算法进行分析,研究表明,多机器人协同工作可以提高 SLAM 的精度<sup>[32]</sup>。同时,多机器人 SLAM 的容错能力更强,在复杂的月面非结构化环境下,可以解决单一模型算法偏差或者错误的关联问题<sup>[33]</sup>。

### 4.3 主动 SLAM 算法

在 SLAM 技术研究中,移动机器人在未知环境下进行自主探索,如何把探索策略和 SLAM 算法结合是一个重要方向,这就是主动 SLAM 问题。主动 SLAM 算法是将 SLAM 与某种环境探测方法相结合,平衡探索策略的速度与机器人定位精度和地图构建准确度之间的联系。

### 4.4 结合人工智能技术

以深度学习为代表的人工智能算法近年来在计算机视觉、信息处理等领域发挥了重大作用,将人工智能技术与 SLAM 技术相结合,可以增强对实际场景的理解,在地图构建得到的三维模型上进一步通过模式识别提取其中的语义信息,可以解决在未知动态环境下 SLAM 技术的挑战,并极大提高算法性能。

深度学习可以自动获取图像特征,SLAM 技术中特征提取、闭环检测、语义地图等都可通过深度学习技术获得更优的结果。如果算法能识别出点云中的物体,就可以知道它是什么、是否能移动,然后就可以去判断它是否在移动,动态场景的问题就会得到较好的解决。Costante 等<sup>[34]</sup>将 SLAM 技术与卷积神经网络结合,利用卷积神经网络获得视觉里程计的特征和最优的估计器。

## 5 未来研究方向

随着我国深空探测的进一步发展,月球车对

导航的自主性要求也更高,目前相关研究还处于发展阶段,结合SLAM技术的研发实践总结以下研究突破点。

### 5.1 完善方法模型

SLAM系统由多个子模块组成,针对不同实际环境下的问题,对模型进行改进与完善。探索出鲁棒性更强、定位精度更高、实时性更好、计算复杂度更低的SLAM算法。

### 5.2 相关分支问题研究

对于非结构化环境和动态环境下SLAM技术一直无法较好实现的问题,可以针对相关分支问题,在某一模块进行研究突破,例如探索出更加鲁棒的图像特征、更加准确的特征提取与匹配算法、更加精确的视觉传感器标定方法、更加快速的闭环检测算法等。

### 5.3 融合环境信息

视觉SLAM领域研究者们逐渐关注针对不同的层次信息进行融合,研究涉及认知心理学、人工智能、仿生学等领域,将低层次的数据融合或高层次的决策级融合,在复杂环境下提高移动机器人的智能感知。

### 5.4 创建语义地图

传统的SLAM地图描述缺乏语义信息,对SLAM技术的应用具有一定的局限性。机器人需要具备智能场景理解以及目标识别的能力,将人工智能算法融入SLAM技术,构造含有语义信息的地图,是解决该问题并提升算法性能的重要方法。

## 参考文献:

- [1] 王伟,鲍劲松,金烨,等.月球车虚拟仿真系统中自主导航的实现[J].机械设计与研究,2009,25(2):65-69.
- [2] 曹凤萍,王荣本,张亮修.基于双目立体视觉的月球车三维定位算法[J].交通信息与安全,2012,30(4):28-33.
- [3] DURRANT-WHYTE H, BAILEY T. Simultaneous localization and mapping: part I[J]. IEEE robotics and automation magazine, 2016, 13(3): 99-110.
- [4] 王忠立,赵杰,蔡鹤皋.大规模环境下基于图优化SLAM的图构建方法[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(1):75-85.
- [5] 李琳辉,赵一兵,郭烈,等.沙质环境中基于视觉的月球车定位方法[J].大连理工大学学报,2011,51(5):744-749.
- [6] KLEIN G, MURRAY D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces [C]//IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Nara, Japan: IEEE, 2007: 1-10.
- [7] ENGEL J, SCHOPS T, GERMERS D. LSD-SLAM: Large scale direct monocular SLAM [C]//European Conference on Computer Vision. Switzerland: Springer, 2014: 834-849.
- [8] ENDRES F, HESS J, STURM J, et al. 3-d mapping with an rgb-d camera [J]. IEEE transactions on robotics, 2014, 30(1): 177-187.
- [9] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system [J]. IEEE transactions on robotics, 2017, 31(5): 1147-1163.
- [10] CADENA C, CARLONE L, CARRILLO H, et al. Simultaneous localization and mapping: present, future, and the robust-perception age [J]. IEEE transactions on robotics, 2016, 32(6): 120-124.
- [11] EADE E, DRUMMOND T. Edge landmarks in monocular SLAM [J]. Image and vision computing, 2009, 27(5): 588-596.
- [12] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. International journal on computer vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [13] ALI A M, NORDIN M J. SIFT based monocular SLAM with multi-clouds features for indoor navigation [C]//2010 IEEE Region 10 Conference. Fukuoka: IEEE, 2010: 2326-2331.
- [14] ZHU D X. Binocular Vision-SLAM using improved SIFT algorithm [C]// International Workshop on Intelligent Systems and Applications. Wuhan, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [15] YE Y. The research of SLAM monocular vision based on the improved surf feature [C]//International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. Hong Kong, China: IEEE, 2014: 344-348.
- [16] CALONDER M, OZUYSAL M, TRZCINSKI T, et al. BRIEF: Computing a local binary descriptor very fast [J]. IEEE transactions on software engineering, 2012, 34(7): 1281-1298.
- [17] 孙凤池,黄亚楼,康叶伟.基于视觉的移动机器人同时定位与建图研究进展[J].控制理论与应用,2010,27(4):488-494.
- [18] 李海丰,胡遵河,陈新伟. PLP-SLAM: 基于点、线、面特征融合的视觉SLAM方法[J].机器人,2017,39(2):214-220.
- [19] DAVISON A J, REID I D, MOLTON N D, et al. MonoSLAM: real-time single camera SLAM [J]. IEEE

- transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2007, 29(6): 1052–1067.
- [20] 曹军, 曾碧, 何元烈. 基于路标观测的改进 EKF-SLAM 算法[J]. 自动化与信息工程, 2014, 35(1): 21–26+31.
- [21] 许亚朝, 何秋生, 王少江, 等. 一种改进的自适应卡尔曼滤波算法[J]. 太原科技大学学报, 2016, 37(3): 163–168.
- [22] DOUCET A, FREITAS N D, MURPHY K, et al. Rao-blackwellised particle filtering for dynamic Bayesian networks [C] // Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2000: 176–183.
- [23] MONTEMERLO M, THRUN S, ROLLER D, et al. Fastslam2.0: an improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges [C] // International Joint Conference on Artificial Intelligence. Mexico: Morgan Kaufmann, 2003: 1151–1156.
- [24] 宋宇, 李庆玲, 康轶非, 等. 平方根容积 Rao-Blackwellised 粒子滤波 SLAM 算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 357–367.
- [25] 梁明杰, 闵华清, 罗荣华. 基于图优化的同时定位与地图创建综述[J]. 机器人, 2013, 35(4): 500–512.
- [26] 权美香, 朴松昊, 李国. 视觉 SLAM 综述[J]. 智能系统学报, 2016, 11(6): 768–776.
- [27] 吴勇, 关胜晓. 基于无迹卡尔曼滤波器的改进 SLAM 问题求解方法[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(3): 30–36.
- [28] ZHOU W, MIRO J V, DISSANAYAKE G. Information-efficient 3-d visual SLAM for unstructured domains [J]. IEEE transaction on robotics, 2008, 24(5): 1078–1087.
- [29] TAN W, LIU H, DONG Z, et al. Robust monocular SLAM in dynamic environments [C] // IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Los Alamitos: IEEE, 2013: 209–218.
- [30] LOPEZ D G, SJO K, PAUL C, et al. Hybrid laser and vision based object search and localization [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena: IEEE, 2008: 2636–2643.
- [31] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. Visual-Inertial Monocular SLAM with map reuse [J]. IEEE robotics and automation letters, 2017, 2(2): 796–803.
- [32] 梁建, 吕强, 卫恒, 等. 基于智能算法的多机器人 SLAM 方法[J]. 中国科技信息, 2016, (23): 21–22.
- [33] 吕强, 林辉灿, 张洋, 等. 基于视觉的多机器人协作 SLAM 问题[J]. 科技导报, 2015, 33(23): 110–115.
- [34] COSTANTE G, MANCINI M, VALIGI P, et al. Exploring representation learning with CNNs for frame-to-frame ego-motion estimation [J]. IEEE robotics and automation letters, 2015, 1(1): 18–25.

## A Survey of Simultaneous Localization and Mapping on Unstructured Lunar Complex Environment

WANG Yiqiao, ZHANG Wei

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Latest research progresses of SLAM (simultaneous localization and mapping) using in the unstructured complex environment of lunar surface were summarized. In addition, we focused on summarizing and comparing the detection and matching of features of SIFT, SURF and ORB, and analyzed the three main methods: SLAM Based on Extended Kalman Filter, SLAM Based on Particle Filter and SLAM Based on Graph Optimization (EKF-SLAM, PF-SLAM and Graph-based SLAM). Furthermore, the challenge of SLAM technology was studied deeply. Finally, the future research directions of advanced SLAM were discussed. The research showed that certain research achievements were made in the study of multi-sensor fusion SLAM, multi-robot cooperative SLAM, active SLAM and combined with artificial intelligence technology. However, there were few research in this field aiming at optimization method model, related problem branch research and semantic mapping which should be taken as the primary research direction in the next step.

**Key words:** simultaneous localization and mapping (SLAM); feature extraction; filter-based; graph optimization; unstructured environment

文章编号:1671-6833(2018)03-0051-05

# 基于改进人工蜂群算法的多无人机协同任务规划

刘广瑞, 王庆海, 姚冬艳

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 多无人机协同任务规划是多无人机协同作战的关键. 针对无人机信息共享、多任务能力等特点提高了任务规划难度, 考虑战场威胁分布、目标任务时序、无人机续航时间等因素, 建立了多无人机协同执行多目标的多任务规划数学模型. 通过引入动态评价选择策略、引入 Metropolis 准则等方式提出改进人工蜂群算法(IABC)对该模型求解. 通过对多无人机协同任务规划模型进行求解分析, 验证了该模型和规划算法的正确性和有效性.

**关键词:** 无人机; 协同; 任务规划; 动态评价策略; 人工蜂群算法

**中图分类号:** V279+.2; TP242.6 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.026

## 0 引言

多无人机协同任务规划是根据无人机所处的地形和环境因素, 为多无人机执行多目标任务制定最佳作战任务规划方案和各无人机作战航迹<sup>[1]</sup>. 近年来, 国内外学者对多无人机协同任务规划做了大量研究. 文献[2]考虑环境威胁、战斗毁伤概率等因素提出了并行 GAPSO 算法对协同任务规划模型进行了求解, 但模型建立未能考虑无人机任务时间, 所规划任务序列实用性差. 文献[3]和文献[4]在求解无人机任务调度问题上未能考虑环境威胁因素, 仅仅是对目标点之间进行任务规划, 致使算法所规划序列对无人机生存率很难保证. 文献[5]建立了多无人机多目标多任务模型, 模型未能考虑无人机燃油限制和任务时间约束, 致使执行任务效率较低或根本完成不了任务. 文献[6]引入逆向算子改进人工蜂群算法对多无人机单任务进行了任务规划, 提高了任务规划效率, 但未考虑无人机执行任务前后时间约束, 不能够做到各无人机协同执行任务.

考虑到多无人机任务规划的协同性、安全性和任务时效性, 针对无人机信息共享、多任务能力等特点提高了任务规划难度, 考虑战场威胁分布、目标任务时序、无人机续航时间等因素<sup>[7]</sup>, 建立了多无人机协同执行多目标的多任

务规划数学模型. 首先采用文献[8]所提算法对各目标点间和各无人机与目标点间最优航迹进行规划. 之后考虑战场威胁分布、无人机续航时间等约束, 引入时间窗对无人机执行任务起始时间进行约束建立多无人机任务规划模型, 提出一种基于改进人工蜂群算法的多无人机协同任务规划方法. 仿真实验结果表明, 所设计多无人机协同任务规划模型的正确性和有效性得到了很好的验证.

## 1 多无人机协同任务规划模型

### 1.1 问题描述

以多无人机执行多目标任务为背景, 如图1, 无人机执行任务的环境信息已知, 由  $n$  架无人机执行  $m$  个目标任务, 对每个目标依次执行侦查、攻击和评估3项任务, 每项任务耗时都为  $t_c$ . 每架无人机对每个目标只能执行一项任务. 各目标位置、无人机出发位置和每项任务耗时已知. 其中  $U_1, U_2, \dots, U_n$  分别表示1#, 2#,  $\dots$ ,  $n$ #无人机;  $T_1, T_2, \dots, T_m$  分别表示1#, 2#,  $\dots$ ,  $m$ #目标; 其中第  $i$  个目标被执行完侦查任务、攻击任务和评估任务的结束时间分别为  $t_{iS}$ 、 $t_{iA}$  和  $t_{iE}$ .

假设无人机在二维空间完成规定任务, 通过  $6m$  维向量表示  $n$  架无人机执行  $m$  个目标任务. 无人机根据任务时间约束按照时间先后依次

收稿日期:2017-04-10; 修订日期:2017-08-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1304510); 郑州大学优秀青年教师发展基金(1421321076)

作者简介:刘广瑞(1966—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事机器人及精密控制技术研究, E-mail: lgrui2006@163.com.

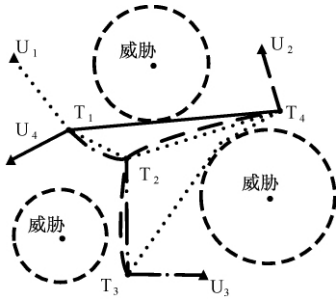


图1 多无人机协同执行任务示意图  
Fig.1 A sketch map of multi-UAV cooperative execute tasks

执行3项任务.为规划多无人机任务分配序列,首先需要根据文献[8]所提航迹规划算法规划出各目标点和各无人机与目标点间最优航迹,再根据所提算法规划出最优或较优任务序列.

### 1.2 约束条件

式(1)约束所有目标的所需任务必须按照任务顺利要求执行;式(2)约束每架无人机只能执行每个目标其中一项任务;式(3)约束所有目标的任务必须全部被执行完毕;无人机由一个位置移动到另一个位置需躲避所有威胁且航迹较优,最大航程须小于一上限;式(4)和(5)分别表示无人机*i*开始任务时间和结束任务时间.

$$t_{is} \leq t_{iA} - t_c \leq t_{iE} - t_c; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 3m; \quad (3)$$

$$t_{s_{jk}} = t_{l_{j(k-1)}} + t_c + tw_{jk}; \quad (4)$$

$$t_{l_{jk}} = t_{s_{jk}} + t_c, \quad (5)$$

式中, $x_{ij}$ 为第*i*个目标被第*j*个无人机执行任务则为1,否则为0; $t_{s_{jk}}$ 和 $t_{l_{jk}}$ 分别为第*j*个目标第*k*项任务开始和结束时间; $tw_{jk}$ 为执行第*j*个目标第*k*项任务的等待时间<sup>[8]</sup>.

### 1.3 目标函数建立

假设无人机飞行速度为*v*,在已知无人机和目标位置的前提下,无人机以最优或较优时间完成所有任务的任务分配计划.目标函数为:

$$F = \max(S/v), \quad (6)$$

其中 $S = [S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n]$ , $S_i$ 为第*i*个无人机完成分配的任务飞行航迹长度.

## 2 人工蜂群算法的改进

### 2.1 初始化蜜源

将一个任务序列集合 $X = (x_1, x_2, \dots, x_{6m})$ 视作一个蜜源,初始化蜜源需满足约束条件,其

中奇数位为无人机序号,偶数位为前一位奇数位对应的无人机所执行任务的目标序号.如图2,表示的是3架无人机执行2个目标任务的任务序列编码.图中表示的任务分配计划为:3架无人机同时出发, $U_1$ 对 $T_2$ 执行侦察任务; $U_2$ 对 $T_1$ 执行侦察任务;等待无人机执行完 $T_2$ 的侦察任务后, $U_3$ 对 $T_2$ 执行攻击任务;等待 $U_2$ 对 $T_1$ 执行完侦察任务后, $U_1$ 对 $T_1$ 执行攻击任务;等待 $U_3$ 对 $T_2$ 执行完攻击任务后, $U_2$ 对 $T_2$ 执行评估任务;等待 $U_1$ 对 $T_1$ 执行完攻击任务后, $U_3$ 对 $T_1$ 执行评估任务<sup>[9]</sup>.

1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	3	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

图2 任务序列编码方式

Fig.2 Encoding of a sequence of tasks

### 2.2 选择机制

传统ABC算法是通过目标函数值决定的蜜源适应度比例来判定所要跟随的采蜜蜂,该方法虽然提高了算法收敛速度,但是容易导致蜂群向适应度值较高的蜜源聚拢,使算法极易陷入局部最优.采用动态评价选择策略<sup>[10]</sup>取代传统选择机制,通过采蜜蜂动态变化状况决定被跟随的概率,极大地提高了蜂群多样性,避免了算法陷入局部最优.

动态评价指标为 $w1(i)$ 和 $w2(i)$ ,蜜源*i*被优化时 $w2(i)$ 按式(8)计算, $w1(i)$ 为0;蜜源*i*未被优化时 $w1(i)$ 按式(7)计算, $w2(i)$ 为0.动态评价函数 $F(i)$ 为式(9).

$$w1(i) = \begin{cases} w1(i) + 1, & w1(i) < Limit; \\ Limit, & w1(i) \geq Limit, \end{cases} \quad (7)$$

$$w2(i) = \begin{cases} w2(i) + 1, & w2(i) < Limit; \\ Limit, & w2(i) \geq Limit. \end{cases} \quad (8)$$

$$F(i) = \begin{cases} 50\left(1 - \frac{w1(i)}{Limit}\right), & w1(i) \neq 0; \\ 50\left(1 + \frac{w2(i)}{Limit}\right), & w1(i) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

式中: $w1(i)$ 为蜜源*i*被优化连续不变的次数; $w2(i)$ 为蜜源*i*被优化连续变化次数; $Limit$ 为算法的限制参数.

通过动态评价函数计算单个蜜源得分,采蜜蜂被选择概率 $P_i$ 的计算公式为(10),通过 $P_i$ 计算累计第*i*个采蜜蜂被选择概率,将生成的0~1的随机数与各累计选择概率匹配,决定观察蜂选择哪个采蜜蜂.

$$P_i = F(i) / \sum_{i=1}^{NP/2} F(i). \quad (10)$$



### 2.3 邻域搜索

由于所优化问题为离散问题,对任务序列  $X = (x_1, x_2, \dots, x_{6m})$  进行邻域搜索时,由于任务序列奇数位置和偶数位置表示不同的含义,需进行不同的邻域搜索策略. 设邻域搜索位为  $I$ , 若  $I$  为奇数,随机选取没有在  $I$  位对应的目标执行过任务的无人机替代  $I$  位对应的无人机; 若  $I$  为偶数,随机选取  $I$  位对应的无人机未执行过的其他偶数位对应的目标位进行位置交换. 之后采取文献[6]的方法引入逆向算子的方式对任务序列进行变异. 邻域搜索完成后对任务序列进行可行性判定,该方式提高了邻域搜索解的可行性,提高了算法收敛速度.

### 2.4 判定准则

在航迹寻优过程中,由于寻优域较宽,传统 ABC 算法全局寻优性能劣化,寻优收敛速度前快后慢. 为提高算法收敛速度和精度,引入 Metropolis 准则<sup>[11]</sup>对新老蜜源进行进一步判定. 当前航迹向新航迹转化概率表达如式(11). 通过改进,算法寻优初期对较差航迹具有较高接受概率,使算法不易陷入局部最优; 算法寻优后期对较差航迹具有较小接受概率,蜜蜂可在较优航迹附近进行细致搜索.

$$P(o \rightarrow n) = \begin{cases} 1, & f(o) \geq f(n); \\ e^{\frac{f(o) - f(n)}{T(t)}}, & f(o) < f(n). \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $o$  代表旧航迹;  $n$  代表新航迹; 下降函数  $T(t) = T(t-1) \cdot \sigma$ , 退火系数  $\sigma$  一般取 0.8.

### 2.5 算法流程图

基于改进人工蜂群算法(IABC)的多无人机协同任务规划算法流程图如图3所示,其中  $q$  为当前迭代次数,  $L_{\max}$  为最大迭代次数.

## 3 算例分析

在 Inter(R) Core(TM) i3-2130 CPU, 3.4 Ghz, Matlab R2014a 环境下进行仿真分析,假设在  $1\,000\text{ km} \times 1\,000\text{ km}$  的战场环境内,5架无人机对10个目标执行任务,无人机参数和威胁参数设置如表1和表2所示. 目标  $T_1, T_2, \dots, T_{10}$  位置分别为  $(100, 300), (310, 240), (210, 700), (620, 610), (250, 500), (620, 350), (450, 470), (600, 150), (820, 350), (420, 750)$ . 人工蜂群算法参数: 蜜蜂总数为  $NP = 60$ , 采蜜蜂总数为  $NP/2$ ,  $Limit = 10, L_{\max} = 300$ .

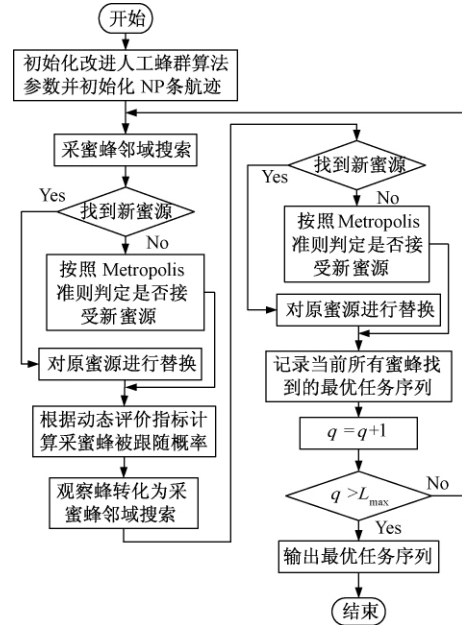


图3 IABC 算法流程图

Fig. 3 The flow diagram of IABC algorithm

表1 无人机参数设置

Tab. 1 Information setting of UAV

UAV 编号	起始坐标	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	续航时间/h
U <sub>1</sub>	(100, 800)	200	12
U <sub>2</sub>	(100, 400)	200	14
U <sub>3</sub>	(800, 800)	200	16
U <sub>4</sub>	(900, 500)	200	10
U <sub>5</sub>	(400, 100)	200	13

表2 威胁参数设置

Tab. 2 Information setting of threats

编号	威胁中心位置	威胁半径/km	威胁等级
威胁1	(460, 300)	120	2
威胁2	(180, 600)	80	3
威胁3	(400, 600)	100	1
威胁4	(700, 500)	120	2
威胁5	(800, 250)	90	3
威胁6	(580, 750)	100	3
威胁7	(180, 200)	100	2
威胁8	(300, 850)	100	2

采用 ABC 和 IABC 算法分别进行了 20 次仿真实验,通过 IABC 算法仿真得出的最优任务分配计划对应的其中一架无人机的航迹见图4. 通过 20 次试验仿真数据分析得出两种算法的目标函数最优值收敛曲线对比图见图5,目标函数均值收敛曲线对比图见图6. 其中 ABC、ROABC 和 IABC 分别代表基本人工蜂群算法、逆向算子人工蜂群算法和改进人工蜂群算法多无人机多任务规划仿真实验目标函数值. 图7为通过 IABC 算法

仿真得出的最优任务分配计划的无人机任务执行时间表. 表 3 为对应的无人机任务分配表, 其中 C、A 和 E 分别对应无人机执行的侦查、攻击和评估任务, 例如, 1C 对应无人机对目标 1 执行侦察任务.

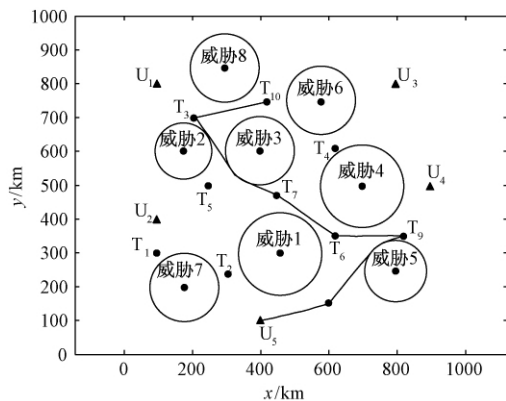


图 4 无人机航迹图

Fig. 4 Flight path of UAV

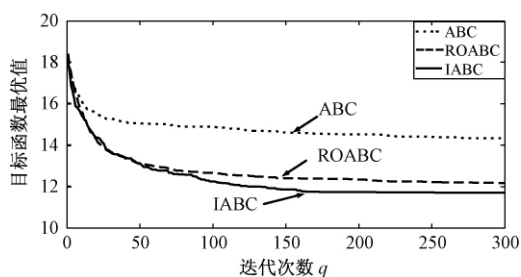


图 5 目标函数最优值收敛曲线对比图

Fig. 5 Comparison convergent curve of target function's optimal value

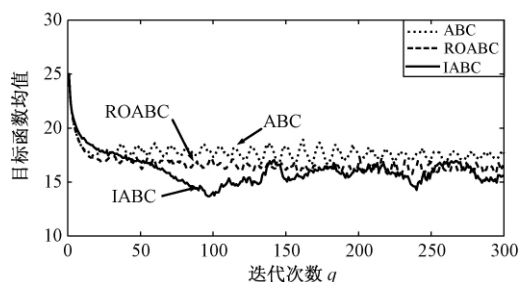


图 6 目标函数均值收敛曲线对比图

Fig. 6 Comparison convergent curve of target function's mean value

表 3 无人机任务分配表

Tab. 3 UAV's work distribution chart

UAV 编号	航迹长度/km	任务耗时/h	任务分配计划
U <sub>1</sub>	1 579.15	10.90	3C→10C→4A→2A→1A→5E
U <sub>2</sub>	1 554.16	11.27	1C→5C→7A→4E→6A→8E→9E
U <sub>3</sub>	1 568.13	10.84	4C→7C→2C→8A→9A→6E
U <sub>4</sub>	1 741.72	11.27	3A→10A→5A→1E→2E
U <sub>5</sub>	1 480.93	10.40	8C→9C→6C→7E→3E→10E

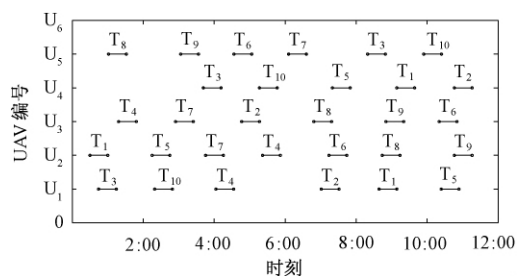


图 7 UAV 任务执行时刻表

Fig. 7 UAV's assignment schedule

通过 20 次仿真实验数据分析, 随着进化代数的增加, 目标函数值不断降低, 种群不断向更优的方向进化, 两种改进算法较传统算法不但收敛的快, 而且收敛精度也高很多. IABC 算法、ROABC 算法和 ABC 算法耗时均值分别为 24.75 s、25.04 s 和 24.03 s, 最优收敛值分别为 11.72 h、12.16 h 和 14.33 h. 在耗时相当的情况下, IABC 算法最优收敛值比 ABC 算法低 16.5%, 比 ROABC 算法收敛值低 3.6%, 种群均值更是优于 ABC 算法. 根据图 5, 随着进化代数增加, 所提算法优化种群目标函数均值较另两种算法更低, 可知, 所提算法比另外两种算法种群更优. 表 3 给出的无人机任务分配表就是所提 IABC 算法优化的全局最优解.

## 4 结论

针对无人机信息共享、多任务能力等特点提高了任务规划难度, 考虑战场威胁分布、目标任务时序、无人机续航时间等因素, 建立了多无人机协同执行多目标的多任务规划数学模型. 采用改进人工蜂群算法对该模型求解通过仿真结果表明:

(1) 引入时间窗对无人机执行任务起始时间进行约束建立多无人机任务规划模型, 增强了多无人机任务规划模型实用性;

(2) 通过引入动态评价选择策略、Metropolis 准则等方式提出改进人工蜂群算法对该模型求解, 仿真结果表明了该方法的有效性;

(3) 算法优化过程中很难取得一个全局最优解, 只能优化得到一个相对较优的解, 每次优化结果很难保证完全一致, 算法稳定性还有待进一步提高.

## 参考文献:

- [1] 沈林成, 陈璟, 王楠. 飞行器任务规划技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 593-606.
- [2] 邓道靖, 马云红, 龚洁, 等. 基于并行 GAPSO 算法的多无人机协同任务规划[J]. 电光与控制, 2014,

- 23(11): 1-6.
- [3] 杜继永,张凤鸣,杨骥,等. 多UCAV协同任务分配模型及粒子群算法求解[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1751-1755.
- [4] LIN L, SUN Q B, WANG S G, et al. Research on PSO based multiple UAVs real-time task assignment [C]//2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Guiyang, China: IEEE, 2013: 1530-1536.
- [5] GENG L, ZHANG Y, WANG J J, et al. Cooperative task planning for multiple autonomous UAVs with graph representation and genetic algorithm [C]//2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). Hangzhou, China: IEEE, 2013: 394-399.
- [6] WANG Z T, ZHENG M F, GUO J S, et al. Uncertain UAV ISR mission planning problem with multiple correlated objectives [J]. Journal of intelligent & fuzzy systems, 2017, 32(1): 321-335.
- [7] 张晓敏,马培蓓,纪军,等. 具有时间约束的多无人机协同航迹控制研究[J]. 电光与控制, 2015, 22(9): 42-45.
- [8] LI B, GONG L G, YANG W L. An improved artificial bee colony algorithm based on balance-evolution strategy for unmanned combat aerial vehicle path planning [J]. Scientific world journal, 2014, 2014(1): 95-104.
- [9] 马纯超,尹栋,朱华勇. 网络化战场环境下多无人机调度问题[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(10): 31-36.
- [10] 徐向平,鲁海燕,程毕芸. 基于动态评价选择策略的改进人工蜂群算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(7): 1969-1974.
- [11] MIAO H, TIAN Y C. Dynamic robot path planning using an enhanced simulated annealing approach [J]. Applied mathematics and computation, 2013, 222: 420-437.

## Multi-UAV Cooperative Mission Planning Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm

LIU Guangrui, WANG Qinghai, YAO Dongyan

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

**Abstract:** Multi-UAV cooperative mission planning was the key to multi-UAV cooperative combat. UAVs could share information with others and tackle tasks, which make it difficult to plan mission. In this paper, considering threat distribution, task sequence restriction and time of endurance, a mission planning mathematical model of multi-UAV cooperative mission planning was developed. To increase mission planning efficiency, the traditional ABC algorithm were improved by introducing dynamic evaluation selection strategy, introduction of metropolis rule, etc. The correctness and effectiveness of proposed method were validated by the calculation and analysis for multi-UAV cooperative mission planning.

**Key words:** unmanned aerial vehicles; coordination; mission planning; dynamic evaluation selection strategy; artificial bee colony(ABC) algorithm

# 含扁率的希尔型三体系统太阳帆悬浮轨道设计

宋 明, 和兴锁, 闫业毫, 和东生

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710029)

**摘 要:** 在考虑大天体含扁率的情况下,研究了太阳帆在希尔型限制性三体问题的悬浮轨道设计方案. 首先介绍一种太阳帆力学模型,这种模型带有改进型的反射控制设备;接着利用一些近似的简化,建立太阳帆在希尔型限制性三体问题系统中的动力学模型. 研究发现,改变反射控制设备中吸收光线模块和热辐射模块的面积大小或者改变太阳帆特征加速度或者改变大天体扁率都会引起系统的共线平衡点的位置发生变化. 在共线平衡点对系统进行线性化处理,运用线性二次调节器对不稳定的系统进行主动控制. 仿真结果表明,通过调节太阳帆姿态角和改变吸收光线模块的面积可以得到太阳帆悬浮轨道并且使其达到渐近稳定.

**关键词:** 太阳帆; 悬浮轨道; 反射控制设备; 希尔型限制性三体问题; 扁率

**中图分类号:** V412.41 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.015

## 0 引言

太阳帆是利用巨大的、像镜子一样的轻质帆面反射太阳光来产生推动力的. 由日本航天局研制的“IKAROS”太阳帆成功发射后<sup>[1]</sup>,基于太阳帆的一系列空间任务被相继提出,如: NanoSail-D, Cubesail, DeorbitSail, Sunjammer, LightSail等. 毫无疑问,太阳帆将会成为本世纪的热门研究课题.

限制性三体问题模型一直被视为基本的动力学模型<sup>[2]</sup>,而希尔型三体问题是限制性三体问题的一种近似<sup>[3]</sup>. 通常情况下人们把天体视为质量均匀分布的理想球体,不考虑质量为无穷小量的太阳帆对天体运动的影响. 但是,宇宙中纯粹意义的球体是不存在的,大部分星体都是扁的,也有一部分是不规则形状的. Sharma<sup>[4]</sup>发现考虑大天体扁率的限制性三体系统存在周期性轨道. Singh<sup>[5]</sup>把诸如天体扁率、天体的辐射等多种扰动影响结合在一起,分析平衡点的非线性稳定性. Douskos<sup>[6]</sup>对希尔型三体问题的平衡点及其稳定性进行了系统研究. 遗憾的是,以上文献没有涉及到天体扁率对太阳帆轨道的影响. 因此,笔者主要研究天体扁率在希尔型三体系统对太阳帆运动的影

响,以及共线平衡点附近的悬浮轨道设计.

## 1 太阳帆力学模型

“IKAROS”太阳帆上的反射控制设备,简称RCD,是一种柔性多层液晶薄片通过改变其上的电压来改变反射率的装置<sup>[7]</sup>. 龚胜平等<sup>[8]</sup>提出了一种RCD,其中包含两种模块: 镜面反射模块和吸收光线模块,并把这种技术成功运用在研究地月系统平衡点太阳帆轨道运动和研究太阳帆在小行星附近的动力学<sup>[9-10]</sup>. 笔者将会利用这一技术并进行一些改进. 改进型的RCD包含两种模块,一种是反射模块,反射系数为 $\rho_r$ ; 另外一种为吸收模块,吸收系数为 $\rho_a = 1 - \rho_r$ . 和之前版本的RCD不同的是,笔者把散射和热辐射一并考虑在内. 假设RCD可以转换成开启和关闭两种状态. 太阳帆总的有效面积为 $A_{tot}$ , 设定RCD的面积为 $A_0 = A_{tot}/8$ , 吸收模块的面积为 $A_a = pA_{tot}$ ,  $p \in [0, 0.125]$ , 其中 $p$ 为比例系数,吸收模块对应的状态为关闭; 同样反射模块的面积为 $A_r = A_{tot} - A_a$ , 对应开启状态. 于是,因吸收、反射和热辐射作用而产生的太阳帆加速度可以表示为:

$$\mathbf{a}_a = \frac{PA_{tot}}{m} p \cos \alpha \mathbf{n}_s; \quad (1)$$

收稿日期:2016-12-10; 修订日期:2017-06-22

基金项目:国家自然科学基金资助(10672133)

作者简介:宋明(1982—),男,河南信阳人,西北工业大学博士研究生,主要从事航天器轨道动力学与控制研究, E-mail: songmingnwp@163.com.

$$\mathbf{a}_r = \frac{PA_{\text{tot}}}{m}(1-p)[2\rho_r \cos^2 \alpha n +$$

$$B_f(1-s)\rho_r \cos \alpha n - \rho_r \sin \alpha \mathbf{n}_s];$$

$$\mathbf{a}_{\text{th}} = \frac{PA_{\text{tot}}}{m}p(1-\rho_r) \frac{\varepsilon_f B_f - \varepsilon_b B_b}{\varepsilon_f + \varepsilon_b} \cos \alpha n. \quad (3)$$

式中,  $P$  表示太阳光压; 太阳帆帆面法向量为  $\mathbf{n} = (\cos \alpha \cos(\omega_s t), -\cos \alpha \sin(\omega_s t), \sin \alpha)^T$ ;  $\mathbf{n}_s = (\cos(\omega_s t), -\sin(\omega_s t), 0)^T$  表示太阳光线方向矢量; 太阳帆质量为  $m$ ;  $\alpha$  是帆面法向量与光线的夹角;  $\omega_s$  是光线在无量纲的相合坐标系下的角速度<sup>[11]</sup>, 笔者视  $\omega_s$  为一常数.

太阳帆力学模型的相关参数详见表 1, 详见文献[12], 太阳帆受到光压加速度为:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_a + \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_{\text{th}}, \quad (4)$$

表 1 太阳帆力学模型参数

Tab. 1 Parameters of solar sail mechanical model

参数	符号	数值
反射系数	$\rho_r$	0.88
镜面反射系数	$s$	0.94
迎光面散射系数	$\varepsilon_f$	0.05
背光面散射系数	$\varepsilon_b$	0.55
迎光面非朗伯系数	$B_f$	0.79
背光面非朗伯系数	$B_b$	0.55

## 2 动力学系统

研究大天体是扁球的限制性三体问题. 首先建立无量纲的质心旋转坐标系  $Oxyz$ , 原点定义为两个主天体的公共质心, 两个主天体间的连线定义为  $x$  轴, 主天体角速度  $\omega$  的指向定义为  $z$  轴,  $y$  轴满足右手定则. 图 1 为圆型限制性三体问题的示意图. 运用无量纲化的定义, 两个主天体质量分别为  $m_1 = 1 - \mu, m_2 = \mu, \mu$  是系统的质量比率,  $\mu = m_2/(m_1 + m_2)$ , 两个主天体距离原点的距离分别为  $\|\overrightarrow{P_1 O}\| = \mu, \|\overrightarrow{OP_2}\| = 1 - \mu$ .

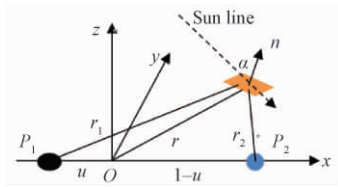


图 1 圆型限制性三体问题

Fig. 1 Circular restricted three-body problem

考虑大天体是扁球的情况下, 太阳帆在该系统的运动微分方程为:

$$\ddot{x} - 2n\dot{y} = \Omega_x + a_x; \quad (5)$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{x} = \Omega_y + a_y; \quad (6)$$

$$\ddot{z} = \Omega_z + a_z, \quad (7)$$

其中  $\Omega$  表示势函数, 见文献[6].

$$\Omega = n^2(x^2 + y^2)/2 + (1 - \mu)/r_1 + \mu/r_2 + (1 - \mu)A_1/2r_1^3 - 3(1 - \mu)A_1z^2/2r_1^5. \quad (8)$$

式中:  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  代表势函数  $\Omega$  对三轴的偏导数;

$$r_1 = \sqrt{(x + \mu)^2 + y^2 + z^2}, r_2 = \sqrt{(x - \mu)^2 + y^2 + z^2}$$

分别表示两大天体和太阳帆的距离;  $n = \sqrt{1 + 3A_1/2}$  是天体平均角速度;  $A_1 = (R_E^2 - R_p^2)/(5R_D^2)$  表示大天体的扁率, 其中  $R_E$  和  $R_p$  分别为大天体的赤道半径和极半径,  $R_D$  是两个星体间距, 见文献[13];  $a_x, a_y, a_z$  为太阳光压加速度在三轴的投影分量;  $a_0 = 2PA_{\text{tot}}/m$  是太阳帆的特征加速度.

$$a_x = a_0[f(p, \alpha) + g(p, \alpha)]\cos(\omega_s t); \quad (9)$$

$$a_y = -a_0[f(p, \alpha) + g(p, \alpha)]\sin(\omega_s t); \quad (10)$$

$$a_z = a_0h(p, \alpha), \quad (11)$$

式中,  $f(\cdot), g(\cdot), h(\cdot)$  是  $p$  和  $\alpha$  的函数.

$$f(p, \alpha) = (1 - p)(1.6544\cos^2 \alpha + 0.0417\cos \alpha - 0.8272)\cos \alpha; \quad (12)$$

$$g(p, \alpha) = p(1 - 0.0526\cos \alpha)\cos \alpha; \quad (13)$$

$$h(p, \alpha) = (1.6544\cos \alpha - 1.6544p\cos \alpha - 0.0943p + 0.0417)\sin \alpha \cos \alpha. \quad (14)$$

运用文献[14]中提到的方法, 即把原点移动到小天体并进行坐标变换:

$$x = 1 - \mu + \mu^{1/3}X; y = \mu^{1/3}Y; z = \mu^{1/3}Z. \quad (15)$$

令  $\mu \rightarrow 0$ , 则含扁率的希尔型限制性三体问题可以表示为:

$$\ddot{X} - 2n\dot{Y} = W_X + a_x; \quad (16)$$

$$\ddot{Y} + 2n\dot{X} = W_Y + a_y; \quad (17)$$

$$\ddot{Z} = W_Z + a_z, \quad (18)$$

式中:  $W$  为新系统的势函数.

$$W = \frac{3X^2}{2} + \frac{15A_1X^2}{4} - \frac{Z^2}{2} - \frac{9A_1Z^2}{4} + \frac{1}{R}. \quad (19)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}. \quad (20)$$

## 3 共线平衡点

求解以下方程组可以得到系统的平衡点:

$$W_X + a_x = 0; \quad (21)$$

$$W_Y + a_y = 0; \quad (22)$$

$$W_Z + a_z = 0. \quad (23)$$

经典的希尔型三体问题只有两个对称的共线平衡点, 笔者主要研究希尔型三体系统的共线平衡点及其附近邻域的轨道运动情况. 假设

该系统的  $L_1$ 、 $L_2$  两共线平衡点位于  $X$  轴上,用  $\mathbf{R}_e = (X_e, 0, 0)^T$  表示共线平衡点. 很显然共线平衡点满足式(21)、(22)和(23), 整理可以得到:

$$3X_e + 15A_1X_e/2 - X_e/|X_e|^3 +$$

$$a_0 [f(p, \alpha) + g(p, \alpha)] = 0; \quad (24)$$

$$- a_0 [f(p, \alpha) + g(p, \alpha)] \sin(\omega_s t) = 0; \quad (25)$$

$$a_0 h(p, \alpha) = 0. \quad (26)$$

$\alpha = 0, \omega_s t = 2k\pi (k \in \mathbb{Z})$  是式(25)和(26)成立的必要条件, 将其代入式(24), 观察式(24), 发现共线平衡点的位置由  $p$ 、 $a_0$  和  $A_1$  共同决定. 运用类

似文献[15]的数值计算方法, 在3个参数  $p$ 、 $a_0$ 、 $A_1$  当中, 固定一个参数不变, 然后观察其他两个参数变化对共线平衡点位置的影响. 图2表示的是, 当太阳帆特征加速度为一常值时, 参数  $p$  和  $A_1$  的改变对  $L_1$ 、 $L_2$  位置的影响. 经典的希尔型限制性三体问题的共线平衡点位置为  $X = \pm 3^{-1/3} \approx \pm 0.693361$ , 然而含扁率的希尔系统的  $L_1$  的横坐标最小值为  $-0.693459$ ,  $L_2$  的最大值为  $0.693264$ . 然后, 按照同样的方法, 固定一个参数, 设定扁率  $A_1$  为一个常数,  $A_1 = 0.00423$ , 则共线平衡点位置变化显示在图3.

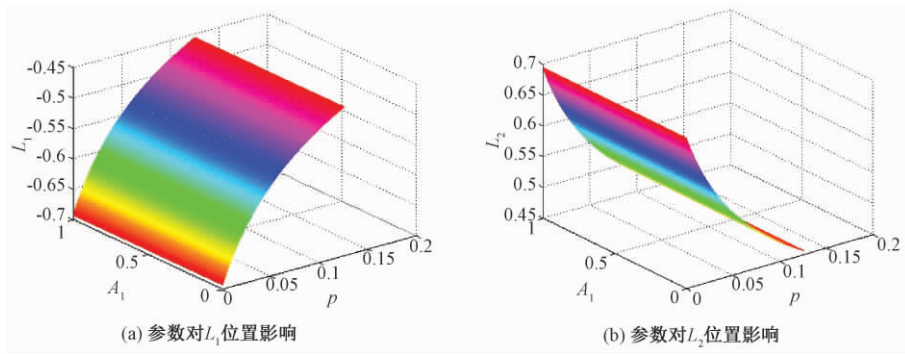


图2 含扁率的希尔系统共线平衡点位置变化图,  $a_0 = 0.001, p \in [0, 0.125], A_1 \in [0, 1]$

Fig. 2 Positions of collinear equilibrium points in the Hill's system with oblateness with variational  $p$  and  $A_1$  with fixed  $a_0 = 0.001, p \in [0, 0.125], A_1 \in [0, 1]$

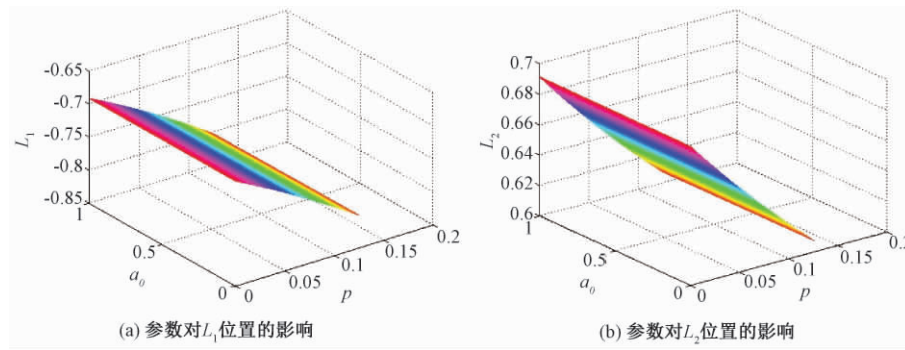


图3 含扁率的希尔系统共线平衡点位置变化图,  $A_1 = 0.00423, p \in [0, 0.125], a_0 \in [0, 1]$

Fig. 3 Positions of collinear equilibrium points in the Hill's system with oblateness with variational  $p$  and  $a_0$  with fixed  $A_1 = 0.00423, p \in [0, 0.125], a_0 \in [0, 1]$

#### 4 系统线性化

为了更进一步研究太阳帆轨道, 需要对系统微分方程进行线性化处理, 即在平衡点处引入小的扰动, 然后利用泰勒展开式, 略去对系统影响很小的高阶项, 只保留线性项, 建立变分方程. 于是, 在平衡点引入小扰动:

$$X = X_e + \xi, Y = \eta, Z = \zeta. \quad (27)$$

然后把小扰动代入到系统方程, 再进行线性化处理就可得到变分方程:

$$\ddot{\xi} - 2n\dot{\eta} = W_{XX}^e \xi + u_\xi; \quad (28)$$

$$\ddot{\eta} + 2n\dot{\xi} = W_{YY}^e \eta + u_\eta; \quad (29)$$

$$\ddot{\zeta} = W_{ZZ}^e \zeta + u_\zeta. \quad (30)$$

其中,

$$W_{XX} = 3X^2/R^5 - 1/R^3 + 3.0375; \quad (31)$$

$$W_{YY} = 3Y^2/R^5 - 1/R^3; \quad (32)$$

$$W_{ZZ} = 3Z^2/R^5 - 1/R^3 - 1.0225; \quad (33)$$

$$\mathbf{u} = [u_\xi, u_\eta, u_\zeta]^T = [a_x, a_y, a_z]^T. \quad (34)$$

此处的  $W_{ij}^e (i, j = X, Y, Z)$  表示势函数的二阶偏



导数在共线平衡点的取值,可以把变分方程写成状态空间的矩阵方程:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u}. \quad (35)$$

其中,  $\mathbf{X} = (\xi, \eta, \zeta, \dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\zeta})^T$  为六维状态矢量.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ W_{xx}^e & 0 & 0 & 0 & 2n & 0 \\ 0 & W_{yy}^e & 0 & -2n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{zz}^e & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_{\xi} \\ u_{\eta} \\ u_{\zeta} \end{pmatrix} \quad (36)$$

## 5 仿真计算

### 5.1 追踪参考轨道

求解共线平衡点附近的太阳帆悬浮轨道,运用 Simo<sup>[11]</sup> 提出的方法,引入参考轨道:

$$\xi_{\text{ref}} = \xi_0 \cos(\omega_s t); \quad (37)$$

$$\eta_{\text{ref}} = \eta_0 \sin(\omega_s t); \quad (38)$$

$$\zeta_{\text{ref}} = \zeta_0. \quad (39)$$

参考轨道满足系统变分方程,把参考轨道代入式(28)~式(30),从而得到:

$$\xi_0 = \frac{a_0(2n\omega_s + \omega_s^2 + W_{yy}^e)}{4n^2\omega_s^2 - (\omega_s^2 + W_{xx}^e)(\omega_s^2 + W_{yy}^e)} \cdot [f(p, \alpha) + g(p, \alpha)]; \quad (40)$$

$$\eta_0 = -\frac{a_0(2n\omega_s + \omega_s^2 + W_{xx}^e)}{4n^2\omega_s^2 - (\omega_s^2 + W_{xx}^e)(\omega_s^2 + W_{yy}^e)} \cdot [f(p, \alpha) + g(p, \alpha)]; \quad (41)$$

$$\zeta_0 = -\frac{a_0}{W_{zz}^e} h(p, \alpha). \quad (42)$$

确定了参考轨道,就可以利用线性二次调节器(LQR)对太阳帆进行主动控制,从而控制太阳帆追踪给定的参考轨道  $\mathbf{X}_{\text{ref}} = (\xi_{\text{ref}}, \eta_{\text{ref}}, \zeta_{\text{ref}})^T$ ,主动控制可以使太阳帆轨道趋于渐近稳定.考虑太阳帆轨道与参考轨道之间的误差  $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_{\text{ref}}$ ,然后应用线性反馈控制,  $\Delta\mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{ref}} = -\mathbf{K}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_{\text{ref}})$ ,使误差  $\Delta\mathbf{X}$  满足性能指标函数  $J$  取最小值:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\Delta\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \Delta\mathbf{X} + \Delta\mathbf{u}^T \mathbf{R} \Delta\mathbf{u}] dt. \quad (43)$$

其中,  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  为系统的加权矩阵,是对称正定或

半正定的,可以自由选择.通过求解代数黎卡提方程(Algebraic Riccati Equation),见文献[16]:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0, \quad (44)$$

可以获得收益矩阵  $\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$ , 这样就把非线性系统(35)转化为稳定的线性系统:

$$\Delta\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}) \Delta\mathbf{X}. \quad (45)$$

判断太阳帆轨道是否稳定取决于矩阵  $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$  特征值的实部是否是小于或等于0.表2给出系统的相关参数和仿真的初始条件,这些参数的选取可根据具体的任务要求而确定,具有任意性.

表2 系统参数和仿真初始条件

Tab.2 Parameters of system and initial conditions for simulation

仿真参数	数值
仿真时间	50
扁率	0.004 23
太阳光线角速率	0.9
太阳帆特征加速度	0.01
初始扰动条件	$[10^{-5}, 10^{-5}, 10^{-5}, 0, 0, 0]$
加权矩阵 $\mathbf{Q}$	$\text{diag} [1, 1, 1, 1, 1, 1]$
加权矩阵 $\mathbf{R}$	$\text{diag} [10^9, 0.1, 0.1]$
参考轨道太阳帆姿态角	$\alpha = \pi/4$

### 5.2 仿真计算

通过仿真计算,可以求出理想太阳帆模型下共线平衡点  $L_1$  的横坐标位置  $-0.693\ 361\ 274\ 35$ .图4表示的是在主动控制下太阳帆周期悬浮轨道,可以看出太阳帆从扰动点出发,通过主动控制,逐渐接近参考轨道,最终几乎与参考轨道重合,图5给出悬浮轨道与参考轨道的相对位置与速度误差,最大位置误差为  $2.947\ 68 \times 10^{-5}$ ,最大的速度误差为  $7.464\ 65 \times 10^{-5}$ ,当轨道趋于渐近稳定后,位置误差保持在  $10^{-8}$  左右,速度误差保持在  $10^{-15}$  左右.仿真结果表明通过追踪参考轨道而设计出来的悬浮轨道可以达到渐近稳定的状态.

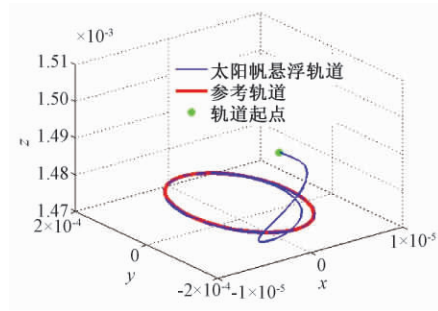


图4 太阳帆悬浮轨道

Fig.4 Solar sail displaced orbit

太阳光压加速度沿三轴的分量随时间的变化

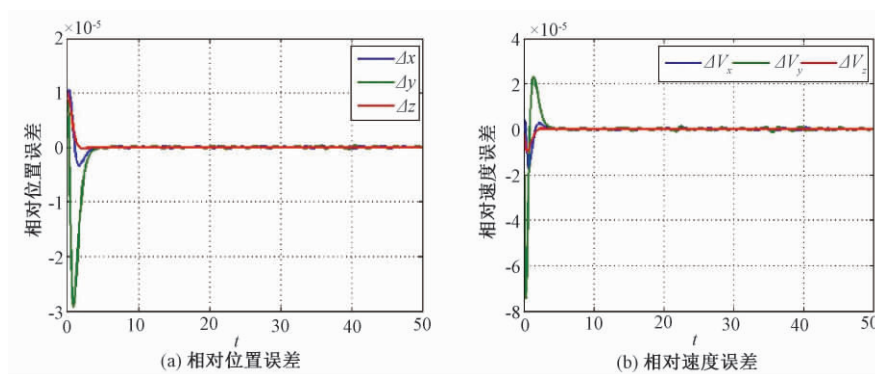


图5 太阳帆悬浮轨道和参考轨道间的相对位置误差和相对速度误差

Fig.5 Relative position error and velocity error between solar sail displaced orbit and refer orbit

情况见图6.可以看出,太阳光压加速度在三轴的分量以 $x$ 轴变化幅度最大, $y$ 轴的变化次之, $z$ 轴的变化幅度最小,而且沿 $x,y$ 两轴的加速度分量变化具有周期性: $x$ 轴的加速度最大值为 $3.4049 \times 10^{-4}$ ,最小值为 $-3.4048 \times 10^{-4}$ ;  $y$ 轴的加速度最大值为 $3.4157 \times 10^{-4}$ ,最小值为 $-6.4011 \times 10^{-4}$ ;  $z$ 轴的光压加速度大致在区间 $[0.005920, 0.005958]$ 小幅度变化,在太阳帆运行大概4.7个单位时间后,沿该轴的加速度趋于平稳,稳定在0.005931附近.图7表示的是RCD控制参

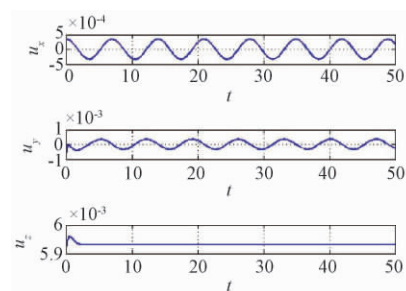


图6 太阳帆光压加速度

Fig.6 Solar radiation pressure acceleration

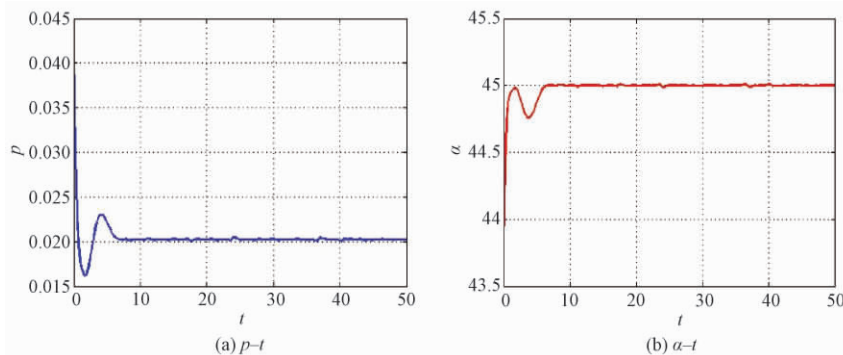
图7 RCD控制参数 $p$ 和太阳帆姿态角 $\alpha$ 随时间变化图

Fig.7 Time histories of control parameter of RCD and the pitch angle of the solar sail

数 $p$ 和太阳帆姿态角 $\alpha$ 随时间的变化图.由图可以看出,两个变化的参数都是在开始的一段时间大幅度变化,之后进入平稳期,参数 $p$ 最终稳定在0.020附近,而姿态角 $\alpha$ 最终稳定在44.99°左右,这也表明两个参数最终稳定值取决于参考轨道的对应参数值.

## 6 结论

在考虑大天体含扁率的情况下,研究了太阳帆在希尔型限制性三体问题的悬浮轨道设计方案,并利用近似简化,建立太阳帆在希尔型限制性三体问题系统中的动力学模型.研究发现,改变反射控制设备中吸收光线模块和热辐射模块的面积

大小;或者改变太阳帆特征加速度;或者改变大天体扁率都会引起系统的共线平衡点的位置发生变化.对系统进行了线性化处理,运用LQR对不稳定的系统进行主动控制.通过调节太阳帆姿态角和改变吸收光线模块的面积可以得到太阳帆悬浮轨道并且使其达到渐近稳定.

## 参考文献:

- [1] TSUDA Y, MORI O, FUNASE R, et al. Flight status of IKAROS deep space solar sail demonstrator [J]. Acta astronaut, 2011, 69(9/10): 833-840.
- [2] BAOYIN H, MCINNEN C. Solar sail equilibria in the elliptical restricted three-body problem [J]. J Guid Control Dynam, 2006, 29(3): 538-543.



- [3] SOSNITSKII S. On the hill stable motions in the three-body problem [J]. *Adv Space Res*, 2015, 56(5): 859–864.
- [4] SHARMA R K. Periodic-orbits of the 3rd kind in the restricted 3-body problem with oblateness [J]. *Astrophys & space science*, 1990, 166(2): 211–218.
- [5] SINGH J. Combined effects of oblateness and radiation on the nonlinear stability of L4 in the restricted three-body problem [J]. *Astron J*, 2009, 137(2): 3286–3292.
- [6] DOUSKOS C N, MARKELLOS V V. Out-of-plane equilibrium points in the restricted three-body problem with oblateness [J]. *Astronomy and astrophysics*, 2006, 446(1): 357–360.
- [7] TSUDA Y, MORI O, FUNASE R, et al. Achievement of IKAROS –Japanese deep space solar sail demonstration mission [J]. *Acta astronaut*, 2013, 82(2): 183–188.
- [8] MU J S, GONG S P, LI J F. Reflectivity-controlled solar sail formation flying for magnetosphere mission [J]. *Aerosp Sci Technol*, 2013, 30(1): 339–348.
- [9] GONG S P, LI J F, SIMO J. Orbital motions of a solar sail around the  $L_2$  earth-moon libration point [J]. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2014, 37(4): 1349–1356.
- [10] GONG S P, LI J F. Equilibria near asteroids for solar sails with reflection control devices [J]. *Astrophys & space science*, 2015, 355(2): 213–223.
- [11] SIMO J, MCINNES C. Solar sail orbits at the Earth-Moon libration points [J]. *Commun nonlinear science*, 2009, 14(12): 4191–4196.
- [12] MCINNES C R. *Solar sailing: technology, dynamics and mission applications* [M]. London: Springer, 1999.
- [13] SHARMA R K, RAO P V S. A case of commensurability induced by oblateness [J]. *Celestial mechanics and dynamical astronomy*, 1978, 18(2): 185–194.
- [14] MARKELLOS V V, ROY A E, PERDIOS E A, et al. A hill problem with oblate primaries and effect of oblateness on hill stability of orbits [J]. *Astrophys & space science*, 2001, 278(3): 295–304.
- [15] TSIROGIANNIS G A, DOUSKOS C N, PERDIOS E A. Computation of the Liapunov orbits in the photo-gravitational RTBP with oblateness [J]. *Astrophys & space science*, 2006, 305(4): 389–398.
- [16] WIE B. *Space vehicle dynamics and control* [J]. *Aircraft engineering and aerospace technology*, 1998, 70(5): 2077–2078.

## Design of Displaced Orbits for Solar Sail in Hill's Restricted Three-body Problem with Oblateness

SONG Ming, HE Xingsuo, YAN Yehao, HE Dongsheng

( School of Mechanics And Civil & Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi' An 710029, China)

**Abstract:** The solar sail displaced orbits in the Hill's restricted three-body problem was investigated, where the larger primary was an oblate spheroid in the system. Firstly, the model of solar sail equipped with a new version of reflectance control device was introduced. Next, dynamical model of the system with the larger primary an oblate spheroid was established and the Hill's restricted three-body problem with oblateness was built through appropriate simplifications. The collinear equilibrium points of the Hill's system varying with the variations of areas of absorption and thermal radiation of reflectance control devices in the solar sail, or the dimensionless characteristic acceleration of solar sail, or the oblateness of the larger primary were also investigated. Then, Linearization near the collinear equilibria of the system was applied. A linear quadratic regulator was used to stabilize the nonlinear system. The simulation revealed that solar sail displaced orbits in this system were doable and asymptotically stable by means of adjusting the pitch angle of solar sail and the area of absorption in reflectance control devices.

**Key words:** solar sail; displaced orbits; reflectance control devices; hill's restricted three body problem; oblateness

# 基于补充总体局部均值分解的轴承故障诊断方法

任子晖, 渠 虎, 王 翠, 陈 明

(中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 为了弥补局部均值分解(LMD)在处理非平稳、非高斯信号的不足,提出一种基于补充总体局部均值分解(CELMD)和频谱分析相结合的轴承故障诊断方法.该方法向原信号成对地添加符号相反的白噪声,首先对含噪信号进行LMD分解,得到一系列的乘积函数(PF),再选取包含最丰富故障信息的PF分量,最后对该PF分量进行FFT变换,提取故障特征频率,实现对轴承状态和故障类型地识别.通过对仿真信号和轴承振动信号地分析,表明该方法不仅能消除残留白噪声和抑制模态混叠还可以提高故障诊断的准确性和有效性.

**关键词:** 补充总体局部均值分解; 特征频率; FFT变换; 振动信号; 滚动轴承

**中图分类号:** TH133.3

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.028

## 0 引言

滚动轴承是旋转机械必不可少的部件,当滚动轴承不稳定或损伤时必须将影响旋转机械的稳定运行,甚至损害整套设备.轴承损伤时会产生冲击特征,导致产生的信号具有非平稳、非高斯的特点<sup>[1]</sup>.

非平稳信号的分析一直是专家的研究热点,近年来不少学者相继提出很多行之有效的方法,如小波分解<sup>[2-3]</sup>、经验模态分解<sup>[4-5]</sup>、局部均值分解<sup>[6]</sup>等,但它们也都有各自不足.比如,小波分解的小波基是固定而不能自适应,经验模态分解是自适应的时频分析方法,但却存在端点效应、模态混叠、过包络和欠包络等问题<sup>[7]</sup>.局部均值分解是对经验模态分解的端点效应的改进,并且没有过包络和欠包络的问题,但没能改善模态混叠的问题<sup>[8-9]</sup>.因此,文献[9]提出了一种基于噪声辅助分析的总体局部均值分解(ensemble local mean decomposition, ELMD)的方法,将白噪声分析引入了局部均值分解,缓解了模态混叠的问题,但是引入的白噪声不能完全被中和,存在完备性的问题.笔者借鉴补充总体经验模态分解<sup>[10-12]</sup>的思路,通过成对地添加正负两组白噪声,可保证在与ELMD有相当的分解效果的时候,减小了由

白噪声引起的重构误差.

笔者基于采用补充总体局部均值分解(complementary ensemble local mean decomposition, CELMD)和频谱分析对轴承信号分析,实现对轴承故障特征频率地提取和识别,并通过仿真研究和试验研究论证了该方案的优越性.

## 1 补充总体局部均值分解理论

### 1.1 LMD 基本理论

设原始信号为 $x(t)$ ,经LMD分解后,可表示为 $x(t) = \sum_{i=1}^k PF_i(t) + u_i(t)$ ,LMD的具体分解过程参考文献[8].其中: $PF_i(t)$ 表示经LMD分解后得到瞬时频率具有物理意义的乘积函数(product function, PF).乘积函数的表达式为 $PF_i(t) = a_i(t) s_i(t)$ ;  $u_i$ 表示LMD分解出*i*阶PF分量后的余量.其中: $a_i$ 和 $s_i$ 分别表示乘积函数的瞬时幅值和纯调频信号. $PF_i$ 的瞬时频率可从对 $s_i$ 处理后获得表达式:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d[\arccos(s_i(t))]}{dt}. \quad (1)$$

### 1.2 ELMD 基本理论

间歇性的高频信号或高频扰动噪声会使LMD分解出现模态混叠现象.模态混叠的出现不

收稿日期:2017-05-16; 修订日期:2017-08-11

基金项目:江苏省重点研究发展计划项目(BE2016046)

作者简介:任子晖(1962—),男,天津人,中国矿业大学教授,主要从事机电设备监测、故障诊断及检测技术与自动化装置煤矿等研究,E-mail: fdsn2014@foxmail.com.

仅容易导致信号时频分布混叠的现象,而且会导致 PF 分量的瞬时频率的物理意义不明确。

噪声辅助分析方法能够有效地抑制 LMD 方法出现模态混叠的现象,程军圣等把噪声辅助分析的方法引入到 LMD 方法中,提出了总体局部均值分解(ELMD)的方法,ELMD 算法步骤简述如下,详细过程参见文献[9]。

(1) 把白噪声序列  $n_1(t)$  添加到目标信号;

(2) 对含噪信号进行 LMD 分解,得到第一组乘积函数  $PF_{1i}$  和余量  $u_i$ ;

(3) 循环上述步骤 1~2;

(4) 对上述所有残留噪声的各阶 PF 分量分别做求总体平均运算,以减弱添加的噪声对真实 PF 的影响,即可求得最后分解结果。

### 1.3 CELMD 基本理论

为了避免 ELMD 添加的白噪声不能完全被中和以及运算时间过长的问题,笔者提出 CELMD 算法。其过程为首先在原信号中成对地添加正负两组白噪声,然后分别对两组加噪信号进行 LMD 分解,所以最终的 PF 分量是由残留正白噪声和负白噪声的两组 PF 分量求平均得到。CELMD 算法的步骤如下:

(1) 把白噪声序列  $n_1(t)$  添加到目标信号;

(2) 对含噪信号进行 LMD 分解,得到第一组乘积函数  $PF_{1i}$  和余量  $u_i$ ;

(3) 把与第一步符号相反的白噪声序列  $-n_1(t)$  加入到目标数据中;

(4) 对加相反噪声信号进行 LMD 分解,得到第二组乘积函数  $PF_{-1i}$  和余量  $u_{-i}$ ;

(5) 重复执行 1~4;

(6) 得到残留正白噪声和负白噪声的两组 PF 分量,按下面公式最终求得 PF 和  $u$ 。

$$PF_i(t) = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (PF_{nj} + PF_{-nj}). \quad (2)$$

$$u_i(t) = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (u_j + u_{-j}). \quad (3)$$

### 1.4 参数设置

在 CELMD 分解的过程中需要确定两个参数: 加入的白噪声的幅值  $\varepsilon$  以及 CELMD 分解的次数  $N$ 。添加白噪声的幅值过小或者集成次数过少,起不到改变极值点分布的作用,从而不能平均极值点分布; 如果幅值太大或者集成次数太多,固然能减弱所添加噪声影响,但也会使分解过慢。通过实验验证,当  $N$  取值接近数百时,残留噪声所导致的误差不超过 0.01,因此  $N$  的取值一般为

100,添加白噪声的幅值为原信号的标准差(standard deviation, SD) 的 0.1~0.2。

## 2 仿真研究

为验证该理论的有效性,构造仿真信号  $x(t) = n(t) + x_1(t) + x_2(t) + x_3(t)$ 。其中,  $n(t)$  是两段均值为 0 的随机白噪声;  $x_1(t)$  为一高频间断信号,其表达式为:

$$x_1(t) = \begin{cases} \sin(100\pi t), & t \in (0.63, 0.67), \\ 0, & t \in (0, 0.63] \cup [0.67, 1], \end{cases} \quad (4)$$

$x_2(t)$  为一高频正弦信号,  $x_2(t) = 2\sin(30\pi t)$ ,  $t \in (0, 1]$ ;  $x_3(t)$  为一低频正弦信号  $x_3(t) = 2\sin(10\pi t)$ ,  $t \in (0, 1]$ 。采样率设为 1 kHz, 仿真信号波形如图 1 所示。

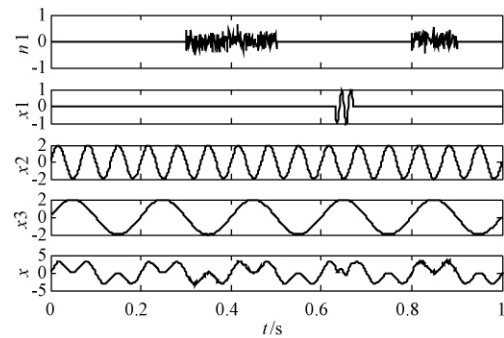


图1 仿真信号及各组成成分的波形

Fig.1 Simulating signal and waveform of the components

对仿真信号分别进行 LMD、ELMD 和 CELMD 分解。其中,加入白噪声的幅值是仿真信号标准差的 0.15 倍,加入白噪声的次数在 ELMD 和 CELMD 中取值分别为 100 和 50 对(正、负白噪声各 50 个)。其分解结果分别如图 2 所示。

综合对比图 2 可得出,由于随机白噪声和高频间断信号的存在,经 LMD 分解得到的 PF1 分量中不仅有高频噪声  $n(t)$ ,还有高频间断正弦信号  $x_1(t)$  和高频正弦信号  $x_2(t)$ ,从而产生模态混叠现象,没能获得真正的分离信号。从图 2(b) 和图 2(c) 可以看出,分解得到的 PF 分量与原始信号的 4 个组成部分基本一致,这表明经过添加白噪声和集成平均,在一定程度抑制了 LMD 分解时产生的模态混叠现象。图 2(b) 中, PF1 分量和 PF2 分量的间歇部分的幅值比较大,这表明添加的白噪声并没有完全被中和,存在残留噪声,影响了 ELMD 分解的完备性。但图 2(c) 中 PF1 和 PF2 分量的间歇部分信号基本上接近 0,可以认为添加的白噪声基本上消除,

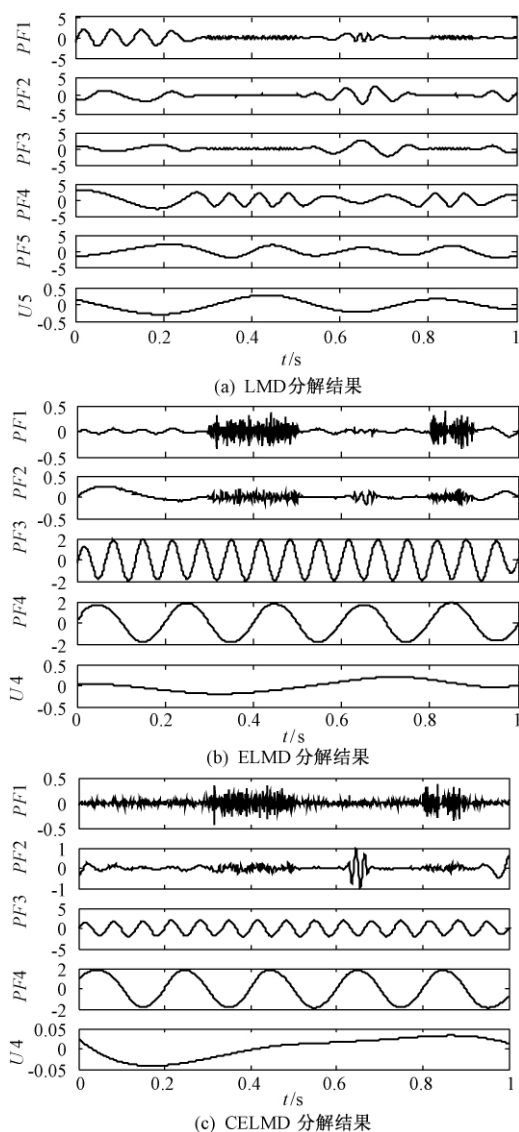


图2 仿真信号的分解对比图

Fig. 2 Comparison of the decomposition results of simulation signals

分解的完备性较好.

为进一步对比 ELMD 和 CELMD 的完备性,需分析重构误差(reconstruction errors, RE). 重构误差为分解后得到的重构信号与原始信号的差值. 其中,重构信号是根据 ELMD 和 CELMD 分解后得到的乘积函数和余量相加而得,用  $\hat{x}(t)$  表示. 图 3 即是本实验中残留在信号中重构误差.

为进一步比较,给出均方根误差(root mean squared error, RMSE)的计算公式为  $E_{\text{rms}}$ :

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [x(t) - \hat{x}(t)]^2}, \quad (5)$$

式中,  $T$  为信号长度. 本仿真中, ELMD 和 CELMD 的均方根误差统计结果如表 1 所示.

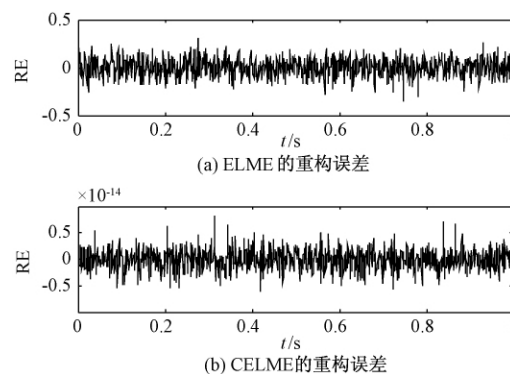


图3 ELMD 和 CELMD 重构误差

Fig. 3 The reconstruction errors of the ELMD and CELMD

表1 重构信号均方根误差对照表

Tab. 1 The RMSEs in the signal reconstruction

参数 方法	添加噪 声幅值	添加噪声 次数	RMSE
ELMD	0.15	100	0.014
CELMD	0.15	100(50 × 2)	2.82e - 16

### 3 试验验证

本文轴承故障数据采用美国凯斯西储大学(Case Western Reserve University)电气工程实验室的滚动轴承试验数据对所提的方法进行验证. 实验时,电动机转速是 1 730 r/min,负载为 0 Ps,轴承振动信号数据采样频率为 12 kHz. 电机驱动端采用型号为 6206-RS 的深沟型轴承,结构特如表 2 所示. 经计算,其内圈、外圈、滚动体单点故障时特征频率的理论值分别为 156.14、103.36、135.28 Hz.

表2 滚动轴承结构参数表

Tab. 2 Table of rolling bearing structure parameters

轴承外 径/mm	节圆直 径/mm	轴承内 径/mm	滚动体 个数	滚动体 直径/mm	接触角 /(°)
52	39	25	9	7.94	0

为验证本文方法有效性,以内圈故障为例分析,信号时域波形图和频谱图分别如图 4 和图 5 所示. 从两图中很难直接看出故障频率,因此,对内圈故障信号分别进行 LMD、ELMD、CELMD 分解,求得 PF 分量,由于篇幅所限,就不再一一列出各个 PF 分量. 其中,ELMD 和 CELMD 的  $\varepsilon$  取值为 0.15,  $N$  取值分别为 100 和 50. 在所得的 3 组 PF 分量中,分别提取第 5 个 PF 分量,进行 FFT 变换,得到频谱如图 6 所示.

对图 6 分析可知,图 6(a) 中的 LMD 分解得到的 PF5 分量的频谱图幅值集中在 150 Hz 和

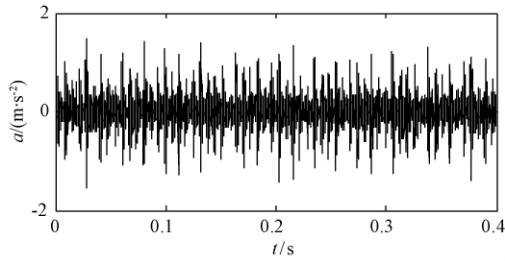


图4 轴承内圈故障时域波形图

Fig. 4 Time domain waveform of bearing inner ring fault

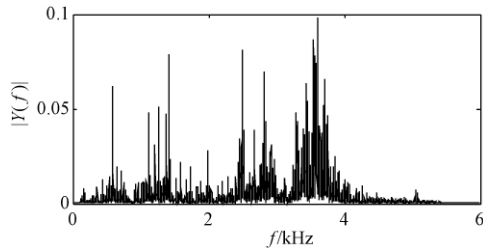
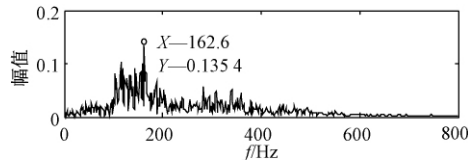
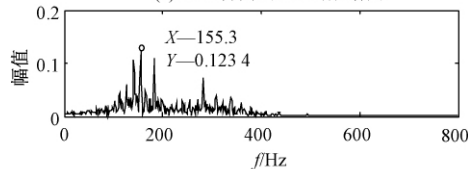


图5 轴承内圈故障频谱图

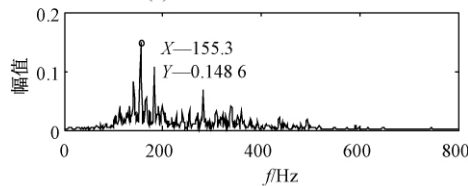
Fig. 5 The spectrum of bearing inner ring fault



(a) LMD分解的PF5的频谱图



(b) ELMD分解的PF5的频谱图



(c) CELMD分解的PF5的频谱图

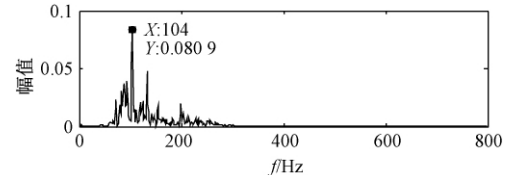
图6 3种分解方式对比

Fig. 6 Comparison of three decomposition methods

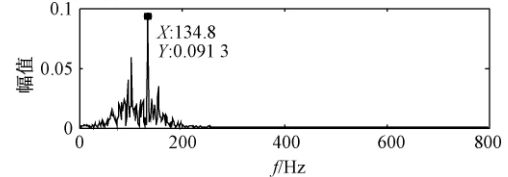
300 Hz 附近,但是不能区分出具体的特征频率. 图6(b)的ELMD分解和6(c)CELMD分解所求得PF5分量频谱图幅值都主要集中于155.3 Hz附近,与轴承的内圈故障的特征频率 $f_i$ 基本相同,其次,振动信号频率集中的地方为140.6、183.1、283.3 Hz,分别为 $f_i - f_r/2$ 、 $f_i + f_r$ 、 $2f_i - f_r$ , $f_r$ 为轴承正常旋转频率.由此可以判断出轴承存在内圈故障,并且可以看出,和ELMD相比,CELMD的PF分量的频谱图幅值集中的频率点更少、更准确,因此CELMD分解更有效、更优越.

同理,使用CELMD分解对外圈故障信号和

滚动体故障信号分解,得到如图7所示的频谱.从7(a)可以看出,频率最集中的地方为104 Hz,与轴承的外圈故障的特征频率 $f_o$ 基本相同;其次,振动信号频率集中的地方为70.3、133.1、203.3 Hz,分别为 $f_o - f_r$ 、 $f_o + f_r$ 、 $2f_o$ .由此可以判断出轴承存在外圈故障.从7(b)可以看出,频率最集中的地方为133.3 Hz;其次,振动信号频率集中的地方为100.6、153.3 Hz,分别为 $f_b - f_r$ 、 $f_b + f_r$ ,由此可以得出轴承存在滚动体故障.



(a) 外圈故障CELMD分解的PF6的频谱图



(b) 滚动体故障CELMD分解的PF6的频谱图

图7 CELMD分解的PF6分量的频谱图

Fig. 7 Spectrum of PF6 with CELMD

## 4 结论

通过总结CELMD和傅里叶变换结合的滚动轴承诊断方法可知,CELMD不但在中和添加白噪声和抑制模态混叠方面具有优势,而且可以起到对高频噪声的滤波效果;同时,CELMD结合傅里叶变换方法还能够提取到更精确的故障特征频率,与计算所得的理论特征频率对比,提高对故障诊断的准确性和有效性.

## 参考文献:

- [1] 向玲,唐贵基,胡爱军. 旋转机械非平稳振动信号的时频分析比较[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 42-45.
- [2] 刘小峰,彭永金,李慧. 谐波小波解调法在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 15-20.
- [3] 张文斌,周晓军,林勇,等. 基于谐波小波包方法的旋转机械故障信号提取[J]. 振动与冲击, 2009, 28(3): 87-89.
- [4] 苏文胜,王奉涛,张志新,等. EMD降噪和谱峭度法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 18-21.
- [5] 杨宇,于德介,程军圣. 基于EMD与神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2005,

- 24(1): 85–88.
- [6] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. *Journal of the royal society interface*, 2005, 2(5): 443.
- [7] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in adaptive data analysis*, 2011, 1(1): 1–41.
- [8] 胡劲松, 杨世锡, 任达千. 基于样条的振动信号局部均值分解方法 [J]. *数据采集与处理*, 2009, 24(1): 82–86.
- [9] 程军圣, 张亢, 杨宇. 基于噪声辅助分析的总体局部均值分解方法 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(3): 55–62.
- [10] 陆森林, 王龙. CEEMD-FFT 在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(1): 75–78.
- [11] 蔡念, 黄威威, 谢伟, 等. 基于互补自适应噪声的集合经验模式分解算法 [J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(10): 2383–2389.
- [12] 郑近德, 程军圣, 杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(21): 21–26.

## Research on Fault Diagnosis Method of Bearing Based on Complementary Ensemble Local Mean Decomposition

REN Zihui, QU Hu, WANG Cui, CHEN Ming

(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** To solve the problem that local mean decomposition (LMD) method was not insufficient in process the non stationary and non Gaussian signal, a fault diagnosis method based on the complementary ensemble local mean decomposition (CELMD) and spectrum analysis was proposed. Firstly, in this method, the white noises were added in pairs into a target signal, and then the noisy signal was decomposed into a series of production function by using LMD method. The PF component containing main fault information was selected, which was transformed by fast Fourier transform (FFT), to realize the identifications of the working status and fault types. Through the analysis of the simulation signals and the vibration signal of the bearing, it was proved that the method could eliminate the residual white noise and restrain the mode mixing, and improve the accuracy of the fault diagnosis as well.

**Key words:** CELMD; characteristic frequency; FFT transform; vibration signal; roller bearing

# 装载机工作装置载荷测试样本长度确定方法

万一品, 宋绪丁, 陈乐乐

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 构建了装载机工作装置载荷测试系统, 以预处理后销轴载荷为数据样本, 提出一种基于中心极限定理的样本长度确定方法, 并探讨了样本长度变化对载荷均幅值分布模型预估参数的影响。结果表明: 提出的载荷样本长度确定方法避免了谱密度法的数据饱和以及趋势线拟合法对拟合模型的依赖性。在置信度 0.95 和统计误差为 0.05 时, 得到了测试物料工况下载荷均幅值分布估计参数达到稳定时的临界样本数为 48 斗, 低于临界样本数时估计参数变化波动明显, 高于临界值开始趋于稳定。本方法具有可信度高、试验成本低和工作量小的优点, 为装载机工作装置载荷测试样本长度的确定提供了重要参考依据。

**关键词:** 装载机; 载荷测试; 中心极限定理; 样本长度

**中图分类号:** TH243.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.019

## 0 引言

装载机作业工况复杂多变, 疲劳失效成为零部件主要的失效形式<sup>[1-2]</sup>。统计分析是结构件载荷谱编制及疲劳寿命预测的依据, 样本长度决定分析结果精度和试验成本<sup>[3]</sup>, 确定合理的样本长度成为载荷测试与疲劳试验谱编制的关键基础。

数据的均值特性是样本长度确定最常用的评价准则, 文献[4]研究了参数模型建模样本长度, 给出了样本长度区间选取的基本原则, 明确了样本数对模型参数估计的重要性; 文献[5]基于频域分析给出了功率谱密度方法确定样本长度的理论计算公式; 文献[6]利用指数模型和变差系数法计算了随机数据中样本长度确定方法; 文献[7]利用近似均值精度估计的方法给出了样本长度近似估计的计算公式; 文献[8-9]利用拟合趋势线的方法获得了所需的载荷测试样本长度。然而, 谱密度法以信号频带宽度为依据, 未考虑载荷的统计特性; 近似均值估计法用样本直接代替总体, 考虑因素过少, 结果可信度低; 而趋势线拟合法过度依赖拟合模型的选取, 包含人为因素, 得

到的结果波动较大。

由于缺少实测试验数据, 对装载机工作装置载荷测试样本长度确定方法的公开研究很少。构建 ZL50 型装载机工作装置载荷测试系统, 得到黏土物料工况下销轴载荷时间历程。提出一种基于中心极限定理的样本长度确定方法, 考虑实测载荷数据均值特性和统计误差, 分析不同方法得到的样本长度结果对载荷统计模型的影响, 给出了满足误差精度要求的样本长度结果。

## 1 载荷测试与数据处理

### 1.1 载荷测试

装载机工作装置由铲斗、动臂、摇臂、连杆等通过销轴铰接组成, 各铰接点处的销轴载荷是工作装置各部件力学分析的基础, 油缸位移则是工作装置姿态分析的基础, 结构敏感点应力和油缸压力信号等则是辅助性验证参数<sup>[10]</sup>。得到装载机工作装置载荷测试测点布置如图 1 所示。各测点传感器和信号采集装置如图 2 所示。

选择黏土物料工况, 采用 L 型铲装路线和一次铲装作业法进行试验, 如图 3 所示。

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-08-10

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF07B02); 长安大学优秀博士研究生项目(310825175009)

作者简介: 万一品(1988—), 男, 河南邓州人, 长安大学博士研究生, 主要从事动态载荷测试与疲劳研究。

通信作者: 宋绪丁(1963—), 男, 陕西合阳人, 长安大学教授, 博士生导师, 主要从事结构抗疲劳研究, E-mail: songxd@chd.edu.cn。



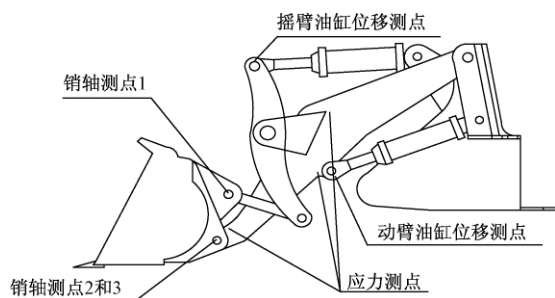


图1 装载机工作装置载荷测点布置图

Fig.1 Load measuring points of the working device

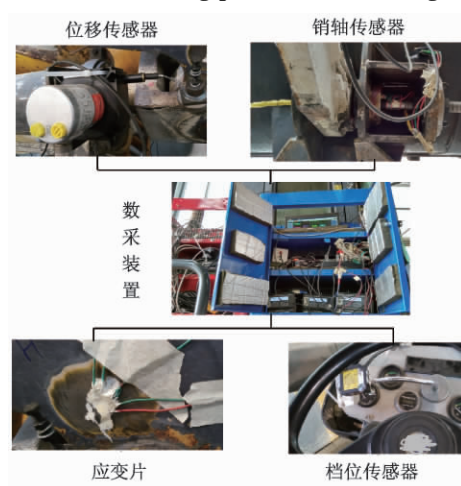


图2 工作装置载荷测试设备

Fig.2 Load measuring equipments



图3 散状物料铲装试验图

Fig.3 Bulk material loading test

## 1.2 数据处理

实测数据包含干扰信号及异常峰值点,在载荷数据统计处理前进行预处理,包括滤波、消除趋势项以及异常峰值点剔除<sup>[11]</sup>.以铲斗与动臂左侧铰点销轴为例,编制预处理程序,处理前后销轴载荷时间历程段对比如图4所示.

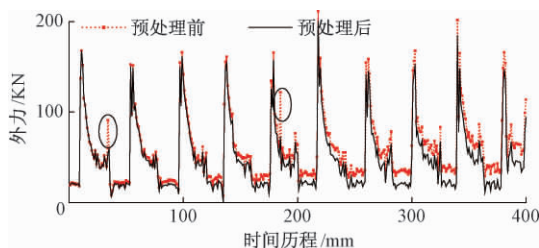


图4 动臂与铲斗铰点销轴载荷预处理

Fig.4 Comparison diagram of load pretreatment

由图4可知,动臂与铲斗销轴载荷具有周期性,预处理剔除了载荷奇异值并且消除了线性趋势项,所得载荷时间历程保留了销轴的真实受力特性.将1个作业循环数据视为1个子样,24个子样均值如表1所示,依时间序列由不同子样数组成的样本均值如表2所示.

表1 各子样数据均值变化表

Tab.1 The mean change of sample data

子样序号	均值/kN	子样序号	均值/kN	子样序号	均值/kN
1	51.89	9	51.37	17	45.17
2	49.07	10	44.78	18	46.48
3	51.85	11	45.48	19	46.51
4	48.14	12	47.73	20	54.52
5	44.61	13	54.65	21	55.13
6	50.94	14	51.53	22	49.07
7	45.76	15	46.36	23	48.33
8	46.82	16	48.21	24	50.56

表2 含不同子样个数的样本数据均值变化表

Tab.2 The mean change of data with a different number of sample

子样个数	均值/kN	子样个数	均值/kN	子样个数	均值/kN
1	51.89	9	48.93	17	48.49
2	50.48	10	48.52	18	48.38
3	50.94	11	48.25	19	48.28
4	50.24	12	48.20	20	48.59
5	49.11	13	48.69	21	48.91
6	49.41	14	48.90	22	48.92
7	48.89	15	48.73	23	48.72
8	48.64	16	48.70	24	48.83

## 2 载荷样本长度确定方法

装载机工作装置实测载荷数据是一个具有周期性的物理随机过程,在其系统参数和试验条件基本保持不变时,将装载机工作装置载荷数据视为一般平稳物理现象的随机数据,从而认为其是各态历经的<sup>[12]</sup>.记装载机销轴全生命周期载荷数据为总体 $X$ ,则总体均值 $E(X) = u$ 和方差 $D(X) = \sigma^2$ ,在总体中选择容量为 $n$ 的样本 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ,样本的均值记为 $\bar{x}$ ,根据中心极限定理可得式(1):

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - nu}{\sqrt{n\sigma^2}} = \frac{\bar{x} - u}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (1)$$

总体方差不为0且样本数 $n$ 充分大时, $f(x)$ 近似服从标准正态分布;对于载荷总体标准差 $\sigma$

未知时,可用样本标准差  $S$  代替总体标准差,此时  $\bar{x} - u/(S/\sqrt{n})$  服从  $t$  分布,显著水平  $\alpha$  与总体中样本个数  $n$  之间的概率关系如式(2)所示:

$$P\left\{|\bar{x} - u| \leq \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1)\right\} = 1 - \alpha. \quad (2)$$

此时总体均值置信区间如式(3)所示:

$$\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \leq u \leq \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1). \quad (3)$$

记变异系数为  $V = S/u$ , 总体均值和样本均值的相对误差为  $\varepsilon = (u - \bar{x})/u$ , 变异系数  $V$  与相对误差  $\varepsilon$  以及相对误差  $\varepsilon$  与样本长度  $n$  之间的关系分别如式(4)和式(5)所示:

$$V = (1 - \varepsilon) \cdot (S/\bar{x}). \quad (4)$$

$$\varepsilon \geq \left| \frac{S}{u \sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right| = \left| \frac{V}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right|. \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得式(6),如下所示:

$$n \geq \left[ \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{S}{\bar{x}} \cdot t_{\alpha/2}(n-1) \right]^2. \quad (6)$$

给定置信水平  $1 - \alpha$  后,根据样本均值和标准差以及式(6)可计算得到给定统计误差  $\varepsilon$  下所需最小样本长度.然而,在实际求解过程中样本长度  $n$  是未知的,此时  $t_{\alpha/2}(n-1)$  也是未知的,因此需要根据经验选定  $n$  的初始值  $n_1$ .由中心极限定理推导样本长度计算公式及过程,可得样本长度迭代计算流程如图5所示.

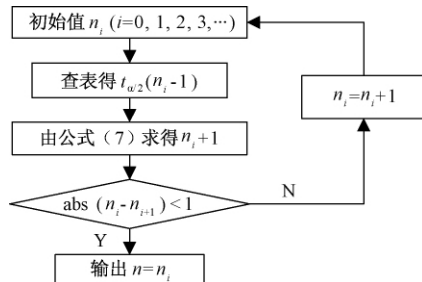


图5 样本长度迭代计算流程图

Fig. 5 Flow diagram of sample length calculation

### 3 结果分析

#### 3.1 载荷样本长度计算结果

置信水平为 95%, 统计误差取 0.05, 初始子样选择 3, 根据式(6)和图5可得子样数  $n$  的输出值与迭代次数之间的变化关系如图6所示.

以相邻两个输出值的差值作为迭代的终止条件,第15和16次的迭代输出分别为 47.02 和 47.73,取整后的 48 斗样本长度即为通过提出的基于中心极限定理法获得的最小样本长度.选用多项式、S 曲线和指数模型对表2中样本均值变

化趋势进行拟合,所得结果如图7所示.

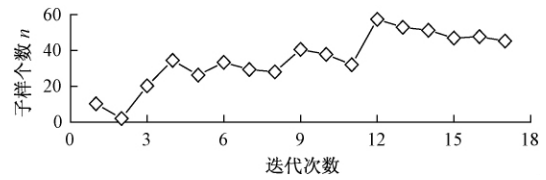


图6 样本个数输出值与迭代次数关系

Fig. 6 Relationship between sample and iteration

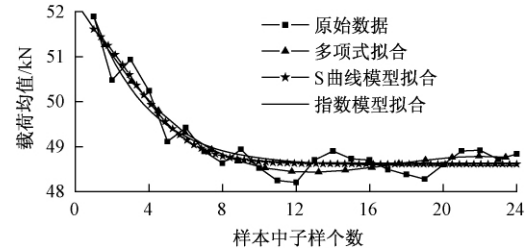


图7 趋势线拟合结果示意图

Fig. 7 The results of trend line method

对非线性拟合方程,拟合度指标  $R^2$  的计算公式如式(7)所示:

$$R^2 = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 / \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (7)$$

式中,  $x_i$  为实测数据均值;  $x'_i$  为拟合方程预测值.

由式(7)得多项式、S 曲线和指数模型的拟合优度分别为 0.89、0.92 和 0.94,趋势线趋于稳定时最小子样个数分别为 17 斗、14 斗和 19 斗.由图7和样本长度计算结果可知趋势线拟合方法对拟合模型有一定依赖性,所得结果不稳定.采用谱密度法<sup>[5]</sup>得到样本长度约为 400 斗,近似均值估计法<sup>[7]</sup>得子样个数约为 16 斗.

#### 3.2 载荷统计灵敏度分析

不同样本长度的载荷影响着均值频次和幅值频次概率密度函数各待估参数的取值,样本长度的影响最终反映在载荷谱的编制结果中.利用 nCode 软件对预处理后的销轴载荷进行均幅值频次统计,样本长度从 5 斗开始每次增加 5 斗直至 80 斗,其中 80 斗的雨流计数结果如图8所示.

载荷统计分布中幅值常采用威布尔分布,而均值则采用正态分布或对数正态分布.这里采用概率图法分析雨流计数均值结果,均值频次的正态分布和对数正态分布概率图如图9所示.

由图9可知,销轴载荷均值频次采用对数正态分布.40 斗和 80 斗的样本均幅值频次直方图分别如图10和图11所示.

记均值变量为  $x$ ,幅值变量为  $y$ ,则均值对数正态分布和幅值威布尔分布的概率密度函数  $f(x)$

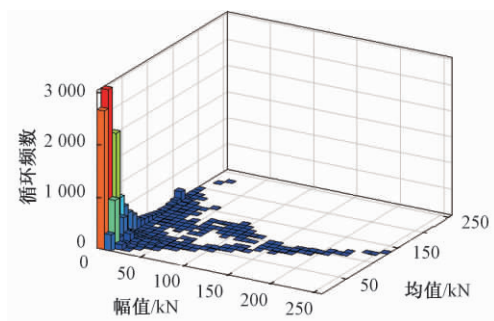


图8 雨流计数结果示意图

Fig. 8 The result of rain flow counting method

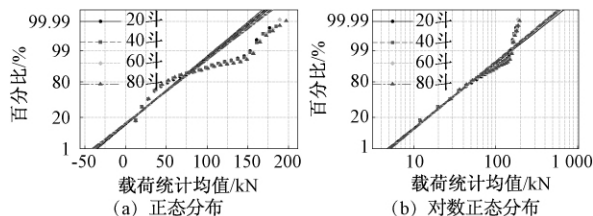


图9 均值分布概率图

Fig. 9 Probability graph of mean distribution

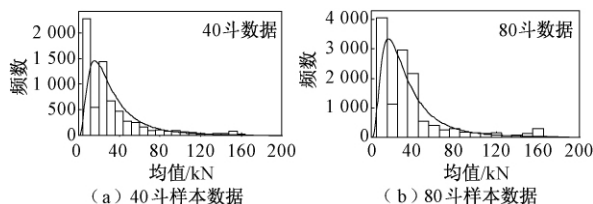


图10 均值频数直方图与分布拟合图

Fig. 10 Mean frequency histogram &amp; distribution fitting

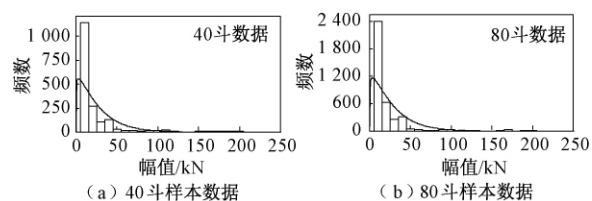


图11 幅值频数直方图与分布拟合图

Fig. 11 Amplitude frequency histogram and distribution fitting

和  $f(y)$  分别如式(9)和式(10)所示<sup>[13]</sup>:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - u)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad (9)$$

$$f(y) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{y}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{y}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad (10)$$

式中,  $u$  和  $\sigma$  为对数正态分布位置参数和形状参数;  $\alpha$  和  $\beta$  为威布尔分布形状参数和尺度参数。

以5斗数据为间隔,样本从5斗~80斗的均幅值频数统计分布参数变化如图12所示。由图12可知,随着样本长度  $n$  的增加,载荷均幅值的统计分布参数趋于稳定。当  $n < 20$  时,4个待估统计参数与样本长度近似呈线性变化关系;当  $20 \leq n < 50$  时,待估参数呈现波动变化;待估统计参数自样本长度  $n$  趋近于50时开始趋于稳定,即销轴

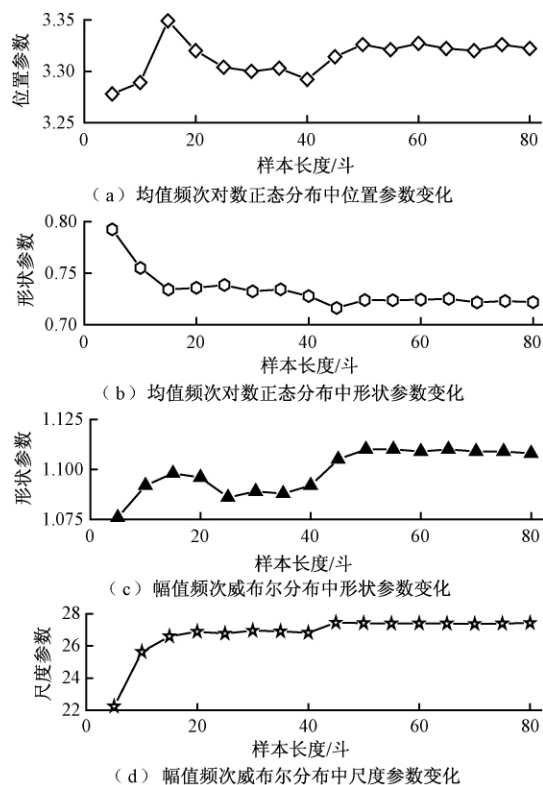


图12 均幅值分布待估参数与样本长度关系

Fig. 12 The relationship between the distribution parameters and the sample length

载荷谱编制结果对样本长度的灵敏性以50斗样本长度数据为明显分界。在  $n < 50$  时,载荷样本长度的增加或减小会对载荷谱编制结果产生较大影响;在  $n \geq 50$  时,载荷样本长度的改变对载荷谱编制结果的影响则可以忽略。

在误差取0.05、置信水平为0.95时,谱密度法所得400斗的样本结果趋于保守,使模型参数估计出现数据饱和,增加了试验测试成本以及数据处理的难度;而近似均值法和趋势线拟合法所得20斗左右的样本数据下,均幅值统计参数估计量并没有达到稳定;基于文中方法所得48斗可以认为是销轴载荷测试最小样本,此时总体参数的估计值  $u$ 、 $\sigma$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  已基本开始趋于稳定。通过载荷统计参数估计量的验证,基于中心极限定理确定载荷样本长度方法,与谱密度法相比减小了工作量;与近似均值和趋势线拟合法相比,具有较高的精确性和可信度。

## 4 结论

(1) 提出的载荷样本长度确定方法避免了谱密度法的数据饱和和趋势线拟合法对拟合模型的依赖,谱密度法所得400斗样本长度结果偏于保守,而趋势线拟合法结果随拟合模型的改变而改

变,低于20斗的样本长度可靠性不高。

(2) 基于雨流计数和统计分析得到载荷均幅值分别服从对数正态分布和威布尔分布,置信度0.95和统计误差为0.05,得到了48斗样本长度是载荷均幅值分布模型估计参数达到稳定时的临界样本数,在低于临界样本数时估计参数变化波动明显,高于临界值开始趋于稳定。

(3) 基于中心极限定理的样本长度确定方法具有可信度高、试验成本低和工作量小的优点,为装载机工作装置载荷测试提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] MURER S, LEGUILLON D. Static and fatigue failure of quasi-brittle materials at a V-notch using a dugdale model [J]. *European journal of mechanics A/solids*, 2010, 29(8): 109–118.
- [2] 万一品,来盼盼,宋绪丁,等. 装载机工作装置有限元分析与疲劳强度评估 [J]. *起重运输机械*, 2016(9): 30–34.
- [3] 阎楚良,高镇同. 最少空测采样飞行起落次数设计准则 [J]. *航空学报*, 1999, 11(20): 514–517.
- [4] 高品贤. 参数模型建模样本长度的选择 [J]. *振动、测试与诊断*, 1991, 11(4): 5–10.
- [5] 石来德. 机械的有限寿命设计和试验 第七讲载荷谱的研制过程 [J]. *建筑机械*, 1986(10): 35–45.
- [6] 石来德,张巨光,黄珊秋. 随机数据处理中确定样本长度的问题的探讨 [J]. *建筑机械*, 1993(4): 16–21.
- [7] 张云龙,褚文农,许纯新. 装载机传动系载荷样本长度的确定 [J]. *工程机械*, 1994(6): 16–20.
- [8] 何春华,周懿,项娇. 汽车道路行驶试验载荷谱样本长度确定方法的研究 [J]. *汽车技术*, 2003, (11): 14–17.
- [9] 李叶妮,林少芬,刘少辉,等. 回归分析法在样本长度误差分析中的应用 [J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2010, 15(1): 72–75.
- [10] 万一品,贾洁,梁佳,等. 装载机工作装置结构强度分析与试验研究 [J]. *机械强度*, 2016, 38(4): 772–776.
- [11] 万一品,宋绪丁,郁录平,等. 装载机工作装置销轴载荷测试方法与试验研究 [J]. *机械强度*, 2017, 39(1): 26–32.
- [12] 孙祖望,张义甫,郭德虎. 推土机动态性能试验的非平稳随机数据模型和处理方法 [J]. *工程机械*, 1988, 19(10): 22–28.

## Study on Method for Determining Load Sample Length of the Loader Working Device

WAN Yipin, SONG Xuding, CHEN Lele

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The load measuring system of the loader working device was constructed and the pin-shaft pretreatment load was used as the sample data. The sample length determination method based on central limit theorem was proposed, and the influence of sample length variation on the parameters of load mean amplitude distribution model was discussed. The results showed that the proposed method could avoid the data saturation of the spectral density method and the dependence of the trend line fitting method on the model. When the confidence level was 0.95 and the statistical error was 0.05, the critical sample number was 48. The estimated parameters of the distribution model had obvious fluctuation when the number of samples was lower than the critical value. It tends to be stable when the sample number was higher than the critical value. This method had the advantages of high reliability, low test cost and small workload, which could provide an important reference for load measuring of the loader working device.

**Key words:** loader; load measuring; central limit theorem; sample length

# 1 m口径空间相机主望远镜组件设计

卢晓明<sup>1,2</sup>, 贾建军<sup>1,2</sup>, 周成林<sup>1</sup>, 方勇勇<sup>1</sup>, 谢永<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了研究大口径望远镜的性能与稳定性,对1 m口径主望远镜组件进行了材料选取、结构设计与分析计算,给出了完整的设计分析结果。首先,比较常用材料的各项性能,确定1 m口径望远镜的主镜材料,并进行轻量化设计。接着,经理论计算确定主镜的支撑方案,并对各个部件进行建模。然后,对主镜组件进行模态分析,验证支撑方案。最后,对主镜组件进行重力变形分析与热分析。轻量化后主镜重76 kg,轻量化率达到77%。仿真结果表明:主镜轴向与径向自重变形RMS值分别为8.9 nm与3.5 nm;经iSight软件优化设计,主镜径向自重变形RMS值从3.5 nm减小到3.3 nm,相比优化前提高了5.7%。当主镜镜体温度梯度为 $20 \pm 0.3$  °C时,镜面RMS值为10.1 nm,满足望远镜的面形精度要求。

**关键词:** 大口径; 主镜; 轻量化; 柔性支撑; 重力变形; 优化设计; 热变形

**中图分类号:** TH751 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.008

## 0 引言

随着科学技术的不断发展和人类空间探索步伐的日益加快,大口径望远镜广泛地用于观察、研究地形、空间实时监控、空间目标成像、探测、识别及定轨等。随着分辨率的提高,空间光学系统的口径不断增长,其重量急剧增加,由此带来的自重和温度变形越发显著,这使得支撑系统的设计越来越复杂,因此必须对大口径望远镜主镜进行轻量化,同时又要保证必要的结构刚度,确保光学系统的成像质量不变<sup>[1]</sup>。望远镜主镜作为空间光学系统的重要部件,其材料选取、结构形式和支撑方案不仅直接决定主镜面形精度和整个光学系统的光学性能,而且影响项目的研制成本和研制周期<sup>[2]</sup>。因此,根据大口径望远镜地面环境和在轨运行环境的差异,对望远镜及其支撑结构进行设计与优化,增强望远镜抵抗由自重和温度变化引起的镜面变形的能力,是空间光学传感器研制的关键技术之一。

笔者对1 m口径主望远镜组件进行了材料选取、结构设计与分析计算,给出了完整的设计及优化结果,并对其进行了热力分析验证。仿真结果表明,组件设计方案是可行的有效的,所给出的优化

方法能够切实提高望远镜抵抗镜面变形的能力。

## 1 镜体材料选取

通常而言,镜体材料的选择要考虑比刚度( $E/\rho$ )、导热系数( $\lambda/\alpha$ )和稳定性3个指标,分别表征力学性能、热学性能和使用寿命<sup>[3]</sup>。常用镜体材料属性的比较如图1所示,SiC的比刚度仅次于金属铍,相比于微晶玻璃等其他材料,可有效提高组件刚度和轻量化水平,同时它具有较高的导热系数,有利于减小镜体温度梯度和热变形,提高组件的环境适应性。此外,SiC的物理、化学性质稳定,能够抵抗宇宙射线长期辐照。经调研,SiC材料已经成功应用于多种空间光学系统中。例如,美国的MICAS和GEO、欧洲的Herschel等空间望远镜已经在轨运行多年<sup>[4-6]</sup>;国内由上海硅酸盐研究所研制的SiC镜体也已经成功应用于多个空间遥感仪器中<sup>[7]</sup>。

## 2 镜体设计

根据设计要求,SiC主镜直径为1 000 mm,镜面曲率半径为2 200 mm。由于卡塞格林光学系统的要求,主镜需要中心开孔,取中心孔孔径275 mm。

收稿日期:2017-11-22; 修订日期:2017-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302181)

作者简介:卢晓明(1990—),男,河南郑州人,中国科学院大学博士研究生,主要从事空间光学传感器结构技术方面的研究,E-mail:lxmjane66@sina.com。



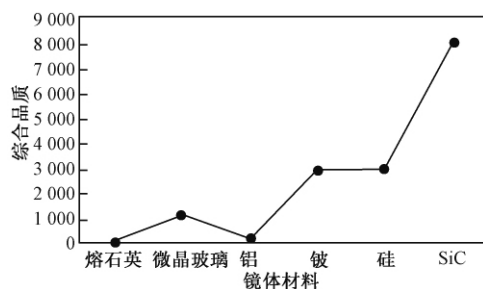


图1 常用镜体材料属性比较

Fig.1 Comparison of general materials of lens body

SiC 主镜拟采用背部封闭式的单拱形状,轻量化孔拟采用三角形孔,背部面板直径取 880 mm,拱形面加强筋厚度取 6 mm. 拟采用六点的背部支撑,支撑孔径取 85 mm. 望远镜主镜初步设计模型如图 2 所示.

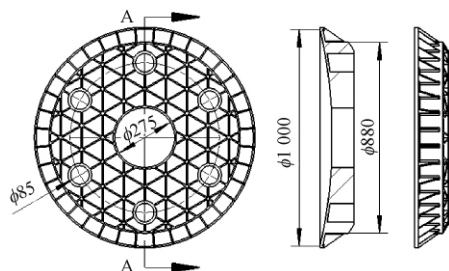


图2 镜体设计模型

Fig.2 Design model of lens body

### 3 主镜背部多点支撑方案

望远镜主镜是直接参与成像的光学元件,其镜面面形精度直接影响光学系统的成像质量. 由于地面与在轨重力环境的差异以及在轨温度环境的变化会使光学主镜面形变化,这就要求望远镜组件必须具有良好的结构稳定性和热稳定性. 在失重环境下,望远镜的支撑结构应对望远镜进行有效定位,同时卸载自重. 在空间热环境下,望远镜的支撑结构通过内部设置的柔性铰链结构在一定程度上释放应力,减小热应力对镜面的影响. 望远镜支撑结构的设计应当兼顾面形与刚度,通过平衡二者实现最优支撑. 由此可见,主镜支撑结构是直接影响主镜面形精度的关键因素.

根据上述原则,并参考相关文献[8-12],采用六点柔性支撑并辅以中心定位的复合结构方案. 其中,背部支撑结构为柔性铰链,作为主镜的轴向约束;中心定位结构为与 SiC 材料线膨胀系数匹配的弹性芯轴,作为主镜的径向约束.

结构件包括主镜胶接件、柔性铰链、主镜背板、主镜中心芯轴. 望远镜组件的三维模型爆炸图如图 3 所示. 主镜胶接件在主镜背部支撑点

处与主镜胶接,再通过柔性铰链与主镜背板联接. 柔性铰链与主镜胶接件、柔性铰链与主镜板通过螺钉连接. 其中,柔性铰链设计是主镜背部支撑的重点,需兼顾热应力释放与结构刚度的平衡.

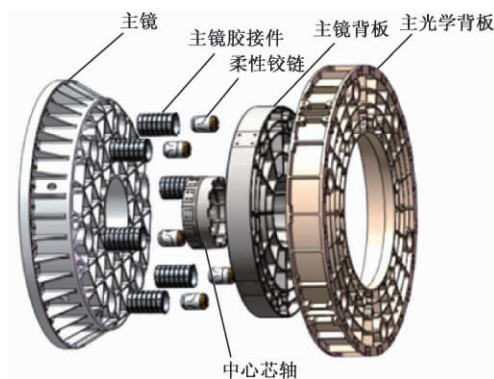


图3 望远镜组件的三维模型爆炸图

Fig.3 The exploded views of the telescope component

胶接孔所在节圆半径  $D$  (平衡半径) 的确定依据为内外圆环盘重量相等,计算公式为:

$$\frac{\pi R^2 - \pi \cdot 137.5^2}{2} = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \pi \cdot 137.5^2, \quad (1)$$

式中:主镜外圆为斜筋,故取  $R = 470$  mm. 计算结果取整  $D = 690$  mm.

轻量化后主镜重 76 kg,轻量化率高达 77%. 在 5.1 节对主镜轻量化后的重力变形进行校核.

#### 3.1 主镜胶接件

胶接件用于实现主镜和背板相应结构的联接,为了减小主镜胶接件粘接部位的局部应力,应尽量增大胶接件与主镜的胶接面积;同时为了减小温度环境变化时胶接件与主镜间的热应力,胶接件材料的线膨胀系数应与主镜接近. 所设计胶接件结构如图 4 所示.

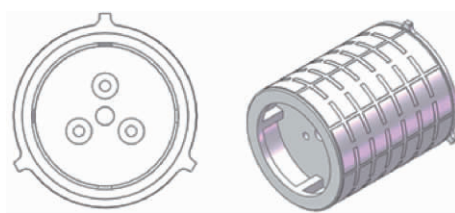


图4 主镜胶接件

Fig.4 The mirror glue joints

胶接件与主镜背部孔采用间隙配合,图 4 中胶接件外圆柱面侧有深 0.1 m 的沉面,用于灌胶. 在胶接件与柔性铰链联接处采取一定的柔性设计,卸载螺钉引入的应力. 胶接件采用相同线膨胀系数的殷钢材料,实现在一定温度区间范围内与

SiC 材料的匹配.

### 3.2 柔性铰链

柔性铰链用于卸载主镜组件内部热应力,尤其是背板引起的热应力,从而消除对主镜面形精度的影响.笔者采用图 5 所示的双曲线型柔性铰链,材料为 TC4. 柔性铰链的设计主要考虑柔性与刚度的平衡,通过有限元分析计算,确定了如图 6 所示的柔性铰链尺寸,其一阶频率为 155 Hz.

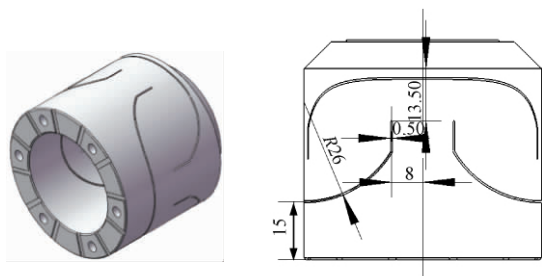


图 5 柔性铰链示意图

图 6 柔性铰链结构尺寸

Fig.5 Whiffletree drawing

Fig.6 Whiffletree design

### 3.3 中心芯轴

中心芯轴的作用是给主镜提供径向辅助支撑.中心芯轴与主镜之间采用间隙配合,并与主镜采用胶接的联接方式.中心芯轴结构如图 7 所示,材料选用碳化硅基碳纤维复合材料.

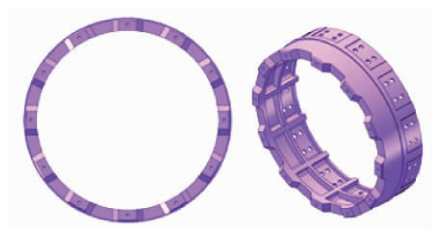


图 7 芯轴设计

Fig.7 Mandrel design

使用 solidworks 软件对芯轴进行有限元计算,计算条件为极限工况,即主镜重量全部作用在中心芯轴上,计算此时中心芯轴的径向变形.由图 8 所示的计算结果可知,中心芯轴在承受 760 N 时,最大变形量为 0.000 5 mm.表明即使主镜重量全在芯轴上,变形量也很小,符合结构要求.

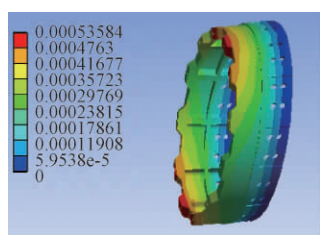


图 8 芯轴压力变形图

Fig.8 The transformation figure of mandrel pressure

### 3.4 主镜背板

主镜背板是主镜的承力部件,要求具有足够的结构刚度,同时其热膨胀系数应与主镜材料碳化硅接近,因此,本文中主镜背板采用碳化硅基碳纤维复合材料(C/SiC),结构设计如图 9 所示.

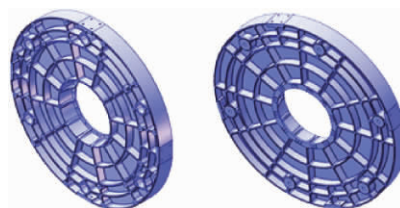


图 9 主镜背板

Fig.9 The primary mirror backplane

C/SiC 复合材料具有良好的综合性能,具有很高的比刚度,较低的热膨胀系数,且在工艺上能够通过控制添加 SiC 的比例,在一定范围内改变材料性能参数,使其能够尽量满足设计的要求.此外,C/SiC 复合材料通过编织、掺杂、反复烧结成型,性能稳定可靠,抗空间辐照性能好.通常情况下,C/SiC 复合材料的相关参数如表 1 所示,可见其热膨胀系数与 SiC 的热膨胀系数  $2.2 \times 10^{-6}$  较为接近,满足背板设计要求.

### 3.5 主光学背板

主光学背板用于承载主镜组件与次镜组件,即主次镜连接的中间过渡件,其力学、热稳定性会影响主次镜的配准.同时主光学背板是整个望远镜的对外接口板,其材料采用中组份的铝基碳化硅材料,图 10 为主光学背板设计图.



图 10 主光学背板

Fig.10 The main optical backplane

## 4 主镜有限元分析

### 4.1 主镜重力变形分析

主镜采用背部六点支撑情况下,自身轴向与径向重力变形分别如图 11 与图 12 所示.

主镜轴向与径向自重变形 RMS 值分别为 8.9 nm 与 3.5 nm.望远镜采用卧式放置,要求径向自重变形较小,满足设计要求.



表 1 C/SiC 复合材料参数  
Tab.1 Parameters of C/SiC composite materials

材料	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/GPa		泊松比	剪切模 量/GPa	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}$		热导率/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )		比热容/ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
		轴向	径向			轴向	径向	轴向	径向	
C/SiC	1.9-2.2	85	15	0.25	25	0.5E-06	3.8E-06	5.5	2	800

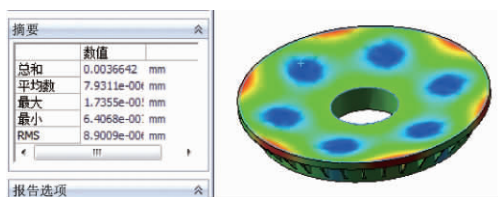


图 11 轴向重力变形

**Fig. 11 The axial gravity transformation**

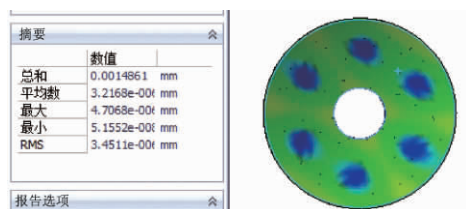


图 12 径向重力变形

**Fig. 12 The radial gravity transformation**

## 4.2 优化设计

主镜轻量化优化设计是一个多目标优化问题,即在一定约束条件下,合理的布置轻量化孔的位置,减少变形量和质量.本问题需要明确的参数包括材料属性、载荷、力学约束、优化变量、约束条件和优化目标等.

利用 iSight 软件对主镜背部支撑孔大小  $D1$  及位置  $D2$  进行优化设计, 计算取整后得出在安装孔大小  $D1 = 90 \text{ mm}$ , 分布直径  $D2 = 670 \text{ mm}$  时

主镜 *RMS* 最小, 径向自重变形 *RMS* 值为 3.3 nm, 相比优化前提高了 5.7%.

### 4.3 模态分析

主镜组件分析模型由壳单元和体单元(八节点六面体或四节点四面体单元)组成,网格总数为 263 585,质量为 160.8 kg。底部 6 个孔处固定,约束 6 个方向的自由度。主镜组件 FEM 模型见图 13,力学分析结果见表 2。

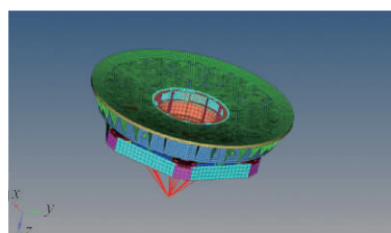


图 13 镜体 FEM 模型

**Fig. 13 The FEM model of mirror**

#### 4.4 热变形

主镜尺寸较大,必须对其进行温度梯度分布与变形进行分析,可知,①当主镜镜面温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、背部为  $20.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,镜面  $RMS$  值为  $0.016\text{ }\lambda = 10.1\text{ nm}$ ;②当镜面中心  $20.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、外缘圈  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,镜面  $RSM$  为  $0.90\text{ }\lambda = 6.33\text{ nm}$ ;③当镜面面内有  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度差时,镜面  $RMS$  值达到  $0.016\text{ }\lambda = 10.1\text{ nm}$ ,说明主镜能满足温度适应性要求。

表 2 主镜组件力学分析结果  
Tab.2 The results of the analysis

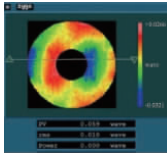
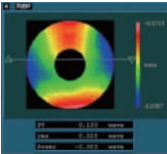
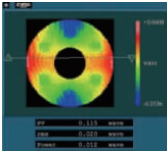


固定方式	模态/Hz	重力方向	镜面顶点刚性位移/mm	光轴倾角/ $^{\circ}$	变形 <i>RMS</i> /mm	力学分析图
全固定 (6 组小面 固定,每个 小面 3 个 螺钉)	前三阶 模态: 220.1, 289.0, 298.6	径向	$X$  $x: 2.87\text{E-}03$ $y: -8.06\text{E-}06$ $z: -2.33\text{E-}07$	$\alpha: 7.22\text{E-}08$ $\beta: -4.85\text{E-}07$ $\gamma: -4.77\text{E-}08$	0.01 $\lambda$	
						
						
		轴向	$Z$  $x: -2.07\text{E-}05$ $y: 3.08\text{E-}03$ $z: -7.35\text{E-}05$	$\alpha: 5.46\text{E-}07$ $\beta: 4.94\text{E-}07$ $\gamma: 6.17\text{E-}07$	0.028 $\lambda$	
						

表 3 主镜温度分析列表

Tab. 3 The analysis list of the mirror's temperature

工况	温度分布	变形	面形含 Power	面形不含 Power
镜面 20 ℃, 背部 20.3 ℃				
镜面中心 20.3 ℃, 外缘圈 20 ℃				
镜面一侧 20 ℃, 另一侧 20.3 ℃				

## 5 结论

笔者完成了 1 m 口径主望远镜组件结构的设计及优化分析,验证了方案的可行性和有效性,给出了 1 m 口径望远镜组件的详细设计方案,采用 SiC 作为制作主镜镜坯的材料,对主镜支撑形式、镜体结构参数等进行了分析和优化,得到了重 76 kg、轻量化率 77% 的轻量化主镜结构. 分析了主镜的支撑原理,给出了具体的主镜的双曲线型柔性铰链. 利用有限元方法分析了主镜组件在重力、热载荷工况下的变形,并对其进行了模态分析,主镜轴向与径向自重变形  $RMS$  值分别为 8.9 nm 与 3.5 nm. 后经 iSight 软件优化设计,主镜径向自重变形  $RMS$  值从 3.5 nm 提高到 3.3 nm,比优化前提高了 5.7%. 当主镜镜体温度梯度为  $20 \pm 0.3$  ℃,镜面  $RMS$  值为 10.1 nm,满足光学要求. 可为空间相机大口径望远镜的设计提供参考和借鉴.

## 参考文献:

- [1] 曾春梅,余景池,郭培基. 2m 超轻高精度 SiC 分块镜的设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (11): 3034-3039.
- [2] 郭万存,吴清文,杨近松,等. 2 m 主镜主动支撑优化设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42 (6): 1480-1484.
- [3] 伞兵,李景林,孙斌. 空间相机大口径反射镜轻量

化技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (10): 3043-3048.

- [4] ROBICHAUD J L. SiC optics for EUV, UV and visible space missions [J]. SPIE, 2003, 4854: 39-49.
- [5] ANAPOL M, GARDNER L, TUCKER T, et al. Lightweight 0.5 msilicon carbide telescope for a geostationary earthobservatory mission [J]. SPIE, 1995, 2543: 164-172.
- [6] SEIN E, TOULEMONT Y, BREYSSSES J, et al. A new generation of large SiC telescopes for space applications [J]. SPIE, 2004, 5528: 83-95.
- [7] 韩媛媛,张宇民,韩杰才,等. 国内外碳化硅反射镜及系统研究进展[J]. 材料工程, 2005, 33 (6): 59-63.
- [8] 汪宝旭,伍凡,蒋世磊,等. 卡式红外光学系统光机分析及结构优化[J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (7): 1872-1878.
- [9] 张锐,陈志远,杨世模,等. 空间太阳望远镜主镜支撑结构的优化设计[J]. 光学技术, 2007, 33 (1): 23-26.
- [10] 李志来. 长焦距空间相机主镜间桁架支撑结构设计[J]. 激光与红外, 2012, 42 (1): 89-93.
- [11] 袁健,沙巍,陈长征,等. 空间相机桁架式支撑结构的集成优化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (12): 3661-3666.
- [12] 周超. 大口径望远镜系统建模及仿真分析研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.

(下转第 86 页)

# 乘用车驻车制动自动装调系统研究

宋景芬<sup>1</sup>, 夏伟<sup>1</sup>, 邓小禾<sup>2</sup>, 何耀华<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 汽车工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北省汽车零部件重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 乘用车驻车制动装调不合格易导致车辆驻车制动力不足或制动器卡钳自动调整间隙过小, 进而带来车轮阻滞力偏大、制动拖滞等问题。以某款采用手动驻车机构的微型车为研究对象, 对该车型当前驻车制动装调工艺的现存问题进行分析, 提出新的装调工艺, 并在此基础上研发了一套基于 LabVIEW 控制的驻车制动自动装调系统, 详细介绍了该自动装调系统的硬件设计及控制方法, 通过试验验证: 新装调工艺及自动装调系统能够提高驻车制动的装调一致性, 降低工人劳动强度, 具有较好的应用价值。

**关键词:** 驻车制动; 自动化; 装调质量; 试验验证

**中图分类号:** U270.7 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.021

## 0 引言

随着经济技术的发展, 汽车安全性越来越受生产厂家和消费者的重视。驻车制动系统作为辅助制动系统, 在制动系统中有很重要的作用。其结构的好坏不仅取决于设计水平, 对于已经设计加工完成的系统, 更需要在装配和调整过程中进行合理控制, 才能使其最大程度的满足设计和性能要求, 若其装调过程不合理, 会导致车辆驻车制动力不足, 或制动卡钳自动调整间隙过小, 进而带来车轮阻滞力偏大、制动拖滞等问题<sup>[1-3]</sup>。因此, 在新车下线之前需要对驻车制动系统进行合理的装调。作为保障车辆正常停车以及坡道驻车的重要部件, 驻车制动系统一直是国内外研究人员关注的重点。目前国内外学者关于制动器的结构以及行车制动的性能方面做了大量的研究<sup>[4-6]</sup>, 但对汽车驻车制动器的研究并不多<sup>[7]</sup>, 对手动驻车制动机构的装调过程和装调质量的研究未见报道。现阶段汽车总装线上驻车制动操纵机构的装配与调整大多由人工手动完成, 其装调过程很难保证该机构的装调质量, 研发符合汽车总装生产要求的驻车制动自动装调系统, 实现汽车驻车制动系统装调生产的自动化研究是一种必然趋势和客观需要, 是解决人为因素对汽车驻车制动装调质量影响的重要途径。

## 1 人工装调工艺分析

### 1.1 驻车制动系统结构原理

常见的驻车制动系统主要由驻车制动操纵手柄、固定支架、调整螺杆、调整螺母、平衡杠杆、拉索、制动器等。小型车辆(轿车、微型车等)驻车制动器常与后轮行车制动器共用, 如图1所示<sup>[8]</sup>。

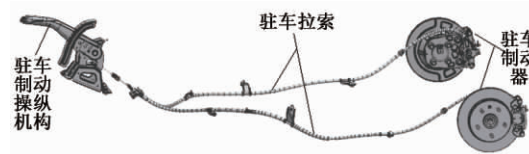


图1 驻车制动系统结构图

Fig.1 The structure of parking brake system

### 1.2 驻车制动系统人工调整方法

《GB 7258—2012 机动车运行安全技术条件》中对驻车制动系统的要求如下<sup>[9]</sup>：

(1) 驻车制动应能使机动车即使在没有驾驶员的情况下, 也能停在上、下坡道上。驾驶人应在座位上就可以实现驻车制动, 对于乘用车而言, 驾驶人施加于操纵装置上的力应小于等于 400 N。

(2) 车辆最大驻车坡度应不小于 20%。

(3) 操纵机构应有足够的储备行程, 一般应在操纵机构全行程的三分之二以内产生规定的制动效能。

收稿日期:2017-02-23; 修订日期:2017-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51576147)

作者简介:宋景芬(1963—), 女, 贵州遵义人, 武汉理工大学副教授, 主要从事汽车新技术等研究, E-mail: wahy1967@163.com.

(4) 驻车制动操纵机构总行程( $L$ )的四分之三要不小于最大驻车坡度时拉索的总行程( $L_s$ )。

操纵机构总行程:

$$L = \frac{\alpha}{180} \pi (R_1 + R_2). \quad (1)$$

拉索总行程:

$$L_s = S_1 + S_2 + S_3, \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为操纵手柄转角;  $R_1$  为导线圈半径;  $R_2$  为拉索钢丝半径;  $S_1$  为前段拉索变形量;  $S_2$  为后段拉索变形量;  $S_3$  为驻车制动器拉杆移动量。

目前汽车总装线上主流的装调工艺有以下两种:

(1) 定制套筒调节. 在新车型试生产时通过大量试验确定驻车制动调整螺母的合适位置(驻车制动操纵手柄无松旷、摩擦片无拖磨), 记录此批车辆螺杆露出长度, 采用此长度的定深套筒进行调节. 其优点是操作简单, 缺点在于不具备容差性, 有一定的返修比例。

(2) 定扭矩调节. 新车试生产中, 根据实车试验确定驻车制动调整螺母拧紧力矩(驻车制动操纵手柄无松旷、摩擦片无拖磨), 按此力矩调整驻车制动螺母的拧紧力矩. 并监测调整后驻车制动手柄拉起 2 齿位置的力矩值, 以此作为总装线上的驻车制动装调检验的依据. 这种调节方式基本不受零部件尺寸误差的影响, 采用定扭矩电枪打紧调整螺母、定制扭力扳手校验调整力矩, 调节方式简单, 被广泛采用。

### 1.3 针对目标车型的人工调整工艺研究

目标车型驻车制动装调的现用调整工艺采用上述定扭矩调节法, 最终拧紧调整螺母之前, 在驻车制动操纵手柄处于棘轮 2 齿位置时对调整螺母进行预拧紧, 并通过多次拉起/释放驻车制动操纵手柄的方式来促使制动器制动间隙自调机构将制动器间隙调整到设定值, 同时消除拉索弹性形变的影响。

根据企业实际测试数据, 对应车型所需的操作扭矩为  $15 \pm 3 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 预设目标校验扭矩为  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 即驻车制动操纵手柄拉起至 2 齿所需施加的扭矩值, 装调合格车辆检测扭矩的最大偏差达 20%。实际调整过程中, 校验值波动范围越小, 驻车手柄处于同一位置提供的制动力矩越稳定, 装调质量的一致性越好. 当前人工装调方式使不同车辆的实际装调数据不一致, 影响装调合格率. 其主要原因如下:

(1) 装调过程中驻车制动操纵手柄上的棘轮

棘爪机构处于手动释放状态, 快节奏的装调环境很难保证每次打紧调整螺母都是在精确的 2 齿位置, 不同的拧紧角度使得调整结束后 2 齿位置的拉索预紧力不同。

(2) 工人很难保证每次用相同的拉力拉动驻车制动操纵手柄至 8 齿位置, 且驻车拉索由于存在弹性形变而效率较低, 不同大小的拉力对预打紧后的拉索弹性形变消除效果不同, 故而影响最终拧紧后的拉索预紧力。

此外, 人工装调工艺还存在以下不足:

(1) 驻车制动操纵机构装配调整的劳动强度大。

(2) 驻车制动操纵机构装调质量受操作工人的技术水平、体力消耗、精神状态等多种因素的影响, 装调质量的一致性较难保证。

(3) 装调质量的好坏不能量化, 后续的质量追查和工艺改进均缺少有利的依据。

由此可见, 人工装调工艺很难保证装调质量, 研发符合总装生产要求的驻车制动自动装调系统, 是解决人为因素对装调质量影响的重要途径。

## 2 驻车制动自动装调系统组成及结构设计

汽车驻车制动自动装调系统主要由工控机、系统控制器、A/D 模数转换器、驻车制动手柄控制装置(包括电机、减速器、转矩传感器、转角传感器、操纵驻车制动手柄的专用抓持器等)、拉索预紧力调整螺母自调装置(包括电机、减速器、转矩传感器、驻车制动拉索调整螺母套筒等)、扫码枪及棘轮锁释放器等组成, 如图 2 所示。

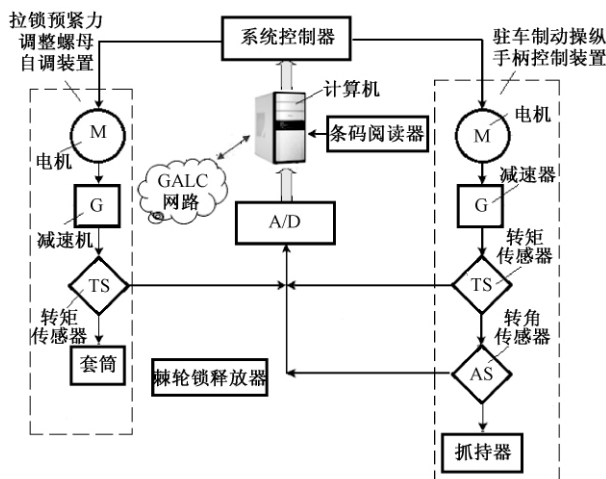


图 2 汽车驻车制动操纵机构自动装调系统的组成

Fig. 2 The composition of hand brake tuning device



装调过程中,扫码枪将车辆 VIN 发送给工控机,计算机开始控制自动装调系统动作.驻车制动手柄专用夹具由经伺服电机、减速机输出的扭矩驱动,减速机输出轴与专用夹具之间的扭矩传感器用于实时监测扭矩值.驻车制动手柄到达指定位置后,调整螺母自调装置按预设扭矩值拧紧螺母.初次调整结束后的检测扭矩大小用来判断装调是否合格.其装调工作流程如图3所示.

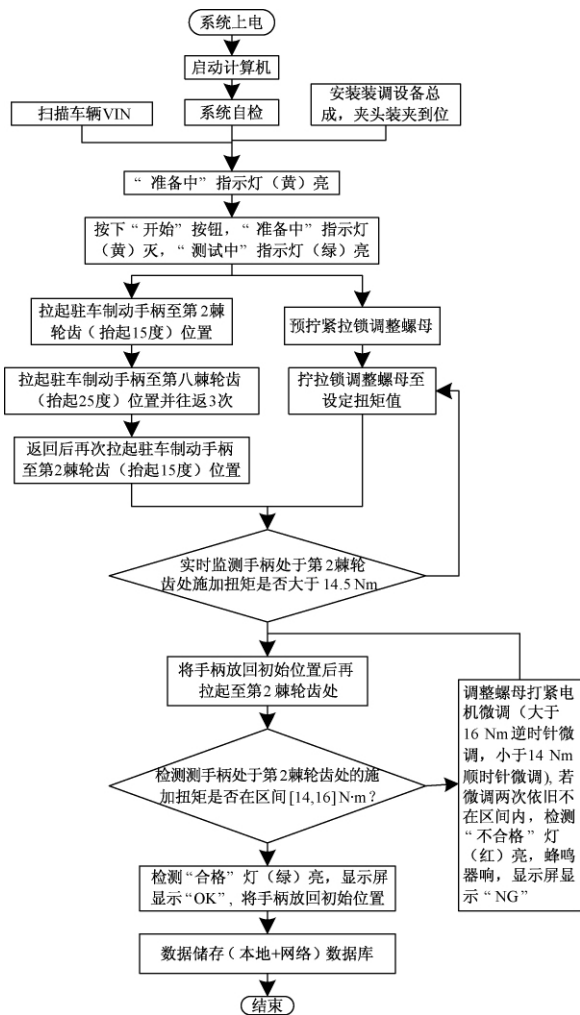


图3 装调设备调整策略

Fig. 3 The adjustment flow chart

### 2.1 拉索预紧力调整螺母自调装置的设计

为了保证驻车制动操纵机构的装调质量,需要在驻车制动操纵手柄被拉到规定位置时对驻车拉索调整螺母进行2~3次调整.由于驻车制动拉索调整螺母的位置随驻车制动操纵手柄的拉起而变化,为了使拉索预紧力调整螺母自调装置能够跟随拉索调整螺母转动,并保证其在拧紧拉索调整螺母时具有抗翻转功能,专门设计了拉索预紧力调整螺母自调装置专用支架.图4是其加工样件和伺服机构组装后的实物图,图中的两个线缆

接头分别对应着伺服机构的动力线缆和信号线缆.



图4 拉索预紧力调整螺母自调装置总成实物图

Fig. 4 The figure of adjusting nut pre-tightening device

### 2.2 驻车操纵手柄控制装置的设计

装调过程中需要多次拉起/放下驻车制动手柄,该动作由驻车操纵手柄控制装置完成,手柄专用抓持器的结构如图5所示.

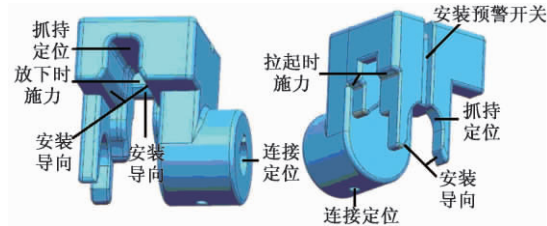


图5 手柄抓持器

Fig. 5 Clamp model

汽车驻车制动手柄抓持器采用整体式结构,由连接定位、抓持定位、拉起施力、放下施力、安装导向、安装预警开关专用卡槽等部分组成.抓持定位部分是一条与驻车制动手柄尾部结构形状相适应的异形槽,实现伺服驱动器在驻车制动手柄尾部的快速定位和抓持两大作用;安装导向部分是具有一定斜度的导向槽,用以实现快速安装;安装预警开关专用卡槽用来固定安装不到位预警开关及导线.驻车制动操纵手柄控制装置主要由伺服机构(电机、减速机、扭矩传感器)、控制开关、信号灯、专用抓持器等组成,如图6所示.

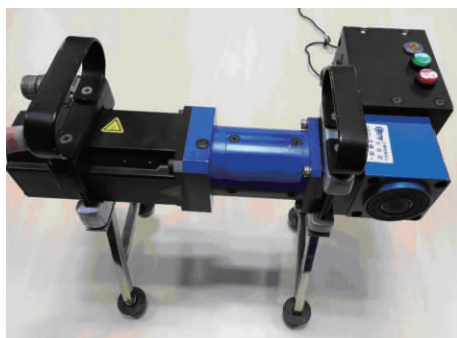


图6 驻车操纵手柄控制装置总成实物图

Fig. 6 The assembly diagram of parking brake control device

## 2.3 棘轮释放器的设计

自动装调系统的装调过程中需要多次拉起/放下驻车制动手柄,为了便于利用伺服驱动器进行驻车制动手柄拉起和放下的往返操作,需设计汽车驻车制动手柄棘轮锁释放器,用于解除汽车驻车制动手柄中棘爪对棘轮的锁止作用力。

汽车驻车制动手柄棘轮锁释放器主要由外套、内弹性体和螺钉 3 部分组成。由于内弹性体与驻车制动手柄间的摩擦力大于按下驻车制动手柄端头按钮所需的力,故可以有效释放汽车驻车制动手柄棘轮锁,以便伺服驱动器能有效执行驻车制动手柄拉起、放下的往返操作。

## 3 自动装调系统控制程序设计

### 3.1 设备位置调零控制

利用伺服电机输出轴的调用节点函数先清除程序错误,然后再通过力矩模式控制驻车制动操纵手柄控制装置,写入力矩值使其运动到初始位置后停止相应操作,然后将控制模式调整为自动模式,位置调零控制程序如图 7 所示。

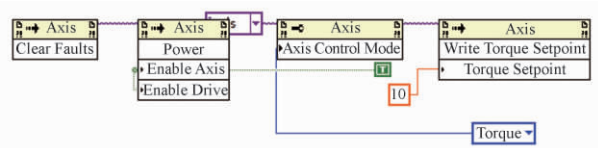


图 7 位置调零程序

Fig. 7 Procedure of CLR clear

### 3.2 调整螺母拧紧控制

利用直线运动函数使伺服驱动器驱动制动手柄上抬 2 齿(该直线运动函数需要设置较多的参数,如资源名称、加速度、减速度、平顺度、位移量、速度等),然后利用数字输出函数开启拧紧调整螺母的伺服机构,调整螺母拧紧后将其关闭,最后利用力矩模式使其回位。

### 3.3 力矩校验控制

采用直线运动函数使伺服驱动器拉起驻车制动操纵手柄至 2 齿,读取实时力矩值并与标准力矩值作比较,若在预设范围内则为合格并输出“OK”,否则控制调整螺母拧紧装置进行力矩微调,若两次微调之后力矩仍然不满足要求则为不合格并输出“NG”,利用力矩模式回位。

装调结束后,系统利用“数据库信息”通知器操作函数自动将最终的测试数据利用簇的形式发送给数据库。数据库存储与读取程序主要分为两部分,即数据存储程序及数据读取程序。对于数据

存储程序而言,是利用“数据库信息”通知器操作函数接收来自于电机运动控制程序中“数据库信息”通知器操作函数发送的测试数据,并利用数据库的相应操作函数将其保存。

## 4 自动装调系统试验验证

为验证自动装调系统控制程序的可操作性,特搭建驻车制动自动装调系统试验台架。试验台将驻车制动手柄总成直接固定在试验台支座(其高度和目标车型驻车制动手柄的安装支座高度一致)上,用螺旋弹簧连接驻车拉索来模拟实车驻车制动机构,由于弹簧拉力和实车驻车制动机构区别较大,故试验台架仅用于验证装调系统控制程序的可操作性,具体装调数据的可靠性需进行实车验证。

图 8 是拆除了车内地毯、驾驶座椅及中控台护板的试验车,该试验环境可等同汽车生产线上驻车制动装调工位的操作环境。图中所示驻车制动装调系统的操纵手柄控制装置、调整螺母自调装置和操纵手柄棘轮锁释放器均已安装到位。



图 8 试验车试验环境

Fig. 8 Test environment of experimental car

实车试验环境搭建完成后,对驻车制动自动装调系统的有效性进行实车验证。为了方便和人工装调数据进行对比,这里随机抽取 100 次试验结果进行分析,图 9 给出了驻车制动自动装调系统和人工装调的装调结果对比数据。由图 9 数据可以看出:驻车制动自动装调系统装调数据( $15 \pm 1 \text{ N}\cdot\text{m}$ )的一致性明显优于人工装调的装调数据( $15 \pm 3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ),检测扭矩的最大偏差由 20% 下降至 6.7%,下降了约 13.3%。

该装调过程中驻车制动操纵手柄的等效受力及转角如图 10 所示。装调过程中驻车制动手柄的动作角度与操作控制流程相对应。

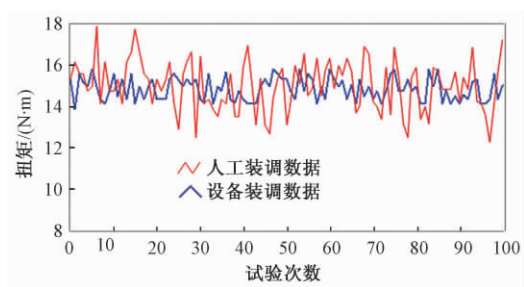


图9 自动装调系统装调数据与人工装调数据对比

Fig. 9 The data comparison between the tuning device and manual work

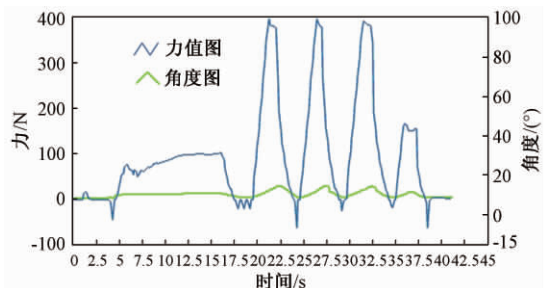


图10 操纵手柄等效力和转角

Fig. 10 The equivalent force and turn angle of the hand brake arm

## 5 结论

(1) 针对目标车型的装调工艺研究,提出了新的调整工艺,提高了驻车制动装调质量的一致性,装调检测数据的波动由  $15 \pm 3 \text{ N} \cdot \text{m}$  缩小至  $15 \pm 1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,检测扭矩的最大偏差由 20% 下降至 6.7%,装调一致性得到明显改善。

(2) 对目标车型手动驻车制动机构自动装调系统的首次设计,提出了全新的结构设计和装调控制方式,有较好的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 赵志勇,朱坤玉. 汽车手制动护套与拉杆之间的装配力测量[J]. 客车技术与研究,2010(5):53-55.
- [2] 潘雷,王振芳. 车轮阻滞力在装配过程中的控制方法[J]. 汽车零部件,2013(1):88-89.
- [3] 李恒. 车轮阻滞力在装配过程中的控制方法[J]. 汽车与配件,2012,46:32-33.
- [4] 缪建成,陈关龙,金隼. 小直径柔性钢索预紧张力的测量与计算[J]. 力学与实践,2006(2):29-32.
- [5] ANTANAITIS D B. Vehicle integration factors affecting brake caliper drag[J]. SAE international journal of passenger cars mechanical systems, 2012, 5(4):1244-1258.
- [6] 王孔龙,阎成,马瑞,等. 汽车手操纵驻车系统的效率研究[J]. 公路与汽运,2015(5):1-4.
- [7] MACLEN L D. Analysis of brake assembly with floating disc[J]. Journal of mechanical engineering science, Suffolk, England, 2004,218(9):1021-1032.
- [8] 王镇宇. 汽车设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.
- [9] 公安部交通管理科学研究所,交通运输部公路科学研究院,中国汽车技术研究中心. 机动车运行安全技术条件: GB 7258—2012[S]. 北京: 中国标准出版社,2012.

## Research on Parking Brake Automatic Tuning System of Passenger Cars

SONG Jingfei<sup>1</sup>, XIA Wei<sup>1</sup>, DENG Xiaohe<sup>2</sup>, HE Yaohua<sup>2</sup>

(1. Automotive Engineering School, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Auto Parts Laboratory of Hubei Province, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The unqualified parking brake installation and adjustment of passenger cars can easily lead to insufficient parking brake force or too small automatic adjustment gap of brake calipers, thus causing the problems of large wheel blocking force, brake dragging and so on. Taking a mini-car with manual parking mechanism as the research object, the existing problems of the current parking brake installation and adjustment process of the car was analyzed, and a new installation and adjustment process was put forward and a set of automatic parking brake installation and adjustment system based on LabVIEW control was developed. The hardware design and control method of the system in detail was introduced and the test results proved that the new installation and adjustment process and automatic installation and adjustment system could improve the parking brake installation and adjustment consistency, reduce the labor intensity of workers, and have better application value.

**Key words:** parking brake; automation; set-up quality; real vehicle experiment



## 基于 FBG 传感的 CFRP 层合板低速冲击响应监测

胡业发, 王 彬, 张锦光, 宋春生, 徐仕伟

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:** 运用有限元分析软件 ABAQUS 对碳纤维复合材料(CFRP)层合板在低速冲击作用下的响应进行了模拟,发现了冲击过程中随着冲击能量的增大,层内最大应力随之增大的现象.实验利用光纤光栅(FBG)传感器受到应力作用后光栅中心波长随应力增大而增大的特性,对埋有 FBG 传感器的 CFRP 层合板进行低速冲击响应监测实验,并对解调仪采集的中心波长值进行分析,得到冲击能量与中心波长偏移峰值的关系.实验结果表明:埋有 CFRP 层合板中的 FBG 传感器能准确捕捉到瞬间冲击信号,并且 FBG 传感器中心波长偏移峰值能反映冲击能量的大小,随着冲击能量增大,中心波长偏移峰值增大,层内最大应力也随之增大.

**关键词:** CFRP 层合板; 低速冲击响应; FBG 传感器; 有限元分析; 冲击能量

**中图分类号:** TH145 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.024

### 0 引言

碳纤维复合材料具有轻质高强、可设计性高的特点,广泛应用于多个领域,如汽车、飞行器.然而,碳纤维复合材料在其生命周期内往往会受到各种低速冲击(冲击速度小于 25 m/s)的影响,如人为踩踏、设备碰撞等.由于复合材料结构本身对冲击作用比较敏感,这种冲击很容易在复合材料内部造成损伤.研究表明,低速冲击损伤会使结构的力学性能下降 35%~40%<sup>[1]</sup>.与高速冲击(如飞行器的鸟撞冲击<sup>[2]</sup>、防弹门的弹头撞击<sup>[3]</sup>)不同,低速冲击造成的损伤往往发生在复合材料结构的内部,肉眼很难直接观察到,因此,对于低速冲击过程必须要通过有效的手段进行监测.

近年来,国内外研究人员开始应用 FBG 传感器来进行冲击的监测.Tsuda 等<sup>[4]</sup>提出了运用 FBG 传感器组建的光纤传感系统对 CFRP 层合板冲击响应进行测量的方法,证明了埋入 FBG 传感器对复合材料板结构的整体性影响较小.Takeda 等<sup>[5]</sup>利用光栅研究了层合板在低速冲击作用下的损伤行为,并结合应变片和超声 C 扫描对光栅监测层合板内部应变的准确性及与实际损伤的相符性进行了验证.谷广伟等<sup>[6]</sup>通过

FBG 传感器对玻璃纤维复合材料层合板的冲击响应进行监测,发现波长变化可以反映层合板的应变情况.武雪等<sup>[7]</sup>将 FBG 传感器埋入碳纤维复合材料层合板中,对复合材料成型过程和单次冲击进行了监测研究.实验发现 FBG 传感器能有效监测层合板内部的应变.陆观等<sup>[8]</sup>搭建了基于 FBG 传感器应变敏感特性的复合材料板冲击监测系统,分析了基于经验模态分解的冲击信号特征提取方法,研究了基于信号特征提取的冲击信号方向判别.

文献[4-8]的研究方法多采用试验研究,缺少低速冲击过程的仿真分析,笔者在 ABAQUS 中对 CFRP 层合板在低速冲击下的响应过程进行了模拟.文献[4-8]中的研究证明了 FBG 传感器中心波长变化量能有效地反映冲击过程中层合板内部的应变.但是,针对 FBG 传感器中心波长偏移峰值与冲击能量关系的研究仍欠缺.笔者采用落球冲击的方法来进行 CFRP 层合板的低速冲击实验,通过埋置在层合板中的 FBG 传感器对层合板的低速冲击过程进行监测,并采用解调仪对 FBG 传感器信号进行快速解调,获得了低速冲击过程中 FBG 传感器的中心波长峰值,研究了冲击能量与 FBG 传感器的中心波长偏移峰值(中心波长峰

收稿日期:2017-05-15; 修订日期:2017-08-11

基金项目:湖北省重大科技创新计划项目(2014AAA005);国家自然科学基金资助项目(U1537103)

作者简介:胡业发(1961—),男,湖北武汉人,武汉理工大学教授,博士,主要从事碳纤维理论研究,E-mail: huyefa@whut.edu.cn.

值与初始中心波长值的差值为波长偏移峰值) 的关系,为 FBG 传感器中心波长偏移峰值衡量冲击能量大小提供依据。

## 1 CFRP 层合板低速冲击过程分析

### 1.1 CFRP 层合板低速冲击有限元建模

运用 ABAQUS 软件对 CFRP 层合板在低速冲击作用下的响应进行模拟,由于 FBG 传感器的体积小,埋入层合板后对结构的力学性能影响较小<sup>[9]</sup>,故在仿真分析中忽略置入的 FBG 传感器的影响。

根据标准 ASTM D7136—07<sup>[10]</sup> 的规定,所选用的 CFRP 层合板的材料为 T300/环氧树脂,尺寸为 160 mm × 100 mm,铺层方案为  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ ,钢球质量为 64 g。由于钢球刚度远大于层合板刚度,因此笔者在建模中将钢球定义为刚体。钢球速度为钢球与层合板表面刚接触时的速度,通过改变冲击速度来改变冲击能量的大小。冲击钢球材料参数如表 1 所示。T300/环氧树脂层合板的参数如表 2 所示,表中,  $E_1$ 、 $E_2$  表示各向弹性模量;  $\nu_{12}$  为泊松比;  $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$  为 3 个方向的剪切模量;  $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$  为 3 个方向的拉伸强度;  $X_c$ 、 $Y_c$ 、 $Z_c$  为 3 个方向的压缩强度;  $S_{12}$ 、 $S_{23}$  为纵向和横向的剪切强度;  $W_{xt}$ 、 $W_{yt}$  为纵向和横向的拉伸断裂能;  $W_{xc}$ 、 $W_{yc}$  为纵向和横向的压缩断裂能。

表 1 钢球的材料参数

Tab. 1 Material parameters of steel ball

密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比 $\nu$
7 800	210	0.3

表 2 T300/环氧树脂层合板的材料参数

Tab. 2 Material parameters of T300/epoxy resin

参数	数值	参数	数值
$E_1 / \text{GPa}$	128	$X_c / \text{GPa}$	0.870
$E_2 / \text{GPa}$	8.7	$Y_c / \text{GPa}$	0.198
$\nu_{12}$	0.32	$Z_c / \text{GPa}$	0.198
$G_{12} / \text{GPa}$	4	$S_{12} / \text{GPa}$	0.104
$G_{13} / \text{GPa}$	4	$S_{23} / \text{GPa}$	0.086
$G_{23} / \text{GPa}$	4	$W_{xt} / \text{J}$	740
$X_1 / \text{GPa}$	2.09	$W_{xc} / \text{J}$	440
$Y_1 / \text{GPa}$	0.05	$W_{yt} / \text{J}$	20
$Z_1 / \text{GPa}$	0.05	$W_{yc} / \text{J}$	80

不同冲击能量下对应的钢球初始速度如表 3 所示。

表 3 冲击参数

Tab. 3 Impact parameter

速度 $V / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.765	2.500	3.090	3.536	3.952
能量 $E / \text{J}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

在 ABAQUS 中对 CFRP 层合板和钢球分别进行建模,由于低速冲击过程中,冲击钢球变形很小,因此分析中将其设置成刚体。将钢球和 CFRP 层合板模型进行装配,形成一个完整的装配体模型,为节省计算时间,此处将钢球和层合板表面之间的距离设置成 0 (临界接触位置),以便于分析时更快进入冲击接触状态。将层合板的两端进行约束,并在冲击钢球上施加一个垂直于层合板的初始速度,在分析中通过改变初始速度来进行不同冲击能量下的分析。选用单元 S4R 和 C3D4 对层合板和冲击钢球进行网格划分,有限元网格划分模型如图 1 所示。

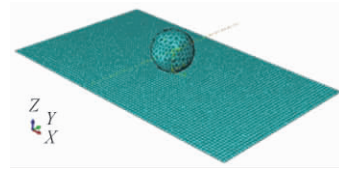


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element analysis model

### 1.2 有限元分析结果

分析时选取 0.1 J、1.765 m/s 的冲击等级,设置分析时间为 1 ms,观察层合板在低速冲击作用下的响应过程。在 ABAQUS 中查看冲击过程中应力波在层合板中的传播过程,选取典型时刻来分别查看  $0^\circ$  层和  $90^\circ$  层的应力情况,如图 2 所示。从图 2 可以看到,应力波在层合板内部是沿着纤维方向进行传播的。冲击过程中系统的动能和内能时间历程曲线,如图 3 所示。

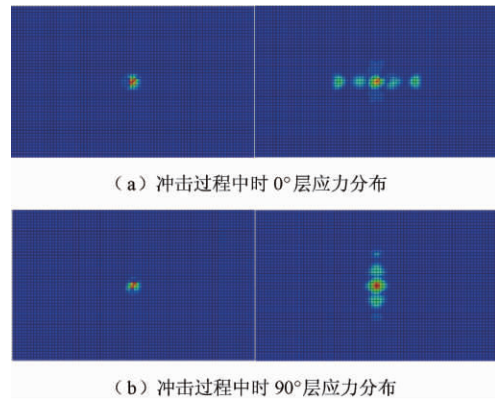


图 2 应力波传播方向

Fig. 2 Direction of propagation of stress wave

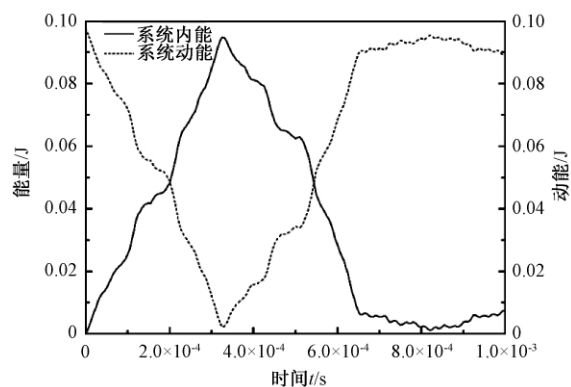


图3 冲击过程中系统能量的时间历程曲线

Fig.3 Energy-Time curve during impact

冲击过程中的系统动能来自于冲击钢球,因此图3中的动能曲线所反映的是冲击钢球在冲击过程中动能的变化。从图3可以看到,动能曲线先下降到达一个谷底,然后上升,最后趋于平稳,这表明:在1 ms的分析时间内冲击钢球与层合板完成冲击接触。反映的实际情况是钢球以一定冲击速度与层合板表面接触,在层合板的阻挡下,速度降低直至0,冲击钢球的动能转化为层合板的内能,随后层合板内能又转化为钢球的动能,从而使得冲击钢球反弹,最终与层合板脱离接触。从动能曲线可以看出,曲线趋于稳定后的动能要小于冲击开始时候的动能,可知在冲击接触的过程中,层合板吸收了一部分的动能。

不同冲击能量下,CFRP层合板中间层(ply-5)中的最大应力值,如图4所示。从图4可以看出,在0.1 J~0.5 J范围中,随着冲击能量的增加,层内的最大应力值呈增大趋势。

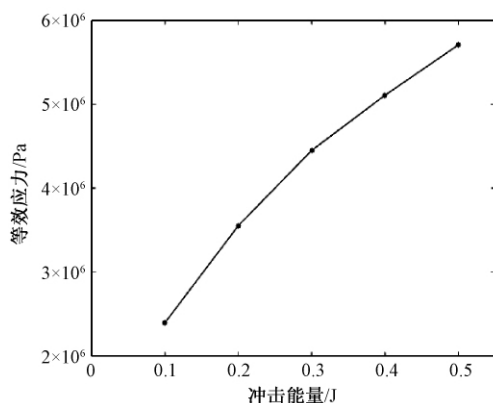


图4 不同能量下 ply-5 层中的最大应力

Fig.4 Mises in ply-5 under different impact energy

## 2 CFRP 层合板低速冲击实验研究

### 2.1 CFRP 层合板低速冲击实验

实验件选用 T300 12K 碳纤维单向布作为纤

维增强体,M03 环氧树脂作为基体,层合板尺寸为 160 mm × 100 mm,铺层方案  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ ,将 FBG 传感器沿着纤维方向埋置在中间层处,如图5所示,光栅位置距板材中心 10 mm. 实验件一共 3 个,如图6所示。

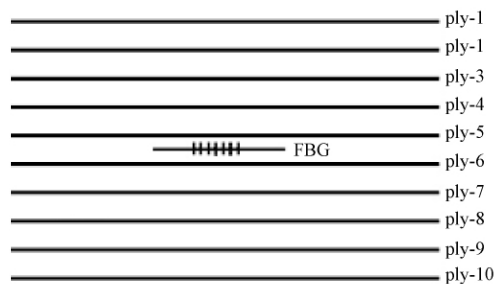


图5 FBG 埋放位置

Fig.5 The FBG embedding position

将1#实验件的两端固定,使层合板的几何中心正对着冲击钢球的正下方;将 FBG 传感器通过光纤跳线与解调仪相连,然后通过网线与电脑相连;打开解调仪软件,观察能否获得 FBG 传感器的波长信号,并记录传感器初始波长数据;最后将冲击钢球按照表4中编号1~5依次调整到对应高度来对层合板进行冲击,同时采集冲击过程中的波长信号;按照同样的方法完成其他两个实验件的冲击,并保存波长信号。具体实验参数见表4。

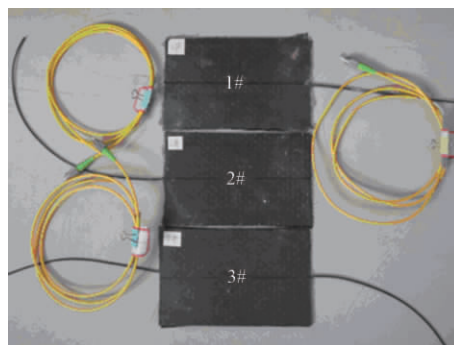


图6 3组层合板实验件

Fig.6 Three pieces of laminate specimens

表4 冲击实验参数

Tab.4 Parameters of impact experiment

编号	高度/m	接触时的速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	冲击能量/ J
1	0.159	1.765	0.1
2	0.319	2.500	0.2
3	0.478	3.090	0.3
4	0.638	3.536	0.4
5	0.797	3.952	0.5

## 2.2 实验结果与分析

对FBG传感器上采集的中心波长信号进行分析,光纤光栅解调仪的采样频率为4 000 Hz.图7所示的是在0.1 J能量冲击下,1#实验件中的FBG传感器中心波长的变化.

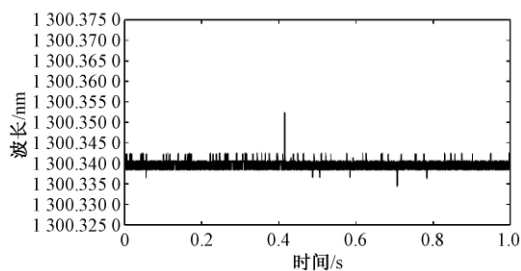


图7 1#实验件中FBG中心波长的变化

Fig.7 Wavelength shift in FBGs embedded in specimen 1#

由图7可知,在冲击钢球与层合板冲击的瞬间,FBG传感器的中心波长会出现一个峰值,波长峰值与初始波长的差值为波长偏移峰值,峰值过后,波长会出现回落.这表明在冲击瞬间,冲击点处的接触力所产生的应力波会引起了CFRP层合板内部的微变形,当应力波传播到传感器所埋置的位置时,这种微变形就会导致传感器发生微应变,从而使得FBG传感器的中心波长发生偏移.这表明传感器能够准确的捕捉到瞬间的冲击信号.

在0.1 J~0.5 J能量冲击下,3个实验件中的FBG传感器的波长偏移峰值如图8中所示.

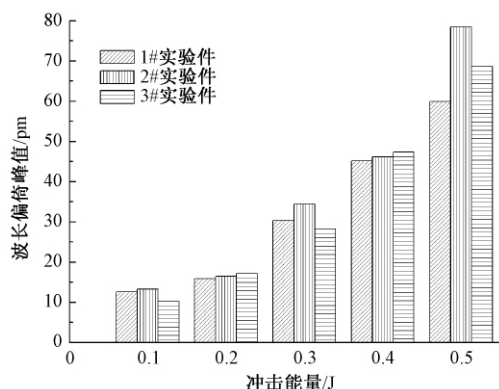


图8 3个实验件波长偏移峰值

Fig.8 Wavelength shift in FBGs embedded in 3 specimens

从图8中可以得出,0.1 J~0.5 J范围内,随着冲击能量的增加,3个实验件中传感器波长偏移峰值均呈现出逐渐增大的趋势,可见FBG传感器中心波长的偏移峰值与冲击能量的大小有关,FBG传感器中心波长的偏移峰值能反映冲击能量的大小.

根据FBG传感器的原理<sup>[11]</sup>,在忽略温度对光栅中心波长影响的情况下,FBG传感器中心波长的偏移量与FBG传感器布置点的应力成正比,从图8可以得出,随着冲击能量的增加,FBG传感器中心波长偏移峰值增大,FBG传感器布置点的层内最大应力值呈增大趋势,从而验证了图4所得的结论.

实验中1#、2#、3#实验件在同种冲击能量作用下,3个传感器的波长偏移峰值出现了一定的差异,经过分析,原因为3个实验件自身质量差异以及固化过程中存在残余应力.

## 3 结论

笔者将ABAQUS仿真和层合板低速冲击响应实验结合分析得到以下结论:

(1) 应力波在层合板内部是沿着纤维方向进行传播的;

(2) 埋置在CFRP层合板中的FBG传感器能够准确的捕捉到瞬间冲击信号,随着冲击能量增加,层内最大应力值呈增大的趋势,中心波长偏移峰值也随之增大.中心波长偏移峰值的大小可以反映冲击能量的大小,在层合板没有受到损伤之前,波长偏移峰值越大,冲击能量越大.

这为以后应用FBG传感器监测CFRP低速冲击损伤奠定基础,为构建FBG传感网络进行CFRP冲击损伤判定提供依据.

## 参考文献:

- [1] 崔海坡,温卫东,崔海涛. 复合材料层合板冲击损伤及剩余强度研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(3): 466-472.
- [2] 李成,郭文辉,铁瑛. 采用流固耦合方法的复合材料层合板鸟撞分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 76-79.
- [3] 李成,马志垒,王永涛. 冲击荷载下防弹钢板三维损伤分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(4): 85-88.
- [4] TSUDA H, LEE J R. Strain and damage monitoring of CFRP in impact loading using a fiber Bragg grating sensor system[J]. Composites science & technology, 2007, 67(7-8): 1353-1361.
- [5] TAKEDA S, AOKI Y, NAGAO Y. Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors[J]. Composite structures, 2012, 94(3): 813-819.
- [6] 谷广伟,王庆涛,李炜. FBG监测层合板低速冲击损伤研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(4): 31-34.

- [7] 武雪, 李炜. 基于 FBG 的复合材料成型与冲击监测研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(5): 9-12.
- [8] 陆观, 徐一鸣, 邱自学, 等. 基于光纤传感技术的复合材料板低速冲击信号方向判别[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(12): 90-92.
- [9] WANG W J, SONG H, GUO W, et al. Mechanical properties of composites with embedded FBG sensors in manufacturing engineering[J]. Advanced materials research, 2012, 583: 263-267.
- [10] ASTM D7136-07. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event[S]. 2007.
- [11] 赵勇. 基于光纤光栅传感器的复合材料层合板冲击能量研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 24-25.

## Monitoring of CFRP Laminates under Low Velocity Impact Based on FBG Sensors

HU Yefa, WANG Bin, ZHANG Jinguang, SONG Chunsheng, XU Shiwei

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In this paper, ABAQUS was used to simulate the response of carbon fiber composite laminates under low velocity impact. It was found that with the increase of the impact energy, the maximum stress of each layer increased. By using the characteristic that the center wavelengths of FBG sensors in composite material structure were determined by stress, the experiment used the embedded FBG sensors to monitor the response of low velocity impact. By analyzing the center wavelength captured by optic fiber grating demodulator, the relationship between the impact energy and the peak wavelength shift of sensors was found. Experimental results showed that, the embedded FBG sensors were able to accurately capture the transient impact signal and the peak wavelength shift of sensors could determine the size of the impact energy. With the increase of the impact energy, the peak wavelength shift increases as well as the maximum stress of layer.

**Key words:** CFRP laminate; response of low velocity impact; FBG sensors; finite element analysis; impact energy

(上接第 76 页)

## Component Design on Telescope with 1 m-Caliber Space Camera

LU Xiaoming<sup>1,2</sup>, JIA Jianjun<sup>1,2</sup>, ZHOU Chenglin<sup>1</sup>, FANG Yongyong<sup>1</sup>, XIE Yong<sup>1</sup>

(1. The Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. School of Physical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To study the performance consistence of the large-caliber telescope, the main 1m-caliber telescope was structure-designed and analyzed to achieve the comprehensive result. The materials of the main telescope were selected by comparing the materials' nature, and light-weight design was performed. After choosing the supporting scenarios of the main telescope and preparing case models, we proceeded modal analysis to the main telescope parts, and verified supporting materials. Last, we conducted the gravity-transformative and thermal analysis on the main telescope. The weight of the main telescope was reduced to 76 kg with a light-weight ratio of 77%. The simulation results indicated that the *RMS* of axial and radial direction of the specular were 8.9 nm and 3.5 nm respectively. After performing optimal design viai Sight, the radial self-weight deformation *RMS* of the primary mirror was improved to 3.3 nm, decreased 5.7% comparing with the *RMS* before optimization. When the temperature of main specular body reached  $20 \pm 0.3$  °C, the *RMS* was 10.1 nm, which satisfied the surface figure accuracy of the telescope.

**Key words:** large-caliber telescope; main telescope; light-weight; whiffle tree support; gravity transformation; optimal design; thermal transformation

# 大型竖式还原罐壁面温度分布特性研究

车玉思<sup>1,2</sup>, 王成铎<sup>2</sup>, 孙玉福<sup>2</sup>, 杨沛胥<sup>1,2</sup>, 张少军<sup>1,2</sup>

(1. 郑州大学 河南省资源与材料工业技术研究院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 根据传热学理论提出一种计算方法, 用来研究大型竖式还原罐轴向传热和温度分布特性. 结果表明: 在内外绝热段, 还原罐壁温沿高度方向呈线性递减规律; 在自然对流换热段, 还原罐壁温沿高度方向呈非线性递减, 温度下降速率逐渐减小, 但在壁厚减小处, 温度下降速率出现突变. 通过与数值模拟计算及现场实测温度对比, 进一步验证了该计算方法的正确性. 根据还原罐温度分布特性曲线, 可得到罐体关键部位的温度, 为解决还原罐材质的选择、还原罐的设计、罐体连接处密封材料的选择等实际工程问题提供参考依据.

**关键词:** 竖式还原罐; 传热; 温度分布; 计算流体动力学

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.005

## 0 引言

目前, 世界原镁主要由中国的皮江法工艺生产, 该工艺的主要缺点是依靠人工加料出渣、能耗高、技术装备落后. 为此, 国内外有研究人员开发了竖式还原罐法炼镁, 依靠球团自身重力实现自动化排渣. 如 Yu 等<sup>[1]</sup>开发了一种从上部加料、出渣的竖式还原罐; 任玲等<sup>[2]</sup>设计了一种内外嵌套的竖式套罐结构. 竖式还原罐工作时长时间处于高温和负压状态, 还原罐寿命短, 不仅影响生产, 还会增加成本. 从竖式还原罐的结构可知, 结晶段与过渡段通过法兰连接, 法兰面的温度决定了密封材料的选择与密封性能的优劣, 法兰面的温度至关重要. 同时, 还原罐在靠近冷端部分容易在 500~800℃ 时析出  $\sigma$  有害相导致产生密集裂纹<sup>[3]</sup>, 破坏罐体, 若能在还原罐上准确找出  $\sigma$  相析出段, 并采取相应措施, 可有效提高还原罐寿命. 为此, 笔者通过理论计算与数值模拟结合的方法对竖式还原罐沿轴向的传热和温度分布特性进行了研究.

## 1 竖式还原罐结构及计算模型

### 1.1 竖式还原罐实际结构

竖罐法是基于皮江法工艺开发, 工作时罐内

绝对压强低于 20 Pa, 反应温度通常维持在 1 180~1 200℃<sup>[4]</sup>, 其核心装备还原罐如图 1(a) 所示, 实现从上部自动加料, 下口自动出渣. 图 1(b) 给出了竖式还原罐过渡段的结构, 由圆管、锥形管和法兰组成. 罐壁内侧和法兰端面以上部分视为绝热, 圆管底端面温度为 1 200℃. 圆管下部高 532 mm 的一段外侧面处于绝热, 其余侧面处于大气环境下.

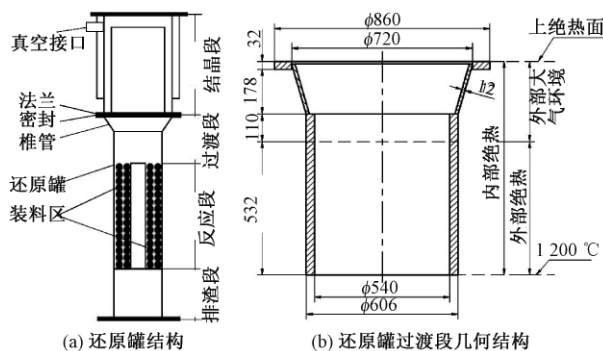


图 1 竖式还原罐

Fig.1 Vertical reduction pot

### 1.2 计算模型简化

由于还原罐壁厚远小于轴向高度, 沿径向方向的温度梯度可忽略不计, 可认为热量传递属于沿轴向的一维导热问题.

收稿日期:2017-10-03; 修订日期:2017-12-22

基金项目:国家重点研发计划重点专项项目(2016YFB0301001)

通信作者:张少军(1961—),男,宁夏中宁人,郑州大学教授,博士,主要从事原镁绿色冶炼及镁基新技术研究, E-mail: zhangshaojun@zzu.edu.cn.



若对锥形管和法兰部分进行合理简化,则可根据一维导热微分方程,并结合合理的边界条件求解整个部件的温度分布.为此,对还原罐进行如下简化:锥形管和法兰简化为与下部还原罐外径相同的圆管,如图2所示.

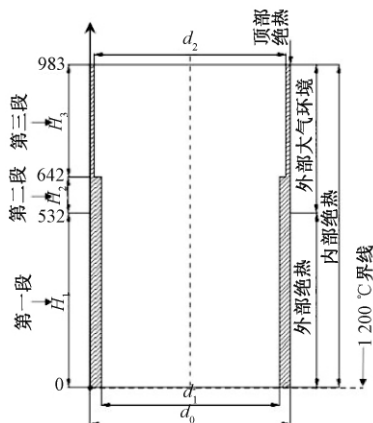


图2 简化后的物理模型

Fig.2 Simplified physical model

由于对流换热量与换热面积关系密切,故保持简化后的模型中对流换热面积不变,简化后上部圆管外径为 $d_0$ ,内径为 $d_2$ ,高度为 $H_3$ ;下部圆管保持不变,外径为 $d_0$ ,内径为 $d_1$ ,下部圆管绝热段高度为 $H_1$ ,对流换热段高度为 $H_2$ .其中, $d_0 = 606 \text{ mm}$ , $d_1 = 540 \text{ mm}$ , $d_2 = 582 \text{ mm}$ , $H_1 = 532 \text{ mm}$ , $H_2 = 110 \text{ mm}$ , $H_3 = 341 \text{ mm}$ .

## 2 竖式还原罐壁温分布的解析解

根据图2中的简化模型,在还原罐竖直方向 $z$ 建立一维导热微分方程,并依边界条件的不同分为三段:第一段 $H_1$ ( $z=0$ 至 $z=532 \text{ mm}$ )的底端温度 $1200 \text{ °C}$ ,壁厚 $33 \text{ mm}$ ,内外罐壁绝热;第二段 $H_2$ ( $z=532 \text{ mm}$ 至 $z=642 \text{ mm}$ )壁厚 $33 \text{ mm}$ ,内壁绝热,外壁参与对流换热;第三段 $H_3$ ( $z=642 \text{ mm}$ 到 $z=983 \text{ mm}$ )壁厚 $12 \text{ mm}$ ,内壁绝热,外壁参与对流换热.

### 2.1 平均自然对流换热系数和换热量的计算

还原罐壁的温度分布规律由对流换热量决定,而对流换热量取决于第二段和第三段壁面的平均对流换热系数.笔者先假定对流换热段壁面的平均温度,并依此确定定性温度下空气的物性,根据此条件计算还原罐壁面温度分布,然后对假定壁面温度进行校核,直至迭代计算的对流换热段壁面平均温度与假定温度吻合.

假设参与自然对流的管壁平均温度为 $t_x = 405 \text{ °C}$ ,大气温度定为 $t_k = 20 \text{ °C}$ ,则计算所用空气

的定性温度 $t_m$ 为:

$$t_m = (t_x + t_k) / 2 = (405 + 20) / 2 = 212.5 \text{ °C}.$$

由此定性温度查找对应空气的各项参数:导热系数 $\lambda_m = 0.03768 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ,运动黏度 $\nu = 37.565 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,普朗特数 $Pr = 0.6792$ .

格拉晓夫数的计算公式如下:

$$Gr = g\beta\Delta t l^3 / \nu^2, \quad (1)$$

式中: $g$ 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $\beta$ 为容积膨胀系数, $\beta = 1/(273 + t_m)$ , $1/\text{°C}$ ;  $\Delta t$ 为换热温差, $\Delta t = t_x - t_k$ , $\text{°C}$ ;  $l$ 为自然对流段定性高度(取计算模型中对流换热段高度), $\text{m}$ .

由公式(1)可计算格拉晓夫数为:

$$Gr = \frac{9.8 \times (405 - 20) \times (0.341 + 0.11)^3}{(37.565 \times 10^{-6})^2 \times (273 + 212.5)} = 5.05 \times 10^8 < 3 \times 10^9.$$

查文献[5]可知,此情况属于层流换热,而努赛尔数的计算公式为:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n, \quad (2)$$

其中, $C$ 取 $0.59$ ;  $n$ 取 $0.25$ .

根据公式(2)计算努赛尔数为:

$$Nu = 0.59 \times (5.05 \times 10^8 \times 0.6792)^{0.25} = 80.3.$$

则平均自然对流换热系数为:

$$h_m = \frac{Nu \cdot \lambda_m}{l} = \frac{80.3 \times 0.03768}{0.341 + 0.11} = 6.708 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}.$$

根据图2简化模型,可知总的对流换热面积 $A_z$ 为:

$$A_z = \pi d_0 (H_3 + H_2), \quad (3)$$

式中: $d_0$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 为已知数据.

则总的对流换热面积为:

$$A_z = \pi \times 0.606 \times (0.11 + 0.341) = 0.8586 \text{ m}^2.$$

则总的自然对流换热量 $\Phi$ 为:

$$\Phi = h_m A_z (t_x - t_k) = 6.708 \times 0.8586 \times (405 - 20) = 2217.59 \text{ W}.$$

### 2.2 第一段罐壁传热及温度分布特性分析

第一段为 $z=0$ 到 $z=532 \text{ mm}$ 还原罐部分,其底端面温度为 $1200 \text{ °C}$ ,假设在稳态时 $z=532 \text{ mm}$ 处壁面温度为 $T_1$ .此段的传热问题属于通过平壁的导热<sup>[6]</sup>,导热量 $\Phi_d$ 计算公式为:

$$\Phi_d = A_1 \frac{\lambda_s}{H_1} \Delta t_1, \quad (4)$$

式中: $A_1$ 为第一段还原罐的横截面积, $\text{m}^2$ ;  $\lambda_s$ 为还原罐材质的导热系数,取 $35 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ;  $\Delta t_1$ 为第一段还原罐上下两端面的温差, $\text{°C}$ .

根据第一段还原罐的内外径可计算横截面积 $A_1$ 为: $A_1 = d_0^2 - d_1^2 = (0.606^2 - 0.54^2) \cdot \pi/4 =$



0.059 4 m<sup>2</sup>.

第一段还原罐上下两端面的温差  $\Delta t_1$  可由如下公式计算:

$$\Delta t_1 = T_{ry} - T_1, \quad (5)$$

式中:  $T_{ry}$  为下部圆管底端面温度, 1 200 °C.

可得内外绝热段导热热量  $\Phi_d$  为:

$$\Phi_d = 0.059 4 \times \frac{35}{0.532} (1\ 200 - T_1) = 4\ 689.82 - 3.908\ 2 T_1. \quad (6)$$

由于还原罐对流换热处散失的热量都是由第一段热传导而来, 可得方程:

$$\Phi = \Phi_d. \quad (7)$$

解方程(7)得:

$$T_1 = (4\ 689.82 - 2\ 217.59) / 3.908\ 2 = 632.6\ ^\circ\text{C}.$$

则第一段还原罐壁面温度的分布公式为:

$$t_1 = z \cdot (T_1 - T_{ry}) / H_1 + T_{ry}, z \in [0, 0.532]. \quad (8)$$

把已知量代入公式(8), 得到第一段还原罐壁面的温度分布为:

$$t_1 = \frac{632.6 - 1\ 200}{0.532} z + 1\ 200 = -1\ 066.58z + 1\ 200, z \in [0, 0.532]. \quad (9)$$

### 2.3 第二段罐壁传热及温度分布特性分析

#### 2.3.1 温度场的数学描写

此段为圆筒, 圆柱坐标系下的导热微分方程为:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi}, \quad (10)$$

式中:  $\rho$ 、 $c$ 、 $\dot{\Phi}$  及  $\tau$  分别为微元体的密度、比热容、内热源及时间.

笔者研究的模型属于稳态导热且还原罐材质的导热系数、密度、比热容都可视为常数; 壁厚相比其直径可忽略, 故在径向方向可认为无温度梯度; 由对称性可知此段圆管在周向无热量传递. 根据以上结论, 式(10)可简化为:

$$\frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda_s} = 0, \quad (11)$$

轴向取长度为  $dz$  的微元段来分析. 参与对流换热的还原罐外壁周长设为  $P_1$ , 则此微元段对流散热量为:

$$\Phi_s = h_m (P_1 dz) (t - t_k). \quad (12)$$

此段还原罐横截面积为  $A_1$ , 则公式(11)中相应的折算源项为:

$$\dot{\Phi} = -\frac{\Phi_s}{A_1 dz} = -\frac{h_m P_1 (t - t_k)}{A_1}. \quad (13)$$

把公式(13)代入(11), 以此段底端为起点,

在高度  $H_2$  的区域建立第二段还原罐的温度场方程:

$$\frac{d^2 t}{dz^2} = \frac{h_m P_1 (t - t_k)}{\lambda_s A_1}, z \in [0, H_2]. \quad (14)$$

假设在高度  $z = H_2$  处壁面温度为  $T_2$ , 那么方程(14)的两个边界条件为:

$$\begin{cases} z = 0, t = T_1; \\ z = H_2, t = T_2. \end{cases} \quad (15)$$

#### 2.3.2 温度场的求解

由于第二段还原罐温度场的数学描写是关于温度  $t$  的二阶非齐次常微分方程, 为便于求解, 引入过余温度  $\theta = t - t_k$ , 可得关于过余温度的齐次方程, 整理方程(14)和边界条件(15)得:

$$\begin{cases} d^2 \theta / dz^2 = m_1^2 \theta; \\ z = 0, \theta = \theta_1 = T_1 - t_k; \\ z = H_2, \theta = \theta_2 = T_2 - t_k. \end{cases} \quad (16)$$

其中,

$$m_1 = \sqrt{\frac{h_m P_1}{\lambda_s A_1}} = \sqrt{\frac{4 h_m d_0}{\lambda_s (d_0^2 - d_1^2)}} = \frac{\sqrt{4 \times 6.708 \times 0.606}}{\sqrt{35 \times (0.606^2 - 0.54^2)}} = 2.478.$$

解方程(16)可得第二段还原罐壁面过余温度分布为:

$$\theta = \frac{\theta_1 e^{-m_2 H_2} - \theta_2}{e^{-m_2 H_2} - e^{m_2 H_2}} e^{m_2 z} + \frac{\theta_1 e^{m_2 H_2} - \theta_2}{e^{m_2 H_2} - e^{-m_2 H_2}} e^{-m_2 z}, \quad z \in [0, H_2]. \quad (17)$$

把已知数据代入方程(17)化简可得第二段还原罐的温度分布为:

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{(632.6 - 20) \times e^{-2.478 \times 0.11} - (T_2 - 20)}{e^{-2.478 \times 0.11} - e^{2.478 \times 0.11}} e^{2.478 z} + \\ &\quad \frac{(632.6 - 20) e^{2.478 \times 0.11} - (T_2 - 20)}{e^{2.478 \times 0.11} - e^{-2.478 \times 0.11}} e^{-2.478 z} + 20 \\ &= (-881.1 + 1.81 T_2) e^{2.478 z} + \\ &\quad (1\ 493.68 - 1.81 T_2) e^{-2.478 z} + 20, \\ &\quad z \in [0, 0.11]. \end{aligned} \quad (18)$$

### 2.4 第三段罐壁传热及温度分布特性分析

第三段罐壁温度场的分析与下部圆管对流换热段相同, 但该段还原罐横截面面积变为  $A_2$ , 边界条件亦有改变, 以此段底端为起点, 在高度  $H_3$  的区域建立第三段还原罐的温度场方程和边界条件为:

$$\begin{cases} d^2 \theta / dz^2 = m_2^2 \theta; \\ z = 0, \theta = \theta_2 = T_2 - t_k; \\ z = H_3, d\theta / dz = 0. \end{cases} \quad (19)$$

其中,

$$m_2 = \sqrt{\frac{h_m P_2}{\lambda_s A_2}} = \sqrt{\frac{4h_m d_0}{\lambda_s (d_0^2 - d_2^2)}} = \sqrt{\frac{4 \times 6.708 \times 0.606}{35 \times (0.606^2 - 0.582^2)}} = 4.04.$$

求解方程(19)可得第三段还原罐的温度分布为:

$$t_3 = \frac{T_2 - 20}{1 + e^{2m_1 H_1}} (e^{m_1 z} + e^{2m_1 H_1} e^{-m_1 z}) + 20 = (0.0599T_2 - 1.198)(e^{4.04z} + 15.69e^{-4.04z}) + 20, \\ z \in [0, 0.341]. \quad (20)$$

## 2.5 第二段与第三段连接处的传热分析及温度计算

实际的传热过程中,第二段与第三段连接处存在导热面积的突变,由能量守恒可知通过第二段顶端的导热量与通过第三段底端的导热量相同.

由式(18)可知,第二段还原罐在连接处,即 $z=0.11$  m 的导热量为:

$$\Phi_{z=0.11} = -\lambda_s A_1 (dt_1/dz)_{z=0.11} = -35 \times 0.0594 \times 2.478 \times [(-881.1 + 1.81T_2)e^{2.478 \times 0.11} - (1493.68 - 1.81T_2)e^{-2.478 \times 0.11}] = 11823.7 - 19.367T_2. \quad (21)$$

由公式(20)可得第三段还原罐在连接处,即 $z=0$  处的导热量为:

$$\Phi_{z=0} = -\lambda_s A_2 (dt_2/dz)_{z=0} = -35 \times 0.0224 \times 4.04 \times (0.0599T_2 - 1.198) \times (e^0 - 15.69e^0) = 2.7847T_2 - 55.69. \quad (22)$$

联立式(21)和(22)可求得第二段与第三段还原罐连接处的温度,即 $T_2$  的值:

$$\Phi_{z=0.11} = \Phi_{z=0} \Rightarrow T_2 = 536.3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

## 2.6 对流换热段的温度分布及平均壁温的校核

### 2.6.1 还原罐对流换热段的温度分布

把 $T_2=536.3$  °C 的值代入式(18),可得第二段还原罐的温度分布:

$$t_2 = 90.33e^{2.478z} + 522.25e^{-2.478z} + 20, \\ z \in [0, 0.11]. \quad (23)$$

把 $T_2=536.3$  °C 的值代入式(20),可得第三段还原罐的温度分布:

$$t_3 = 30.93e^{4.04z} + 485.33e^{-4.04z} + 20, \\ z \in [0, 0.341]. \quad (24)$$

### 2.6.2 对流换热段平均壁面温度校核

对流换热段还原罐壁面平均温度 $T_m$  为:

$$T_m = \frac{1}{H_2 + H_3} \left[ \int_0^{H_2} (90.33e^{2.48z} + 522.25e^{-2.48z} + 20) dz + \int_0^{H_3} (30.93e^{4.04z} + 485.33e^{-4.04z} + 20) dz \right] = 406.4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\int_0^{H_1} (30.93e^{4.04z} + 485.33e^{-4.04z} + 20) dz = 406.4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

此数值与计算所做假设初始值(405 °C) 的偏差在1% 以内,可认为对流换热壁面平均温度的假设初始值正确合理.

## 3 还原罐壁面温度分布的数值模拟

虽然文献[7]对还原罐进行罐内球团温度分布规律的研究,但没有涉及还原罐壁面的温度分布计算.为便于对竖式还原罐的温度分布进行解析解计算,将实际物理模型中锥形管和法兰简化为与下部还原罐外径相同的圆管.为验证简化模型的合理性,采用流体计算软件 FLUENT (6.3.26) 对两种模型壁面的温度分布分别进行数值模拟.

对于实际模型,还原罐底端面恒温为1200 °C,上部与空气进行自然对流换热.在圆柱坐标系下,还原罐体内部导热微分方程的通用形式如式(10)所示.实际模型可认为是稳态传热过程,且还原罐材质的密度、比热和导热系数视为常数,模型的轴对称性使温度在周向方向无梯度,尽管在解析解的分析求解中将对流换热以内热源的方式嵌入导热微分方程,但在本数值计算中对流换热作为边界条件,而还原罐体内部无内热源.基于这些分析,导热控制方程可简化为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (25)$$

边界条件为:①还原罐底端面恒温面, $z=0$ ,  $r \in [0.27, 0.33]$ ,  $t=1200$  °C;②还原罐内外绝热罐壁:  $\partial t / \partial r = 0$ ;③还原罐法兰顶端面为 $z=0.862$ ,  $r \in [0.36, 0.43]$ ,  $\partial t / \partial z = 0$ ;④还原罐对流换热壁面:  $-\lambda_s \frac{\partial t}{\partial r} = h_m(t - t_k)$ .

而对于简化模型,其边界条件与解析解计算相同,计算思路和导热控制方程与实际模型相同,只有顶端面的边界条件有所差别.

④还原罐顶端面:  $z=0.983$ ,  $r \in [0.291, 0.303]$ ,  $\partial t / \partial z = 0$ .

其中,对流换热段平均壁温选取 $t_x=405$  °C,对流换热系数为 $h_m=6.708$  W/(m<sup>2</sup>·K).

数值模拟的结果如图3所示.通过实际模型的数值模拟结果可知,对流换热段壁面平均温度为407 °C,与解析解求解的壁面平均温度相比,其偏差在1% 以内,证明了解析解的计算结果是合

理的.由图(a)可知,还原罐体温度在径向方向基本无温度梯度,说明解析解中忽略径向方向温度梯度是合理的.

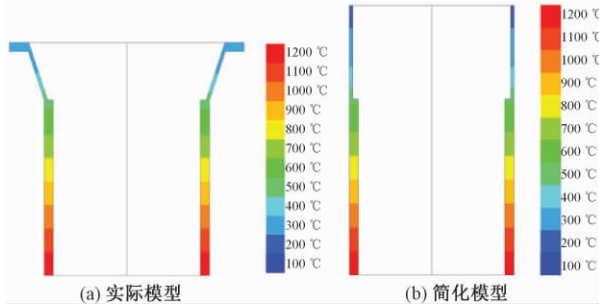


图3 还原罐模型的温度分布

Fig.3 Temperature distribution of the model of reduction pot

根据简化模型的数值模拟结果可得对流换热段壁面平均温度为409℃,该值与实际模型中数值计算模拟结果(407℃)相对误差小于1%,证明解析解计算中将实际物理模型中锥形管和法兰简化为与下部还原罐外径相同的圆管是合理的.

## 4 现场实测与结果分析

### 4.1 测量与计算结果对比

鉴于还原炉顶的实际工况及还原罐的结构,法兰面的温度相对容易测量,且受人为因素影响较小,故选取法兰面同一位置的实测温度与计算结果进行对比.用希玛AS872 A高温红外测温仪(量程为-25~1 180℃,精度为±2%,)测量了8支还原罐工作时法兰面的温度,测量结果如表1所示.从表1可以看出,法兰面的温度在222~240℃波动,其平均值为232℃.

表1 法兰面的实测温度

Tab.1 Measured temperature of flange surface

罐号	1	2	3	4	5	6	7	8
温度/℃	229	222	232	242	228	237	229	240

将求解的各段壁面温度分布公式进行适当的变换,可得到整个还原罐壁面在其高度方向上的温度分布:

$$t = \begin{cases} -1\,066.58z + 1\,200, z \in [0, 0.532]; \\ 90.33e^{2.478(z-0.532)} + 522.25e^{-2.478(z-0.532)} + 20, z \in [0.532, 0.642]; \\ 30.93e^{4.04(z-0.642)} + 485.33e^{-4.04(z-0.642)} + 20, z \in [0.642, 0.983]. \end{cases} \quad (26)$$

由该公式计算可得法兰端面的温度约为265℃,比实际测量温度(232℃)高出约12%.

经分析可知,出现偏差主要有以下几点:①测温当天气温与计算温度有偏差;②部分罐体受大气流动的影响,并非全部为自然对流换热;③测点在法兰侧面的高度不同造成的误差;④法兰面密封材料不能完全保证绝热;⑤红外测温枪的精度的影响;⑥炉膛温度与计算所用1 200℃有偏差.

### 4.2 计算结果分析

由公式(26)可以得到壁面温度在高度方向上的温度分布曲线,如图4所示,分析可得到以下规律:

(1) 还原罐第一段即内外绝热段的壁面温度随高度的增加呈线性下降趋势,该段属于一维平板导热问题,温度与高度呈线性关系.

(2) 还原罐第二段即圆筒对流换热段的壁面温度随高度的增加呈指数型函数下降.由于在单位高度内自然对流换热量因壁温的下降而减小,所以该段的温度下降速率在沿高度方向略有减小.因第二段的高度较小故温度下降速率减小的不太明显.

(3) 还原罐第三段即锥形管和法兰段的壁温分布规律与第二段相似,温度下降速率也逐渐减小;但第三段温度在初始阶段下降速率突然急剧增加,结合公式(13)可知,这是因为热量从第二段向第三段传导时,横截面积大幅减小,单位体积散热量急剧增加,造成局部温度快速下降.

从图4可以得出,温度为800℃的还原罐高度为 $z = 0.375$  m;温度为500℃的高度为 $z = 0.663$  m;由此可知,实际模型中锥管及锥管以下267 mm段的温度在500~800℃,故在该段材料的选择上应注意合金元素的配比<sup>[8]</sup>,防止 $\sigma$ 有害相的产生.法兰端面的温度计算为265℃,故法兰

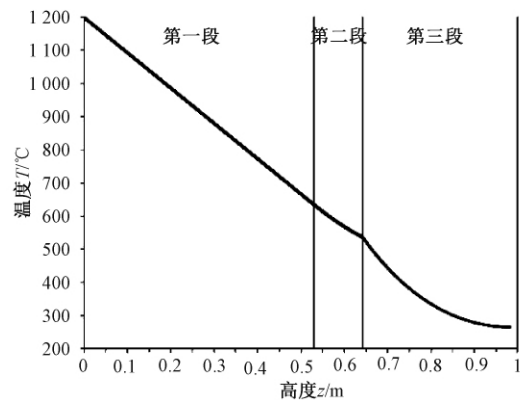


图4 还原罐壁面温度分布

Fig.4 Wall temperature distribution of reduction pot

连接处的密封材料耐温不得小于  $265\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]。

从图 4 还可以得出,锥管的平均温度大约在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,据此,笔者可以调整锥管的壁厚、结构尺寸、材质等,通过优化还原罐的设计,改善过渡段的受力情况,减小蠕变失稳对材料造成的破坏,从而提高锥管及还原罐的可靠性及使用寿命。

## 5 结论

(1) 还原罐过渡段的温度分布特性有如下特点:第一段(内外绝热段)的壁面温度随高度的增加呈线性下降趋势;第二段(圆筒对流换热段)的壁面温度随高度的增加呈指数型函数下降,下降速率在沿高度方向略有减小;第三段(锥形管和法兰段)的壁温分布规律与第二段相似,但在初始阶段温度下降速率突然急剧增加。

(2) 根据还原罐过渡段的温度分布曲线,可以得到关键部位的温度,为还原罐材料的选择、还原罐的设计、密封材料的选择等实际工程问题提供依据。

## 参考文献:

[1] YU A, HU H, LI N Y. Mathematical modelling of

magnesium reduction in a novel vertical Pidgeon process [J]. *Modelling and simulation in materials science and engineering*, 2002, 10: 413–423.

[2] 任玲,夏德宏,毕寒冰. 新型竖置镁还原罐的设计[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2012(2): 30–33.

[3] 夏兰廷. 防止炼镁还原罐耐热钢有害相的产生及高温性能的强化[J]. *中国铸造装备与技术*, 2009(6): 352–354.

[4] 徐日瑶. 硅热法炼镁生产工艺[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003: 374.

[5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

[6] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[7] LI R B, ZHANG S J, GUO L J, et al. Numerical study of magnesium (Mg) production by the Pidgeon process: impact of heat transfer on Mg reduction process [J]. *International journal of heat & mass transfer*, 2013, 59(1): 328–337.

[8] 闫浩,李艳,程艳芳. 一种新型炼镁还原罐制造技术[J]. *热加工工艺*, 2009(15): 153–155.

[9] 付平,常德功. 密封设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009, 332.

## Research of Wall Temperature Distribution of Large Vertical Reduction Pot

CHE Yusi<sup>1,2</sup>, WANG Chengduo<sup>2</sup>, SUN Yufu<sup>2</sup>, YANG Peixu<sup>1,2</sup>, ZHANG Shaojun<sup>1,2</sup>

(1. Henan Province Industrial Technology Research Institute of Resources and Materials, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** According to the theory of heat transfer, a calculating method was presented for investigate the heat transfer and temperature distribution along the axial direction of large vertical reduction pot. The results showed that the wall temperature of reduction pot decreased linearly with increase in altitude of the adiabatic section. In the heat transfer area, the wall temperature decreased in a nonlinear way with increase in altitude, the decreasing rate of which gradually declined, but the decreasing rate changed abruptly in the place of the declining thickness. And the method was further verified through comparative analyses of CFD and the field measured temperature. According to the reduction pot temperature distribution curve, the temperature of key part of the pot could be collected. This could provide reference for practical engineering to solve the problem of the reduction pot material selection, reduction pot design, sealing material of pot connection selection. These results could have certain engineering application value.

**Key words:** vertical reduction pot; heat transfer; temperature distribution; CFD

# 突发饮用水污染下的水阀和消防栓的调度研究

邹露, 颜雪松, 胡成玉

(中国地质大学(武汉) 计算机学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 研究在突发饮用水污染情况下, 如何对消防栓和水阀最优调度, 从而使得对用户造成的危害程度最小、同时调度成本最小, 但是, 这两个目标是互相矛盾的, 调度成本的减小必然导致污染水体对用户危害程度增加。因此, 首先建立了两目标优化模型, 其中, 第一个优化目标为污染事件发生后, 用户饮用的污染物质量最小; 第二个优化目标为对消防栓和水阀调度的成本最小; 然后以美国某小镇真实饮用水管网为研究对象, 利用 NSGA-II 算法求解最优的水阀和消防栓调度方案, 同时分析了不同参数对调度结果的影响, 仿真结果验证了本文所建立的多目标优化模型和调度算法的有效性。

**关键词:** 多目标优化; 消防栓; 阀门; 污染源; 配水系统

**中图分类号:** TP301.6 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.006

## 0 引言

目前, 对突发饮水污染下的供水管网中消防栓和水阀最优调度的研究成果较少, 文献[1]以消耗的污水体积最少为目标, 确定了水阀和消防栓的调度方案。考虑到水阀和消防栓的调度需要一定的成本消耗, 文献[2-4]在污染源可辨识的基础上, 建立了水阀和消防栓的多目标优化调度模型, 并利用 NSGA-II 算法求解。文献[5-7]在污染源不确定的情况下, 利用鲁棒优化方法对水阀和消防进行最优调度, 使得用户受到伤害的程度最低。文献[8]利用智能体算法求解突发饮用水污染下的应急调度策略。

笔者在前人研究工作的基础上, 建立了一种新的多目标优化模型, 第一个优化目标是 minimized 群众摄入的污染物质量, 第二个优化目标为最小化对消防栓及水阀的操作代价。区别于前人的工作, 笔者建立调度优化模型更加贴合实际应用。首先, 在优化模型中, 决策变量不仅包括对哪些水阀和消防栓进行操作, 而且还包括操作的具体时间。另外, 对水阀和消防栓的操作代价以距离的形式进行了定义, 也即从基站到需要操作的水阀或消防栓距离越远, 则操作代价越大。

## 1 水阀和消防栓多目标调度优化模型

图1显示了当发生污染事件后, 对水阀和消防栓不进行调度和进行调度两种不同情况下污染物扩散情况。

可见, 图(b)中污染物流经的管线(红色粗线路径)远比图(a)中要少, 这说明对水阀和消防栓的调度可以极大地减少污染区域, 降低对用户的危害程度。一般来说, 通过对水阀操作可以隔离被污染水体, 而对消防栓调度可以将被污染水体排放到管外, 从而更快恢复供水。

第一个优化目标是最小化用户摄入的污染物质量, 如式(1)所示:

$$\min f_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{t_{\text{end}}} C_{n,t}(x_h, x_v) Q_{n,t} \Delta t. \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{h \in H} x_h \leq H_{\max}. \quad (2)$$

$$\sum_{v \in V} x_v \leq V_{\max}. \quad (3)$$

$$x_h \in \{0, 1\}, x_v \in \{0, 1\}. \quad (4)$$

其中,  $f_{1a,i,t}(x_v, x_h)$  表示当污染事件  $a$  在节点  $i$  时刻  $t$  入侵后, 用户摄入的污染物质量;  $N$  为污染物流经的节点总数;  $C_{n,t}$  表示在节点  $n$  时刻  $t$  污染物浓度;  $Q_{n,t}$  表示节点  $n$  时刻  $t$  需水量;  $\Delta t$  表示仿真步长;  $x_v$  和  $x_h$  为阀门和消防栓控制变量,  $x_v = 1$  表

收稿日期:2017-09-06; 修订日期:2017-11-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61305087); 国家自然科学基金资助项目(61673354)

通信作者:胡成玉(1978—), 男, 湖北枣阳人, 中国地质大学副教授, 博士, 主要从事计算机算法理论研究, E-mail: huchengyu@cug.edu.cn.

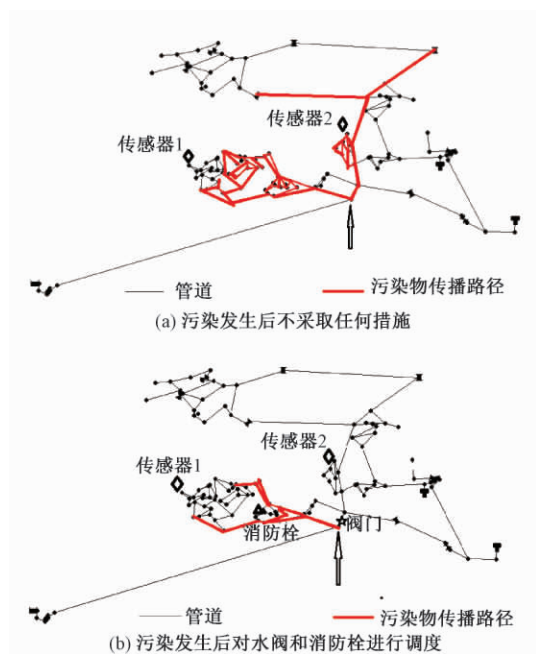


图1 当污染发生后,有无调度策略对污染物扩散的影响

Fig.1 When contaminant event occurred, closing the valves and opening the hydrants or not will have a great impact on the results

示关闭阀门,  $x_h = 1$  表示打开消防栓;  $H/V$  是消防栓和阀门的结合;  $H_{\max}/V_{\max}$  为消防栓和阀门的数量约束。

第二个优化目标操作水阀和消防栓所需要的代价,如式(5)所示:

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^p D(\text{valve}_k) + \sum_{j=1}^q D(\text{hydrant}_j). \quad (5)$$

式中:  $p, q$  为管网中需要操作的阀门和消防栓的次数;  $k$  为阀门索引;  $j$  为消防栓索引;  $D(\text{valve}_k)$  和  $D(\text{hydrant}_j)$  分别表示从基站出发到需要操作的阀门  $k$  或消防栓  $j$  的距离。

## 2 基于 NSGA-II 的多目标优化算法

### 2.1 编码和初始化种群

在算法实现中,种群每个个体由一条染色体组成,每个染色体包括多个基因,每个基因对应水阀或消防栓的状态,比如某个水阀  $V$  的状态表示为  $(S, T_{\text{begin}}, T_{\text{end}})$ . 其中  $S=1$  表示打开水阀,  $S=0$  表示关闭水阀,  $T_{\text{begin}}$  和  $T_{\text{end}}$  分别表示对水阀操作的开始时间和结束时间。

比如一个染色体表示为  $\{H_1(1, 4, 10), H_2(1, 7, 10), \dots, H_5(0, T, D), V_1(0, 3, 5), V_2(0, 2, 6), \dots, V_5(0, T, D)\}$ , 则表示消防栓  $H_1$  在 4 h 后打开,持续时间为 6 h 后关闭,消防栓  $H_2$  于 7 h 后打

开,持续 3 h 后关闭;阀门  $V_1$  和  $V_5$  分别在 3 h 和 2 h 后关闭,持续 2 h 和 4 h 后打开。

### 2.2 交叉和变异算子

为了产生新的种群,我们将旧的种群个体随机两两随机配对作为父代,并采用算数交叉,得到新的子代. 为了避免消防栓或阀门节点重复,则需要进行检查修正,若重复,则采用父代染色体替代. 然后对种群进行变异操作,对每个染色体随机选择某个基因位进行变异操作。

### 2.3 适应度函数评价

由式(1)可知,要计算消费者摄入的污染物质量,则需要计算污染物在任意节点的污染物浓度,我们利用美国环境保护署开源软件 EPANET 进行水力和水质仿真,获得管网中每个节点的污染物模拟浓度,然后结合每次的消防栓和水阀的状态,计算出式(1). 对于式(5),则根据基站的坐标位置以及需要操作的消防栓和阀门位置可计算出操作距离,以此作为操作代价。

## 3 实验仿真及分析

### 3.1 实验仿真和算法参数设置

以美国某城镇一个真实管网为对象,该管网包括 126 个节点和 168 条管道. 如图 2 所示,  $\Delta$  (索引为 20) 和  $\star$  (索引为 30) 分别代表基站位置和污染源入侵位置. 消防栓打开时水流速度设置为 170 GPM.

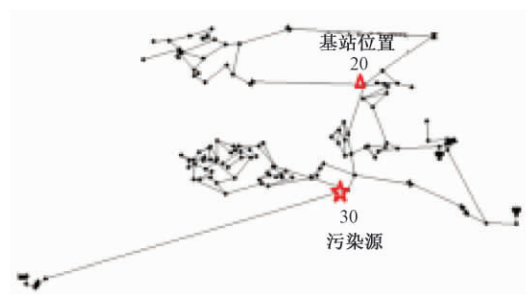


图2 美国某镇真实配水管网(126个节点,168条边)

Fig.2 Water distribution system in one town of USA, (126 nodes and 168 edges)

在 NSGA-II 算法设置中,一个染色体包含 10 个基因,分别对应 5 个阀门和 5 个消防栓,种群大小为 100,迭代次数为 50 次,交叉因子和变异因子分别为 0.9 和 0.02。

### 3.2 实验结果分析

由于该优化问题的最优 Pareto 前沿未知,但是从图 3 可以看出,随着演化代数的增加, Pareto 前沿逐渐收敛,这说明所建立的模型是有效的。



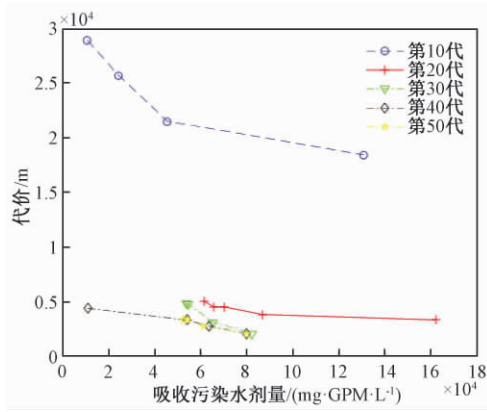


图3 不同演化代数下 Pareto 前沿

Fig.3 Pareto fronts at different evolution generations

实际上,有诸多因素会影响到 Pareto 前沿,比如污染事件发生的位置、基站位置、消防栓的冲刷速度(即消防栓的水流速度)都会导致 Pareto 前沿发生改变。

### 3.2.1 消防栓的水流速度对 Pareto 前沿的影响

在该实验中,假定消防栓的排放污水速度为 70GPM、170GPM 和 270GPM。

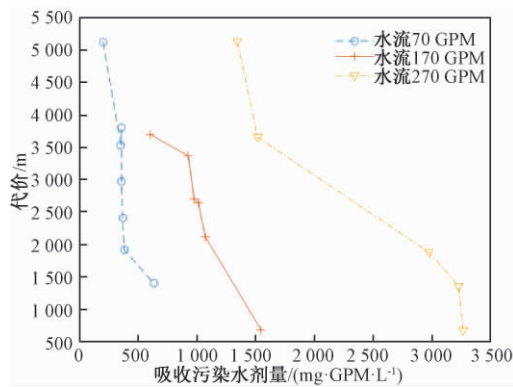


图4 消防栓流速不同对 Pareto 前沿的影响

Fig.4 Impact on Pareto fronts by different water flow rate of hydrants

由图4可看出,消防栓的流速为 270 GPM 时,Pareto 前沿并未收敛。而消防栓流速为 170 GPM 和 70 GPM 时,Pareto 前沿有交叉,说明这两种情况下 Pareto 解相对较好。由此可知,冲刷力度大并不一定能得到最优的结果。

### 3.2.2 基站位置对 Pareto 前沿的影响

当污染源位置已知即为固定时,基站位置到污染源的也会对结果产生影响,在这部分中,实验中分别假定基站位置位于编号为 15、8、20 号节点处,而污染事件发生在 30 号节点处,其中,位于 20 号节点的基站离污染源最近,位于 15 号节点的基站离污染源距离最远。

由图5可以看出,基站位置对 Pareto 前沿有

一定的影响,当基站位置不同时,Pareto 前沿都有交叉,这也说明了算法具有一定的鲁棒性。

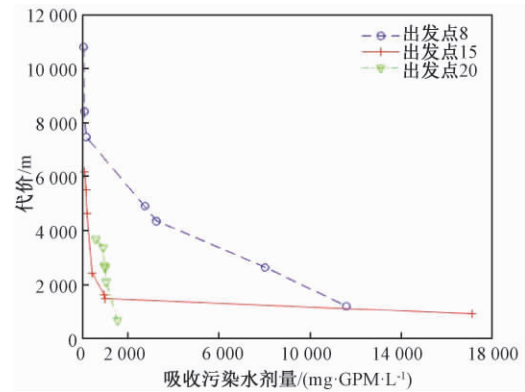


图5 基站到污染事件的距离不同对 Pareto 前沿影响

Fig.5 Impact on Pareto fronts by the distance from base station to source of contamination

### 3.2.3 污染源位置对调度的影响

当污染事件发生在不同的节点处,其对管网的污染路径也是不同的,因此,需要进一步分析污染事件发生的位置对 Pareto 前沿产生影响。在仿真实验中,假定污染事件可能发生在 30 号节点,32 号节点以及 57 号节点。

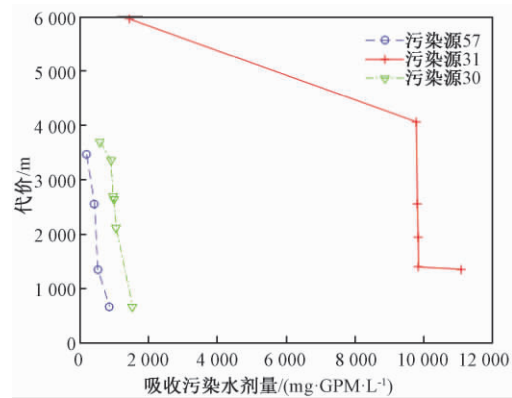


图6 不同的污染源位置对 Pareto 前沿影响

Fig.6 Impact on Pareto fronts by different location of contaminant source

由图6可以看出,当污染源位置为 31 时,Pareto 前沿相对较差;而污染源位置位于 57 时,Pareto 前沿较好。其原因在于与 31 号节点相连的边有 4 条,与 30 号节点相连的边有 3 条,而与 57 号节点相连的边仅有 2 条,因此,相连的边数越多,则污染物传输分支越多,其分流路径更为复杂,导致了 Pareto 解搜索的难度就相应增加。

## 4 结论

配水系统的预警与应急反应关系到国计民生,本文首先建立了一个两目标优化模型,然后利用多目标遗传算法 NSGA-II 进行求解,并分析了



污染源位置,消防栓的冲刷速度和基站位置对算法仿真结果的影响.

目前的研究工作都是面向小规模管网,实际上,大多数水管网的规模比较巨大,而水质传感器的布置数量相对较少,因此很难通过传感器采集的信息确定污染发生的精确位置,这样,在不确定环境下对水阀和消防栓调度研究是一个挑战性课题,这也是我们未来的研究方向.

### 参考文献:

- [1] POULIN A, MAIHOT A, GRONDIN P, et al. Optimization of operational response to contamination in water networks [C] // Proceeding of Water Distribution System Analysis Symp. Cincinnati, Ohio: ASCE Press, 2006.
- [2] BARANOWSKI T. M, LEOEUF E J. Consequence management utilizing optimization [J]. Journal of water resources planning and management, 2008, 134(4): 386–394.
- [3] PREIS A, OSTFELD A. Multiobjective contaminant response modeling for water distribution systems security [J]. Journal of hydroinformatics, 2008, 10(4): 267–274.
- [4] ALFONSO L, JONOSKI A, SOLOMATINE D. Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks [J]. Journal of water resources planning and management, 2010, 136(1): 48–58.
- [5] PREIS A, OSTFELD A. Genetic algorithm for contaminant source characterization using imperfect sensors [J]. Civil engineering and environmental systems, 2008, 25(1): 29–39.
- [6] GAVANELLI M, NONATO M, PEANO A, et al. Genetic algorithms for scheduling devices operation in a water distribution system in response to contamination events [C] // Proceedings of 12th Euro Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Malagaspain: Springer, 2012: 124–135.
- [7] RASEKH A, BRUMBELOW, K. Drinking water distribution systems contamination management to reduce public health impacts and system service interruptions [J]. Environmental modelling & software, 2014, 51: 12–25.
- [8] ZECHMAN E M. Integrating evolution strategies and genetic algorithms with agent-based modeling for flushing a contaminated water distribution system [J]. Journal of hydroinformatics, 2013, 15: 798–812.

## Research on Dispatching Algorithm of Valves and Hydrants under Sudden Drinking Water Pollution

ZOU Lu, YAN Xuesong, HU Chengyu

( College of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper, this study mainly focused on how to operate hydrants and valves to reduce the impact and operation cost under sudden drinking pollution. However, the two goals of impact and operation cost were in conflict. Therefore, a two-objective optimization model was proposed, one goal was to minimize the consumed contaminated water, the other is to minimize the operation cost, and then a real water distribution system in a town of USA was employed and Pareto solutions were given by NSGA-II, at the same time, an comprehensive analysis of different factors was conducted. The simulation results showed the effectiveness of the proposed multi-objective optimization model and scheduling algorithm.

**Key words:** multi-objective optimization; hydrant; valve; contaminant source; water distribution system

# 《郑州大学学报(工学版)》征稿简则

## 1. 刊登内容

本刊主要刊登机械、电气、信息、水利、化工、土木、交通、材料、环境工程等学科领域的学术论文。

## 2. 投稿要求

(1) 原创性论文,有创新性,主题明确、结构完整、论据可靠、论证合理、层次分明、逻辑严密、文字精炼、可读性强。

(2) 投稿具有合法性,不存在抄袭、剽窃、侵权等不良行为;来稿未在任何正式出版物上公开发表过,不允许一稿多投。

(3) 请严格遵守国家有关保密规定,不泄漏国家机密。

(4) 稿件请用 Word 编辑排版,若系基金资助课题,请在首页地脚处注明(包括项目编号)。

(5) 文稿格式要求规范、项目齐全,按顺序给出:题目(一般不超过 20 字),作者(包括工作单位含二级机构、邮编),摘要(包括研究的目的、方法、结果和结论四要素,200~300 字,内容应具体、准确,切忌空洞和主观评价),关键词(3~8 个),中图分类号,正文(包括图、表,6000 字左右为宜),参考文献,英文信息(摘要与中文摘要一一对应,包括英文题目、作者姓名、单位、地址、邮编及关键词),并在首页地脚处注明第一作者和/或通信作者简介(包括出生年、性别、籍贯、职称、学位、研究方向、电子邮箱和电话)。

(6) 物理量的符号和法定计量单位必须符合国家标准、国际标准。例如,物理量的符号用斜体,单位要用正体;矩阵、向量、矢量、张量等,用黑斜体表示。

(7) 文中图、表只附必要的,图、表应有中、英文图题和表题,小图、表宽度不超过 75 mm,大图、表宽度 120~150 mm;插图的纵、横坐标的标目(物理量的符号和单位)要齐全;表格采用三线表。应按标准方式标注,如:时间的标注方式应为  $t/s$  或  $t/min$  或  $t/h$ ,速度的标注方式应为  $v/(m \cdot s^{-1})$ 。

(8) 参考文献须在文中标引,并按在文中引用的次序排序;按照 GB/T 7714—2015 著录:

期 刊 [序号] 作者. 题名[J]. 刊名,年,卷(期):起止页码.

专 著 [序号] 作者. 题名[M]. 出版地:出版社,出版年:起止页码.

学位论文 [序号] 作者. 题名[D]. 保存地:保存单位(包括二级学院/系),年份.

论文集 [序号] 作者. 题名[C]. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

析出文献 [序号] 作者. 题名[C]//源文献. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

标 准 [序号] 起草单位. 标准编号 标准名称[S]. 出版地:出版社,出版年.

专 利 [序号] 专利所有者. 题名:专利号[P]. 日期.

电子文献 [序号] 作者. 电子文献题名[J/OL]. 刊名,年,卷(期):起止页码. 发表或更新日期/引用日期(任选). 电子文献的出版或可获得地址.

## 3. 投稿方法

请登录《郑州大学学报(工学版)》网站(<http://www.zdxbgxb.com>)进行在线投稿(需要先注册)。同一篇稿件只需投稿一次,以免系统给出多个编号,如果要修改请登录按照提示提交修改稿。若需查询稿件处理状况,请通过“作者登录”进行查询。

## 4. 作者须知

本刊实行三审制,双盲式同行评议。一般审稿周期为 6 周左右,论文刊发以后给作者赠送当期样刊。本刊已经加入“中国知网”、“万方数据——数字化期刊群”等数据库和检索机构,所付作者稿酬中已包含其著作权使用费,不再另付。如作者不同意,请在来稿时说明,本刊将做适当处理。本刊编辑部使用“科技期刊学术不端文件检测系统”,请作者规范投稿,维护自身及期刊的良好声誉,如果造成“重复发表”,将择期发出撤消论文通告,并在今后 5 年内拒收来稿,通报作者单位,取消论文效用。

## 5. 联系地址

通信地址:(450001) 郑州市高新区科学大道 100 号郑州大学学报(工学版)编辑部

联系电话:0371—67781276 / 67781277, E-mail: gxb@zzu.edu.cn