

- 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

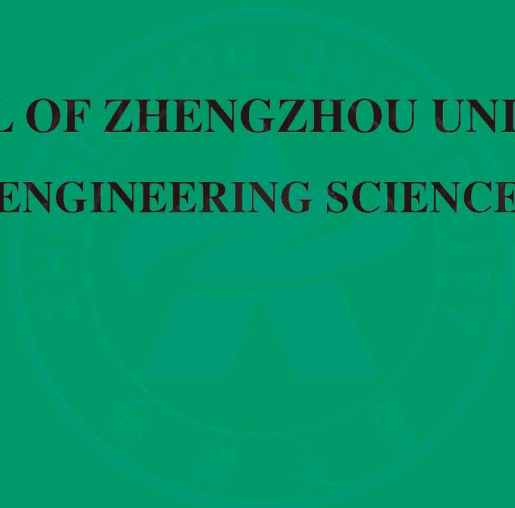
CN 41-1339/T

CODEN ZDXGAN

郑州大学学报

工学版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE



2018.6

第39卷 第6期

Vo1.39 No.6

2018年11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 凌(清华大学)

王忠勇(郑州大学)

公茂果(西安电子科技大学)

叶国田(郑州大学)

刘国际(郑州大学)

刘春太(郑州大学)

许 群(郑州大学)

李 杰(同济大学)

吴泽宁(郑州大学)

张 涛(北京航空航天大学)

陈伟能(华南理工大学)

陈德良(郑州大学)

单崇新(郑州大学)

贾 瑜(郑州大学)

郭院成(郑州大学)

梁 静(郑州大学)

董 林(郑州大学)

臧双全(郑州大学)

王亚明(郑州大学)

王宗敏(中原工学院)

左其亭(郑州大学)

刘 波(中国科学院数学与系统科学研究院)

刘金盾(郑州大学)

关绍康(郑州大学)

麦立强(武汉理工大学)

李勇平(上海应用物理所)

张 冰(郑州大学)

张少军(郑州大学)

陈静波(郑州大学)

庞新厂(郑州大学)

赵明皞(郑州大学)

高丹盈(河南工程学院)

唐 珂(南方科技大学)

梁长浩(合肥物质科学院)

韩一帆(郑州大学)

潘复生(重庆大学)

《群体智能优化算法》专题导语



王凌教授
清华大学

王凌教授贺《群体智能优化算法》专题:

攻坚克难登高峰,
学习进化绣智能,
群体协作拓新路,
智能优化展宏图.

王凌,清华大学自动化系教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,主要从事智能优化、生产调度理论方法与应用研究,已主持和参与国家自然科学基金、国家重点研发计划课题、973 课题、863 课题等项目 20 余项,已出版专著 5 部、译著 1 部,在 *IEEE Trans*、*Automatic* 等刊物上发表论文 260 余篇,SCI 收录 150 余篇、EI 收录 250 余篇,Google 学术引用 15 000 余次,SCI 严格他引 3 700 余次,获得 2014 年国家自然科学二等奖、2003 年教育部自然科学一等奖等奖项.



金耀初教授
英国萨里大学

群体智能是计算智能及人工智能研究的重要领域之一,它通过模拟生物或物理系统中的集群及涌现行为,借助邻近个体之间简单的交互过程而无需中心控制,实现稳定的、自适应的集群行为.从宏观层面的鸟群、鱼群、蜂群及蚁群等社会动物的集群行为,到微观层面的生物形态生成,都已成为群体智能研究中模拟的对象.

群体智能方法是理解复杂系统、构建自组织系统及解决复杂系统优化问题的重要工具.大部分群体智能优化算法简洁有效,在大量实际优化问题的求解中取得了成功的应用.因此,通过模仿自然界更多、更复杂的群体行为,研发新型、高效的群体智能优化算法在进化计算及人工智能研究中十分重要.与此同时,问题导向的群体智能优化算法研究,比如求解数据驱动的复杂系统优化问题,特别是求解稀疏数据驱动的大规模、高维多目标及强约束优化问题,对进化优化及群体智能优化算法的落地,对智能优化的推广和普及具有举足轻重的作用.

金耀初,英国萨里大学计算机系教授,分别于 1988、1991 及 1996 年在浙江大学电机系获学士、硕士及博士学位,并于 2001 年在德国波鸿鲁尔大学神经信息研究所获工学博士学位,现为英国萨里大学计算机科学系“计算智能”首席教授,“自然计算与应用”研究组组长,萨里大学“数学与计算生物学中心”共同负责人.金耀初博士是教育部“长江学者”讲座教授,芬兰国家技术创新局“芬兰讲座教授”,目前担任《IEEE 认知与发育系统汇刊》主编, Springer《复杂与智能系统》共同主编,IEEE 杰出演讲人,IEEE Fellow.



谭莹教授
北京大学

群体智能是产生于个体间交互协同又高于个体能力的群体涌现现象,是超越个体迈向强人工智能的必由之路.群体智能优化是利用群体智能来高效求解复杂优化问题的利器,是当今智能优化技术的先锋,必将成为现代人工智能发展的助推器.

谭莹,北京大学信息科学技术学院教授,博士生导师,1997 年在东南大学无线电工程系获工学博士学位,2005 年入选中国科学院百人计划.研究领域:计算智能、群体智能、机器学习、数据挖掘与知识发现及其应用.在神经网络信息处理、进化计算与群体计算、人工免疫系统及其在计算机安全的应用等方面取得了显著的研究成果,获得 2009 年度国家自然科学二等奖 1 项、军队科学技术进步奖 5 项以

及优秀论文奖多项. 总共发表学术论文 200 多篇, 出版专著《烟花算法引论》、*Fireworks Algorithm: A Novel Swarm Intelligence Optimization Method* 等 5 部, 授权发明专利 3 项等. 担任 *International Journal of Computational Intelligence and Pattern Recognition* 主编, *IEEE Transactions on Cybernetics* 副主编, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning System* 副主编, 以及十几个重要国际/国内学术期刊的副主编和编委.



段海滨教授
北京航空航天大学

大自然是人类创造力的丰富源泉, 群体智能是仿生智能百花园中最娇艳的花朵. 目前已经由群体智能优化算法拓展到群体智能无人系统, 由单纯的软件实现延拓到软硬件融合, 在军民领域中展现出广阔的应用前景, 已经成为引领人工智能颠覆性前沿技术的核心驱动力.

段海滨, 北京航空航天大学导航、制导与控制学科教授、博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 入选“万人计划”- 科技创新领军人才、“万人计划”- 中组部首批青年拔尖人才、科技部中青年科技创新领军人才、教育部新世纪优秀人才、北京市科技新星, 飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室学术带头人. 主持国家自然科学基金重点项目、国家杰出青年科学基金、中央军委科技委创新特区项目、军口 863 计划、总装预研、空军装备十三五预研、海军装备十三五预研等课题. 发表 SCI 论文 70 余篇, 授权发明专利 25 项, 获中国航空学会科学技术一等奖、CAA 技术发明一等奖、吴文俊人工智能科技创新一等奖、国防技术发明二等奖、国防科技进步二等奖(均排名第 1), 获中国青年科技奖、全国优秀科技工作者、中国青年五四奖章、中国自动化学会首届青年科学家奖、茅以升北京青年科技奖、杨嘉墀科技奖.



王兴伟教授
东北大学

群体智能理论与方法是新一代人工智能的重要方向, 其智能涌现的特征改变了传统的智能构造方法与计算模式. 在未来, 它将会不断出现新的理论进展与方法实践, 推动人工智能的理论技术创新!

王兴伟, 东北大学教授, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 东北大学国家示范性软件学院院长, 享受国务院政府特殊津贴专家, 爱思唯尔中国高被引学者, 研究方向为计算机网络与大数据. 近年来, 共获得国家级和省部级科研项目 40 余项, 取得国家发明专利 15 项, 发表论文 500 余篇, 被 SCI 收录 100 余篇次, 他引 3 000 余次. 获国家科技进步二等奖 2 项、教育部科技进步一等奖 2 项、辽宁省技术发明二等奖 1 项、辽宁省自然科学三等奖 1 项.

目 次

群体智能优化算法专题

群体智能优化算法	程 适, 王 锐, 伍国华, 郭一楠, 马连博, 史玉回(1)
GP 算法在图像分析上的应用综述	毕 莹, 薛 冰, 张孟杰(3)
改进鲸鱼群算法及其在炼钢连铸调度中的应用	曾 冰, 王梦雨, 高 亮, 董昊臻(14)
两阶段三存档集约束优化算法 (TSDA)	李二超, 李 进(23)
一种应用于函数优化问题的多种群人工蜂群算法	王守娜, 刘 弘, 高开周(30)
基于单纯形的改进精英人工蜂群算法	金 叶, 孙越泓, 王加翠, 王 丹(36)
一种量子行为磷虾算法及其仿真分析	刘 振, 刘文彪, 鲁华杰(43)
基于多目标蜂群进化优化的微电网能量调度方法	李佳华, 马连博, 王兴伟, 程 适, 邵一川(50)
基于广义粒子群优化模型的工艺规划方法研究 文笑雨, 罗国富, 李 浩, 肖艳秋, 乔东平, 李晓科(59)

化工与材料

响应面法优化脱硅稻壳基活性炭对恩诺沙星的吸附	张宾朋, 韩秀丽, 方书起, 常 春(64)
高温吸附热泵中传质通道强化蒸汽生成的实验研究 刘周明, 盛遵荣, 叶 松, 姚志敏, 薛 冰, 魏新利(69)
折流板安装角对扇叶型折流板换热器性能影响	谭国锋, 王 珂, 王永庆, 王 丹(74)
改性柚皮对水体中盐酸环丙沙星的动态吸附研究	邹卫华, 符艳真, 刘鹏磊, 刘 晓, 万怡贝(78)
聚乳酸立构复合晶体的表面形貌及其力学性能	刘艳萍, 魏航航, 李 倩(83)

电气工程

基于电导增量法的太阳能光伏阵列 MPPT 仿真	梁 亮, 詹智民, 邓小磊, 叶 磊, 陈根永(88)
基于脑电图的三分类前臂运动方向解析	逯 鹏, 张利朋, 胡玉霞, 陈书立, 李新建(93)

CONTENTS

【Thematic Issue on Swarm Intelligence Optimization Algorithm】

Swarm Intelligence Optimization Algorithms	
..... CHENG Shi, WANG Rui, WU Guohua, GUO Yinan, MA Lianbo, SHI Yuhui (1)	
A Survey on Genetic Programming to Image Analysis	BI Ying, XUE Bing, ZHANG Mengjie (3)
Improved Whale Swarm Algorithm and its Application in Steelmaking Continuous Casting Scheduling	
..... ZENG Bing, WANG Mengyu, GAO Liang, DONG Haozhen (14)	
Constraint Optimization Algorithm with Two-Stage and Three-Archive	LI Erchao, LI Jin (23)
A Multi-swarm Artificial Bee Colony Algorithm for Function Optimization	
..... WANG Shouna, LIU Hong, GAO Kaizhou (30)	
An Improved Multi-elitist Artificial Bee Colony Algorithm Based on Nelder-Mead Simplex Method	
..... JIN Ye, SUN Yuehong, WANG Jiabei, WANG Dan (36)	
A Quantum Behaved Krill Herd Algorithm and Its Simulation Analysis	LIU Zhen, LIU Wenbiao, LU Huajie (43)
A Novel Multi-objective Artificial Bee Colony Algorithm for Microgrid Energy Dispatching Model	
..... LI Jiahua, MA Lianbo, WANG Xingwei, CHENG Shi, SHAO Yichuan (50)	
Research on Process Planning Problems Based on General Particle Swarm Optimization Model	
..... WEN Xiaoyu, LUO Guofu, LI Hao, XIAO Yanqiu, QIAO Dongping, LI Xiaoke (59)	

【Chemical Engineering & Material Engineering】

Response Surface Methodology for Optimization of Enrofloxacin Adsorption by Using Activated Carbon Derived from the Residue of Desilicated Rice Husk	ZHANG Binpeng, HAN Xiuli, FANG Shuqi, CHANG Chun (64)
Experimental Study on the Enhancement of Steam Generation by Utilizing Mass Transfer Passage in a High-temperature Adsorption Heat Pump	LIU Zhouting, SHENG Zunrong, YE Song, YAO Zhimin, XUE Bing, WEI Xinli (69)
Study on Performance of Blade Baffle Heat Exchanger with Different Baffle Installation Angles	
..... TAN Guofeng, WANG Ke, WANG Yongqing, WANG Dan (74)	
Fixed Bed Column Study for Ciprofloxacin Hydrochloride Removal from Solution Using Modified Grapefruit Peel	
..... ZOU Weihua, FU Yanzhen, LIU Penglei, LIU Xiao, WAN Yibei (78)	
The Morphology and Mechanical Properties of Poly (Lactic Acid) Stereocomplex Crystal	
..... LIU Yanping, WEI Hanghang, LI Qian (83)	

【Electrical Engineering】

PV Array MPPT Simulation Based on the Conductance Increment Method	
..... LIANG Liang, ZHAN Zhimin, DENG Xiaolei, YE Lei, CHEN Genyong (88)	
Three Classification Forearm Movement Direction Information Decoding Based on EEG	
..... LU Peng, ZHANG Lipeng, HU Yuxia, Chen Shuli, LI Xinjian (93)	

群体智能优化算法

程适¹, 王锐², 伍国华³, 郭一楠⁴, 马连博⁵, 史玉回⁶

(1. 陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710119; 2. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073;
3. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075; 4. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州
221116; 5. 东北大学 软件学院, 沈阳 辽宁 110819; 6. 南方科技大学 计算机科学与工程系, 广东 深圳 518055)

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.024

0 引言

群体智能(swarm intelligence)的核心思想就是若干个简单个体构成一个群体,通过合作、竞争、交互与学习等机制表现出高级和复杂的功能,在缺少局部信息和模型的情况下,仍能够完成复杂问题的求解^[1].其求解过程为对求解变量进行随机初始化,经过迭代求解,计算目标函数的输出值.群体智能优化算法不依赖于梯度信息,对待求解问题无连续、可导等要求,使得该类算法既适应连续型数值优化,也适应离散型组合优化.同时,群体智能优化算法潜在的并行性和分布式特点使其在处理大数据时具备显著优势.因此,群体智能优化算法越来越多地受到各个领域学者的关注,成为一个热门研究方向.

1 群体智能算法的优越性

群体智能优化算法包括了多种算法,例如经典的粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO),蚁群优化算法(ant colony optimization, ACO)等^[1].近年来,又涌现出不少新算法,例如头脑风暴优化算法(brain storm optimization, BSO)^[2-4],烟花算法(fireworks algorithms, FWA)^[5],鸽群算法^[6]等.新的群体智能优化算法为求解多种多样的实际问题提供了新的思路 and 手段.以头脑风暴优化算法为例,这种算法的特点是将群体优化方法和数据挖掘/数据分析的方法进行融合,以数据分析的方法为基础去选择相对较好的解.通过对求解问题的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关联的基础上,更好地求解问题.

将最优化问题建模为在解空间上搜索最优值的搜索问题,群体优化算法通过启发式信息来指导搜索过程.在搜索过程中,多个个体通过竞争与协作的方式,共同对解空间进行搜索.由于有多个个体同时协作进行搜索,使得群体优化算法具有一种潜在的并行性.不同于常规的数值解法,群体优化算法对目标函数的性态(单调性、可导性、模态性)几乎没有限制,甚至不需要知道目标函数的表达式,因此群体智能优化算法极大地拓展了可求解的最优化问题的范围,可以广泛地应用于各种优化问题中,如动态优化问题、约束优化问题、不确定环境优化问题及多目标优化问题等.

2 群体智能算法专题论文概述

遗传规划是一种演化计算算法,能够利用计算机技术自动生成“程序”(模型)解决实际问题.毕莹等撰写的文章《GP算法在图像分析上的应用综述》介绍了GP算法基本原理、发展及其主要应用领域^[7].对GP算法在图像分析方面如特征提取、图像分类、边缘检测、图像分割等的代表性研究进行了较为系统全面的综述,并对GP算法在图像分析上的研究难点及热点如计算复杂度、泛化能力、迁移学习等进行了总结和归纳,指出了未来主要研究方向.

曾冰等撰写的文章《鲸鱼群算法及其应用》研究了一种新的群体智能优化算法——鲸鱼群算法^[8].文章系统介绍了鲸鱼群算法的原理、基本步骤及与其他典型群体智能优化算法相比的优

收稿日期:2018-05-07; 修订日期:2018-07-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(6177021519, 61503373, 61573361, 61773119, 61703256, 61771297); 湖南省杰出青年基金项目(2017JJ1001); 中央高校基本科研业务费专项资金(GK201703062)

作者简介:程适(1983—),男,陕西汉中,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@sunu.edu.cn.

点.并针对多峰优化问题的特点,改进鲸鱼群算法的迭代规则,引入稳定性阈值和适应度阈值两个参数.最后以炼钢连铸调度问题为例,阐述了鲸鱼群算法在工程优化领域的具体应用.

针对传统约束优化算法采用相同的进化策略处理位于 Pareto 边缘的解与函数值较差的解,使得寻优结果较差的问题,李二超等撰写的文章《两阶段三存档集约束优化算法(TSDA)》提出一种两阶段三存档集约束优化算法^[9].该算法与其他约束多目标进化算法在3种经典约束测试函数上进行了对比,仿真结果表明,该算法在不同类型约束条件下的寻优能力均具有优势.

针对传统人工蜂群算法收敛速度慢、易陷入局部最优解等不足,王守娜等撰写的文章《一种应用于函数优化问题的多种群人工蜂群算法》提出一种基于种群分割的应用于函数优化问题的多种群人工蜂群算法^[10].6个基准测试函数的实验表明,该算法适应度高、收敛速度快,克服了传统人工蜂群算法易陷入局部最优解的不足,在函数优化问题中表现出了更好的性能.

人工蜂群算法存在收敛速度慢、求解精度不高、易陷入局部最优解等问题.基于受粒子群启发的多精英人工蜂群优化算法,金叶等撰写的文章《基于单纯形的改进精英人工蜂群算法》引入了蜂群中的精英个体和全局最优个体增强开发全局最优解的能力^[11].数值实验表明,该改进算法的寻优精度和收敛速度均有明显提高.

为改进基本磷虾算法收敛效率低下、容易收敛到局部极值的不足,刘振等撰写的文章《一种量子行为磷虾算法及其仿真分析》基于协同进化和量子计算基本理论,提出一种量子行为磷虾算法,称之为协同进化量子磷虾算法^[12].仿真验证表明,该算法能得到更优解,具备良好的优化性能.

针对微电网能源调度优化问题,李佳华等撰写的文章《基于多目标蜂群进化优化的微电网能量调度方法》提出了微电网系统运行的经济和环保的双重优化模型,根据调度系统的评估结果对调度方案进行优化^[13].并将所提模型和基于指标化拥堵距离的多目标蜂群算法应用于解决含有多种分布式电源的微电网能量动态调度实验中.仿真结果表明,通过合理安排微电源出力,所提方法能够有效降低系统总成本.

文笑雨等撰写的文章《基于广义粒子群优化模型的工艺规划方法研究》在广义粒子群优化模型基础上,结合工艺规划问题的特性,设计了求解工艺规划问题的改进广义粒子群优化算法^[14].与

其他算法相比,该算法在求解工艺规划问题时具有更高的求解效率和更好的稳定性.

3 结束语

本专题的讨论将有益于群体智能优化算法的研究,促进群体智能优化算法在实际问题求解中的应用.本专题的顺利完成,离不开作者、审稿专家和《郑州大学学报(工学版)》编辑们的大力支持与协助,在此表示诚挚的感谢.

参考文献:

- [1] KENNEDY J, EBERHART R, SHI Y. Swarm Intelligence [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [2] SHI Y. An optimization algorithm based on brainstorming process [J]. International journal of swarm intelligence research (IJSIR), 2011, 2(4): 35-62.
- [3] CHENG S, QIN Q, CHEN J, et al. Brain storm optimization algorithm: A review [J]. Artificial intelligence review, 2016, 46(4): 445-458.
- [4] 程适,陈俊风,孙奕菲,等.数据驱动的发展式头脑风暴优化算法综述[J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(3): 22-28.
- [5] TAN Y, YU C, ZHENG S, et al. Introduction to fireworks algorithm [J]. International Journal of Swarm Intelligence Research, 2013, 4(4): 39-70.
- [6] DUAN H, QIAO P. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning [J]. Journal of intelligent computing and cybernetics, 2014, 7(1): 24-37.
- [7] 毕莹,薛冰,张孟杰. GP 算法在图像分析上的应用综述[J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(6): 3-13.
- [8] 曾冰,王梦雨,高亮,等.鲸鱼群算法及其应用[J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(6): 14-22.
- [9] 李二超,李进.两阶段三存档集约束优化算法(TSDA) [J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(6): 23-29.
- [10] 王守娜,刘弘,高开周.一种应用于函数优化问题的多种群人工蜂群算法[J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(6): 30-35.
- [11] 金叶,孙越泓,王加翠,等.基于单纯形的改进精英人工蜂群算法[J].郑州大学学报(工学版), 2018, 39(6): 36-42.
- [12] 刘振,刘文彪,鲁华杰.一种量子行为磷虾算法及其仿真分析[J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(6): 43-49.
- [13] 李佳华,马连博,王兴伟,等.基于多目标蜂群进化优化的微电网能量调度方法[J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(6): 50-58.
- [14] 文笑雨,罗国富,李浩,等.基于广义粒子群优化模型的工艺规划方法研究[J].郑州大学学报(工学版), 2018,39(6): 59-63.

GP 算法在图像分析上的应用综述

毕莹, 薛冰, 张孟杰

(新西兰惠灵顿维多利亚大学 工程与计算机学院, 新西兰 惠灵顿 6140)

摘要: GP (genetic programming) 算法, 常被称为遗传规划、遗传编程或遗传程序设计, 是一种进化计算算法, 能够利用计算机技术自动生成“程序”(模型) 解决实际问题. 介绍了 GP 算法基本原理、算法目前发展及其主要应用领域. 对 GP 算法在图像分析领域如特征提取、图像分类、边缘检测、图像分割等的代表性研究工作进行了较为系统且全面的讨论和综述. 最后, 对 GP 算法在图像分析上的研究难点及热点如计算复杂、提高泛化能力、迁移学习等进行了总结和归纳, 指出了未来主要研究方向.

关键词: GP; 遗传规划; 遗传编程; 图像分析; 进化计算; 特征提取; 图像分类; 边缘检测; 图像分割

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.018

0 引言

随着人工智能技术的快速发展, 计算机视觉和模式识别作为研究热点, 受到了国内外研究人员的广泛关注. 图像分析 (image analysis) 是计算机视觉和模式识别中较为重要的一个分支, 旨在研究图像的内容, 通过采用计算机技术从图像中提取有用的信息来完成具体的任务, 如图像分类、图像检索、目标检测、目标识别等^[1-2]. 与图像分析密切相关的是图像处理 (image processing). 图像处理技术常用来处理图像以获得更为理想的图像, 包括图像缩放、图像降噪、图像增强和图像压缩等^[1-2].

图像往往涉及高维数据, 且因拍摄角度、环境及光线等差别变化较大, 导致图像分析尤为困难. 比如一个 100×100 的图像就有 10 000 个像素点. 对于计算机而言, 灰度图像每个像素点由一个 8 位值即 0 ~ 255 的值代表灰度值, RGB 彩色图像每个像素点包含 3 个 0 ~ 255 的值分别代表每种颜色分量. 基于此, 对图像所包含的信息进行分析、提取、描述时往往需要相关领域知识以及人为介入.

图像特征是一种重要的描述图像的手段, 目前已有许多方法可以从图像中提取重要的特征如纹

理特征、边缘特征、形状特征等. 这些方法包括灰度共生矩阵 (grey-level co-occurrence matrix, GLCM); 局部二值模式 (local binary patterns, LBP); Sobel 算子; Canny 算子; 方向梯度直方图 (histogram of orientation gradient, HOG) 及尺度不变特征变换 (scale-invariant feature transform, SIFT) 等^[3]. 这些传统方法在图像分析上取得了较大的成功, 但针对未知问题, 选择合适的描述特征方法进行图像分析仍具有很大的挑战性^[4].

近年来, 进化计算 (evolutionary computation, EC) 算法已成为研究热点并应用于大规模优化^[5]、调度^[6]、图像分析^[7]等领域. EC 算法通过模拟自然界生物进化机制完成搜索问题的最优解决方案. 与传统方法相比, 基于种群的 EC 算法能并行搜索多个解, 融合已知领域知识与设计人员智慧, 利用计算机技术自动搜索解决方案, 不需要该问题领域知识和人为介入. 基于这些优点, EC 算法在图像分析如图像分割上获得较大成功^[8]. 所有 EC 算法中, GP (genetic programming) 算法, 常被称为遗传规划、遗传编程或遗传程序设计, 是一种较为广泛应用于图像分析的算法^[7].

GP 算法作为一种 EC 算法, 能够运用计算机技术自动生成“程序”(模型) 解决实际问题. 与其他 EC 算法相比, 常见的基于树状结构的 GP 算法

收稿日期:2018-02-13; 修订日期:2018-06-25

作者简介: 毕莹 (1992—), 女, 湖北黄冈人, 新西兰惠灵顿维多利亚大学博士, 主要从事进化计算、遗传规划、图像分析等研究, E-mail: Ying.Bi@ecs.vuw.ac.nz.

通信作者: 薛冰 (1985—), 女, 河南南阳人, 新西兰惠灵顿维多利亚大学高级讲师, 博士, 主要从事进化计算、遗传规划、图像分析、特征处理等研究, E-mail: Bing.Xue@ecs.vuw.ac.nz.

个体编码结构更为灵活,能同时执行多项任务,且生成的模型具有很好的解释能力.近几年,GP 算法已成功应用于图像分析,包括特征提取、图像分类、图像分割、边缘检测等.

目前针对 GP 算法在图像分析上的综述较少.2007 年 Krawiec 等^[9]讨论了自 GP 算法提出以来其在目标识别及图像分析上的应用.但近些年,GP 算法进一步应用于特征提取、图像分类、图像分割等领域.文献[7]中回顾了 GP 算法在图像分析领域如特征提取、图像分类、边缘检测等的应用.文献[8]回顾了部分 GP 算法在图像分割领域的应用.然而现有综述仍缺乏对近些年 GP 算法在图像分析上的应用全面而系统的讨论.基于此,有必要对 GP 算法在图像分析上的应用进行一个较为全面的综述,给对此领域感兴趣的研究人员尤其是硕博研究生提供更为全面的参考.

1 研究背景

1.1 GP 算法基本原理

GP 算法^[10]是一种基于种群的进化计算算法.该算法模拟自然界生物进化过程并根据达尔文“物竞天择,适者生存”原则自动生成可以解决实际问题的计算机程序.初始时,GP 算法随机生成一个初始种群,种群中的每个个体有一个适应度值.在进化过程中,选择操作如锦标赛选择(tournament selection)常被用来选择适应度值较好的个体进行复制、交叉或变异操作产生新的种群.新生成的每个个体又重新被适应度函数评估获得适应度值,如此迭代下去,直至满足终止条件,输出最优的计算机程序(结果).

与其他 EC 算法如粒子群算法(particle swarm optimisation, PSO)等采用矢量编码方式不同,GP 算法的个体编码方式为计算机程序.该计算机程序可以用树状结构表示,叶节点由终止符(terminals)构成,中间节点由函数或者操作符(functions)构成.图 1 给出了一个简单的 GP 树.其数可用数学公式表达为: $(F1 + F2) * ((F3 + 0.55) * F4)$. 其中 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 、 $F4$ 和 0.55 是叶节点(终止符),通常为输入的特征(变量)或随机生成的常量;“*”和“+”是中间节点,“*”是根节点,通常为函数或操作符.这些函数或操作符既可是通用的基本操作符,也可依据具体问题来设定.

设计一个新的 GP 算法或应用 GP 算法解决具体问题时,需要考虑以下 5 个基本因素^[11].

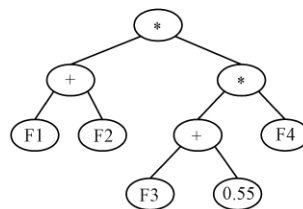


图 1 一个简单的 GP 树

Fig. 1 An example of GP tree

(1) 定义终止符集合(terminal set).该集合通常由变量及常量构成.变量由具体问题确定,常量通常在算法初始时随机生成.

(2) 定义函数集合(function set).该集合可以由不同的函数构成.这些函数包括算术运算函数如“+、-、*”,受保护的%,逻辑函数如 IF,三角函数如 sin、cos 等.对复杂或特定的问题,许多领域相关的操作算子也可设计为函数.

(3) 设计适应度函数(fitness function).适应度函数在进化过程中用来评估个体的优劣,并引导算法的搜索过程.它往往根据实际问题需要来定义,比如对于分类问题,其适应度函数可为分类准确率或错误率.

(4) 选择运行参数(parameter settings).GP 算法运行参数包括最大代数、种群大小、交叉率、变异率、选择方法、每次选择的个体个数及 GP 树的最大和最小深度等.

(5) 确定终止条件(terminations).终止条件决定算法何时停止运行和输出结果,如达到最大代数或搜索到最优解等.

1.2 GP 算法发展的简要综述

自提出以来,GP 算法获得了广泛关注,除经典的树状结构 GP 算法(tree-based GP,默认为 GP)之外,许多新型算法被提出,包括线性 GP 算法(linear GP, LGP)^[12];笛卡尔 GP 算法(cartesian GP, CGP)^[13];强类型 GP 算法(strongly typed GP, STGP)^[14];基于语法的 GP 算法(grammatically-based GP 或 grammar guided GP, GGGP)^[15-16];几何语义 GP 算法(geometric semantic GP, GSGP)^[17]等.实现 GP 算法可以借助基于不同编程语言的 GP 算法包或库,包括基于 JAVA 的 ECJ^[18]、基于 Python 的 DEAP^[19]、基于 MATLAB 的 GPLAB^[20]、基于 C++ 的 RMIT-GP^[21]及基于 TensorFlow 的 KarooGP^[22]等.

目前,有关 GP 算法研究成果及进展的代表性国际学术会议包括:European Conference on Genetic Programming(EuroGP)、The Genetic and Evo-

lutionary Computation Conference (GECCO)、IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)、Genetic Programming Theory & Practice、International Conference on Simulated Evolution and Learning (SEAL)、International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN) 等. 代表性杂志包括: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*、*Evolutionary Computation* (MIT Press)、*Genetic Programming and Evolvable Machines*、*Soft Computing* 等. 此外, GP 算法最新理论与应用研究、国际上的研究人员及团队排名等内容也可通过网站 <http://www.cs.bham.ac.uk/~wbl/biblio> 进行查询.

近年来, GP 算法已成功应用于各个领域以解决回归、预测、分类、调度、图像分析及模式识别等问题. Poli 等在文献 [11] 中详细介绍了 GP 算法的基本概念与原理、各种变型、应用领域及待解决的问题等. Chen 等^[23] 研究了高维数据的符号回归问题, 提出在解决符号回归时采用特征选择来提高 GP 算法的泛化能力. Haeri 等^[24] 设计了一个统计 GP 算法解决符号回归问题. 该方法采用统计信息生成子树帮助种群初始化, 并提出了基于相关性的交叉、变异操作和基于差异的 GP 树编辑策略.

Bhowan 等^[25] 研究了 GP 算法在非平衡类数据上的应用, 设计了一个集成多目标 GP 方法生成分类器, 可以在较大类和较小类上获得更好的性能. Bhowan 等^[26] 提出了一个两步 GP 方法解决非平衡类数据分类, 用多目标 GP 算法生成一组 Pareto 前沿近似解, 并基于这些解用 GP 算法构建分类器. Nag 和 Pal^[27] 设计了一个集成多目标 GP 算法分类器, 可以同时进行特征选择和分类. 该方法将多分类问题转化为生成多个二分类器, 通过分配权重将这些分类器集成. Espejo 等^[28] 对 GP 算法在分类问题上的应用进行了详细的综述, 包括特征提取、特征构建、模型选择、集成模型学习等.

Nguyen 等^[29-31] 对 GP 算法生成调度规则解决生产调度问题进行了较为系统的研究. 文献 [30] 中设计了一个多目标协同进化 GP 算法, 可以同时解决多个调度决策问题. 文献 [31] 对 GP 算法在生产调度上的应用进行了较为系统的讨论和综述, 介绍了如何将 GP 算法应用于生产调度问题及其关键技术, 并对比了其他人工智能和运筹学方法, 指出了难点问题和挑战.

Lensen 等^[32] 将 GP 算法应用于自动生成冗余特征构建标准特征选择数据集. Tran 等^[33] 研究

了 GP 算法在不完全数据分类上的应用, 提出了一个基于 GP 算法的插补方法来填补缺失的值, 将不完全数据转化为完全数据进行分类. 文献 [34] 设计了一个能够处理区间值的 GP 方法来构建多个特征, 可以直接对不完全数据进行分类.

2 GP 算法在图像分析上的应用综述

图像特征提取是图像分析中较为重要的一步, 许多基于图像分析的任务如图像分类等都依赖于所提取的特征. 除特征提取外, 特征选择和特征构建也是增强描述图像数据和降低特征维度的重要手段. 近几年, GP 算法已广泛应用于特征提取上. 笔者对 GP 算法在特征提取上的代表性研究工作进行讨论, 并对 GP 算法在图像分类、边缘检测、图像分割上的代表性研究工作分别进行综述.

2.1 图像特征提取

图像特征提取是指从图像数据中提取有用的信息来替代图像完成特定的任务并实现降维. 对于图像分类的各种算法而言, 丰富且高效的特征能够增加算法的可靠性和准确性. 基于 GP 算法的特征提取方法能够自动生成高效的图像描述算子.

Shao 等^[35] 提出一个多目标 GP 算法用来实现图像特征学习, 并用支持向量机 (support vector machine, SVM) 进行图像分类. 所提算法框架由输入层、滤波层、最大池化层和级联层构成. 其中, 滤波层采用一系列图像操作算子如高斯滤波等; 最大池化层采用了 4 种不同的最大池化操作算子. 该算法主要思想与卷积神经网络 (convolutional neural networks, CNNs) 类似, 通过滤波和池化来学习重要特征. 但是 GP 算法能自动选择合适的滤波操作算子及池化算子, 并生成合适的操作顺序. 该方法对分类准确率和模型复杂度两个目标进行了研究. 与传统的图像描述算子如 HOG、SIFT、LBP 及 CNN 相比, 该方法在 3 个分类数据集上取得了更好的性能, 缺点是该方法所提取的特征维度较大. Liu 等^[36] 将文献 [35] 的方法扩展到时空特征学习解决视频中的动作分类, 在滤波层设计一序列滤波操作如高斯滤波等作为 GP 函数处理 3D 视频. 该方法的性能在几个动作分类的数据集上得到了验证, 且生成的视频时空特征描述算子具有很好的解释能力.

Price 和 Anderson^[37] 将 GP 算法应用于自动生成图像描述算子, 采用了 Harris 角点检测、中值滤波、直方图均衡等作为 GP 函数进行特征提取,

缺点是该方法的性能仅在一个图像数据集上进行了验证。

Lam^[38]研究了3种不同特征即像素、直方图和像素位置作为输入的GP算法,并进行纹理特征提取,采用 k 近邻算法(k -nearest neighbours with $k=1, 1NN$)来进行分类。实验结果表明,所提方法能够提取较好的特征以提高分类准确率。

Al-Sahaf等^[39]将GP算法应用于自动生成纹理特征描述算子,并用1NN来进行纹理图像分类。该方法通过扫描图像,获取扫描区域的均值、最大值、平均值和最小值作为输入。该图像描述算子提取的特征具有旋转不变性,其基本原理与LBP类似,但采用了GP算法自动进行特征提取和优化。在几个纹理图像分类数据集上,所提方法能获得比LBP及其变型更好的分类准确率。Al-Sahaf等^[40]对文献[39]中方法进行了改进,提出了一个能够提取动态长度的纹理特征方法。与原方法相比,该方法更为灵活,能够更高效地提取纹理特征进行分类。

Iqbal等^[41]基于文献[40]的方法将迁移学习引入GP算法中,提高其在特征学习和纹理分类上的性能及训练效率。基于种群的GP算法在进化过程中能生成很多小模块,这些模块携带了特定图像领域信息,很容易通过迁移学习应用于其他相关领域或任务中。文献[41]将提取的模块用在GP算法种群初始化和变异操作中,该方法在不同分类数据集上获得了较好性能,是首次将迁移学习引入GP算法中来以提高其在图像分析上的学习效率和性能。

GP算法也能自动地从图像中选择较为重要的区域帮助传统方法提取特征。Al-Sahaf等^[42]研究了两种不同的GP算法从图像中自动选择重要区域,并从选择的区域中提取直方图特征,采用1NN进行纹理图像分类。该方法通过区域选择,可以有效地降低所提取特征的维度和计算复杂度。

2.2 图像分类

图像分类是根据图像的内容将图像归类入若干类别中的一个。根据输入的不同,GP算法在图像分类上的应用可大致分为两类:基于所提特征的GP分类方法和基于像素的GP分类方法。

基于所提特征的GP分类方法是以预先所提取的特征作为算法输入,将GP算法用于构建分类器解决分类问题。构建分类器时,GP算法可以

自动地从输入的特征中选择更为重要的特征。基于像素的GP分类方法是以图像像素作为输入,生成分类器或者提取特征进行分类。此类方法又可细分为两种:第一种采用GP算法构建分类器,并同时进行特征提取、特征构建等;第二种用GP算法进行特征提取,用常见的分类方法如SVM进行分类。其中部分代表性工作已在2.1小节进行了讨论,因此本小节将重点对基于所提特征的GP分类方法和基于像素的GP分类方法的第一种类型进行综述。

2.2.1 基于所提特征的GP分类方法

Nandi等^[43]将GP算法应用于解决乳房医学图像分类。该方法首先人为选择一些感兴趣的区域,然后从区域中提取4个边缘特征、4个形状特征和14个GLCM特征。并采用传统特征选择方法来选择重要的特征,基于选择特征,用GP算法生成分类器。实验结果表明,该方法能获得较高准确率。

Zhang等^[44]设计了一个基于GP算法的多类别图像目标分类方法。该方法从固定区域提取均值和方差特征,然后采用GP算法生成分类器。为处理多类别分类问题,该方法采用了类别区域边界来确定所输入图像区域的类别,并采用梯度下降的邻域搜索方法为生成的GP模型搜索最优的常数参数。

Zhang等^[45]针对GP算法在多类别图像目标分类上的应用,设计了两种基于高斯分布的适应度函数。GP算法与这两种的适应度函数在3种数据集包括人脸识别数据上获得了较好的准确率。

Ul-Ain等^[46]将GP算法应用于解决皮肤癌图像分类。该方法采用了71个纹理特征和领域相关特征作为输入,利用GP算法自动选择较为重要的特征构建分类器。与其他分类方法如1NN、朴素贝叶斯和决策树等相比,所提方法获得了较好的结果,然而该方法性能有待在更多数据集上进行验证。

Ryan等^[47]设计了一个基于GP算法的第一阶段癌症检测系统。该系统包括一系列的操作:背景抑制、图像分割、特征检测、特征选择和图像分类。该系统的算法原理是从每个分割的区域中提取两个GLCM特征作为GP算法输入生成分类器。实验结果表明,所提方法在该图像分类中取得了高达100%的准确率。

Almeida和Torres^[48]设计了一个基于PCA和

GP 算法(PCA + GP)的分类系统来解决多类别目标分类.该方法首先采用3种特征提取方法从图像中提取了颜色、纹理和形状特征,接着采用PCA对特征进行降维,最后采用GP算法构建分类器.与PCA + SVM和PCA + C4.5方法相比,PCA + GP获得了较有竞争力的结果,且生成的分类器具有较好的解释力.

文献[43-48]中的方法均是先从图像中提取特定的特征,然后采用GP算法进行图像分类,所采用的GP算法只需要简单的函数,计算较快.但是这些方法需要人为介入,即预先进行特征提取和特征选择等,其算法性能也较依赖于所提取的特征.

2.2.2 基于像素的GP分类方法

基于像素的GP分类方法直接以图像像素作为输入,自动进行特征提取、特征构建等. Atkins等^[49]提出了一个三层结构的GP方法用来解决二分类图像分类.该结构包括图像滤波层、聚合层和分类层.其中,图像滤波层采用了常见的滤波器如均值、最大值滤波等作为GP函数对输入图像进行处理;图像聚合层从处理的图像中选择合适的区域,并从所选区域中提取均值、最大值等特征;分类层则是从所提特征中构建一个新的特征用来实现分类.该方法在人脸图像分类及行人分类中获得了较好的结果,是首次在GP算法中引入CNNs与深度学习思想,直接从像素中学习特征并进行分类.基于此,更多方法被提出来,并逐渐形成了基于GP算法的进化深度学习(evolutionary deep learning)研究分支.

基于上述三层结构的GP方法,Al-Sahaf等^[50]提出了一个二层结构的GP方法用来解决图像分类问题,即仅包括聚合层和分类层.该算法的过程是从输入的图像中选择合适的区域,提取像素统计值特征,构建特征并实现分类.4个分类数据集上的结果表明,与三层结构的GP方法相比,二层结构的GP方法效果更好且速度更快.

Lensen等^[51]提出了一个GP方法+HOG方法用来实现区域检测、特征提取、特征构建和图像分类.该方法基于上述二层结构的GP方法,将HOG算子设计为函数提取特征,并设计了直方图和距离函数用来构建特征.与二层结构的GP方法相比,该方法能获得更好的分类结果. Bi等^[52]设计了一个四层结构的GP方法用以实现区域检测、特征提取、特征构建和图像分类.该方法在特征提取层采用常见的图像操作算子如高斯滤波

器、Sobel算子等来增强特征提取.实验结果表明,该方法能获得比其他GP和非GP方法更好的结果.

Agapitos等^[53]设计了一个四层结构的GP方法用来对手写数字进行分类.该结构自下向上依次为:滤波器组层、变换层、平均池化层和分类层.该方法研究了两种不同的训练模式,最终分类层采用Quasi-Newton优化方法来训练正则化的多项回归分类器.与几种标准GP方法相比,该方法在手写数字分类上获得了较好性能.与文献[53]类似, Suganuma等^[54]设计了一个四层结构的GP方法,并在分类层采用SVM进行图像分类.然而,这两种方法都需要先对具体结构进行设计,没有用到GP算法结构灵活的优势;且这两种方法都与CNNs的结构框架相似,但并没有与CNNs进行对比.

2.3 边缘检测

边缘检测是一项用来检测图像中像素亮度不连续变化的技术,能够发现图像中目标的边界,帮助边缘特征提取和图像分割.基于GP算法的边缘检测技术是通过图像像素或特征进行分析,构建边缘检测算子将像素分为边缘和非边缘点.相较于其他EC算法如遗传算法(genetic algorithms, GAs)等,近些年来GP算法在边缘检测上的应用较少,本小节将对代表性的研究工作进行综述.

Golonek等^[55]将GP算法应用于自动生成边缘检测算子.该算法基于输入图像,采用 4×4 的移动窗口,生成64-bit的数字转化函数进行边缘检测,并与Sobel方法进行了对比. Kadar等^[56]提出了一个基于GP算法的边界检测方法.该方法以单个图像作为输入,在函数集合中采用了纹理梯度及其他算术运算函数来生成边界检测算子.实验结果表明,该算法比其他几种传统方法的性能更好.

Ross等^[57]提出了一个GP方法来检测岩石图像中的边缘.该方法首先采用9种不同的滤波器对采集的岩石图像进行处理,然后将得到的图像作为GP算法输入生成边缘检测算子.与人工神经网络相比,基于GP算法的边缘检测算子效果更好.

Fu等^[58]设计了一个GP方法自动从区域中挑选像素点,并基于选择的像素点构建边缘检测算子.在标准数据集上的实验结果表明,所提方法能够获得较好的性能.对采用该方法构建边缘检测算子中的像素点的分析表明,所提方法能够选取丰富的像素点构建线性或二阶滤波器进行边缘

检测。

在文献[59]中, Fu 等提出了一个基于分布的 GP 方法来构建特征实现边缘检测。该方法从图像中提取高斯滤波梯度、归一化标准差和直方图梯度特征, 然后采用 GP 构建特征, 并基于构建的特征估计边缘和非边缘像素点的分布, 用于对未知像素点进行分类。实验结果表明, 该方法能够构建具有旋转不变性的特征并获得较好的边缘检测性能。

Fu 等^[60]提出了一个基于高斯滤波器的 GP 方法来生成边缘检测算子。该方法在终止符集合中采用了基于高斯函数的滤波器如高斯梯度, 在操作符中采用了基本的算术运算函数及特定函数。实验结果表明, 所提方法在边缘检测上的性能比高斯梯度算子和边缘抑制算法更好, 但该方法需要相对长的训练时间才能获得较好的边缘检测算子。

2.4 图像分割

图像分割是指将图像分割成小区域用以简化图像的表达和提取有用信息。在 EC 算法中, GAs 在图像分割上的应用较为广泛^[8], 常见的基于 GAs 和 PSO 的图像分割方法多为基于阈值的方法、基于区域的方法和基于聚类的方法等^[8]。与这些方法不同, GP 算法在图像分割上的应用更趋向于直接生成图像分割算子进行图像分割。这些生成的图像分割算子实际上是对图像中的每个像素点进行分类。

Song 和 Ciesielski^[61]将 GP 算法应用于生成分类器来处理纹理图像分割。所提方法以移动窗口里的像素为输入, 生成分类器对每个像素分类, 得到最终图像分割结果。实验结果表明, 所提方法能够发现纹理图像像素之间的关系, 并获得较好的分割结果。该方法不仅可以用来解决二分类的图像分割问题, 而且可以用来解决多分类的图像分割问题。

Liang 等^[62]提出了基于图像特征的 GP 方法处理图像分割, 并研究了 7 种不同的图像特征作为 GP 输入, 包括直方图特征、LBP 特征、GLCM 特征等。结果表明, 以 Gabor 特征作为输入的方法性能较好。文献[63]提出了两种基于 Gabor 特征的多目标 GP 算法实现图像分割。所提算法包含了解的准确率和解的复杂性两个目标, 分别基于两种已有的多目标算法即 NSGA-II 和 SPEA2 来对非支配解排序, 寻找 Pareto 前沿。结果表明, 多目标方法能够获得较小的模型及较好的分割性能。

Liang 等^[64]引入特征选择用来提高 GP 算法在图像分割上的性能。基于 Gabor 特征、LBP 特征、像素统计量、边缘特征和颜色特征等, 设计了一个单目标 GP 算法和两个多目标 GP 算法用来实现特征选择。实验结果表明, 多目标算法能够选择更好的子特征集并获得更优的性能。文献[62, 64]中的方法都是预先提取不同特征, 采用特征操作如特征选择、特征构建来获取高质量的特征来提升图像分割的性能。然而, 这些方法的性能较依赖于所提取特征, 且这些方法只在很小的数据集上进行验证。

Perlin 和 Lopes^[65]提出了一个基于像素的 GP 方法用来实现图像分割。该算法采用一系列不同大小的滤波器如中值、标准差等和算术运算函数来生成图像掩码。为降低计算成本, 该方法采用整合了解的质量和解的复杂度评估的适应度函数。实验结果表明, 在适应度函数中加入对解复杂度的惩罚能提升 GP 模型解释能力。

2.5 其他

除特征提取、图像分类、边缘检测、图像分割外, GP 算法也应用于目标识别、视频检测等领域。Barlow 和 Song^[66]设计了一个 GP 方法来识别场景图像中的字母。在 3 种不同难度的数据集(包括合成图像、现实图像以及模糊图像)上的实验结果表明, 所提方法在简单的数据集上能够获得较好的准确率。Bai 等^[67]将 GP 算法应用于自动生成滤波器进行图像处理。Bianco 等^[68]将已有的视频变化检测算法设计为 GP 函数, 采用 GP 算法来自动选择和组合这些函数, 从而获得更好的算子来解决视频变化检测。Wang 和 Tan^[69]设计了一个 GP 方法生成数学形态操作序列用来解决二维图像分析和增强问题。Torres 等^[70]提出了一个 GP 方法解决基于内容的图像检索问题。所提方法能够自动生成相似性函数, 并从数据库找出与输入图像相似的图像。

3 问题与展望

近几年 GP 算法在特征提取、图像分类、图像分割、边缘检测等问题上取得了较大成功。图像分析也已成为 GP 算法的一个重要应用领域。GP 算法具有非常灵活的结构框架, 较易与现有的图像处理和分析操作算子相融合, 从而获得更好的算法性能。与传统图像分析和特征提取方法相比, GP 算法能自动搜索最优解, 不需人为介入; 与其他 EC 算法相比, GP 算法不仅可以整合不同函

数,充分利用已知领域知识,还具有很好的解释能力.目前 GP 算法在图像分析上具有较好的研究前景,但由于图像变化的多样性及复杂性,性能更好的 GP 算法有待进一步开发.本小节通过归纳已有研究工作,将未来 GP 算法在图像分析上的研究问题及热点归纳如下.

(1) 目前已有部分研究工作基于 CNNs 中的卷积和池化思想来设计 GP 算法,实现图像特征学习和图像分类^[35-36, 49, 52-54].鉴于深度 CNNs 在计算机视觉领域取得的巨大成功,可以预见,将此思想引入 GP 算法中必将进一步挖掘 GP 算法在图像分析上的潜力.但是,目前该问题并没有得到较为系统而全面的研究,特别是如何设计 GP 算法结构框架;如何选择合适的操作算子如滤波或者池化等作为 GP 函数;如何训练滤波器或相关参数等问题,都有待进一步深入研究.此外,目前相关方法仅应用于图像特征提取和分类上,对于其他问题如边缘检测、图像分割上的应用有待进一步研究.未来研究工作可围绕这些问题,开发研究具有深度结构的 GP 算法及其在图像分析上的应用潜力,并形成基于 GP 算法的深度学习理论框架与平台.

(2) 目前的大部分研究工作都是将 GP 算法应用于尺寸较小的图像分析问题上^[35, 40-43, 49-51, 53].针对较大的图像如医学图像、遥感图像上的分析,还尚未有较好的基于 GP 的方法提出.随着技术的发展,清晰度较高、分辨率较高的图像越来越容易获得,此类图像的分析也是研究热点及研究难点.现有方法在进行此类图像分析时往往采取对图像进行预处理的办法,如图像分割、图像压缩等来缩小图像大小^[35, 40-43, 47, 58],然而这些方法可能导致图像丧失部分信息,从而影响最终结果.基于此,适用于尺寸较大的图像分析的高效 GP 算法有待进一步开发和研究.未来研究内容可围绕此难点问题,进一步探索 GP 算法在大图像分析上的应用潜力,重点研究内容包括区域检测、特征提取、特征构建等.

(3) 计算复杂和膨胀是运行 GP 算法时较为显著的两个问题.原因之一是所生成的模型较为复杂,导致算法评估时间较长;而膨胀则是指在进化过程中 GP 模型复杂度增加但其性能并没有提高.由于图像数据的多样性和复杂性,将 GP 算法应用于图像分析无法避免这两个问题.目前已有研究工作提出将解的复杂度整合到单目标 GP 算

法适应度函数中或作为另外一个目标来设计多目标 GP 算法控制生成的 GP 模型复杂度^[35, 64, 66].随着更多的图像操作算子被设计为 GP 函数,在此情况下,如何评估模型复杂度有待进一步深入研究.此外,其他技术如邻域搜索等有待被开发整合为生成的 GP 模型搜索最优的常数参数用来控制模型复杂度.未来研究工作可围绕这两个问题,在保证 GP 算法性能的前提下提出有效的方法降低计算复杂度和模型复杂度.

(4) GP 算法在图像分析上的应用多为监督学习,即从已有的带标签或有 ground truth 的数据集中训练获得较好的模型解决未知问题. GP 算法往往在训练数据集上获得较好性能,在测试数据集上结果不理想,即出现过拟合(overfitting).解决过拟合问题、提高 GP 算法泛化(generalisation)能力是一个重要研究问题.目前已有研究工作提出多种策略增强 GP 算法的泛化能力,如在解决符号回归时加入特征选择^[23]、基于 VC-dimension 理论评估 GP 算法泛化误差和实验误差之间的差距^[71]等,然而这些方法均集中于符号回归上的应用.所以,图像分析问题较为困难,涉及函数更多,算法框架更为复杂,如何提高 GP 算法在图像分析上的泛化能力需进一步深入研究.此外,GP 算法也应用于小样本图像训练数据集上^[4, 39, 40, 42]及非平衡类数据集上,如医学图像^[46-47]、边缘检测^[58-60]等.在这些情况下,如何提高 GP 算法的泛化能力将更具有挑战性.未来研究工作可围绕 GP 算法在图像分析问题包括小样本训练数据集和非平衡类数据集上的应用,重点研究解决过拟合问题和提高 GP 算法泛化能力的策略,进一步提升 GP 算法性能及拓展 GP 算法应用领域.

(5) 迁移学习(transfer learning)作为机器学习的一个重要分支,是近几年的研究热点.基于种群的 GP 算法在进化过程中能生成很多小模块,这些小模块携带了特定领域信息,较易被提取利用来增强 GP 算法在其他相关领域或任务上的学习效率和性能.但目前针对此问题的研究较少,已有研究工作也仅仅局限在特定的领域如纹理图像的特征提取和分类等^[41],且所提出的迁移学习方法较为简单.为提高 GP 算法在图像分析问题上的性能,有待开发出更为有效的迁移学习方法.未来研究工作可围绕迁移什么、如何迁移、何时迁移等展开.

4 结束语

近些年来,GP 算法较为广泛地应用于图像分

析上,笔者对 GP 算法在图像分析领域包括图像特征提取、图像分类、边缘检测、图像分割、目标检测等的代表性研究工作进行了讨论和综述.已有的研究工作进一步表明,GP 算法具有灵活的结构框架、并行计算、不需人为介入、较好的解释能力等优势.然而,GP 算法在图像分析上仍然存在如计算复杂等问题.笔者通过总结归纳已有的研究工作,指出了未来 GP 算法在图像分析上的研究热点和问题,为专家学者和研究人员提供参考.

参考文献:

- [1] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. Image processing, analysis, and machine vision [M]. Pacific Grove, CA: PWS, 1999.
- [2] CHAN T F, SHEN J H. Image processing and analysis: variational, PDE, wavelet, and stochastic methods [M]. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2005.
- [3] HASSABALLAH M, ABDELMEGEID A A, ALSHAZLY H A. Image features detection, description and matching [C]//Image Feature Detectors and Descriptors. Berlin: Springer, 2016: 11–45.
- [4] AL-SAHAF H. Genetic programming for automatically synthesising robust image descriptors with a small number of instances [D]. New Zealand: School of Engineering and Computer Science, Victoria University of Wellington, 2017.
- [5] 梁静,刘睿,瞿博阳,等. 进化算法在大规模优化问题中的应用综述 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(3): 15–21.
- [6] 吴秀丽,张志强. 求解柔性作业车间调度问题的细菌算法对比及改进 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(3): 34–39.
- [7] XUE B, ZHANG M J. Evolutionary feature manipulation in data mining/big data [J]. ACM SIGEVOLUTION, 2017, 10(1): 4–11.
- [8] LIANG Y, ZHANG M J, BROWNE W N. Image segmentation: A survey of methods based on evolutionary computation [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Simulated Evolution and Learning. Berlin: Springer, 2014: 847–859.
- [9] KRAWIEC K, HOWARD D, ZHANG M J. Overview of object detection and image analysis by means of genetic programming techniques [C]//Proceedings of the 2007 International Conference Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies. Washington, DC, USA: IEEE, 2007: 779–784.
- [10] KOZA J R. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [11] POLI R, LANGDON W B, MCPHEE N F. A field guide to genetic programming [M/OL]. [SL.]: Lulu, 2008: 229. [2018–01–12]. <http://lulu.com> and freely available at <http://www.gp-field-guide.org.uk>, 2008.
- [12] BRAMEIER M F, BANTHAF W. Linear genetic programming [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [13] MILLER J F, THOMSON P. Cartesian genetic programming [C]//Proceedings of European Conference on Genetic Programming. Berlin: Springer, 2000: 121–132.
- [14] MONTANA D J. Strongly typed genetic programming [J]. Evolutionary computation, 1995, 3(2): 199–230.
- [15] MCKAY R I, HOAI N X, WHIGHAM P A, et al. Grammar-based genetic programming: a survey [J]. Genetic programming and evolvable machines, 2010, 11(3/4): 365–396.
- [16] WHIGHAM P A. Grammatically-based genetic programming [C]//Proceedings of the Workshop on Genetic Programming: from Theory to Real-world Applications. Rochester: University of Rochester, 1995, 16(3): 33–41.
- [17] MORAGLIO A, KRAWIEC K, JOHNSON C G. Geometric semantic genetic programming [C]//Proceedings of International Conference on Parallel Problem Solving from Nature. Berlin: Springer, 2012: 21–31.
- [18] LUKE S, PANAIT L, BALAN G, et al. ECJ: A java-based evolutionary computation research system [EB/OL]. [2017–12–25]. <http://cs.gmu.edu/ecjlab/projects/ecj>. 2007.
- [19] FORTIN F A, RAINVILLE F M, GARDNER M A, et al. DEAP: evolutionary algorithms made easy [J]. Journal of machine learning research, 2012, 13(1): 2171–2175.
- [20] SILVA S, ALMEIDA J. GPLAB—a genetic programming toolbox for MATLAB [C]//Proceedings of the Nordic MATLAB Conference. Nordic: MATLAB Inc, 2003: 273–278.
- [21] CIESIELSKI V. The rmit-gp genetic programming system [EB/OL]. [2018–05–11]. <http://goanna.cs.rmit.edu.au/~vc/rmitgp>.
- [22] STAATS K, PANTRIDGE E, CAVAGLIA M, et al. Tensor flow enabled genetic programming [C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. New York, NY: ACM, 2017: 1872–1879.
- [23] CHEN Q, ZHANG M J, XUE B. Feature selection to improve generalization of genetic programming for high-

- dimensional symbolic regression [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2017, 21(5): 792–806.
- [24] HAERI M A, EBADZADEH M M, FOLINO G. Statistical genetic programming for symbolic regression [J]. Applied soft computing, 2017, 60: 447–469.
- [25] BHOWAN U, JOHNSTON M, ZHANG M J, et al. Evolving diverse ensembles using genetic programming for classification with unbalanced data [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2013, 17(3): 368–386.
- [26] BHOWAN U, JOHNSTON M, ZHANG M J, et al. Reusing genetic programming for ensemble selection in classification of unbalanced data [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2014, 18(6): 893–908.
- [27] NAG K, PAL N R. A multiobjective genetic programming-based ensemble for simultaneous feature selection and classification [J]. IEEE transactions on cybernetics, 2016, 46(2): 499–510.
- [28] ESPEJO P G, VENTURA S, HERRERA F. A survey on the application of genetic programming to classification [J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, Part C (applications and reviews), 2010, 40(2): 121–144.
- [29] NGUYEN S, ZHANG M J, JOHNSTON M, et al. A computational study of representations in genetic programming to evolve dispatching rules for the job shop scheduling problem [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2013, 17(5): 621–639.
- [30] NGUYEN S, ZHANG M J, JOHNSTON M, et al. Automatic design of scheduling policies for dynamic multi-objective job shop scheduling via cooperative coevolution genetic programming [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2014, 18(2): 193–208.
- [31] NGUYEN S, MEI Y, ZHANG M J. Genetic programming for production scheduling: a survey with a unified framework [J]. Complex & intelligent systems, 2017, 3(1): 41–66.
- [32] LENSEN A, XUE B, ZHANG M J. Generating redundant features with unsupervised multi-tree genetic programming [C]//Proceedings of European Conference on Genetic Programming. Berlin: Springer, 2018: 84–100.
- [33] TRAN C T, ZHANG M J, ANDREA P, et al. An effective and efficient approach to classification with incomplete data [J]. Knowledge based systems, 2018, 154: 1–16.
- [34] TRAN C T, ZHANG M J, ANDREA P, et al. Directly constructing multiple features for classification with missing data using genetic programming with interval functions [C]//Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. New York, NY: ACM, 2016: 69–70.
- [35] SHAO L, LIU L, LI X. Feature learning for image classification via multiobjective genetic programming [J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2014, 25(7): 1359–1371.
- [36] LIU L, SHAO L, LI X, et al. Learning spatio-temporal representations for action recognition: A genetic programming approach [J]. IEEE transactions on cybernetics, 2016, 46(1): 158–170.
- [37] PRICE S R, ANDERSON D T. Genetic programming for image feature descriptor learning [C]//Proceedings of the 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation. San Sebastian, Spain: IEEE, 2017: 854–860.
- [38] LAM B. Discovery of texture features using genetic programming [M]. Melbourne, Victoria, Australia: School of Computer Science and Inform Technology, RMIT University, 2012.
- [39] AL-SAHAF H, AL-SAHAF A, XUE B, et al. Automatically evolving rotation-invariant texture image descriptors by genetic programming [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2017, 21(1): 83–101.
- [40] AL-SAHAF H, ZHANG M J, AL-SAHAF A, et al. Keypoints detection and feature extraction: a dynamic genetic programming approach for evolving rotation-invariant texture image descriptors [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2017, 21(6): 825–844.
- [41] IQBAL M, XUE B, AL-SAHAF H, et al. Cross-domain reuse of extracted knowledge in genetic programming for image classification [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2017, 21(4): 569–587.
- [42] AL-SAHAF H, ZHANG M J, JOHNSTON M. Binary image classification: A genetic programming approach to the problem of limited training instances [J]. Evolutionary computation, 2016, 24(1): 143–182.
- [43] NANDI R, NANDI A K, RANGAYYAN R M, et al. Classification of breast masses in mammograms using genetic programming and feature selection [J]. Medical and biological engineering and computing, 2006, 44(8): 683–694.
- [44] ZHANG M J, SMART W. Genetic programming with gradient descent search for multiclass object classification [C]//Proceedings of the 7th European Conference on Genetic Programming. Berlin: Springer, 2004: 399–408.
- [45] ZHANG M J, SMART W. Using Gaussian distribution to construct fitness functions in genetic programming

- for multiclass object classification [J]. Pattern recognition letters, 2006, 27(11): 1266–1274.
- [46] UL-AIN Q, XUE B, AL-SAHAF H, et al. Genetic programming for skin cancer detection in dermoscopic images [C]//Proceedings of the 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation. San Sebastian, Spain: IEEE, 2017: 2420–2427.
- [47] RYAN C, FITZGERALD J, KRAWIEC K, et al. Image classification with genetic programming: Building a stage 1 computer aided detector for breast cancer [C]//Handbook of Genetic Programming Applications. Berlin: Springer, 2015: 245–287.
- [48] ALMEIDA A E, TORRES R D S. Remote sensing image classification using genetic-programming-based time series similarity functions [J]. IEEE geoscience and remote sensing letters, 2017, 14(9): 1499–1503.
- [49] ATKINS D, NESHATIAN K, ZHANG M J. A domain independent genetic programming approach to automatic feature extraction for image classification [C]//Proceedings of the 2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation. New Orleans, LA: IEEE, 2011: 238–245.
- [50] AL-SAHAF H, SONG A, NESHATIAN K, et al. Two-tier genetic programming: Towards raw pixel-based image classification [J]. Expert systems with applications, 2012, 39(16): 12291–12301.
- [51] LENSEN A, AL-SAHAF H, ZHANG M J, et al. Genetic programming for region detection, feature extraction, feature construction and classification in image data [C]//Proceedings of the 19th European Conference on Genetic Programming. Berlin: Springer, 2016: 51–67.
- [52] BI Y, XUE B, ZHANG M J. An automatic feature extraction approach to image classification using genetic programming [C]//Proceedings of the 21st European Conference on the Applications of Evolutionary Computation. Berlin: Springer, 2018: 421–438.
- [53] AGAPITOS A, O'NEILL M J, NICOLAU M, et al. Deep evolution of image representations for handwritten digit recognition [C]//Proceedings of the 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Sendai, Japan: IEEE, 2015: 2452–2459.
- [54] SUGANUMA M, TSUCHIYA D, SHIRAKAWA S, et al. Hierarchical feature construction for image classification using Genetic Programming [C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Budapest, Hungary: IEEE, 2016: 1423–1428.
- [55] GOLONEK T, GRZECHCA D, RUTKOWSKI J. Application of genetic programming to edge detector design [J]. IEEE international symposium on circuits and systems, 2006, 20(2): 4683–4686.
- [56] KADAR I, BEN-SHAHAR O, SIPPER M. Evolution of a local boundary detector for natural images via genetic programming and texture cues [C]//Proceedings of the 11th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. New York, NY: ACM, 2009: 1887–1888.
- [57] ROSS B J, FUETEN F, YASHKIR D Y. Edge detection of petrographic images using genetic programming [C]//Proceedings of the 2nd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2000: 658–665.
- [58] FU W, JOHNSTON M, ZHANG M J. Low-level feature extraction for edge detection using genetic programming [J]. IEEE transactions on cybernetics, 2014, 44(8): 1459–1472.
- [59] FU W, JOHNSTON M, ZHANG M J. Distribution-based invariant feature construction using genetic programming for edge detection [J]. Soft computing, 2015, 19(8): 2371–2389.
- [60] FU W, JOHNSTON M, ZHANG M J. Genetic programming for edge detection: a Gaussian-based approach [J]. Soft computing, 2016, 20(3): 1231–1248.
- [61] SONG A, CIESIELSKI V. Texture segmentation by genetic programming [J]. Evolutionary computation, 2008, 16(4): 461–481.
- [62] LIANG Y, ZHANG M J, BROWNE W N. Genetic programming for evolving figure-ground segmentors from multiple features [J]. Applied soft computing, 2017, 51: 83–95.
- [63] LIANG Y, ZHANG M J, BROWNE W N. Figure-ground image segmentation using feature-based multi-objective genetic programming techniques [J]. Neural computing and applications, 2017(12): 1–20.
- [64] LIANG Y, ZHANG M J, BROWNE W N. Image feature selection using genetic programming for figure-ground segmentation [J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2017, 62: 96–108.
- [65] PERLIN H A, LOPES H S. A Genetic programming approach for image segmentation [G]//Computational intelligence in image processing. Berlin: Springer, 2013: 71–90.
- [66] BARLOW B, SONG A. Towards scene text recognition with genetic programming [C]//Proceedings of the 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Cancun, Mexico: IEEE, 2013: 1310–1317.

- [67] BAI H, YATA N, NAGAO T. Efficient evolutionary image processing using genetic programming: Reducing computation time for generating feature images of the Automatically Construction of Tree-Structural Image Transformation (ACTIT) [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Cairo, Egypt: IEEE, 2010: 302 – 307.
- [68] BIANCO S, CIOCCA G, SCHETTINI R. Combination of video change detection algorithms by genetic programming [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2017, 21(6): 914 – 928.
- [69] WANG J, TAN Y. A novel genetic programming based morphological image analysis algorithm [C]// Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. New York, NY: ACM, 2010: 979 – 980.
- [70] TORRES R D S, FALCÃO A X, GONCALVES M A, et al. A genetic programming framework for content-based image retrieval [J]. Pattern recognition, 2009, 42(2): 283 – 292.
- [71] CHEN Q, XUE B, SHANG L, et al. Improving generalisation of genetic programming for symbolic regression with structural risk minimisation [C]// Proceedings of the 2016 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. New York, NY: ACM, 2016: 709 – 716.

A Survey on Genetic Programming to Image Analysis

BI Ying, XUE Bing, ZHANG Mengjie

(School of Engineering and Computer Science, Victoria University of Wellington, Wellington 6140, New Zealand)

Abstract: As an evolutionary computation (EC) technique, Genetic programming (GP) has been widely applied to image analysis in recent decades. However, there was no comprehensive and systematic literature review in this area. To provide guidelines for the state-of-the-art research, this paper presents a survey of the literature in recent years on GP for image analysis, including feature extraction, image classification, edge detection, and image segmentation. In addition, this paper summarised the current issues and challenges, such as computationally expensive, generalisation ability and transfer learning, on GP for image analysis, and pointed out promising research directions for future work.

Key words: genetic programming; image analysis; evolutionary computation; feature extraction; image classification; edge detection; image segmentation

改进鲸鱼群算法及其在炼钢连铸调度中的应用

曾冰, 王梦雨, 高亮, 董昊臻

(华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 研究了一种新的群体智能优化算法——鲸鱼群算法(whale swarm algorithm, WSA). 系统介绍了鲸鱼群算法的原理、基本步骤及与其他典型群体智能优化算法相比的特点, 并针对多峰优化问题的特点改进了 WSA 的迭代规则, 引入稳定性阈值和适应度阈值两个参数, 提出带迭代计数器的 WSA (WSA with iterative counter, WSA-IC). 实验证明, WSA-IC 在最优解数量、最优解质量和收敛速度方面均有着优秀的表现, 将 WSA-IC 应用于炼钢连铸调度问题, 通过实验验证 WSA-IC 具有良好的寻优能力和稳定性, 并提出从理论研究和实际应用两方面深化鲸鱼群算法的研究.

关键词: 群体智能优化算法; 鲸鱼群算法; 多峰优化; 炼钢连铸调度

中图分类号: TP183

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.001

0 引言

当前, 群体智能优化算法在工程优化问题中的应用日益广泛, 特别是针对 NP-hard 问题, 比如车间调度问题^[1-2]、WSNs 分簇问题^[3-4]以及多处理器调度问题^[5]等. 这些工程优化问题通常是多峰优化问题, 即它们的目标函数通常会有多个全局最优解. 如果运用逐点式的传统数值优化方法来求解这些问题, 需要重复计算多次, 再从这些解中选出最优的解, 但并不能保证该解是全局最优解^[6]. 群体智能优化算法通过个体之间的合作与竞争来引导种群的迭代, 从而向更优的解收敛; 并且它们的迭代规则不依赖于函数的导数或梯度等信息, 易于使用. 因此, 越来越多的群体智能优化算法被人们用来解决实际工程优化问题.

受鲸鱼群利用超声波通信进行捕食等行为的启发, 华中科技大学的曾冰和高亮于 2017 年提出了一种新型群体智能优化算法——鲸鱼群算法^[7] (whale swarm algorithm, WSA), 在函数优化问题的求解中取得了显著效果.

1 鲸鱼群算法的原理

鲸鱼群算法是一种基于群体智能的元启发式

算法. 类似于粒子群算法, 鲸鱼群算法首先从定义域内随机生成一组初始解, 即随机初始化种群各个体的位置, 然后根据种群中各个体的位置和适应度值, 以某种机制产生新一代种群. 但不同于粒子群算法通过跟踪个体历史最优解和全局最优解生成新种群的机制, 鲸鱼群算法模拟鲸鱼群以超声波为信息媒介进行捕食等群体行为, 将每个解类比为一条鲸鱼, 每条鲸鱼的移动由比它好(由适应度值判断)的鲸鱼中离它最近的鲸鱼引导, 笔者将这种引导鲸鱼定义为“较优且最近”的鲸鱼.

2 鲸鱼群算法的基本步骤

在鲸鱼群算法中, 每条鲸鱼表示解空间中的一个候选解, 解的优劣根据由优化目标定义的适应度函数判断. WSA 先对鲸鱼群各个体的位置进行随机初始化, 并在之后的迭代过程中, 对种群中的每条鲸鱼 X , 判断其“较优且最近”的鲸鱼 Y 是否存在, 若存在, 则鲸鱼 X 在鲸鱼 Y 的引导下进行随机移动, 如式(1)所示; 否则, 鲸鱼 X 的位置保持不变. WSA 的基本流程如图 1 所示.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \text{rand}(0, \rho_0 \cdot e^{-\eta \cdot d_{X,Y}}) \cdot (y_i^t - x_i^t), \quad (1)$$

式中: x_i^t 和 x_i^{t+1} 分别为 X 的第 i 个元素在第 t 步与 $t+1$ 步迭代时的位置; y_i^t 为 Y 的第 i 个元素在第 t

收稿日期: 2018-05-03; 修订日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575212); 华中科技大学学术前沿青年团队项目

通信作者: 高亮(1974—), 男, 山东临清人, 华中科技大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事智能优化算法及其在设计与制造中的应用研究, E-mail: gaoliang@mail.hust.edu.cn.

步迭代时的位置; $d_{x,y}$ 为 X 与 Y 之间的距离; ρ_0 为超声波源的强度,通常设置为 2; η 为衰减系数,需根据目标函数的特点设置,一般先由公式 $\eta = -20 \cdot \ln 0.25/d_{\max}$ 计算其初始近似值,在此基础上调整为最优值或近似最优值; $\text{rand}(0, \rho_0 \cdot e^{-\eta \cdot d_{x,y}})$ 为 0 到 $\rho_0 \cdot e^{-\eta \cdot d_{x,y}}$ 的随机数。

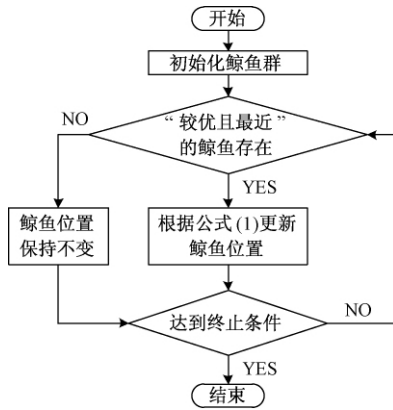


图1 鲸鱼群算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of whale swarm algorithm

根据式(1)可知,如果一条鲸鱼与它的“较优且最近”的鲸鱼之间的距离很小,该条鲸鱼将会积极地朝其“较优且最近”的鲸鱼随机移动;否则,它将消极地朝其“较优且最近”的鲸鱼随机移动,如图2所示。图2中的目标函数维数为2,六角星表示全局最优解,圆圈表示鲸鱼,用虚线标记的矩形区域是当前迭代中鲸鱼的可达区域。

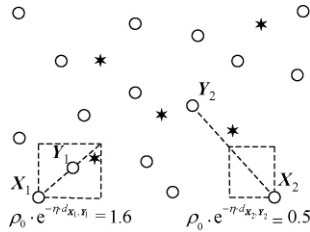


图2 由“较优且最近”的鲸鱼引导的随机移动

Fig. 2 Random movement under the guidance of the “better and nearest” whale

3 鲸鱼群算法与典型群体智能优化算法的比较

群体智能优化算法主要通过模拟生物的群集行为,利用种群的群体智慧进行协同搜索。这类算法对目标函数的性态(单调性、可导性、模态性等)几乎没有限制,使用简单高效,可广泛地应用于各类优化问题。典型的群体智能优化算法有粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法、蚁群优化(ant colony optimization, ACO)算法等。

受鸟群觅食行为的启发,PSO采用速度-位置模型,通过动态跟踪个体历史最优解和全局最优解在解空间内进行搜索。PSO主要应用于连续优化问题,所需设置的参数较少,收敛速度较快,但无法直接用于求解离散优化问题。ACO模拟蚂蚁的觅食行为,通过动态更新各路径上的信息素,使蚂蚁在信息素的引导下找到最短路径。相较于PSO,ACO适用于求解离散优化问题(如最短路径问题),但需要调整较多的参数。而WSA主要针对连续优化问题设计,由于其框架易于扩充的特点,可通过简单的改进应用于离散优化问题。将候选解视为鲸鱼,采用向“较优且最近”的鲸鱼随机移动的位置更新模型,在保持种群多样性的同时进行有效的局部搜索,有利于求解多个全局最优解。此外WSA控制参数较少,易于使用。

WSA与近几年提出的头脑风暴优化(brain storm optimization, BSO)算法^[8-9]存在诸多相似之处:两者均充分利用种群个体的位置分布信息引导最优解的搜索。其主要区别在于引导方式,WSA主要通过个体向“较优且最近”的鲸鱼移动促使算法收敛至最优解;BSO则基于问题特征和解数据的分析,采用数据挖掘技术引导算法搜索最优解。

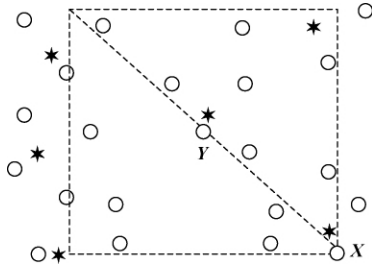
4 鲸鱼群算法的改进

4.1 WSA迭代规则的改进

为解决WSA中参数 η 设置的难题,假设超声波的强度在水中不会衰减,即 $\eta = 0$,则 $\rho_0 \cdot e^{-\eta \cdot d_{x,y}} = 2$ 。当鲸鱼 X 在“较优且最近”的鲸鱼 Y 的引导下随机移动时,若 X 和 Y 分别位于不同的全局最优解附近,如图3所示, X 很可能离开附近最优解所在区域,降低了算法的局部搜索能力。因此,对WSA中鲸鱼的位置更新规则进行如下改进:为当前迭代的鲸鱼(即正本)生成一个副本,若副本在其“较优且最近”的鲸鱼引导下随机移动到优于正本的位置,则正本移至副本所在位置;否则正本保持原地不动。这样图3中的鲸鱼 X 会以很大的概率保持原地不动,从而引导其他个体向其追随的最优解收敛。可见,改进后的位置更新规则仍然适用于 $\eta = 0$ 的情况,可以在不引入任何小生境参数的前提下,有效保证多个子种群的形成,提高算法的局部搜索能力,这非常有利于求解多个全局最优解。

4.2 在迭代过程中识别并跳出已找到的极值点

为使WSA在迭代过程中有效识别并跳出已找到的极值点,提高算法的全局搜索能力,引入

图3 当 $\eta=0$ 时,由“较优且最近”的鲸鱼引导的随机移动Fig.3 Random movement under the guidance of the “better and nearest” whale when $\eta=0$

稳定性阈值 T_s 和适应度阈值 T_f 两个参数. 稳定性阈值 T_s 是一个预先定义的迭代次数, 用来判断一条鲸鱼是否已经找到所跟随的极值点, 达到稳定状态. 为实现上述判断, 每条鲸鱼设置一个迭代计数器 c , 以记录该鲸鱼未更新位置的迭代次数. 适应度阈值 T_f 用于识别当前全局最优解. 在每次迭代过程中, 对于种群中未更新的鲸鱼 X , 需检查其迭代计数器: 若 X 未达到稳定状态(即 $X.c \neq T_s$), 则其迭代计数器自增 1; 反之, 根据 T_f 和 $|f_{\text{gbest}} - f(X)|$ 的大小(f_{gbest} 为当前全局最优适应度; $f(X)$ 为 X 的适应度), 判断是否更新当前全局最优解集合, 接着初始化该鲸鱼, 从而跳出已经找到的极值点. 基于上述对 WSA 的改进方案, 改进的 WSA 被称为带迭代计数器的 WSA (WSA with iterative counter, WSA-IC).

4.3 WSA-IC 算法的流程

初始化鲸鱼包括初始化鲸鱼的位置以及将鲸鱼的迭代计数器置 0.

WSA-IC 算法伪代码如下.

输入: 目标函数, 鲸鱼群 Ω .

输出: 当前全局最优解集 $GloOpt$.

- 1: 开始
- 2: 初始化参数;
- 3: 初始化鲸鱼;
- 4: 计算鲸鱼的适应度值;
- 5: while 终止条件不满足 do

- 6: for $i = 1$ to $|\Omega|$ do
- 7: 寻找 Ω_i 的“较优且最近”的鲸鱼 Y ;
- 8: if Y 存在 then
- 9: 生成 Ω_i 的副本 X' ;
- 10: X' 在 Y 的引导下根据公式(1)移动;
- 11: 计算 X' 的适应度值 $f(X')$;
- 12: if $f(X') < f(\Omega_i)$ then
- 13: $\Omega_i = X'$;
- 14: $\Omega_i.c = 0$;
- 15: else
- 16: 检查 Ω_i 的迭代计数器;
- 17: end if
- 18: else
- 19: 检查 Ω_i 的迭代计数器;
- 20: end if
- 21: end for
- 22: end while
- 23: 判断 Ω 中的每条鲸鱼是否是当前全局最优解;
- 24: 返回 $GloOpt$;
- 25: 结束

4.4 WSA-IC 算法复杂度及收敛性分析

4.4.1 复杂度分析

WSA-IC 算法的时间复杂度分析见表 1, 种群规模和目标函数维度分别为 m 、 n . 在复杂度最高情况下, 即当鲸鱼在位置变换时没有发现适应度更优的个体且迭代计数器达到阈值 T_s , 更新鲸鱼个体需执行 $4n + 1$ 次加法、 $2n$ 次乘法和 $2n + m + 2$ 次比较. 因此, WSA-IC 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$.

4.4.2 收敛性分析

由式(1)及 WSA-IC 算法伪代码可知, WSA-IC 算法可写成如下形式:

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} Ax_i^t + By_i^t, & f(Ax_i^t + By_i^t) < f(x_i^t); \\ x_i^t, & f(Ax_i^t + By_i^t) \geq f(x_i^t). \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A = 1 - \text{rand}(0, 2)$, $B = \text{rand}(0, 2)$.

因此可通过计算求得 $E(A) = 0$, $E(B) = 1$,

$D(A) = D(B) = -E(AB) = 1/3$.

表 1 WSA-IC 算法复杂度分析

Tab.1 Analysis of the algorithm complexity for WSA-IC

算法步骤	加法运算	乘法运算	比较	函数评价	
(1) 寻找“较优且最近”的鲸鱼	0	0	$m-1$	0	
(2) “较优且最近”的鲸鱼存在	鲸鱼位置变换计算	$2n$	n	0	0
	边界修正	0	0	$2n$	0
	变换后鲸鱼位置评价	0	0	0	1
	与鲸鱼原始位置适应度的比较	0	0	1	0
(3) 检查迭代计数器操作	未达到 T_s 值	1	0	0	0
	达到 T_s 值	$2n+1$	n	2	1

要证明 WSA-IC 算法收敛,只需证明式(2)收敛,即证明 x_i^{t+1} 的期望和方差收敛.证明如下:

$$E(x_i^{t+1}) = E(Ax_i^t + By_i^t), \quad (3)$$

$$E(x_i^{t+1})^2 = E(Ax_i^t + By_i^t)^2. \quad (4)$$

由于 A, B 与 y_i^t 相互独立, y_i^t 可以看成是确定的,式(3)、(4)可作如下变形:

$$E(x_i^{t+1}) = E(A)E(x_i^t) + E(B)y_i^t, \quad (5)$$

$$\frac{1}{E(B)}E(x_i^{t+1}) - \frac{E(A)}{E(B)}E(x_i^t) = y_i^t, \quad (6)$$

$$E(x_i^{t+1})^2 = E(A^2)E(x_i^t)^2 + 2E(AB)E(x_i^t)y_i^t + E(B^2)(y_i^t)^2. \quad (7)$$

由 $\frac{1}{E(B)}\lambda - \frac{E(A)}{E(B)} = 0$ 得 $E(x_i^t)$ 的收敛特征值 $\lambda = E(A) = 0 < 1$, 因此 $E(x_i^t)$ 收敛.

由式(5)、(7)推出

$$\begin{aligned} D(x_i^{t+1}) &= E(x_i^{t+1})^2 - E(x_i^{t+1})^2 = \\ &= E(A^2)E(x_i^t)^2 - E^2(A)E(x_i^t)^2 + \\ &= 2E(AB)E(x_i^t)y_i^t - 2E(A)E(B)E(x_i^t)y_i^t + \\ &= (E(B^2) - E^2(B))(y_i^t)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D(x_i^{t+1}) - E(A^2)D(x_i^t) &= \\ &= D(A)E(x_i^t)^2 + 2E(AB)E(x_i^t)y_i^t - \\ &= 2E(A)E(B)E(x_i^t)y_i^t + D(B)(y_i^t)^2 = \\ &= D(A)(E(x_i^t)^2 - 2E(x_i^t)y_i^t + (y_i^t)^2). \end{aligned} \quad (9)$$

同理可证 $D(x_i^t)$ 收敛.因此,在 WSA-IC 算法中,鲸鱼总是收敛于较优且最近的个体.

4.5 WSA-IC 算法的参数设置

WSA-IC 算法包含 4 个参数,即超声波源强度 ρ_0 、衰减系数 η 、稳定性阈值 T_s 以及适应度阈值 T_r .其中, ρ_0 和 η 分别被设置为 2 和 0; T_r 通常认为与给定的适应度误差(即精度)相等,当精度未给定时,可设置为 1.0×10^{-8} ;基于大量实验结果, T_s 的值一般设置为函数维度的 100 倍.

4.6 数值实验

采用如下 6 个多峰优化算法作为对比算法: locally informed PSO (LIPS) [6]、fitness-euclidean distance ratio PSO (FERPSO) [10]、speciation-based DE (SDE) [11]、crowding DE (CDE) [12]、speciation-based PSO (SPSO) [13] 以及 WSA.所有算法都是在 Microsoft Visual Studio 2015 中用 C++ 编程语言实现,在相同的环境下运行,停止条件均为 CPU 计算时间.

4.6.1 测试函数

测试函数采用 15 个 CEC2015 多峰基准测试函数,其基本信息如表 2 所示.表中 n, o_1, o_2 分别表示函数维度、全局最优解个数、局部最优解个

数.所有的测试函数都是最小化问题,其搜索空间均为 $[-100, 100]^n$.

表 2 CEC2015 多峰测试函数

Tab.2 CEC2015 multimodal functions for the experiment

函数序号	函数名称	n	o_1	o_2
F1	Expanded Two-Peak Trap	5	1	15
F2	Expanded Five-Uneven-Peak Trap	5	32	0
F3	Expanded Equal Minima	4	625	0
F4	Expanded Decreasing Minima	5	1	15
F5	Expanded Uneven Minima	3	125	0
F6	Expanded Himmelblau's Function	4	16	0
F7	Expanded Six-Hump Camel Back	6	8	0
F8	Modified Vincent Function	3	216	0
F9	Composition Function 1	10	10	0
F10	Composition Function 2	10	1	9
F11	Composition Function 3	10	10	0
F12	Composition Function 4	10	10	0
F13	Composition Function 5	10	10	0
F14	Composition Function 6	10	1	19
F15	Composition Function 7	10	1	19

4.6.2 参数设置

算法的主要参数设置如表 3、表 4 所示.在表 3 中, m_1/m_2 表示 WSA-IC 算法的种群大小/其他算法的种群大小, CPU 计算时间以 s 为单位.由于 WSA-IC 算法在迭代过程中可以有效识别并跳出已经找到的极值点,因此可以设置相对较小的种群规模,以降低算法的计算复杂度.

表 3 CEC2015 多峰测试函数相关参数的设置

Tab.3 Setting of parameters associated with CEC2015 multimodal functions for the experiment

函数序号	适应度误差	m_1/m_2	CPU/s
F1	0E-08	40/200	6
F2	0E-08	60/200	200
F3	0E-08	50/2 000	1 500
F4	0E-08	30/100	180
F5	0E-08	40/800	80
F6	0E-08	40/200	20
F7	0E-06	30/100	30
F8	0E-04	100/1 000	1 500
F9	0E-08	500/3 000	1 800
F10	0E-08	500/1 000	500
F11	0E-08	100/800	800
F12	0E-08	400/600	800
F13	0E-08	50/300	260
F14	0E-08	400/2 000	500
F15	0E-08	100/600	1 000

表 4 7 种算法主要参数的设置

Tab. 4 Setting of main parameters of seven algorithms

算法	参数
LIPS	$\omega = 0.729\ 844$, $ns_{ize} = 2 \sim 5$
FERPSO	$\chi = 0.729\ 844$, $\varphi_{\max} = 4.1$
SDE	$CR = 0.9$, $F = 0.5$, $m = 10$
CDE	$CR = 0.9$, $F = 0.5$, $CF = m$
SPSO	$\chi = 0.729\ 844$, $\varphi_1 = 2.05$, $\varphi_2 = 2.05$
WSA	$\rho_0 = 2$
WSA-IC	$\rho_0 = 2$, $\eta = 0$, $T_s = 100 \cdot n$, $T_f = \varepsilon_f$

注: ω 为惯性权重; ns_{ize} 为邻居个数; χ 为收缩因子; φ_{\max} 为系数; CR 为交叉概率; F 为缩减因子; n 为种群大小; CF 为拥挤因子; φ_1 、 φ_2 为系数。

4.6.3 评价指标

为保证比较的公正性,每个算法在每个测试

函数上独立运行 51 次,并从最优解数量、最优解质量、收敛速度三方面来度量算法的性能。

4.6.4 实验结果与分析

(1) 最优解的数量. 算法在最优解数量方面的表现通过平均最优解个数(average number of optima found, ANOF) 衡量. 算法的 ANOF 值及显著性水平为 0.05 时的 Z 检验结果见表 5. 表中, $\text{avg} \pm \text{sd}$ 表示算法取得的 ANOF 均值 \pm 标准差; δ 表示 Z 检验结果,且符号“+”(“-”)表示 WSA-IC 算法的结果优于(劣于) 对比算法且差异显著,符号“=”表示 WSA-IC 算法和对比算法结果的差异不显著. 总体看来,符号“-”的数量只有 1 个,针对每种对比算法,符号“+”的数量占多数,意味着 WSA-IC 算法在最优解数量上的表现远好于其他算法。

表 5 7 种算法在测试函数上获得的 ANOF 值与 Z 检验结果

Tab. 5 ANOF of seven algorithms on test functions and results of Z-test

函数	WSA-IC	LIPS	FERPSO	SPSO	SDE	CDE	WSA
序号	avg \pm sd	avg \pm sd	δ	avg \pm sd	δ	avg \pm sd	δ
F1	1 \pm 0	0.22 \pm 0.41	+	0.67 \pm 0.47	+	1 \pm 0	=
F2	32 \pm 0	21.02 \pm 1.80	+	7.43 \pm 1.42	+	0 \pm 0	+
F3	625 \pm 0	257.98 \pm 8.81	+	148.14 \pm 7.32	+	163.73 \pm 212.52	+
F4	1 \pm 0	0.33 \pm 0.47	+	0.43 \pm 0.50	+	0.80 \pm 0.40	+
F5	125 \pm 0	82.82 \pm 4.21	+	84.29 \pm 4.36	+	15.65 \pm 1.54	+
F6	16 \pm 0	14.16 \pm 0.85	+	11.39 \pm 1.36	+	4.37 \pm 0.48	+
F7	8 \pm 0	5.24 \pm 0.92	+	2.73 \pm 1.07	+	7.47 \pm 0.70	+
F8	216 \pm 0	86.28 \pm 5.51	+	70.29 \pm 4.23	+	23.53 \pm 1.67	+
F9	4.22 \pm 1.13	1.04 \pm 0.82	+	3.55 \pm 1.05	+	0 \pm 0	+
F10	0 \pm 0	0 \pm 0	=	0 \pm 0	=	0 \pm 0	=
F11	0.80 \pm 0.40	0.16 \pm 0.36	+	0.10 \pm 0.30	+	0.35 \pm 0.48	+
F12	0.14 \pm 0.34	0.20 \pm 0.40	=	0.02 \pm 0.14	=	0.82 \pm 0.38	-
F13	0.94 \pm 0.24	0.77 \pm 0.42	=	0.96 \pm 0.19	=	1 \pm 0	=
F14	0 \pm 0	0 \pm 0	=	0 \pm 0	=	0 \pm 0	=
F15	1 \pm 0	1 \pm 0	=	1 \pm 0	=	0.98 \pm 0.14	=

(2) 最优解的质量. 将算法取得的最优解适应度值减去 100 与相应函数序号的乘积,由此得到的最优解均值(标准差)及 Z 检验结果如表 6 所示,分别用 $\text{avg}(\text{sd})$ 和 δ 表示. 显然,符号“-”的数量远少于符号“+”和“=”的数量,说明 WSA-IC 算法取得了较高的最优解精度。

(3) 收敛速度. 在比较算法的求解效率时,以算法在测试函数 F14 上的收敛曲线为例进行分析,如图 4 所示. 横坐标为评价次数,纵坐标为算法多次实验找到的当前全局最优解适应度均值。

由于 FERPSO 和 WSA 的种群可能会过早收敛而停止迭代,对比算法不包括这两个算法. 从图 4 可以看出,相比于其他算法,WSA-IC 算法在 F14 上以更快的速度收敛到更优的解。

综上所述,WSA-IC 算法能高效地搜索到更多更优的解,这主要得益于对 WSA 两方面的改进: 其一,改进迭代规则,使 WSA-IC 算法在保证多个子种群形成的同时保持局部搜索能力; 其二,在迭代过程中识别并跳出已经找到的极值点,加速 WSA-IC 算法向全局最优解收敛,尽可能地提高算法的全局搜索能力。

表6 7种算法在测试函数上获得的最优解质量与Z检验结果

Tab.6 Quality of optima found by seven algorithms on test functions and results of Z-test													
函数 序号	WSA-IC	LIPS		FERPSO		SPSO		SDE		CDE		WSA	
	avg(sd)	avg(sd)	δ	avg(sd)	δ	avg(sd)	δ	avg(sd)	δ	avg(sd)	δ	avg(sd)	δ
F1	0.00E+00 (0.00E+00)	5.39E+00 (1.30E+01)	+	1.33E+01 (1.89E+01)	+	3.66E-02 (7.61E-02)	+	3.62E-10 (1.80E-09)	=	4.32E-01 (2.95E-01)	+	5.73E+01 (3.19E+01)	+
F2	1.39E-16 (9.85E-16)	5.86E-12 (3.28E-11)	=	6.11E-14 (6.71E-14)	=	2.60E-01 (2.71E-01)	+	5.51E-10 (4.50E-10)	=	2.40E-04 (3.04E-04)	=	6.75E-01 (4.77E+00)	+
F3	3.25E-14 (1.83E-13)	1.12E-10 (4.36E-11)	=	2.41E-12 (9.77E-12)	=	3.57E-03 (1.88E-03)	=	2.52E-10 (5.00E-10)	=	1.10E-08 (3.29E-09)	=	0.00E+00 (0.00E+00)	=
F4	3.34E-15 (1.75E-14)	2.51E-02 (3.47E-02)	=	7.23E-02 (8.17E-02)	+	2.39E-01 (9.09E-01)	=	2.11E-02 (4.59E-02)	=	1.45E-14 (2.48E-14)	=	1.29E+00 (5.35E-01)	+
F5	2.12E-15 (9.89E-15)	1.35E-10 (8.79E-11)	=	2.58E-12 (1.51E-11)	=	5.49E-04 (3.72E-04)	=	3.26E-10 (3.66E-10)	=	8.58E-05 (5.74E-05)	=	0.00E+00 (0.00E+00)	=
F6	2.55E-14 (5.29E-14)	6.71E-12 (3.52E-11)	=	4.69E-14 (6.00E-14)	=	2.37E-02 (2.84E-02)	=	3.56E-10 (7.27E-10)	=	3.32E-11 (1.15E-10)	=	2.69E-11 (1.13E-10)	=
F7	5.58E-07 (3.34E-15)	5.64E-07 (2.59E-08)	=	5.58E-07 (6.06E-14)	=	1.22E-02 (1.61E-02)	=	6.15E-07 (6.42E-08)	=	5.58E-07 (1.29E-14)	=	1.79E+00 (1.97E+00)	+
F8	2.36E-08 (6.89E-08)	3.85E-06 (1.61E-06)	=	2.12E-07 (3.95E-07)	=	6.38E-05 (9.64E-06)	=	5.92E-06 (4.10E-06)	=	1.31E-06 (5.85E-07)	=	3.02E-06 (3.47E-06)	=
F9	6.86E-14 (5.99E-14)	1.12E-07 (3.98E-07)	=	1.47E-10 (4.23E-10)	=	1.53E+00 (3.57E-09)	+	1.53E+00 (7.90E-14)	+	1.53E+00 (2.31E-09)	+	5.21E-10 (1.00E-09)	=
F10	3.71E+01 (1.27E+01)	3.00E+01 (3.58E-02)	-	4.95E+03 (6.63E+03)	+	1.26E+04 (4.06E+03)	+	3.41E+01 (1.03E+01)	-	5.10E+01 (1.13E+01)	+	9.30E+03 (6.54E+03)	+
F11	4.17E-02 (8.79E-02)	6.87E-05 (3.05E-04)	=	2.65E-02 (6.26E-02)	=	4.52E-02 (5.74E-02)	=	1.64E-01 (2.89E-01)	=	6.55E-02 (2.64E-02)	=	3.11E-03 (8.68E-03)	=
F12	4.52E-01 (2.59E-01)	3.98E+00 (1.74E+01)	+	1.66E-01 (5.91E-02)	-	5.04E+01 (7.69E+01)	+	1.28E-04 (3.43E-04)	-	1.36E-01 (2.08E-02)	-	1.49E+01 (5.66E+01)	+
F13	1.19E+01 (4.76E+01)	3.54E+00 (2.21E+01)	-	8.08E+00 (4.17E+01)	-	4.98E+01 (1.31E+01)	+	1.78E-13 (1.93E-13)	-	4.50E-13 (9.54E-14)	-	3.25E+02 (7.85E+01)	+
F14	6.27E+01 (2.88E+01)	2.23E+02 (1.99E+02)	+	1.05E+02 (9.29E+01)	+	3.07E+02 (2.38E+01)	+	1.39E+02 (4.01E+01)	+	6.51E+02 (3.16E+01)	+	4.59E+02 (1.79E+02)	+
F15	0.00E+00 (0.00E+00)	6.05E-12 (3.26E-11)	=	4.46E-14 (9.03E-14)	=	4.92E+01 (1.34E+01)	+	3.73E+00 (2.64E+01)	+	1.06E-06 (2.25E-06)	=	2.37E+02 (7.19E+01)	+

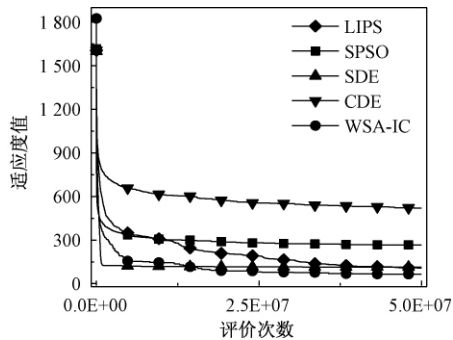


图4 算法在函数F14上的收敛情况

Fig.4 Convergence rate of algorithms on F14

(4) 参数的影响. 稳定性阈值 T_s 是 WSA-IC 算法最为关键的参数, 其值需根据优化问题的特点设定. 对取不同 T_s 值的 WSA-IC 算法进行了实验, 结果如表 7 所示. 由表 7 可知, 当 $T_s = 100n$ 时, WSA-IC 算法在大部分测试函数上都能取得

最优的 ANOF 值. 因此, 对于几乎所有的连续优化问题, T_s 均可以设置为 $100n$.

5 鲸鱼群算法的应用

目前鲸鱼群算法已在某些工程优化领域(如无线传感器网络能效优化)获得了成功的应用. 下面以炼钢连铸调度问题为例介绍鲸鱼群算法的具体应用.

5.1 炼钢连铸调度问题

以某钢厂的工艺流程为例介绍炼钢连铸调度问题. 如图 5 所示, 有 N 个待加工浇次, 各浇次包括一定数目的炉次, 需按同一工艺路线(EAF-AOD-LF1-LF2-CC)进行加工, 要求在保证连铸阶段相邻浇次预留准备时间, 同一浇次内炉次连

表 7 WSA-IC 算法在不同的 T_s 取值下获得的 ANOF 值Tab. 7 ANOF of WSA-IC with different values of T_s

函数序号	$T_s = 20n$	$T_s = 40n$	$T_s = 60n$	$T_s = 80n$	$T_s = 100n$	$T_s = 120n$	$T_s = 140n$	$T_s = 160n$	$T_s = 180n$	$T_s = 200n$
F1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F2	32	32	32	32	32	32	32	32	31.98	32
F3	472.94	586.94	622.20	624.92	625	625	625	624.96	624.90	624.96
F4	0.69	0.92	0.96	0.98	1	1	1	1	1	1
F5	125	125	125	125	125	125	125	124.94	124.94	124.90
F6	16	16	16	16	16	15.98	15.94	15.94	15.96	15.96
F7	8	8	8	8	8	8	8	8	7.98	8
F8	216	215.98	216	216	216	215.92	215.88	215.88	215.88	215.82
F9	5.69	4.69	4.24	3.71	4.22	3.84	3.86	4.04	4.06	3.71
F10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F11	0.82	0.76	0.63	0.65	0.80	0.73	0.67	0.73	0.73	0.67
F12	0.08	0.02	0.06	0.06	0.14	0.08	0.08	0.08	0.04	0.06
F13	0.69	0.82	0.63	0.67	0.94	0.61	0.69	0.49	0.51	0.49
F14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F15	0.94	0.80	0.92	0.88	1	0.92	0.65	0.67	0.71	0.55

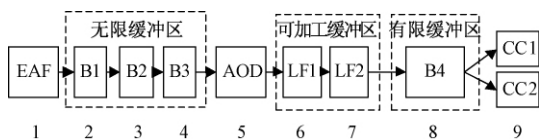


图 5 钢铁生产工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of the steel production process

续加工的前提下,确定浇次顺序、连铸机分配和各工序的开始时间及结束时间,以最小化最大完工时间.此外,特定工序间设置一定数量的无限缓冲区、有限缓冲区和可加工缓冲区^[14].其中,无限缓冲区不限制炉次的缓存时间;有限缓冲区中炉次的缓存时间受限;可加工缓冲区既可加工炉次又可缓存炉次且缓存时间不受限.这类问题早已获得某些学者的关注^[14-15],但不同于已有的研究,笔者考虑连铸阶段存在 2 台并行机的情况,将缓冲区视为加工时间为 0 的生产阶段,则笔者所研究的炼钢连铸调度问题实质上是 9 阶段零等待混合流水车间调度问题.

5.2 基于 WSA-IC 的炼钢连铸调度算法

由于调度问题的离散特性,WSA-IC 算法不能直接用于求解炼钢连铸调度问题,因此从如下 4 个方面对 WSA-IC 算法进行了改进:①设计了一种离散的鲸鱼个体编码与解码方案;②采用汉明距离计算个体间的距离;③改进了鲸鱼个体的移动规则;④设计了一种有效的自适应邻域搜索策略.由于该算法不需要保存在迭代过程中求得的多个当前全局最优解,所以该算法不需要 T_i 参数.

基于 WSA-IC 的炼钢连铸调度算法伪代码如下.

输入: 目标函数, 鲸鱼群 Ω , 当前全局最优解 $GBest$, 当前全局最优解的适应度值 f_{gbest} .

输出: 最优解.

```

1: 开始
2: 初始化参数;
3: 初始化鲸鱼;
4: 计算鲸鱼的适应度值;
5: while 终止条件不满足 do
6:   for  $i = 1$  to  $|\Omega|$  do
7:     寻找  $\Omega_i$  的“较优且最近”的鲸鱼  $Y$ ;
8:     if  $Y$  存在 then
9:       生成  $\Omega_i$  的副本  $X$ ;
10:       $X$  根据个体移动规则向  $Y$  移动;
11:      计算  $X$  的适应度值  $f(X)$ ;
12:      if  $f(X) < f(\Omega_i)$  then
13:         $\Omega_i = X$ ;
14:         $\Omega_i.c = 0$ ;
15:      else
16:        if  $\Omega_i.c \neq T_s$  then
17:           $\Omega_i.c = \Omega_i.c + 1$ ;
18:        else
19:          重新初始化  $\Omega_i$ ;
20:          计算  $\Omega_i$  的适应度值;
21:        end if
22:      end if
23:    else
24:      生成的  $\Omega_i$  副本  $X$ ;
25:      对  $X$  执行自适应邻域搜索;
26:      if  $f(X) < f(\Omega_i)$  then
27:         $\Omega_i = X$ ;

```

```

28:       $\Omega_i$ .  $c = 0$ ;
29:      else
30:          if  $\Omega_i$ .  $c \neq T_s$  then
31:               $\Omega_i$ .  $c = \Omega_i$ .  $c + 1$ ;
32:          else
33:              if  $f(\Omega_i) < f_{gbest}$  then
34:                   $f_{gbest} = f(\Omega_i)$ ;
35:                   $GBest = \Omega_i$ ;
36:              end if
37:              重新初始化  $\Omega_i$ ;
38:              计算  $\Omega_i$  的适应度值;
39:          end if
40:      end if
41:  end if
42: end for
43: end while
44: 判断最后一代种群中是否有比  $GBest$  好的鲸鱼,有则替
    换  $GBest$ ;
45: 返回最优解  $GBest$ ;
46: 结束

```

5.2.1 个体编码与解码

算法基于工件进行编码,即将浇次编号的排序作为编码.解码采用文献[14]所提方法,根据编码所示浇次序列,以浇次为单位安排作业计划,其中连铸机的分配依据最早空闲机器优先规则.

5.2.2 个体间的距离计算

在上述离散个体编码方案中,个体维度都相同,个体之间的距离计算与等长字符串之间的距离计算非常相似,故采用汉明距离^[16]计算不同鲸鱼个体间的距离.假设两条鲸鱼个体 X_1 、 X_2 如图6所示, X_1 和 X_2 有4个元素不相同,所以, X_1 和 X_2 之间的汉明距离为4.

$$\begin{aligned}
 X_1 &= (1, \overset{\sim}{3}, \overset{\sim}{1}, \overset{\sim}{2}, \overset{\sim}{5}, \overset{\sim}{4}, \overset{\sim}{1}, \overset{\sim}{6}) \\
 X_2 &= (1, \overset{\sim}{2}, \overset{\sim}{3}, \overset{\sim}{5}, \overset{\sim}{6}, \overset{\sim}{4}, \overset{\sim}{1})
 \end{aligned}$$

图6 两条鲸鱼个体示意图

Fig. 6 Sketch map of two whales

5.2.3 个体移动规则

由于个体采用离散编码方案,WSA算法的个体位置迭代式(1)不再适用,因此需针对炼钢连铸调度问题,改进个体移动规则.为了保证当前个体向它的“较优且最近”的个体随机移动,引入一个新的参数——选择概率 λ . 鲸鱼 Ω_u 的副本 X' 在它的“较优且最近”的鲸鱼 Y 的引导下,进行如下移动:首先比较个体 X' 和 Y 中对应位置的元素,如果不同,则将该元素的值和位置分别存入集合 A 和 B 中;遍历这些不同元素所在的位置,生

成一个0到1之间的随机数 P ,若 P 小于 λ 且 Y 中该位置的元素属于集合 A (存储未被选择的元素),则将 Y 中该元素赋值给 X' 中对应位置的元素,否则从集合 A 中随机选择一个值赋给 X' 中对应位置的元素.注意到已经赋值给 X' 的元素应从集合 A 中移除.

5.2.4 自适应邻域搜索策略

为增强算法的局部搜索能力,当种群中不存在当前鲸鱼个体的“较优且最近”的鲸鱼时,对当前个体进行结合移位算子和交换算子的自适应邻域搜索.自适应邻域搜索方法将种群不同个体与生成该个体的邻域搜索算子关联起来.首先比较区间 $[0,1]$ 内的随机数 a 和自适应邻域搜索概率 ϑ 的大小,若 $a < \vartheta$,选择关联的邻域算子进行局部搜索;反之,则从交换算子和移位算子中任选一种邻域算子实现局部搜索.

5.3 实例仿真与分析

为验证本文算法的有效性,随机生成5个不同规模的案例,选择遗传算法(genetic algorithm, GA)、人工蜂群算法(artificial bee colony, ABC)、传统WSA算法作为比较算法.WSA-IC算法的参数设置如下:种群规模 PS 为50,选择概率 λ 为0.5,自适应邻域搜索概率 ϑ 为0.75,稳定性阈值 T_s 为 $200 + |Z|/2$ ($|Z|$ 为浇次数).所有算法以相同的迭代次数为终止条件,每组实验运行10次,结果见表8.由表8知,对于测试的5个案例,WSA-IC算法均能找到优于ABC、GA和WSA算法求得的解,并取得较小的标准差,且这种差异随着案例规模的增大而增大.由此说明,笔者提出的算法具有良好的寻优能力和稳定性.图7为所示算法的收敛曲线(横坐标为迭代次数,纵坐标为每次迭代求得的最优解适应度值).从图7可知,相较于GA、ABC和WSA算法,WSA-IC算法能更快地收敛到更优的解.

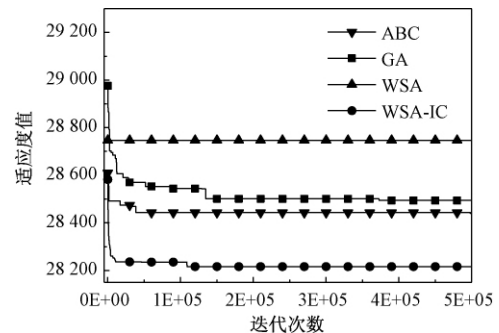


图7 算法调度90个浇次时的收敛情况

Fig. 7 Convergence rate of algorithms for the case of scheduling 90 casts

表 8 WSA-IC 算法与其他算法的实验结果
Tab. 8 Experimental results of WSA-IC and other algorithms

迭代次数	ABC		GA		WSA		WSA-IC	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
30	8 601.30	8.72	8 614.30	24.42	8 705.00	128.22	8 580.10	5.56
45	11 361.30	20.79	11 437.50	37.13	11 558.00	114.68	11 275.00	4.90
60	17 426.30	21.31	17 529.40	90.96	17 698.10	192.93	17 295.10	8.30
75	20 583.00	59.58	20 739.30	94.40	20 925.00	351.09	20 387.00	11.75
90	28 413.20	47.58	28 542.40	71.89	28 739.40	186.38	28 214.40	11.59

6 结束语

研究了一种新兴的群体智能算法——鲸鱼群算法(WSA)。针对多峰函数优化问题的特点,提出了改进的鲸鱼群算法(WSA-IC)。WSA-IC 改进了 WSA 的迭代规则,并引入了“稳定性阈值”和“适应度阈值”两个参数,使算法能在迭代过程中有效地识别并跳出已找到的极值点。结果表明,WSA-IC 在求解多峰函数优化问题上有着优异的性能,且 WSA-IC 的参数极易设置。此外,以炼钢连铸调度问题为例,阐述了 WSA 在工程优化领域的具体应用,表明 WSA 具有较大的应用价值。

当前关于 WSA 的研究仍处于起步阶段,未来可以将 WSA 与其他元启发式算法相结合以提高算法的优化性能;本文实验已证明 WSA 对多峰连续优化问题以及炼钢连铸调度问题的适用性,未来可以研究 WSA 在其他实际工程优化问题(特别是 NP-hard 问题)中的应用。

参考文献:

- [1] ZHANG G H, GAO L, SHI Y. An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem [J]. Expert systems with applications, 2011, 38 (4): 3563–3573.
- [2] 吴秀丽, 张志强. 求解柔性作业车间调度问题的细菌算法对比及改进 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39 (3): 34–39.
- [3] KUILA P, JANA P K. A novel differential evolution based clustering algorithm for wireless sensor networks [J]. Applied soft computing, 2014, 25: 414–425.
- [4] ELHABYAN R S Y, YAGOUB M C E. Two-tier particle swarm optimization protocol for clustering and routing in wireless sensor network [J]. Journal of network and computer applications, 2015, 52: 116–128.
- [5] HOU E S H, ANSARI N, REN H. A genetic algorithm for multiprocessor scheduling [J]. IEEE transactions on parallel and distributed systems, 1994, 5 (2): 113–120.
- [6] QU B Y, SUGANTHAN P N, DAS S. A distance-based locally informed particle swarm model for multimodal optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2013, 17 (3): 387–402.
- [7] ZENG B, GAO L, LI X Y. Whale swarm algorithm for function optimization [C]// Proceedings of the 13th international conference on intelligent computing. Liverpool: Springer, 2017: 624–639.
- [8] 程适, 陈俊凤, 孙奕菲, 等. 数据驱动的发展式头脑风暴优化算法综述 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39 (3): 22–28.
- [9] SHI Y H. An optimization algorithm based on brainstorming process [J]. International journal of swarm intelligence research, 2011, 2 (4): 35–62.
- [10] LI X D. A multimodal particle swarm optimizer based on fitness Euclidean-distance ratio [C]// Proceedings of the 9th Annual conference on Genetic and Evolutionary Computation. Washington: ACM, 2007: 78–85.
- [11] LI X D. Efficient differential evolution using speciation for multimodal function optimization [C]// Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Washington: ACM, 2005: 873–880.
- [12] THOMSEN R. Multimodal optimization using crowding-based differential evolution [C]// Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation. Portland: IEEE, 2004: 1382–1389.
- [13] LI X D. Adaptively choosing neighbourhood bests using species in a particle swarm optimizer for multimodal function optimization [C]// Proceedings of the 6th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Berlin: Springer, 2004: 105–116.
- [14] 唐秋华, 郑鹏, 张利平, 等. 融合启发式规则和文化基因算法的多缓冲炼钢—连铸生产调度 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21 (11): 2955–2963.
- [15] PACCIARELLI D, PRANZO M. Production scheduling in a steelmaking-continuous casting plant [J]. Computers and chemical engineering, 2004, 28 (12): 2823–2835.
- [16] HAMMING R W. Error detecting and error correcting codes [J]. Bell system technical journal, 1950, 29 (2): 147–160.

两阶段三存档集约束优化算法(TSDA)

李二超, 李 进

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 针对约束优化算法采用相同的进化策略处理位于 Pareto 边缘的解与函数值较差的解, 使得寻优结果较差, 提出一种两阶段三存档集约束优化算法. 该算法分为两个阶段. 第一阶段: 根据 $\varepsilon(t)$ 值将种群分为 3 个存档集, 即非支配解存档集、支配解存档集以及非支配可行解存档集. 非支配解存档集进行混合策略的双重寻优, 既避免了算法陷入局部最优, 又使得靠近前沿的解加速收敛; 支配解存档集则注重于全局搜索, 从而有利于算法搜索到更优可行解. 非支配解存档集和支配解存档集使用不同的优化策略进行进化, 提高了算法的寻优能力. 第二阶段: 在第一阶段达到设定的代数时, 将各代保留到非支配可行解存档集中的个体进行快速非支配排序, 选出的 N 个优秀个体则为最优解. 最后, 将提出的算法与其他约束多目标进化算法在 3 种经典约束测试函数上进行对比, 仿真结果表明, 所提出算法在不同类约束条件下的寻优能力均具有优势.

关键词: 约束优化; 三存档集; 混合策略; 两阶段; 寻优能力

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.002

0 引言

近些年, 用多目标优化技术来解决约束问题是个热点^[1-2]. 首先要找到全局内的可行解集, 其次才能考虑解集的分布性和收敛性, 其中设计有效的约束处理技术是关键所在. 因此, 将进化算法引入到约束多目标优化问题中是必须的. 除了要解决多目标优化过程中面临的提高进化算法搜索能力、避免陷入局部最优、合理设置参数等多个问题外, 还必须保证算法获得可靠的求解性能和全局的优化效果. 因此, 约束多目标优化算法的研究内容较多, 不仅需要重点研究约束处理技术, 还必须研究与之相适应的进化策略、多样性维护策略以及精英选择策略等多项关键技术.

孟红云等^[3]提出一种用于约束多目标优化问题的双群体差分进化算法. 该算法同时使用两个群体, 一个群体用于保存搜索过程中找到的可行解; 另一个用于记录在搜索过程中得到的部分具有某些优良特性的不可行解, 避免了构造罚函数和直接删除不可行解. 但是, 该方法在更新可行解集时会存在丢失边界解和不利于保持种群的整体多样性的缺陷; 而在更新不可行解集时会出现

目标函数较差的个体, 从而影响种群的收敛. Deb 提出了一种可行性法则^[4]来比较个体, 但 Deb 准则认为可行解优于不可行解, 没有利用较优不可行解所携带的信息, 不利于保持种群的多样性. 最近, 一些学者基于精英保留机制提出了双档案集方法, 将进化过程产生的可行解和不可行解个体分别存入可行解档案和不可行档案. 例如, 文献[5]提出了基于遗传算法的双档案集机制; 文献[6-9]提出了基于差分算法的双档案方法. 然而这些方法仅粗略地以约束违反度值作为依据, 优先选择靠近可行边界的不可行解, 没有区分出最优不可行解, 将直接影响算法的寻优能力.

基于此, 笔者提出一种两阶段三存档集约束优化算法, 主要创新点包括: ①提出新的三存档集处理约束条件, 避免了处于 Pareto 边缘的解与函数值较差的解采用同样的进化策略; ②对非支配解存档集和支配解存档集采用侧重点不同的搜索方式. 非支配解存档集采用混合策略进化, 既进行局部搜索又进行全局搜索, 保证在 Pareto 前沿附近的解快速收敛, 又不会陷入局部最优; 支配解存档集采用自适应变异, 将变异率和个体信息联系起来, 引导种群进化.

收稿日期:2018-03-01; 修订日期:2018-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61763026, 61403175)

作者简介:李二超(1980—), 男, 河北定州人, 兰州理工大学副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事多目标优化技术研究, E-mail: lecstarr@163.com.

1 约束优化问题及相关定义

不失一般性,一个约束的多目标优化问题可定义如下^[1]:

$$\begin{cases} \min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)); \\ \text{s. t. } g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, q; \\ h_j(x) = 0, j = q + 1, \dots, m; \\ l_i \leq x_i \leq u_i, i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in S$ 是决策变量, S 表示 n 维搜索空间,它满足如下边界约束条件: $l_i \leq x_i \leq u_i$, $1 \leq i \leq n$; $F(x)$ 是目标函数; q 表示不等式约束条件的个数; m 表示总约束条件的个数; $g_j(x)$ 为第 j 个不等式约束条件; $h_j(x)$ 为第 $j - q$ 个等式约束条件; u_i 和 l_i 分别为分量 x_i 的上界和下界。

满足所有约束条件的解是可行解,而所有的可行解组成可行域 $\Omega \in S$; 不满足任意一个约束条件的解被称为不可行解,所有的不可行解组成不可行域。如果 $g_j(x) = 0 (j = 1, 2, \dots, q)$ 在一个可行解处成立,则称该不等式约束条件在该可行解处是活跃的。

个体 x 在第 j 个约束条件上的约束违反度表示为:

$$G_j(x) = \begin{cases} \max\{g_j(x), 0\}, & 1 \leq j \leq q; \\ \max\{|h_j(x)| - \delta, 0\}, & q + 1 \leq j \leq m, \end{cases} \quad (2)$$

式中: δ 为等式约束的容忍参数,该参数可以定义为一个特定的值(一般设为 0.000 1)或采用只适应变化的方式定义。所以个体 x 总的约束违反度表示为: $v(x) = \sum_{j=1}^m G_j(x)$ 。

2 两阶段三存档集约束优化算法(TSDA)

通过对三存档集进行搜索机制不同的进化方式,来引导种群向真实 Pareto 前沿进行进化。利用非支配解存档集双重寻优,一方面使得靠近 Pareto 前沿的解加速向前靠近;另一方面使存档集避免陷入局部收敛。支配解存档集利用自适应的变异概率,将目标函数值与种群个体的信息联系起来,提高了算法的搜索效率。最后通过非支配可行解存档集保留种群当中的精英个体,提高了算法约束优化性能。

2.1 最优不可行解

在非支配解存档集中让最优不可行解进入存档集参与进化,不仅能加快算法的收敛速度,同时也增强了可行域边界附近的寻优能力。判定一个不

可行解是否位于可行域附近,具体如下:若一个不可行解的约束违反度小于等于当代的 $\varepsilon(t)$ 值(可行阈值),则其为靠近可行域边界的不可行解。

定义 1 ε 值(可行阈值):

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon(0) \cdot \left(1 - \frac{5t}{3T}\right), & t \leq 0.6T; \\ 0, & t > 0.6T, \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 是当前代数; T 为进化总代数; $\varepsilon(0)$ 是种群中个体根据约束违反度升序排序后第 $0.05 \cdot N$ 个个体, N 为种群的规模。

定义 2 最优不可行解: 靠近可行域边界,且在可行域中找不到能支配该不可行解的可行解,则称该不可行解为最优不可行解,如图 1 所示。

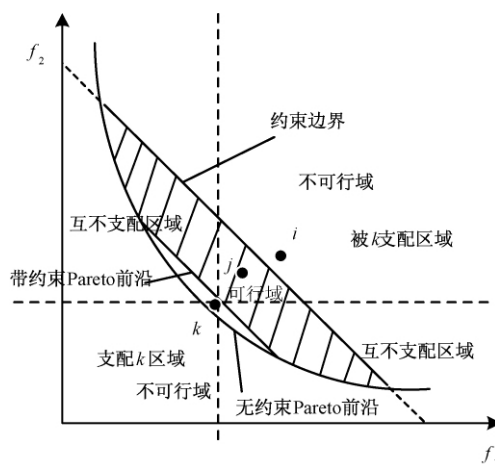


图 1 最优不可行解

Fig. 1 The optimal infeasible solution

图 1 中点 i 及 k 皆为靠近可行域边界(图中的阴影部分为可行域)的不可行解,不可行解 i 虽然靠近可行域边界,但其远离 Pareto 前沿,对种群进化没有引导作用,因此,在选择最优不可行解时,需要跳过这种不可行解。而不可行解 k 既满足靠近可行域边界又满足在可行域中找不到能支配 k 的可行解,则 k 为最优不可行解,让其参与进化。

2.2 三存档集模型

笔者基于 NSGA-II 的基础上加入了两阶段三存档模型,该算法将进化过程划分为两个阶段。首先,将种群利用快速非支配排序法进行分层。根据 Pareto 等级、约束违反度及 $\varepsilon(t)$ 值划分为非支配解(包括可行解及不可行解)、支配解及非支配可行解,分别存入 3 个存档集: 非支配解存档集、支配解存档集以及非支配可行解存档集。然后,种群进行两阶段进化操作。第一阶段: 非支配解存档集及支配解存档集采取不同的策略分别进行进化; 第二阶段: 判断非支配可行解存档集中解的个数

是否超过种群数量,如果超过则将其进行快速非支配排序,计算出非支配可行解存档集中个体的 rank 值及拥挤度距离值,选出种群规模大小的优秀个体。

2.3 非支配解存档集进化

定义3 非支配解存档集(NDA):根据2.1节所计算出当代的 $\varepsilon(t)$ 值区分出种群中约束违反度小于等于 $\varepsilon(t)$ 值的解,其中既包括可行解,也包括不可行解。若该解 rank 值等级为1,则为非支配解,非支配解的集合称为非支配解存档集。

非支配解存档集(NDA)既进行局部搜索又进行全局搜索。NDA 存档集中的解虽然皆为 Pareto 等级为1的解,但这些解有靠近真实 Pareto 前沿的、也有远离 Pareto 前沿的。若只进行局部搜索,很可能陷入局部最优当中,因此,笔者采用非支配解存档集局部搜索和全局搜索同时进行。因为非支配解存档集中的不可行解为靠近可行域且在可行域当中没有能支配它的可行解,所以非支配不可行解只进行局部搜索可以更好地引导种群向 Pareto 前沿进化。非支配解存档集当中的可行解分为两种情况:一种情况为该可行解位于 Pareto 前沿附近,采用局部搜索策略可以使其尽快收敛;另外一种情况为该可行解远离 Pareto 前沿,采用全局搜索策略可以扩大搜索的空间,避免陷入局部最优。鉴于以上两种情况,非支配解存档集当中的可行解为不确定因素,故笔者采用两种不同交叉变异概率对其进行进化。首先将可行解复制一份放入集合 CNDA 中,然后非支配解存档集整体进行局部搜索,而复制的可行解集 CNDA 进行全局搜索。非支配解存档集进化过程中,交叉算子取0.5,变异算子取0.05,在进化过程中生成一个随机数,若随机数 $u \leq 0.5$, u 为 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数,则进行 SBX 交叉操作;若随机数 $u \geq 0.95$,则进行多项式变异操作; $0.5 < \text{随机数} < 0.95$,则按照约束违反度值从小到大,从非支配解存档集中依次选择两个个体进入下一代。CNDA 集合仍采用原 NSGA-II 的 SBX 交叉和多项式变异操作。

2.4 支配解存档集进化

定义4 支配解存档集(DA):若该解不为非支配解,则其为支配解,支配解的集合称为支配解存档集。

支配解存档集进行全局搜索,具体操作如下。

(1) 交叉操作:为了跳出局部最优以及加强空间搜索能力,笔者将正态分布引入到 SBX 算子

中。由于正态分布的引入,算法可搜索到的空间更为广阔,因此更容易跳出局部最优,从而使 Pareto 前沿更具延展性,均匀地分布在 Pareto 域上,保证种群的多样性。NDX 算子的产生方式如下:

如果 $u \leq 0.5$, 则

$$\begin{cases} c_{1,k} = 0.5 [(p_{1,k} + p_{2,k}) + \\ 1.481 |N(0,1)| (p_{1,k} - p_{2,k})], \\ c_{2,k} = 0.5 [(p_{1,k} + p_{2,k}) - \\ 1.481 |N(0,1)| (p_{1,k} - p_{2,k})]; \end{cases} \quad (4)$$

如果 $u > 0.5$, 则

$$\begin{cases} c_{1,k} = 0.5 [(p_{1,k} + p_{2,k}) - \\ 1.481 |N(0,1)| (p_{1,k} - p_{2,k})], \\ c_{2,k} = 0.5 [(p_{1,k} + p_{2,k}) + \\ 1.481 |N(0,1)| (p_{1,k} - p_{2,k})]. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $c_{1/2,k}$ 为子代染色体上对应的第 k 个变量; $p_{1,k}$ 、 $p_{2,k}$ 分别为父代两个染色体上对应的第 k 个变量; $|N(0,1)|$ 为正态分布随机变量。

(2) 变异操作:经典 NSGA-II 算法中多项式变异算子与种群个体的信息并没有联系,无论种群进化到何种程度,变异概率都为固定值,种群没有特定的方向进行进化。因此,将种群个体当前信息与变异算子结合起来时,才能使种群向着真实的 Pareto 前沿进化。自适应变异算子^[10]产生方式如下:

$p_m =$

$$\begin{cases} p_{\max} - \frac{(p_{\max} - p_{\min}) \cdot (f_{\max} - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\min}}, & f \geq f_{\text{avg}}; \\ p_{\min}, & f < f_{\text{avg}}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_{\max} 、 f_{\min} 分别为当前种群中目标函数的最大值、最小值; f_{avg} 为当前种群所有个体平均目标函数值。

在进化的初期,个体的最大目标函数值 f_{\max} 与最小目标函数值 f_{\min} 差异较大,目标函数值较大和较小的个体数目大致相同,此时 f_{avg} 近似等于 f_{\max} 与 f_{\min} 的平均值。由式(6)知, $(f_{\max} - f_{\text{avg}}) / (f_{\max} - f_{\min})$ 的值大致为0.5,此时求得的变异概率较大,有助于算法初期进行全局搜索,寻找最优解集。算法进化到后期,大部分种群个体求得的目标函数值大致相同,此时 f_{avg} 是一个略大于 f_{\min} 的值。当所有个体都进化到最优解时,达到一种极限条件,即 $f_{\min} = f_{\text{avg}}$,这时公式中 $(f_{\max} - f_{\text{avg}}) / (f_{\max} - f_{\min})$ 的值接近1,交叉变异概率相对调整为较小的数,增进局部寻优的能力,与种群个体寻优的方向相一致,有利于最优解集的搜索。

2.5 非支配可行解存档集

笔者使用非支配可行解存档集来保存进化过程中产生的所有可行非劣解. 首先, 在种群每次迭代过程中, 将非支配存档集中约束违反度为 0 的解提取出来, 加入到非支配可行解集中; 然后, 通过快速非支配排序, 选出的 N 个优秀个体进行输出, 此时输出的解全部为最优的可行解.

2.6 算法流程

两阶段三存档集约束优化算法流程:

Step 1 开始 $gen = 1$.

Step 2 初始化种群. 从决策空间 S 随机产生 N 个个体的初代种群 $P(t) = \{x_{1,t}, \dots, x_{N,t}\}$, 并根据目标函数计算每个个体的目标函数值.

Step 3 非支配排序. 对 Step 2 产生的种群进行非支配排序, 按照非支配等级由小到大排序, 并计算每个个体的约束违反度.

Step 4 存档集划分. 将种群中每个个体的约束违反度值与可行阈值 $\varepsilon(t)$ 值相比, 再根据 rank 值大小, 分类到非支配解存档集(NDA)、支配解存档集(DA)及非支配可行解存档集(NDFA)当中.

Step 5 基因操作. 对非支配解存档集和支配解存档集采取不同的进化策略.

Step 5.1 非支配解存档集采用混合搜索策略. 根据 2.3 节中的内容分别对 NDA 和 CNDA 两个集合进行局部搜索和全局搜索, 合并进化后的两个集合, 记作 $U(t)$.

Step 5.2 支配解存档集采用全局搜索. 利用正态分布算子和自适应变异算子对 DA 进行交叉变异操作, 从而生成子种群 $Q(t)$.

Step 6 合并子父代种群. 将 $U(t)$, $Q(t)$ 及父代种群 $P(t)$ 进行合并, 记作 $Y(t)$.

Step 7 选择操作. 将 $Y(t)$ 进行快速非支配排序, 根据 rank 值及拥挤度距离值大小从 $Y(t)$ 中选出 N 个个体作为下一代种群 $P(t+1)$.

Step 8 判断当前代数是否大于设定代数, 如满足则跳转至 Step 9, 进行第二阶段的操作; 否则, $gen = gen + 1$, 并跳转至 Step 3.

Step 9 对非支配可行解存档集(NDFA)进行快速非支配排序, 根据 rank 值及拥挤度距离选择出 N 个个体, 输出最终的 Pareto 最优解, 算法终止.

2.7 计算复杂度分析

假设非支配解存档集规模为 N_1 , 支配解存档集规模为 N_2 , 非支配可行解存档集规模为 N_3 . 则计算非支配解存档集、支配解存档集和非支配可

行解存档集目标函数和约束违反度的时间复杂度为 $O(m(N_1 + N_2 + N_3))$. 其中, m 为目标函数个数; N 为种群规模; 非支配解存档集变异和交叉操作的时间复杂度为 $O(mN_1)$; 支配解存档集变异和交叉操作的时间复杂度为 $O(mN_2)$; 选择操作的时间复杂度为 $O(m(N_1 + N_2 + N_3)^2)$. 综上, TSDA 算法迭代一次的最坏时间复杂度为 $O(m(N_1 + N_2 + N_3)) + O(mN_1) + O(mN_2) + O(m(N_1 + N_2 + N_3)^2)$, 所以本文算法时间复杂度为 $O(mN^2)$.

3 TSDA 算法实验结果与分析

3.1 测试函数与参数设置

所有实验在硬件配置为 Intel Pentium、G2030 CPU、4G 内存、主频 3.0 GHz、Win10 系统的计算机上进行, 程序采用 Matlab R 2010 编写.

为了验证 TSDA 算法的性能, 选择了 SRN、TNK、OSY 作为测试函数, 其函数表达式见表 1. 并与运用可行性规则的 NSGA-II 算法(FRNSGA-II)进行比较.

TSDA 算法参数设置: 随机生成的种群规模为 $N = 200$, 进化代数为 2 000 代, 交叉算子为 NDX(正态分布)交叉算子, 采用自适应变异算子, 交叉变异概率详见 2.4 节.

FRNSGA-II 算法参数设置: 随机生成的种群规模为 $N = 200$, 进化代数为 2 000 代, 交叉算子为 SBX 算子, 交叉概率为 0.95, 变异算子为多项式变异, 变异概率为 0.05.

测试函数特点: SRN 函数的 Pareto 前沿连续; TNK 函数为非线性约束函数, 且其 Pareto 前沿不连续; OSY 函数共有 6 个不等式约束条件, 既有线性约束又有非线性约束; Pareto 前沿由三段折线组成. 约束测试函数的真实 Pareto 前沿源自参考文献[11].

3.2 评价指标

3.2.1 GD 指标

世代距离(generational distance, GD)^[12], 用于评价所求得的近似 Pareto 前沿 P_{know} 相对于真实 Pareto 前沿 P_{true} 的逼近程度, 该指标的定义如下:

$$GD = \frac{1}{N_{PF}} \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}, \quad (7)$$

式中: N_{PF} 为 P_{know} 中个体的数量; d_i 为 P_{know} 中第 i 个个体的目标向量到 P_{true} 中最近个体的欧式距离; GD 越小, 表明 P_{know} 越逼近 P_{true} , 收敛性越好.

表1 测试函数表达式

Tab.1 Description of test functions

测试函数	目标函数 $\min F(x) = (f_1(x), f_2(x))$	变量约束	决策变量范围
SRN	$\begin{cases} \min f_1(x) = 2 + (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 1)^2 \\ \min f_2(x) = 9x_1 - (x_2 - 1)^2 \end{cases}$	$\begin{cases} x_1^2 + x_2^2 \leq 225 \\ x_1 - 3x_2 + 10 \leq 0 \end{cases}$	$-20 \leq x_i \leq 20$ $i = 1, 2$
TNK	$\begin{cases} \min f_1(x) = x_2 \\ \min f_2(x) = x_1 \end{cases}$	$\begin{cases} -x_1^2 - x_2^2 + 1 + \\ 0.1 \cos(16 \arctan(x_1/x_2)) \leq 0 \\ (x_1 - 0.5)^2 + (x_2 - 0.5)^2 \leq 0.5 \end{cases}$	$0 \leq x_i \leq \pi$ $i = 1, 2$
OSY	$\begin{cases} \min f_1(x) = 4x_1^2 + 4x_2^2 \\ \min f_2(x) = (x_1 - 5)^2 + (x_2 - 5)^2 \end{cases}$	$\begin{cases} x_1 + x_2 - 2 \geq 0 \\ 6 - x_1 - x_2 \geq 0 \\ 2 + x_1 - x_2 \geq 0 \\ 2 - x_1 + 3x_2 \geq 0 \\ 4 - (x_3 - 3)^2 - x_4 \geq 0 \\ (x_5 - 3)^2 + x_6 - 4 \geq 0 \end{cases}$	$0 \leq x_i \leq 10$ $i = 1, 2, 6$ $1 \leq x_3, x_5 \leq 5$ $0 \leq x_4 \leq 6$

3.2.2 SP 指标

Schott 在 1995 年提出了 Spacing 指标^[13],用来计算所求得的解集在目标空间上的分布均匀性,其计算公式如下所示:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N_{PF} - 1} \sum_{i=1}^{N_{PF}} (d' - d_i)^2}. \quad (8)$$

式中: $d_i = \min_{j \in 1, \dots, n \wedge j \neq i} \sum_{k=1}^M |f_k^i(x) - f_k^j(x)|$ 表示离第 i 个个体最小的目标距离和; d' 为所有 d_i 的均值; N_{PF} 为所求得解集的个体数量; S 越小表示所求得的解集分布的越均匀,当 S 为 0 时,表示所求解集中的所有解都是等距离分布的。

表 2 为 2 种算法对上述 3 种测试函数的 SP、GD 的统计结果. 可以看出,本文算法 TSDA 在测试函数 TNK、OSY 上的 GD 值明显小于对比算法——FRNSGA-II 算法,说明笔者所提算法采用的策略避免了种群陷入局部最优,对种群收敛到 Pareto 前沿起着重要的作用. 在 SP 值方面,算法也有着明显的优势,这说明所提算法的分布性更好,保证了种群的多样性。

3.3 仿真结果

图 2、图 4、图 6 为本文算法 TSDA 所求得的 Pareto 前沿,图 3、图 5、图 7 为基于可行性规则的 NSGA-II 算法所求得的 Pareto 前沿. 通过以上的对比可以看出: 对于 SRN 函数,两种算法虽然都找到了真实的 Pareto 前沿,但 FRNSGA-II 算法的分布性和收敛性较差; 对于 TNK 测试函数,本文算法 TSDA 有更好的收敛性,并保持良好的分布性; 对于 OSY 测试函数,FRNSGA-II 算法所得到的解集明显偏离真实前沿. 由此可以得出,笔者提出的 TSDA 算法在 3 个约束测试问题上,其最优 Pareto 前沿在逼近性和分布性上都明显优于 FRNSGA-II。

4 结论

针对约束优化算法处理位于 Pareto 边缘的解与函数值较差的解采用相同的进化策略使得寻优结果较差的问题,提出两阶段三存档集约束优化算法. 利用两个存档集不同的寻优方式,很好地兼顾了探索开发和收敛的平衡. 并且通过与其他算法在 3 种测试函数上的对比表明,本文算法在处理约束多目标优化问题时,分布性及收敛性均

表2 2种进化算法求解标准测试函数所得的 GD、SP 值

Tab.2 GD and SP values obtained by two evolutionary algorithms for solving standard test functions

测试函数	GD				SP			
	TSDA		FRNSGA-II		TSDA		FRNSGA-II	
	平均值	方差	平均值	方差	平均值	方差	平均值	方差
SRN	2.8346E-04	2.5521E-03	0.022 3	0.528 6	0.093 2	0.001 4	1.176 2	0.972 3
TNK	1.137E-04	8.1149E-03	7.499 5	7.042 7	0.134 8	7.865E-04	2.435 7	3.071 5
OSY	0.612 5	0.304 0	2.178 5	0.718 6	3.246 8	1.559 7	8.523 6	2.461 8

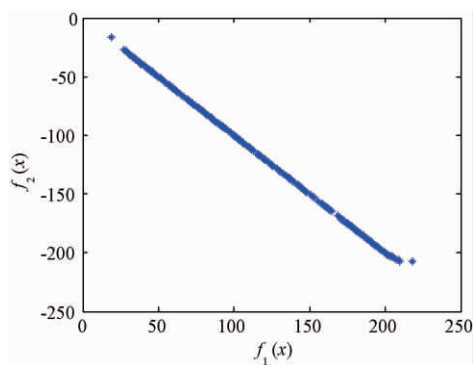


图2 TSDA 算法 SRN 函数仿真结果
Fig.2 Simulation result of TSDA algorithm on SRN function

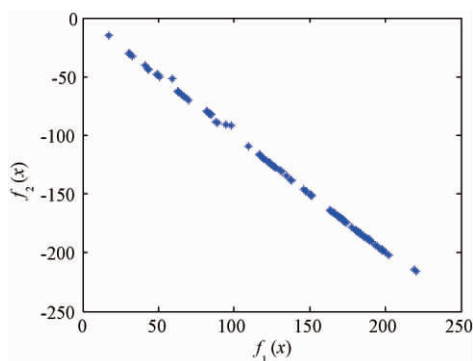


图3 FRNSGA-II 算法 SRN 函数仿真结果
Fig.3 Simulation result of FRNSGA-II on SRN function

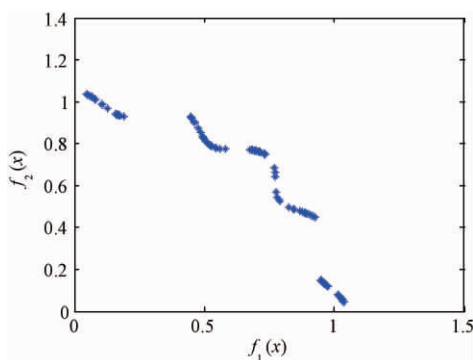


图4 TSDA 算法 TNK 函数仿真结果
Fig.4 Simulation result of TSDA algorithm on TNK function

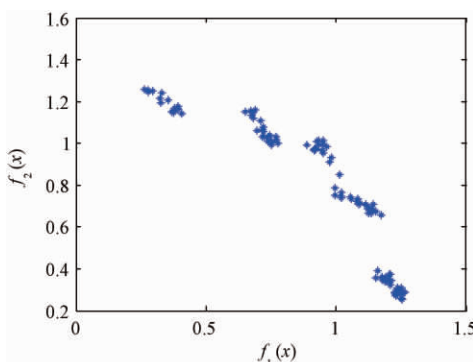


图5 FRNSGA-II 算法 TNK 函数仿真结果
Fig.5 Simulation result of FRNSGA-II on TNK function

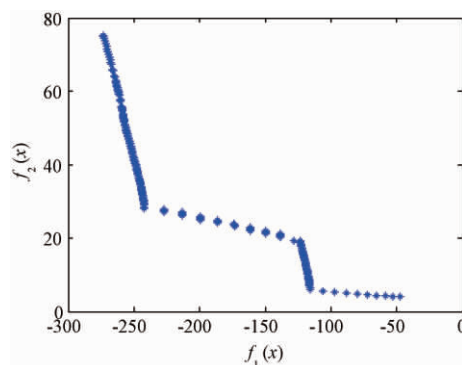


图6 TSDA 算法 OSY 函数仿真结果
Fig.6 Simulation result of TSDA algorithm on OSY function

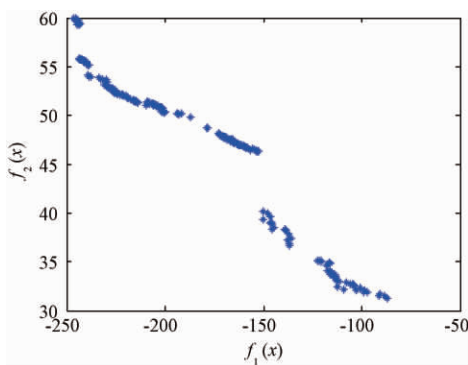


图7 FRNSGA-II 算法 OSY 函数仿真结果
Fig.7 Simulation result of FRNSGA-II on OSY function

具有一定优势.

然而,必须承认,本文算法 TSDA 在计算量上要高于 FRNSGA-II 算法.接下来的研究将致力于如何降低算法的时间复杂度及本文算法的实际应用.

参考文献:

- [1] 李智勇,黄滔,陈少森,等.约束优化进化算法综述[J].软件学报,2017,28(6):1529-1546.
- [2] 梁静,刘睿,瞿博阳,等.进化算法在大规模优化问题中的应用综述[J].郑州大学学报(工学版),2018,39(3):15-21.
- [3] 孟红云,张小华,刘三阳.用于约束多目标优化问题的双群体差分进化算法[J].计算机学报,2008,31(2):228-235.
- [4] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms [J]. Computer methods in applied mechanics & engineering, 2000, 186(2):311-338.
- [5] HAMMACHE A, BENALI M, AUBÉ F. Multi-objective self-adaptive algorithm for highly constrained problems: novel method and applications [J]. Applied energy, 2010, 87(8):2467-2478.

- [6] 俞国燕,李鹏,何真,等. 一种用于多目标约束优化的改进进化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(6): 1172 – 1178.
- [7] 毕晓君,张磊,肖婧. 基于双种群的约束多目标优化算法[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(12): 2813 – 2823.
- [8] 暴励,曾建潮. 一种双种群差分蜂群算法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 266 – 272.
- [9] 毕晓君,张磊. 基于混合策略的双种群约束优化算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(4): 715 – 720.
- [10] 肖易寒,李明逵,陈立伟. 基于改进 NSGA-II 算法的多光谱测温数据处理[J]. 应用科技, 2017, 44(1): 33 – 39.
- [11] DEB K, PRATAP A, MEYARIVAN T. Constrained test problems for multi-objective evolutionary optimization [C] // Proceedings of First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO 2001. Zurich, Switzerland: EMO, 2001: 284 – 298.
- [12] 韩红艳. 基于 Pareto 支配的高维多目标进化算法研究[D]. 大连: 大连理工大学计算机科学与技术研究, 2016.
- [13] JIANG S, YANG S. A steady-state and generational evolutionary algorithm for dynamic multi-objective optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2017, 21(1): 65 – 82.

Constraint Optimization Algorithm with Two-Stage and Three-Archive

LI Erchao, LI Jin

(School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Constrained optimization algorithm adopted the similav evolutionary strategy to deal with solutions located on the Pareto edge and solutions with poor function values, which could lead to poor search results. Aiming to solve this problem, a constrained optimization algorithm with two-stage and three-archive was proposed. The algorithm was divided into two stages. In the first stage, the population was divided into three archives according to the $\varepsilon(t)$ value. These archives were non-dominated solution archives, dominant solution archives, and non-dominated feasible solution archives, respectively. The dual optimization of hybrid strategy is applied to the non-dominated solution archives. It could not only avoid being trapped in local optimum, but also accelerate the convergence of solutions near the frontier. The dominant solution archives focused on the global search, which was beneficial for the algorithm to search better feasible solution. The non-dominated solution archives and the dominant solution archives were evolved using different optimization strategies to improve the optimization capability of algorithm. In the second stage, non-dominated sorting was performed on individuals when the first stage reached the certain generation. These individuals were concentrated from each generation to the non-dominated feasible solution archives. The selected N individuals were the optimal solution. Finally, the proposed algorithm was compared with other constrained multi-objective evolutionary algorithms on the three classical constraint test functions. The simulation results showed that the proposed algorithm had advantages in different kind of constraints.

Key words: constraint optimization; three-archive; hybrid strategy; two-stage; search ability

文章编号:1671-6833(2018)06-0030-06

一种应用于函数优化问题的多种群人工蜂群算法

王守娜^{1,2}, 刘 弘^{1,2}, 高开周³

(1. 山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014; 2. 山东师范大学 山东省分布式计算机软件新技术重点实验室, 山东 济南 250358; 3. 南洋理工大学 海事研究所, 新加坡 639798)

摘 要: 针对传统人工蜂群算法(ABC)收敛速度慢、易陷入局部最优解等不足,提出一种基于种群分割的多种群人工蜂群算法(MABC)应用于函数优化问题.该算法利用 K 均值聚类算法对蜂群进行种群分割,在子种群中引入基于全局通信的蜜源位置更新方式加速算法收敛,同时引入基于局部通信的适应度函数扩展解方案的多样性.通过对6个基准测试函数的实验表明,MABC算法适应度高、收敛速度快,克服了ABC算法易陷入局部最优解等不足,在函数优化问题中表现出了更好的性能.

关键词: 人工蜂群算法; 种群分割; 蜜源位置更新; 适应度函数; 函数优化

中图分类号: TP183

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.019

0 引言

群体智能(swarm intelligence, SI)算法来源于自然界生物的觅食行为或进化过程的模拟,是一类新型的进化算法,主要特点是群体搜索策略和群体之间的信息交换.典型的群体智能算法包括蚁群优化算法(ant colony optimization, ACO)^[1]、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[2]和人工蜂群算法(artificial bee colony, ABC)^[3]等.蚁群算法在求解性能上有很强的鲁棒性,但算法收敛速度慢,容易陷入局部最优,一般需要较长的搜索时间,而且该算法容易出现停滞现象,不利于发现更好的解.粒子群算法具有相当快的逼近最优解的速度,其个体可以充分利用自身经验调整自身状态,缺点是容易产生早熟收敛,局部寻优能力较差.

人工蜂群算法(artificial bee colony, ABC)是D. Karaboga^[4]在2005年将蜜蜂的觅食行为应用到函数优化问题中而提出的,该算法计算简单、便于实现、鲁棒性强,在复杂组合优化问题中有明显的优势^[5],目前已经成功应用到模糊聚类^[6]、人工神经网络^[7]、传感器网络^[8]等多个领域中.与其他群体智能算法一样,ABC算法也存在收敛速度慢、易陷入局部最优解等问题^[9].针对以上问

题,已有学者提出了相应的改进算法,这些改进算法在一定程度上提高了算法的收敛速度、寻优精度,改善了算法的性能,但是很难实现在避免算法早熟收敛的同时加快算法的收敛速度.目前,大多数关于ABC算法的改进都是基于单一种群模型,没有考虑算法在基于多种群模型改进时相较于原始算法的优势.

聚类(clustering)^[10]是把所有数据对象划分到若干个子集的过程,每个子集是一个簇(cluster),主要指导思想是尽量使相同簇内对象具有最大相似度.在众多聚类方法中, K 均值算法^[11]是一种非常重要的聚类算法,主要思想是依据参数 k 将给定数据集划分成 k 个簇,从而让各聚类中心的数据对象到其对应的中心点的距离平方和最小,该算法原理简单、易于实现.

笔者在原始人工蜂群算法的基础上,利用 K 均值算法的思想将蜂群划分为多个子蜂群,提出一种多种群人工蜂群算法(multi-swarm artificial bee colony, MABC).子种群将全局通信模式和局部通信模式相结合,基于局部通信的适应度函数扩展了解方案的多样性,基于全局通信的蜜源位置更新方式加速算法收敛,避免算法陷入局部最优.在Matlab编程环境下选取6个标准测试函数对算法进行测试,证明了该算法能显著提高ABC

收稿日期:2018-05-01; 修订日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61472232, 61272094)

通信作者:刘弘(1955—),女,山东济南人,山东师范大学教授,博士,博士生导师,主要从事分布式人工智能领域研究, E-mail: lhsden@126.com.

算法的收敛速度和寻优精度.

1 原始人工蜂群算法(ABC)

人工蜂群算法是模拟蜜蜂的采蜜行为提出的一种智能优化算法,由蜜源,被雇佣蜂(引领蜂)和未被雇佣蜂(跟随蜂、侦查蜂)3项基本元素构成.同时,引入3种基本的行为模式:搜索蜜源、招募蜜源和放弃蜜源.其中,蜜源的位置代表优化问题的可行解;蜜源的质量对应解的适应度.

最优蜜源的搜索过程如下:首先,算法随机产生含有 N 个侦查蜂的初始种群,初始时所有蜜蜂都为侦查蜂,同时也是蜜源的数量,每个解 \mathbf{X}_i 是一个 d 维向量, $\mathbf{X}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}\}$.计算解对应函数值,设定一个临界值,将大于临界值的解作为蜜源位置.一个引领蜂与一个蜜源是相对应的,与第 i 个蜜源相对应的引领蜂依据式(1)寻找新的蜜源.

$$V_{ij} = X_{ij} + R_{ij}(X_{kj} - X_{ij}), \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$, V_{ij} 代表更新后的蜜源; j 代表蜜源更新的维度, $j = 1, 2, \dots, d$; k 代表学习的蜜源位置, $k \neq i$, k, j 都是随机选择的,并且 $k \neq j$; R 为 $[-1, 1]$ 的随机数.跟随蜂采用轮盘赌策略选择蜜源,蜜源选择的概率公式如下:

$$p_i = \text{fitness}_i / \sum_{j=1}^N \text{fitness}_j, \quad (2)$$

式中: p_i 代表第 i 个蜜源被选择的概率; fitness_i 代表第 i 个蜜源的质量,即第 i 个解的适应度值,计算公式如式(3)所示; N 代表解的个数.

$$\text{fitness}_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i}, & f_i \geq 0; \\ 1 + \text{abs}(f_i), & f_i < 0. \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_i 是第 i 个解的目标函数值,每个蜜源被选择的概率与适应度成正比.

所有引领蜂和跟随蜂经过一次邻域搜索后,检查蜜源未更新的次数 Limit ,如果一个蜜源经过 Limit 次循环后没有得到改善,则该蜜源将会被放弃,它所对应的引领蜂转为侦查蜂,侦查蜂通过公式(4)搜索新的蜜源 $V_{ij}^{[12]}$.

$$V_{ij} = X_j^{\min} + r_{ij}(X_j^{\max} - X_j^{\min}), \quad (4)$$

式中: r_{ij} 是区间 $[0, 1]$ 上的随机数; j 代表蜜源更新的维度, $j = 1, 2, \dots, d$; X_j^{\max} 和 X_j^{\min} 分别是第 j 维的上界和下界.

原始人工蜂群算法具有控制参数少、计算简单、便于实现等优点,已经被越来越多的研究者关注.但是该算法存在收敛速度慢、容易陷入局部最

优解等缺点,需要在收敛速度和寻优精度等方面加以改进.

2 多种群人工蜂群算法(MABC)

2.1 种群分割

首先,从蜜源 $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ 中随机选取 \sqrt{N} (\sqrt{N} 取整数)个蜜源作为初始聚类中心 C ,令 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_{\sqrt{N}}\}^{[13]}$;然后,利用基于 K 均值算法中基于欧氏距离的方式将剩余蜜源划分到每个聚类中心,即对于蜜源 x_i 按照 $\min\{D_{ij}(x_i, C_j)\}$ 的规则将人工蜂群划分为 \sqrt{N} 个子种群, D_{ij} 代表蜜源 x_i 到聚类中心 C_j 的距离.根据ABC算法思想,种群分割后的蜂群蜜源个数和引领蜂个数均为 \sqrt{N} .

种群分割的具体步骤如下:

步骤1 随机初始化 \sqrt{N} 个聚类中心;

步骤2 将蜜源按照基于欧氏距离的方法依次划分到每个聚类中心;

步骤3 重新计算每类中所有节点的算数平均值,得到更新后的 \sqrt{N} 个簇的中心点;

步骤4 分别计算当前所有蜜源到相应的聚类中心的均方差之和;

步骤5 如果当前迭代次数的均方差之和与前次相同,结束蜜源聚类,转到步骤6,否则转到步骤2;

步骤6 输出蜜源聚类结果,即种群分割结果.

假设在边长为 $300 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ 的空间中蜜源数量为100,按照本文的种群分割方法将其划分为10个子种群,其中相同颜色的个体为同一个子种群,划分结果如图1所示.

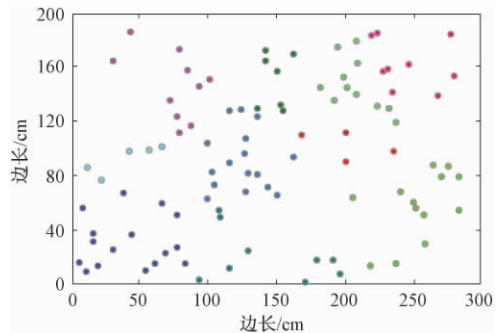


图1 种群分割结果

Fig.1 The result of population segmentation

2.2 蜜源位置更新方式

ABC算法利用原始的位置更新公式(1)时,引领蜂缺乏与整个蜂群的信息交流和共享,算法

易陷入局部最优. 种群分割之后, 提出基于全局通信的新蜜源位置更新公式(5):

$V_{ij} = X_{ij} + R_{ij}(X_{kj} - X_{ij}) + \theta_{ij}(X_{Cbest,j} - X_{ij})$, (5)
式中: V_{ij} 代表更新后的蜜源; $\theta_{ij} \in [0, 1]$ 是一个随机数; $X_{Cbest,j}$ 代表蜜源丰富度最高的子种群的聚类中心.

公式(1)只能权衡自己所在位置和历史最优位置的食物源的丰富度. 公式(5)基于全局通信方式加入引导因子 $X_{Cbest,j} - X_{i,j}$, 使引领蜂能够参考所有子种群中当前最优的位置, 有很好的方向性.

2.3 适应度函数

种群分割之后以子种群 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_{\sqrt{N}}\}$ 为单位进行引领蜂的选取和角色转换, 同一种群内样本对象相似度最高. 引领蜂被跟随蜂选择的概率公式(2)更改为公式(6):

$$p_{c,i} = fitness_{c,i} / \sum_{j=1}^{c_n} fitness_j, \quad (6)$$

式中: $p_{c,i}$ 代表第 c 组中第 i 个引领蜂被选择的概率, 因为将人工蜂群划分为 \sqrt{N} 个子种群, 所以 $c = \{1, 2, \dots, \sqrt{N}\}$; $fitness_{c,i}$ 代表第 c 组中第 i 个蜜源的质量, 即第 c 组中第 i 个解的适应度值; c_n 代表第 c 组中蜜源的数量.

基于局部通信的适应度函数由式(7)代替 ABC 算法中式(3):

$$fitness_i = \frac{1}{1 + F_i}. \quad (7)$$

改进的目标函数值 F_i 计算公式如式(8)所示:

$$F_i = \sum_{X_i \in C_j} D(X_i, C_j) / Num_{C_j}, \quad (8)$$

式中: $\sum_{X_i \in C_j} D(X_i, C_j)$ 代表种群 C_j 中所有蜜源到聚类中心的距离之和; Num_{C_j} 代表种群 C_j 中蜜源的数量.

公式(7)中的适应度函数同时考虑了子种群中的蜜源数量和距离, 提高了算法的鲁棒性.

2.4 MABC 算法步骤

步骤 1 根据 ABC 算法初始化蜂群, 包括种群规模 N , 最大迭代次数 $MaxCycle$, 适应度阈值 $Limit$, 维度 Dim 等.

步骤 2 利用 K 均值聚类算法中基于欧氏距离的方法对人工蜂群进行种群分割, 得到 C 个子种群, 其中 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_{\sqrt{N}}\}$, 每个子种群中分别独立运行.

步骤 3 根据公式(7)分别计算 C_j 个子种群中蜜蜂的适应度值, 适应度值高的一半作为引领

蜂, 剩余的作为跟随蜂.

步骤 4 C_j 中的引领蜂根据公式(5)搜索蜜源, 根据公式(7)计算蜜源适应度值, 若适应度值提高, 则更新蜜源, 否则保留原蜜源不变.

步骤 5 引领蜂提供蜜源丰富度信息, 跟随蜂根据公式(6)选择引领蜂, 并采用公式(5)进行邻域蜜源搜索.

步骤 6 更新 C_j 状态, 迭代次数加 1, 若迭代次数达到 $Limit$ 后仍有未更新的蜜源, 由侦查蜂根据公式(4)产生一个新蜜源.

步骤 7 迭代次数达到最大迭代次数 $MaxCycle$ 时, 算法结束; 否则, 返回步骤 3.

3 实验仿真及分析

实验中采用操作系统是 Windows 10, 处理器是 Intel(R) Core(TM) i5-6300HQ CPU @ 2.30 GHz, 内存 4 GB 的计算机, 编译软件为 Matlab-R2016a.

笔者使用 6 个典型的测试函数^[5]对 MABC 算法、ABC 算法^[14]及文献[15]中改进 ABC (CSABC) 算法的鲁棒性、收敛速度和寻优精度进行对比试验.

3.1 测试函数

为了测试本文 MABC 算法在函数优化问题中的性能, 选择 6 个常用的函数作为测试函数, 见表 1. 其中, $f_1 \sim f_3$ 是单峰函数, 主要用来测试算法的收敛速度和寻优精度; $f_4 \sim f_6$ 是多峰函数, 主要用来测试算法的全局寻优能力和避免早熟的能力.

表 1 测试函数

Tab. 1 Testing functions

函数	名称	搜索空间	最小值
f_1	Sphere	$[-100, 100]$	0
f_2	Rosenbrock	$[-30, 30]$	0
f_3	Schwefel	$[-100, 100]$	0
f_4	Rastrigin	$[-5.12, 5.12]$	0
f_5	Ackley	$[-32, 32]$	0
f_6	Griewank	$[-600, 600]$	0

测试函数 $f_1 \sim f_6$ 表达式如下:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2;$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2];$$

$$f_3(x) = 4.1898n - \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{|x_i|});$$

$$f_4(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10];$$

$$f_5(x) = -20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) -$$

$$\exp\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \cos(2\pi x_j)\right) + 20 + \exp(1);$$

$$f_6(x) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1.$$

3.2 测试结果对比分析

MABC、ABC 和 CSABC 3 种算法对比试验参数设置如下: 种群规模 $N = 100$, 其中引领蜂和跟随蜂的数目均为 50, 最大迭代次数 $Max-$

$Cycle = 1\ 000$, 适应度阈值 $Limit = 50$, 维度 $Dim = 50$.

3 种算法对每个测试函数分别独立进行 50 次实验, 得到对应的最优值、最差值、平均值和方差, 测试结果见表 2. 其中, 最优值和最差值反映算法的质量, 平均值反映算法的收敛速度和寻优精度, 方差反映算法的稳定性和数据的离散程度.

表 2 函数测试结果对比

Tab. 2 Comparison of functions test results

函数	算法	最优值	最差值	均值	方差
Sphere	ABC	9.233 7	1.150 7E+02	1.186 0E+01	2.978 1E+02
	CSABC	7.697 1E-02	7.771 3	3.124 7E-01	1.513 3E-01
	MABC	1.985 6E-06	4.874 42E-04	3.744 5E-05	6.452 3E-05
Rosenbrock	ABC	7.092 0E+04	2.147 7E+05	1.207 3E+04	4.695 3E+02
	CSABC	4.141 4E+03	5.702 8E+05	6.724 2E+04	1.456 3E+02
	MABC	1.691 4	3.700 7E+02	7.566 3	1.142 5E-01
Schwefel	ABC	-7.092 0E+03	-2.147 7	-1.207 3E+01	4.695 3E+03
	CSABC	-4.141 4E+3.5	-5.702 8E+02	-6.724 2E+03	1.456 3E+02
	MABC	-1.691 4E+05	-3.700 7E+03	-7.566 3E+04	1.142 5
Rastrigin	ABC	1.085 7E+03	9.433 8E+06	4.736 9E+05	8.204 6E+06
	CSABC	7.401 4E+02	3.330 6E+05	1.184 2E+04	1.407 2E+04
	MABC	1.333 8	2.378 1E+02	8.166 7	7.243 8E+01
Ackley	ABC	9.233 7E+01	1.150 0	1.186 0E+01	2.978 19
	CSABC	7.697 1E-01	7.771 3E+01	3.124 7	1.513 3
	MABC	1.985 6E-04	4.874 4E-02	3.744 5E-04	3.744 5E-03
Griewank	ABC	1.480 3	1.691 4E+01	4.033 9	6.523 7E+01
	CSABC	3.700 7E-01	1.920 6	4.159 6	7.043 8
	MABC	5.341 1E-05	3.588 7E-03	7.332 8E-05	2.824 3E-03

通过表 2 可以看出, 笔者提出的 MABC 算法在单峰函数和多峰函数测试中均有较高的寻优精度. 算法的最优值、最差值与 ABC 算法和 CSABC 算法相比有明显的提升, 说明 MABC 算法稳定性更高; 在相同的迭代次数下, MABC 算法在各测试函数上均得到了最小均值和最小方差, 表明其收敛速度更快, 寻优精度更高, 性能明显优于 ABC 算法和 CSABC 算法.

图 2 中给出了 MABC 算法、ABC 算法和 CSABC 算法独立运行 50 次的平均适应度值进化曲线. 由图 2(a)、(b) 可以看出, MABC 算法达到稳定收敛的次数远小于 ABC 算法和 CSABC 算法; 由图 2(c) 可以看出, ABC 算法和 CSABC 算法在搜索过程中陷入局部极值, 种群分割策略使 MABC 算法分组寻优, 收敛值明显小于其他两种算法; 由图 2(d) 可以看出, ABC 算法和 CSABC 算法收敛较快, 迭代次数较少, 但过早停滞, 寻优精度不如 MABC 算法; 由图 2(e)、(f)

可以看出, MABC 算法在搜索后期表现出较强的优势, 而 ABC 算法和 CSABC 算法则容易陷入局部最优.

由以上分析可以看出, MABC 算法达到稳定收敛时的寻优精度远高于 ABC 算法和 CSABC 算法, 尤其对单峰函数而言收敛速度更加明显.

4 结束语

笔者针对原始人工蜂群算法存在的收敛速度慢、易陷入局部最优解等不足, 提出了一种基于种群分割的多种群人工蜂群算法(MABC), 该算法利用 K 均值聚类算法中基于欧氏距离的方式对人工蜂群进行种群分割, 将大的种群划分为多个子种群, 每个子种群分别独立运行, 在子种群中引入基于全局通信的蜜源位置更新方式加速算法收敛, 同时引入基于局部通信的适应度函数扩展方案的多样性. 通过 6 组标准测试函数的仿真实验结果可知, 笔者提出的 MABC 算法比 ABC 算法

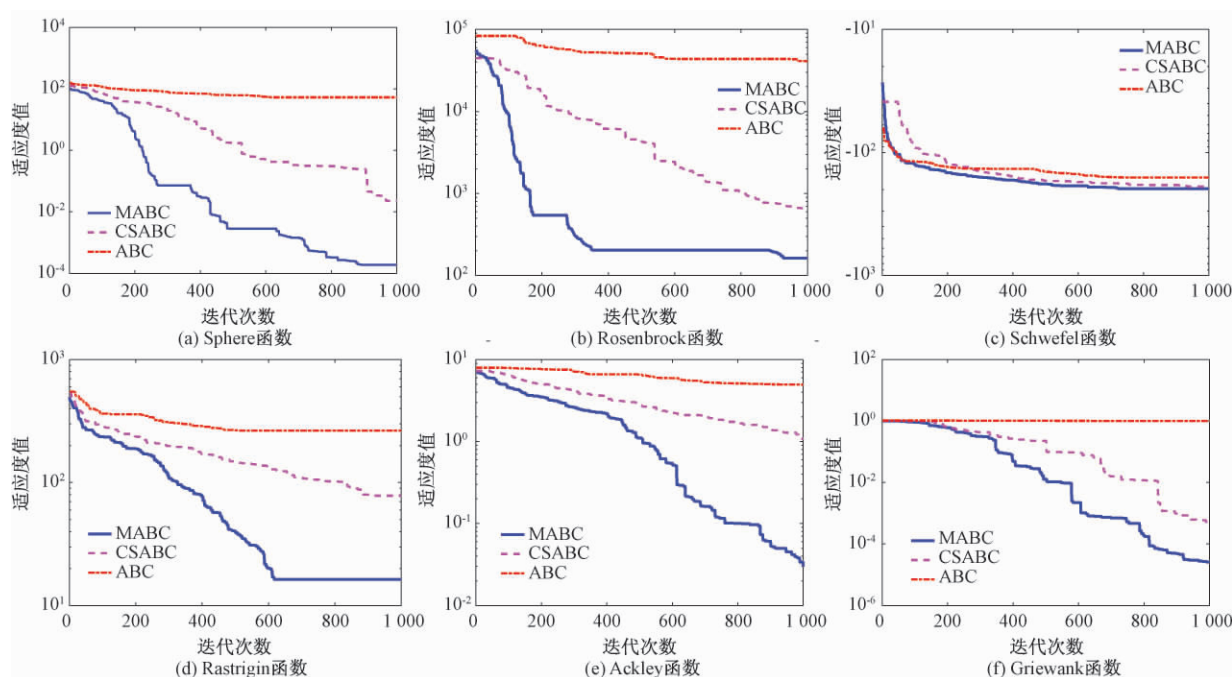


图2 测试函数结果

Fig.2 The results of test functions

及 CSABC 算法收敛速度快、寻优精度高、鲁棒性高、适应度好。

在未来的工作中,我们计划进一步提高算法的性能,并通过更加多样性的测试问题进行验证,比如最优点不在原点或者各维度最优点不一样的测试函数进行测试,以证明没有偏差。另外笔者计划下一步将本文的 MABC 算法有效地应用到实际工程问题中,并采用数学方法使其表现出更多的价值。

参考文献:

- [1] SAMÀ M, PELLEGRINI P, D'ARIANO A, et al. Ant colony optimization for the real-time train routing selection problem [J]. Transportation research, part B, 2016, 85: 89–108.
- [2] 梁静,宋慧,瞿博阳,等. 基于改进粒子群算法的路径优化问题研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(1): 34–38.
- [3] 胡珂,李迅波,王振林. 改进的人工蜂群算法性能 [J]. 计算机应用, 2011, 31(4): 1107–1110.
- [4] KARABOGA D, OZTURK C. A novel clustering approach: artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Applied soft computing journal, 2011, 11(1): 652–657.
- [5] NSEEF SK, ABDOLLAH S, TURKY A, et al. An adaptive multi-population artificial bee colony algorithm for dynamic optimisation problems [J]. Knowledge-based systems, 2016, 104: 14–23.
- [6] KARABOGA D, OZTURK C. Fuzzy clustering with artificial bee colony algorithm [J]. Scientific research & essays, 2010, 5(14): 1899–1902.
- [7] 王允霞. 蜂群算法的研究及其在人工神经网络中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学理学院, 2013.
- [8] OZTURK C, KARABOGA D, GORKEM B. Probabilistic dynamic deployment of wireless sensor networks by artificial bee colony algorithm [J]. Sensors, 2011, 11(6): 6056–6065.
- [9] 徐斌,刘弘. 融合社会力与人工蜂群的人群疏散仿真方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(8): 1725–1729.
- [10] 胡燕,朱晓瑛,马刚. 基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 17–20.
- [11] KHANMOHAMMADI S, ADIBEING N, SHANEH-BANOY S. An improved overlapping k-means clustering method for medical applications [J]. Expert systems with applications, 2016, 67: 12–18.
- [12] DERSIV D. Artificial bee colony algorithm [J]. Scholarpedia, 2010, 5(3): 6915.
- [13] 刘雷,王洪国,邵增珍,等. 一种基于蜂群原理的划分聚类算法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1699–1702.
- [14] 秦全德,程适,李丽,等. 人工蜂群算法研究综述 [J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 127–135.
- [15] 毛力,周长喜,吴滨,等. 一种高效的求解函数优化问题的人工蜂群算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(1): 152–156.

A Multi-swarm Artificial Bee Colony Algorithm for Function Optimization

WANG Shouna^{1,2}, LIU Hong^{1,2}, GAO Kaizhou³

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory for Distributed Computer Software Novel Technology, Jinan 250358, China; 3. Maritime Institute, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: A multi-swarm Artificial Bee Colony(MABC) algorithm based on the segmentation of population was proposed in this paper. It was applied to function optimization to overcome the drawbacks of slow convergence and low computational accuracy of conventional ABC algorithm. In this algorithm, K-means clustering algorithm based on Euclidean distance was introduced to divide the bee colony. In the subpopulation, a method was introduced to update the location of nectar based on global communication to accelerate the convergence of the algorithm; and the fitness function based on local communication was introduced to expand the diversity of the solution. The simulation results of six standard functions showed that the MABC algorithm could attain significant improvement on convergence rate and solution accuracy, and show better performance in function optimization problems when compared with the ABC algorithm.

Key words: Artificial Bee Colony algorithm; segmentation of population; nectar location updating; fitness function; function optimization

(上接第 22 页)

Improved Whale Swarm Algorithm and its Application in Steelmaking Continuous Casting Scheduling

ZENG Bing, WANG Mengyu, GAO Liang, DONG Haozhen

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new swam intelligent optimization algorithm named whale swarm algorithm (WSA) was studied. The principle and essential procedures of WSA were introduced; and the characteristics of WSA were presented through comparison with other classical swam intelligent optimization algorithms. For multimodal optimization, the iteration rule of WSA was improved, two parameters namely stability threshold and fitness threshold were introduced, and thus WSA with iterative counter (WSA-IC) was developed. The experimental results demonstrated that WSA-IC showed good performance in terms of the number and quality of optimal solutions and convergence speed. Then WSA-IC was applied to the steelmaking continuous casting scheduling problem, and proved to have good optimization ability and strong stability through the experiments. Finally, with the above research results, it was summarized that WSA had much value in practice, and further research of WSA could be carried out in theoretical study and practical application.

Key words: swam intelligent optimization algorithm; whale swarm algorithm; multimodal optimization; steel-making continuous casting scheduling

基于单纯形的改进精英人工蜂群算法

金 叶¹, 孙越泓^{1,2}, 王加翠¹, 王 丹¹

(1. 南京师范大学 数学科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京师范大学 江苏省大规模复杂系统数值模拟重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘 要: 针对人工蜂群算法收敛速度慢, 求解精度不高, 易陷入局部最优等问题, 基于受粒子群启发的多精英人工蜂群优化算法, 引入了蜂群中的精英个体和全局最优个体来增强开发全局最优解的能力. 文章中, 在雇佣蜂阶段借助精英个体引导蜜源搜索, 并利用蜂群中蜜源的质量排序重新构造蜜源的选择概率公式; 在跟随蜂阶段, 选择种群最优蜜源引领蜂群, 加强算法对全局最好解的局部开采能力, 同时将随机选择邻居蜜源变为最优定向选择. 最后利用单纯形算法对精英解集进行再次更新, 进一步平衡蜂群的全局搜索和局部寻优能力. 数值实验表明改进的新算法的寻优精度和收敛速度均有明显提高.

关键词: 人工蜂群算法; 定向更新策略; 精英解集; 选择概率; 单纯形

中图分类号: TP391; TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.008

0 引言

人工蜂群(artificial bee colony, ABC)^[1]算法是模拟蜜蜂采蜜机制提出的群体智能随机搜索优化算法, 该算法结构简单, 设置参数少, 不要求解函数的梯度, 易与其他算法结合, 在函数优化^[2]、工程优化^[3]等方面得到了广泛应用.

近年来, 已有不少专家学者对 ABC 算法进行了改进. 文献[4]在雇佣蜂阶段提出了一种带有新的搜索算子的改进的人工蜂群算法(improved artificial colony algorithm, IABC); 文献[5]在跟随蜂阶段提出了一种新的选择策略(improved artificial colony algorithm, iABC); 文献[6]提出了受粒子群启发的多精英人工蜂群算法(particle swarm inspired multi-elitist artificial bee colony, PS-MEABC). 人工蜂群算法具有较好的全局搜索能力, 但是文献[4-5]指出, ABC 算法和其他群智能算法一样, 在求解无约束优化问题时存在易早熟、局部搜索能力弱、寻优得到解的精度低等问题. 笔者在受粒子群启发的多精英人工蜂群算法^[6]的基础上, 提出一种新的基于单纯形的改进精英人工蜂群(improved mu-

liti-elitist artificial bee colony algorithm based on nelder-mead simplex method, NM-PS-MEABC) 算法: 利用定向更新策略, 改进了蜂群随机选取邻居的方式, 建立新的跟随蜂选择概率公式, 并利用单纯形方法局部搜索能力强的特点提高算法的局部寻优能力. 8 个基准函数上的数值实验表明, 求解无约束优化问题时, 本文新算法与 ABC 和 PS-MEABC 算法相比, 求解精度和收敛速度都有较大改进.

1 基本人工蜂群算法

ABC 算法^[1]是通过模拟蜜蜂采蜜过程中的智能机制处理函数优化问题. 人工蜂群算法描述如下: 首先引入蜜源, 它代表解空间中各种可能的解, 函数优化过程中通过适应度值来衡量蜜源; 再引入 3 种蜂, 即雇佣蜂、跟随蜂和侦查蜂. 雇佣蜂在蜂房附近搜索蜜源, 侧重对蜜源的探测; 跟随蜂接收其他蜜蜂分享的蜜源信息, 主要负责开采蜜源; 侦查蜂在食物源枯竭时, 随机在蜂巢附近寻找新的蜜源. 求解无约束优化问题(1)时,

$$\min_{x \in X} f(x). \quad (1)$$

收稿日期: 2018-04-25; 修订日期: 2018-07-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11371197); 教育部人文社会科学青年基金项目(12YJCZH179); 江苏省教育厅高校自然科学研究重大项目(16KJA110001); 江苏省大规模复杂系统数值模拟重点实验室开放基金项目(201601)

通信作者: 孙越泓(1972—), 女, 江苏盐城人, 南京师范大学副教授, 博士, 主要从事智能优化研究, E-mail: 05234@njjnu.edu.cn.

1.1 种群初始化

首先按照式(1)产生 SN 个个体的初始蜜源,得到初始种群:

$$x_{ij} = x_j^{\min} + \text{rand}(0,1)(x_j^{\max} - x_j^{\min}), \quad (2)$$

式中: $i \in \{1, \dots, SN\}$, $j \in \{1, \dots, D\}$, D 代表决策变量维数; x_j^{\min} , x_j^{\max} 分别代表个体在第 j 维上搜索空间的下界和上界.

产生初始种群后,通过式(2)计算蜜源的质量:

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i}, & f_i \geq 0; \\ 1 + |f_i|, & f_i < 0, \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_i 为蜜源 x_i 的目标函数值 $f(x_i)$; fit_i 为蜜源的适应度值,适应度值越大,表示该蜜源质量越优.

1.2 雇佣蜂阶段

雇佣蜂根据式(3)对每个蜜源进行一次邻域搜索,产生新蜜源:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}), \quad (4)$$

式中: $k \in \{1, \dots, SN\}$, $j \in \{1, \dots, D\}$, 这两个数都是随机选取的,但 $k \neq i$; ϕ_{ij} 是 $[-1, 1]$ 上的随机数. 在每次邻域搜索过程中随机更新一维(j)上的数值,然后评估 v_i 的质量,利用贪婪选择策略更新蜜源.

1.3 跟随蜂阶段

跟随蜂阶段,雇佣蜂先将蜜源信息共享给观察蜂,然后跟随蜂依据蜜源质量,选择蜜源进行开采,每个蜜源的选择概率计算方式如下:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i}, \quad (5)$$

式中: P_i 表示蜜源 i 的选择概率. 当蜜源被选中之后,跟随蜂将按照式(4)对所选中的蜜源进行邻域搜索,并根据贪婪选择策略更新蜜源.

1.4 侦查蜂阶段

控制参数 $limit$ 用来记录某个解未被更新的次数. 假定某个解经过 $limit$ 次循环之后都未得到改善,即表明这个解陷入了局部最优,应该被放弃,与这个解相对应的雇佣蜂也转变为侦查蜂,将按式(2)重新随机产生新蜜源.

2 基于单纯形的改进精英蜂群算法

受精英人工蜂群算法^[6]和 Nelder-Mead 单纯形方法^[7]的启发,笔者提出了 NM-PS-MEABC 算法. 该算法的基本思想是在蜂群中建立精英解集,

在雇佣蜂阶段借助精英个体引导蜜源搜索,并利用蜂群中蜜源的质量排序重新构造蜜源的选择概率公式. 在跟随蜂阶段,选择种群最优蜜源引领蜂群,加强算法对全局最好解的局部开采能力,同时将随机选择邻居蜜源变为定向选择. 最后,利用单纯形算法对精英解集进行再次更新,使得算法的局部寻优能力更强,从而达到提高求解精度的目的. 而多精英人工蜂群算法和新算法的3个改进之处:多定向更新策略、基于蜜源目标函数值排序的选择概率公式和基于精英解集的单纯形局部搜索机制.

2.1 多精英蜂群算法

为了提高人工蜂群算法的求解精度, Xiang 等^[6]受粒子群算法^[8]和文献^[9]的启发,将蜂群中多个蜜源丰富的个体作为精英,构建了精英解集. 雇佣蜂阶段通过轮盘赌从精英解集中随机选择一个精英,利用式(6)改进蜜源的更新:

$$v_{id} = x_{id} + \phi_{id}(x_{id} - x_{kd}) + \sigma_{id}(x_{id} - Elitist_{md}), \quad (6)$$

式中: $i \in \{1, \dots, SN\}$; $d \in \{1, \dots, D\}$; $k \in \{1, \dots, SN\}$; ϕ_{id} , σ_{id} 是 $[-1, 1]$ 上的随机数; $Elitist_{md}$ 表示利用轮盘赌方法从精英种群中选出的第 m 个精英的第 d 维. 同时,在跟随蜂阶段结合蜂群的最优蜜源信息,通过式(7)加强对优质蜜源的开采:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) + \theta_{ij}(x_{ij} - gbest_j), \quad (7)$$

式中: $i \in \{1, \dots, SN\}$; $j \in \{1, \dots, D\}$; $k \in \{1, \dots, SN\}$; ϕ_{ij} , θ_{ij} 是 $[-1, 1]$ 上的随机数; $gbest_j$ 表示当代蜂群中的最优个体的第 j 维.

2.2 定向更新策略

Van den Bergh^[10]等指出,在粒子群算法中,粒子更新会出现整体在优化,但是某一维却恶化的情况. 对于 ABC 算法同样存在这种现象,由式(4)、(6)和(7)可知,无论是雇佣蜂阶段还是跟随蜂阶段,在进行蜜源更新时,邻居食物源 x_{kj} , $k \in \{1, \dots, SN\}$ 均是随机从蜂群中选择的个体, k 的随机选取可能会导致蜜源第 j 维更新朝着远离最优蜜源的方向.

受文献^[10-11]的启发,笔者提出了多蜂群协作定向的更新策略,对于 D 维优化问题,在更新第 j 维时,将种群中所有个体的第 j 维和当前全局最优解 $gbest$ 的第 j 维求出距离 $Dist_j = (dist_{1,j}, dist_{2,j}, \dots, dist_{SN,j})^T$,并从中找出最小的距离 $dist_{m',j}$,则蜜源在更新第 j 维时,邻居食物源暂时取为 $x_{m'}$. 接下来以 2 维为例,定向过程如图 1 所示.

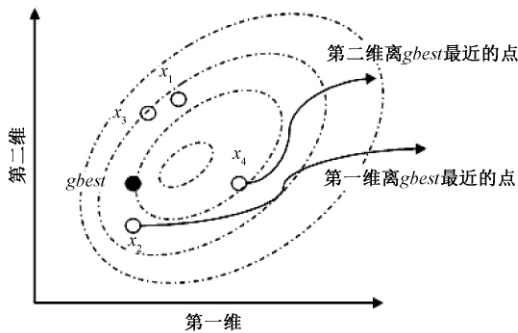


图1 2维空间中蜜源搜索邻居的选取说明

Fig. 1 Illustration of how to select the neighbour sources in 2-D solution space

图1中,种群个体数目 $SN = 5$, 维数 $D = 2$, $gbest$ 为当前种群中的最优解. 对于第一维,种群中个体 x_2 距离 $gbest$ 最近; 对于第二维,个体 x_4 距离 $gbest$ 最近,虽然它在第一维上是种群中距离 $gbest$ 最远的个体.

对于优化问题 $\min_{x \in X} f(x)$ 而言,整个蜂群在寻优过程中不断寻找质量高的蜜源,也即函数值不断下降的解. 然而函数的下降依赖于搜索过程中蜂群中个体不断趋向问题的解 x^* ($x^* \in X$). 最优定向策略应用于观察蜂阶段,通过 $Dist_j$ 的大小来衡量种群中不同个体在第 j 维和 $gbest$ 的距离.

同时,定向过程中为了避免种群搜索陷入局部,在确定了第 j 维离 $gbest$ 最近的食物源 x'_m 后,再结合种群中其他个体蜜源适应度信息,利用锦标赛^[12] 角逐出优胜个体,对 x'_m 进行修正,最终确定为 x_m . 在新算法中用公式(4)更新蜜源的第 j 维时,邻居食物源 x_k 不是随机选取,而是选择 x_m . 这样定向选择每一维蜜源需要开采的区域,更好地利用了当前种群个体的有效信息. 同时,随着种群不断进化,最优蜜源 $gbest$ 在不断改进,从而加快更优质蜜源搜索的速度.

通过上述过程,在更新第 j 维时,借助当前最优解的同时,将整个种群中的所有个体进行比较. 一方面加强了个体间的信息交流,定向引导蜜源更新; 另一方面随着迭代的进行,种群当前最优蜜源不断趋向问题的解 x^* ,也保证了种群 $Foods = \{x_1, x_2, \dots, x_{SN}\}$ 最终能够收敛到问题的最优解 x^* ,文献[13]中有详细的收敛证明.

2.3 基于蜜源目标函数值排序的选择概率公式

基本的人工蜂群算法在跟随蜂阶段,利用式(5)计算每只蜂的跟随概率. 在数值实验中发现,在迭代前期,整体蜜源的质量都不是很好,对应的

选择概率也就相对较低,从而被跟随的可能性较小;到了迭代后期,蜜源的整体质量都很高,即 fit_i 比较相近,蜜源的选择概率大部分接近 $1/SN$. 产生这一现象的主要原因是对于目标函数值小于一定数量级的蜜源,已经很难通过蜜源适应度值的计算公式(3)和概率计算公式(4)将这些蜜源加以区分.

为了解决这一问题,笔者受文献[14]的启发,在构造选择概率公式时,不采用蜜源的适应度值,而是直接利用蜜源目标函数值从大到小排序后的序标,借助式(8)重新定义:

$$P_i = a + b \cdot \frac{e^{\frac{j-1}{NS-1}} - 1}{e^c - 1}. \quad (8)$$

式中: $a = 0.1$; $b = 0.9$; c 为常数; j 为第 i 个蜜源在整个蜂群中按照目标函数值从大到小排序得到的序标. 第 i 个蜜源越好,它的序标 j 将越大,通过式(8)计算得到的选择概率 P_i 也就越接近 1.

2.4 精英解集 Nelder-Mead 单纯形局部搜索机制

单纯形法 (nelder-mead simplex method, NM-SM)^[7] 是一种局部搜索算法,具有较强的局部搜索能力. 近年来,单纯形法被用于一些全局优化算法中来增强局部搜索能力. 单纯形法和人工鱼群算法^[15]、头脑风暴算法^[16] 等优化算法都做结合. 单纯形算法的基本思想是: 对于 D 维优化问题,利用 $D + 1$ 个点作为顶点构成凸包,即单纯形. 在已有单纯形的基础上通过反射、扩张和收缩去寻找一个目标函数值更小的点. 如果得到这样的点就可以用该点作为顶点构造新的单纯形,否则将已有单纯形缩小. 具体算法流程见文献[17].

在单纯形算法每次迭代过程中,反射系数、扩张系数、收缩系数分别为 α, γ, β , 定义如下:

$$\begin{cases} \text{反射点: } x^\alpha = \bar{x} + \alpha(\bar{x} - x^h); \\ \text{扩张点: } x^\gamma = \bar{x} + \gamma(x^\alpha - x^h); \\ \text{收缩点: } x^\beta = \bar{x} + \beta(x^h - \bar{x}), \end{cases}$$

式中, $x^h = \arg \max_{x \mid 1 \leq i \leq D+1} f(x^i)$; $\bar{x} = \frac{1}{D} \sum_{i=1, i \neq h}^{D+1} x^i$.

单纯形算法的大致过程如下:

步骤1 初始化. 计算 $D + 1$ 个点的适应度值,找出最优点 x^g 、次优点 x^p 、中心位置 \bar{x} 、最差点 x^h .

步骤2 对最差的点进行反射,得到反射点 x^α .

步骤3 若 $f(x^\alpha) < f(x^g)$,则执行扩张操作得到扩张点 x^γ ,若 $f(x^\gamma) < f(x^g)$,则 $x^h = x^\gamma$; 否则 $x^h = x^\alpha$.

步骤4 若 $f(x^\alpha) < f(x^h)$,则执行收缩操作得到收缩点 x^β ,若 $f(x^\beta) < f(x^h)$,则 $x^h = x^\beta$.

步骤5 若 $f(x^h) > f(x^a) > f(x^p)$, 执行收缩操作得到收缩点 x^w ; 若 $f(x^w) < f(x^h)$, 则 $x^h = x^w$. 否则, $x^h = x^a$.

人工蜂群算法虽然全局搜索能力不错,但是存在着局部搜索能力差、在接近最优解时搜索效率下降、求解复杂问题时容易陷入局部最优而停滞不前的缺点^[18],而单纯形法具有很强的局部搜索能力,它和人工蜂群算法的全局搜索能力互补,如果将两者结合必然相得益彰.

因此,为了进一步加强算法对蜜源的开采能力,将更新后的精英解集在侦查蜂阶段之后结合当前全局最优蜜源,利用 $D+1$ 个蜜源构成初始单纯形,初始单纯形的构造具体如下.

(1) 若 $SN > D$, 则对更新后的精英解集按照函数值从小到大排序,利用前 D 个精英蜜源和全局最优蜜源构成初始单纯形.

(2) 若 $SN < D$, 则利用式(9)重新产生 $(D-SN)$ 个体,和精英解集、全局最优蜜源一起构成初始单纯形:

$$v_i = elites_i + \varphi(x_i - x_k), \quad (9)$$

式中: $i \in \{1, \dots, D-SN\}$; $k \in \{1, \dots, SN\}$; φ 是 $[-1, 1]$ 上的随机数. 然后利用 Nelder-Mead 单纯形法进行局部搜索,加快算法的收敛. 单纯形方法的迭代次数和食物源数目保持一致,取为 SN .

2.5 NM-PS-MEIABC 算法步骤

步骤1 参数设置. 设置蜂群规模 NP , 雇佣蜂数 $SN = NP/2$, 跟随蜂数 $SN = NP/2$. 迭代步数计数器 $t = 0$, 最大函数计算次数, 蜜源停留最大限制次数 $limit$, 初始化蜜源停留次数 $trial = 0$.

步骤2 初始化种群. 按式(2)随机产生 SN 个蜜源. 利用式(3)对蜜源质量进行评价. 并记录下此时的全局最优蜜源 $gbest$, 并利用初始种群初始化精英解集.

步骤3 精英个体引导雇佣蜂搜索. 利用轮盘赌方法, 随机从精英解集中选取一个精英个体 $Elitist_m$, 利用式(6)对蜜源进行搜索. 对超出搜索范围的解直接利用精英 $Elitist_m$ 代替, 接着利用贪婪选择决定是否更新蜜源, 更新 $gbest$ 和蜜源停留次数 $trial$.

步骤4 选择概率计算. 将所有蜜源按照目标函数值从大到小排列. 蜜源 x_i 质量越高, 序标 j 越大. 利用式(8)计算跟随蜂选择蜜源 x_i 的概率 P_i .

步骤5 全局最优蜜源引导跟随蜂搜索. 被吸

引的跟随蜂利用式(7), 结合雇佣蜂的邻域信息和全局最优蜜源信息, 对优质蜜源进行局部开采. 式(7)中蜜源 x_i 的邻居 x_k 不再是随机选取的, 而是对即将更新的第 j 维, 利用定向更新策略, 从第 j 维中, 选取距离当前最优解第 j 维最近的个体 x'_m 后, 再利用锦标赛修正. 对更新后超出搜索范围的解直接利用蜜源搜索空间的边界替换, 接着利用贪婪选择决定是否更新蜜源, 更新 $gbest$ 和蜜源停留次数 $trial$.

步骤6 侦查蜂更新. 若蜜源的停留次数 $trial > limit$ 成立, 则该蜜源转为侦查蜂, 用式(2)重新随机产生新的蜜源将其更新.

步骤7 精英解集的更新. 如果种群中全局最优蜜源优于轮盘赌选出的最差精英个体, 则将其替换从而更新精英解集, 保持精英蜜源个数为 SN .

步骤8 基于精英解集的单纯形局部搜索机制. 用更新后的精英解集和全局最优蜜源构造初始单纯形, 接下来采用 Nelder-Mead 单纯形进行局部再开采, 最后利用输出的单纯形更新对应的精英个体. 若单纯形最优解优于蜂群最差个体, 则替换蜂群最差个体, 将利用单纯形进行局部搜索得到的最优蜜源信息传递给蜂群.

步骤9 记录全局最优. 单纯形开采后的最优蜜源和 $gbest$ 进行比较, 记录较优的蜜源作为当前全局最优蜜源.

步骤10 停止准则. 判断是否达到最大函数计算次数 FES , 若满足则输出全局最优解, 否则转步骤3.

3 数值仿真实验结果

3.1 测试函数

为了验证 NM-PS-MEIABC 算法的有效性, 笔者进行了数值实验, 将其与 ABC 算法^[1] 和 PS-MEABC^[6] 算法, NMABC^[18] 作比较. 实验设备为: 台式电脑 HP LV2011, CPU 为 Intel Core2 Duo CPU E7500 2.93 GHz, 2 012 MB 内存, 实验仿真软件 Matlab2012b. 所有用于比较的算法的种群大小 $SP = 100$, 食物源数目 $SN = 50$, 最大限制次数 $limit = 100$, 决策变量维数为 30 维, 函数计算次数 (maximum function evaluations, MFE) 为 300 000 次. 参照基于精英蜂群搜索策略的人工蜂群算法^[19], 笔者选取 8 个基本测试函数, 如表 1 所示.

表 1 测试函数
Tab. 1 Test functions

S	函数名称	函数方程	取值范围	最优解	特征
f_1	Sphere	$f_1(X) = \sum_{i=1}^D x_i^2$	$[-100, 100]^D$	$f_1(\vec{0}) = 0$	UM
f_2	Step	$f_2(X) = \sum_{i=1}^D (\lfloor x_i + 0.5 \rfloor)^2$	$[-100, 100]^D$	$f_2(\vec{0}) = 0$	UM
f_3	Quartic Noise	$f_3(X) = \sum_{i=1}^D ix_i^4 + \text{rand}[0, 1)$	$[-1.28, 1.28]^D$	$f_3(\vec{0}) = 0$	UM
f_4	Ackley	$f_4(X) = -20 \exp\left(0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i)\right) + e$	$[-32, 32]^D$	$f_4(\vec{0}) = 0$	MM
f_5	Griewank	$f_5(X) = 1 + \sum_{i=1}^D (x_i^2/4000) - \prod_{i=1}^D (\cos(x_i/\sqrt{i}))$	$[-600, 600]^D$	$f_5(\vec{0}) = 0$	MM
f_6	Penalized1	$f_6(X) = \frac{\pi}{D} \{ 10 \sin^2(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{D-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_D - 1) \} + \sum_{i=1}^D u(x_i, 10, 100, 4)$ $y_i = 1 + \frac{1}{4}(x_i + 1)$ $\sum_{i=1}^D u(x_i, 10, 100, 4) = \begin{cases} k(x_i - a)^m, & x_i > a \\ 0, & -a \leq x_i \leq a \\ k(-x_i - a)^m, & x_i < -a \end{cases}$	$[-50, 50]^D$	$f_6(\vec{0}) = 0$	MM
f_7	Schaffer	$f_7(X) = 0.5 + \sin^2 \sqrt{\sum_{i=1}^D x_i^2} - 0.5 / [1 + 0.001 (\sum_{i=1}^D x_i^2)]^2$	$[-100, 100]^D$	$f_7(\vec{0}) = 0$	MM
f_8	Penalized2	$f_8(X) = \frac{\pi}{D} \{ 10 \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^{D-1} (x_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi x_{i+1})] + (x_D - 1) \} + \sum_{i=1}^D u(x_i, 5, 100, 4)$	$[-50, 50]^D$	$f_8(\vec{0}) = 0$	MM

新算法在构建好的精英解集上引入了 Nelder-Mead 单纯形局部搜索机制,以增强人工蜂群的局部寻优能力. 单纯形中反射系数、扩张系数以及收缩系数的不同取值,在不同问题中对算法影响程度不同. 通常反射系数 $\alpha = 1$, 扩张系数 $1 < \gamma \leq 2$, 收缩系数 $0 < \beta < 1$ [20]. 接下来对反射系数和收缩系数设置不同取值,进行实验分析,测试中选取单峰函数 f_1 , 多峰函数 f_4, f_7 . 在 30 维上进行 30 次模拟,最大函数计算次数为 300 000.

表 2 算法 NM-PS-MEABC 关于扩张系数 γ 的不同取值 ($\beta = 0.5$) 和关于收缩系数 β 的不同取值 ($\gamma = 1.2$)

Tab. 2 The different values of the expansion coefficient and contraction coefficient

函数	标准	$\gamma = 1.2$	$\gamma = 1.5$	$\gamma = 2$	$\gamma = 2 \sim 1.2$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.8$
f_1	Mean	1.13E-59	1.54E-57	1.15E-55	1.28E-63	3.84E-18	1.13E-63	4.52E-65
	Std	3.86E-59	2.18E-57	1.63E-55	1.91E-63	5.44E-18	3.86E-63	9.41E-66
f_4	Mean	2.61E-15	4.15E-15	3.67E-14	1.58E-15	6.66E-01	1.73E-14	6.42E-15
	Std	3.20E-15	2.48E-15	2.96E-14	5.42E-15	1.15E+00	2.36E-14	1.36E-15
f_7	Mean	1.59E+00	2.87E+00	3.53E+00	8.29E-01	3.71E+01	1.59E+00	9.79E-01
	Std	2.15E+00	2.70E+00	1.39E+00	3.59E-01	4.90E+01	2.15E+00	3.45E-01

表 2 给出了取定单纯形收缩系数 $\beta = 0.5$ 时, 扩张系数 γ 不同取值下在 3 个测试函数上的实验结果. 由表 2 得知, 扩张系数 $\gamma = 2$ 时, 算法在选取的测试函数上效果最差; $\gamma = 1.2$ 时, 效果一般; 动态变化 γ 从 2 递减至 1.2 时, 效果最好. 综上, 将 γ 的取值设在 2 ~ 1.2 变化, 随着迭代的进行, 在算法后期减小对单纯形的扩张, 实验得到的结果是最好的. 故新算法中, $\gamma = 2 \sim 1.2$.

表 2 还给出了取定单纯形扩张系数 $\gamma = 1.2$ 时, 收缩系数 β 取值不同时的实验结果. 收

缩系数 $\beta = 0.2$ 时,算法在 3 个给定函数上的结果最差,可知局部寻优的单纯形收缩过小容易导致算法陷入局部最优. 当 $\beta = 0.8$ 时,算法的效果最好,故在新算法 NM-PS-MEIABC 中取 $\beta = 0.8$.

表 3 本文算法与其他人工蜂群算法在 30 维上结果比较

Tab. 3 The comparison results with ABC variants

函数	标准	NM-PS-MEIABC	PS-MEABC	NMABC	ABC
f_1	Mean(Std)	8. 25E - 65(3. 17E - 65)	1. 67E - 37(2. 22E - 37)	2. 71E - 31(4. 50E - 31)	3. 66E - 16(5. 17E - 16)
f_2	Mean(Std)	0. 00E + 00(0. 00E + 00)	0. 00E + 00(0. 00E + 00)	0. 00E + 00(0. 00E + 00)	0. 00E + 00(0. 00E + 00)
f_3	Mean(Std)	5. 50E - 03(1. 50E - 03)	1. 11E - 01(2. 36E - 02)	1. 20E - 02(1. 29E - 02)	7. 60E - 01(1. 07E - 02)
f_4	Mean(Std)	1. 96E - 14(6. 96E - 15)	4. 43E - 14(5. 65E - 15)	1. 24EE - 09(2. 15E - 09)	3. 20E - 14(4. 52E - 14)
f_5	Mean(Std)	5. 51E - 16(2. 45E - 16)	3. 73E - 15(1. 09E - 14)	2. 98E - 14(1. 26E - 14)	4. 99E - 13(7. 06E - 12)
f_6	Mean(Std)	1. 57E - 32(2. 43E - 48)	1. 76E - 32(2. 71E - 33)	4. 32E - 32(4. 76E - 32)	3. 31E - 16(4. 68E - 16)
f_7	Mean(Std)	6. 32E - 02(3. 12E - 02)	4. 21E - 01(5. 68E - 01)	4. 25E - 01(1. 36E - 01)	4. 77E - 01(2. 51E - 01)
f_8	Mean(Std)	1. 35E - 32(8. 71E - 34)	1. 48E - 32(1. 55E - 33)	1. 35E - 32(2. 35E - 32)	2. 69E - 16(3. 81E - 16)

图 2、图 3 分别给出了 ABC 算法、PS-MEABC 算法、NMABC 算法和 NM-PS-MEIABC 算法对于 30 维 f_1 (Sphere) 函数和 f_5 (Griewank) 函数,在独立运行 30 次时取平均最优值的收敛情况. 从

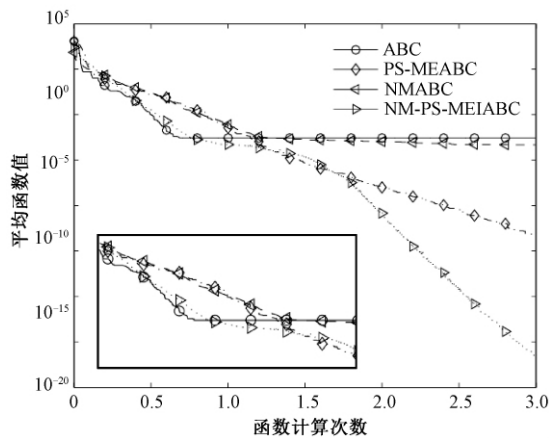


图 2 Sphere 函数收敛情况

Fig. 2 The convergence of Sphere function

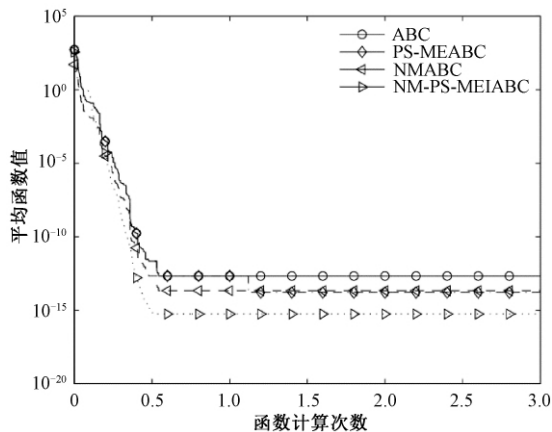


图 3 Griewank 函数收敛情况

Fig. 3 The convergence of Griewank function

3.2 实验结果

由表 3 可以看出,当函数计算次数相同时,很明显 NM-PS-MEIABC 算法具有较好的寻优性能,比 ABC 算法、PS-MEABC、NMABC 算法有更高的求解精度.

图 2 ~ 图 3 可以看出,笔者算法在收敛速度和搜索精度上要优于其余 3 种算法.

4 结束语

笔者提出了一种基于单纯形的改进精英人工蜂群算法,算法利用单纯形算法加强对解的局部寻优,并提出了新的邻域搜索方法和跟随概率的计算公式. 数值实验结果表明,新算法与 ABC、PS-MEABC、NMABC 算法相比,求解精度和收敛速度均有显著提高,寻优性能也更加稳定,未来可以进一步做 ABC 算法的应用以及综述.

参考文献:

- [1] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, TR06 [R]. Kayseri: Faculty of Engineering, Erciyes University, 2005.
- [2] AKAY B, KARABOGA D. A modified artificial bee colony algorithm for real parameter optimization [J]. Information sciences, 2012, 192: 120 - 142.
- [3] 苏国韶, 钱坤. 人工蜂群算法在重力坝断面优化设计中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (11): 223 - 225.
- [4] QUAN H, SHI X. On the analysis of performance of the improved artificial-bee-colony algorithm [C] // Proceedings of the fourth international conference on natural computation. Jinan, China: IEEE, 2008: 654 - 658.
- [5] KIRAN M S, BABALIK A. Improved artificial bee colony algorithm for continuous optimization problems [J]. Journal of computer and communications, 2014, 2(4): 108.
- [6] XIANG Y, PENG Y, ZHONG Y, et al. A particle swarm inspired multi-elitist artificial bee colony algo-

- rithm for real-parameter optimization [J]. Computational optimization and applications, 2014, 57(2): 493–516.
- [7] KAMIYAMA D, TAMURA K, YASUDA K. Down-hill simplex method based differential evolution [C]//Proceedings of annual conference in society of instrument and control engineers, SAC 2010. Tokyo: SAC, 2010: 1641–1646.
- [8] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, MHS 1995. Nagoya: IEEE, 1995: 39–43.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of ICNN 1995 International Conference on Neural Networks. Porth: IEEE, 1995: 1942–1948.
- [10] VAN DEN BERGH F, ENGELBRECHT A P. A cooperative approach to particle swarm optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2004, 8(3): 225–239.
- [11] MA L, HU K, ZHU Y, et al. Discrete and continuous optimization based on hierarchical artificial bee colony optimizer [J]. Journal of applied mathematics, 2014(1): 1–20.
- [12] LIANG J J, QIN A K, SUGANTHAN P N. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2006, 10(3): 281–295.
- [13] 江铭炎, 袁东风. 人工蜂群算法及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [14] LYNN N, SUGANTHAN P N. Heterogeneous comprehensive learning particle swarm optimization with enhanced exploration and exploitation [J]. Swarm and evolutionary computation, 2015, 24: 11–24.
- [15] 张红霞, 罗毅, 师瑞峰. 基于单纯形法的改进型人工蜂群算法 [J]. 计算机应用, 2011, 31(5): 1321–1327.
- [16] CAO Y Y, CHEN W, CHENG S, et al. A simple brain storm optimization algorithm via visualizing confidence intervals [C]//Proceedings of 11th International conference on Simulated Evolution and Learning. Shenzhen, China: SEAL, 2007: 27–28.
- [17] NELDER J A, MEAD R. A simplex method for function minimization [J]. Computer journal, 1965, 7(4): 308–313.
- [18] 罗琨, 杨磊, 查本波, 等. 基于单纯形法的人工蜂群算法改进研究 [J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2014, 31(3): 90–98.
- [19] 马卫, 孙正兴. 基于精英蜂群搜索策略的人工蜂群算法 [J]. 计算机应用, 2014, 34(8): 2299–2305.
- [20] RANAN K P, KUMAR V, GARG Y, et al. Efficient design of discrete fractional-order differentiators using nelder-mead simplex algorithm [J]. Circuits systems & signal processing, 2016, 35(6): 2155–2188.

An Improved Multi-elitist Artificial Bee Colony Algorithm Based on Nelder-Mead Simplex Method

JIN Ye¹, SUN Yuehong^{1,2}, WANG Jiacui¹, WANG Dan¹

(1. School of Mathematical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory for Numerical Simulation of Large Scale Complex Systems, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: There were some problems in the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, such as the slow convergence speed, low solution precision and easy to fall in local optimum. Inspired by particle swarm optimization algorithm, multi-elitist artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization the with use of global best solution and an elitist randomly selected from the elitist set were adopted to enhance the exploitation of the global best solution. In this paper, we the elitist to guide the nectar search during the employed bee process was introduced. And the selection probability formula of food source was reconstructed by using the quality of food source. In the onlooker bee stage, the best food source was selected to guide the swarm to enhance the exploitation of the global best solution, and the neighbor food source was selected to be the optimally directional choice. As the same time, a simplex method was used on elitist solution set to balance the exploration and exploitation ability of the algorithm. The numerical experiment results showed that the proposed algorithm had higher searching precision and faster convergence speed.

Key words: Artificial Bee Colony algorithm; directional update strategy; elitist solution set; selecting probability; simplex method

一种量子行为磷虾算法及其仿真分析

刘 振, 刘文彪, 鲁华杰

(海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘 要: 针对基本磷虾算法收敛效率低下, 容易收敛到局部极值的缺点, 基于协同进化和量子计算基本理论, 提出一种量子行为磷虾算法, 称为协同进化量子磷虾算法 (cooperative evolution quantum krill herd algorithm, CEQKHA). 该算法将磷虾种群划分为主种群和辅种群, 各种群能够独立进化, 并实现优良个体的交换. 利用量子进化行为方式更新磷虾个体位置, 引进 delta 势阱, 将粒子势阱中心设置为最优个体位置, 获取磷虾进化后的位置, 并分别将主种群和辅种群个体采用不同的位置更新方式, 提高种群勘探和开采的能力. 对所提出的算法进行了收敛性分析, 证明了所提出算法的收敛性能. 最后利用基准函数进行了仿真对比分析, 经仿真验证, 所提出的 CEQKHA 能得到更优解, 具备良好的优化性能.

关键词: 磷虾算法; 协同进化; 量子; 多种群; 势阱

中图分类号: TP15

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.017

0 引言

磷虾算法作为一种低阶群智能进化算法^[1], 具有进化机制简单、收敛速度快等特性, 但同时也容易陷入局部极值的情况. 因此磷虾算法的改进方式不断涌现, 当前对其改进主要可以概括为以下几类:

(1) 与局部进化方式进行有效融合. 如文献[2]提出个体进化方式依据列维飞行, 并利用精英个体更新磷虾个体位置; 文献[3]引入反向学习方法初始化种群, 用于提高进化效率; 文献[4]将混沌算法的思想引入到磷虾算法中; 文献[5]对当前种群进化获得的新位置, 再次进行局部调整和二次开发, 并采用贪婪选择方式.

(2) 对磷虾算法中的进化参数进行调整, 文献[6]将静态常数 Δt 进行了自适应推广; 文献[7]不仅使 Δt 自适应变化, 同时对惯性权重依据正弦方式进行调整.

(3) 在磷虾个体的进化过程中引入传统进化规划的操作算子, 如个体迁移、交叉、变异等操作. 文献[8]引入了侧重于开采的磷虾迁移操作, 能让磷虾个体在进化后期处于全局最优值附近搜索; 文献[9]将交叉、变异引入到基本磷虾进化算

法中, 保证算法进化过程中的全局勘探和局部开采的有机统一.

(4) 与其他进化算法的有机融合, 文献[10]提出一种混合磷虾进化算法, 将磷虾个体依据粒子群算法中的粒子进化操作方式执行.

当前各种群智能进化算法大量涌现, 如头脑风暴优化算法^[11], 通过聚类和变异等操作方式驱动进化过程, 克服传统群智能进化算法存在的随机性和盲目性, 但相比磷虾算法缺少生物学进化基础, 种群进化中也没有考虑协同机制. 量子计算以经典的量子力学为理论基础, 充分利用量子的叠加性、相干性、纠缠性, 因而使量子计算具有极好的并行计算能力. 文献[12-14]将量子计算与人工智能演化算法相结合, 使量子计算技术可以结合人工智能进化优势, 从而使进化算法具备全局收敛能力强、鲁棒性好等特性. 文献[12]较早将量子编码引入到免疫克隆算法中; 文献[13]和[14]将量子力学思想分别与引力搜索算法和粒子群算法相融合, 构成量子引力搜索算法和量子粒子群算法, 有效提升了原有算法的收敛性能. 根据量子理论, 并利用协同进化思想, 笔者提出一种协同进化量子磷虾算法 (cooperative evolution quantum krill herd algorithm, CEQKHA). 将磷虾

收稿日期: 2018-04-25; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51605487, 61174031)

作者简介: 刘振 (1983—), 男, 山东临沂人, 海军航空大学讲师, 博士, 主要从事智能决策与优化推理技术研究,
E-mail: hylz1008@126.com.

进化种群分为主种群、辅种群,将磷虾个体的运动状态以量子态中的波函数表示,以一维 delta 势阱作为势场,在得到变量分离形式的波函数以后,适当选择势阱参数,使量子磷虾个体在更新位置过程中趋向于当前势阱中心最优个体的位置,从而提高个体局部开采能力。

1 基本磷虾算法及其特性分析

基本磷虾算法用于模拟磷虾群体受到食物源及群体影响的觅食行为,其觅食行为主要受食物吸引度、种群趋同性以及外部不确定因素影响。个体位置的进化过程可以利用拉格朗日模型表示为

$$\frac{d\mathbf{X}_i(t)}{dt} = \mathbf{N}_i(t) + \mathbf{F}_i(t) + \mathbf{D}_i(t), \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}_i(t) = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}\}$ 表示第 i 个磷虾个体在 t 时刻的位置, n 为问题维数; $\mathbf{N}_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 个磷虾个体受群体影响的向量; $\mathbf{F}_i(t)$ 表示第 i 个磷虾个体受到食物吸引而产生的运动向量; $\mathbf{D}_i(t)$ 表示外界不确定性因素对其运动位置影响的向量,则个体在下一时刻的位置更新可按式(2)进行:

$$\mathbf{X}_i(t + \Delta t) = \mathbf{X}_i(t) + \Delta t \frac{d\mathbf{X}_i(t)}{dt}. \quad (2)$$

磷虾算法进化机制简便,所需控制参数少,由于编码机制设计过于简单,多样性不高,无法在进化过程中保持良好的全局勘探和局部开采性能。为提高基本磷虾算法的全局收敛性能,笔者提出一种协同进化量子磷虾算法。

2 协同进化量子磷虾算法

2.1 多种群协同进化框架结构

传统磷虾进化算法通常都维持单一种群进化模式,无法实现种群之间个体交流和信息的交互。多种群的进化模式能够有效地保证个体进化过程中的多样性^[15],使个体能够以较大的概率接近最优值。因此笔者将磷虾群体划分为主种群和辅种群,经分析验证设置辅种群数目为 4,其进化结构如图 1 所示。

在协同进化量子磷虾算法中,设置主种群为 M ,辅种群为 $Sub_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。每个辅种群在完成一次进化后,都会把当前寻找到的最优个体 $gb_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 传递给主种群 M ,主种群 M 进行贪婪选择判断后,更新当前全局最优解集。

2.2 量子进化行为

一个微观粒子的量子态一般用波函数表示,

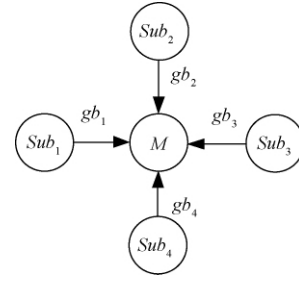


图 1 种群协同进化框架

Fig. 1 Framework for the cooperative evolution

因此波函数的演化状态确定以后,就足以描述整个系统的状态^[16]。薛定谔方程具有和经典牛顿力学等同的作用,在任何时刻粒子的状态都可以用波函数 $\psi(\mathbf{X}, t)$ 表示为:

$$\hbar \psi \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{X}, t) = H(\mathbf{X}) \psi(\mathbf{X}, t), \quad (3)$$

式中: \hbar 为普朗克常数; H 为与时间 t 无关的哈密顿操作符。

波函数幅值的平方为概率密度函数,故积分满足: $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 d\mathbf{X} = 1$ 。由于 H 与时间 t 无关,波函数可以表示为时间片与空间片段的乘积:

$$\frac{j\hbar}{f(t)} \cdot \frac{d}{dt} f(t) = \frac{1}{\psi(\mathbf{X})} \cdot \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{X}) \right) \psi(\mathbf{X}), \quad (4)$$

式(4)中,等式左边是关于 t 的函数,而等式右边是关于 \mathbf{X} 的函数,两边相等并且都是能量 E 。因此,可以获得微分方程为:

$$\frac{1}{f(t)} \cdot \frac{d}{dt} f(t) = -\frac{jE}{\hbar}. \quad (5)$$

$$\text{由于 } E = \frac{1}{\psi(\mathbf{X})} \cdot \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{X}) \right) \psi(\mathbf{X}),$$

则可以得到 $H\psi(\mathbf{X}) = E\psi(\mathbf{X})$ 。

假定在磷虾算法中,所有个体都具备量子行为,选择其中最优的 G_{best} 个体构成吸引势场。不失一般性,假定用量子表示的个体都在一维空间中,因此所有向量 \mathbf{X} 将变成标量 x ,设定 $y = x - g_{\text{best}}$,其中 g_{best} 表示最优个体的位置。应用 δ 势阱,令其中心在零点处,假定一维势阱的数目和 G_{best} 数目一致,则 $V(y) = -\gamma\delta(y) (\gamma > 0)$,其中 γ 为势阱深度。势阱深度在零点处为无穷,而在其他处为零,此时薛定谔方程为:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dy^2} \psi(y) + \gamma\delta(y) \psi(y) + E\psi(y) = 0. \quad (6)$$

由于 $Q(y) = |\psi(y)|^2 = \frac{1}{L} e^{(-2|y|/L)}$, 令

$u = e^{(-2|y|/L)}$, 则得到 $y = \pm \frac{L}{2} \ln(1/u)$. 由于 $y = x - g_{\text{best}}$, 则得到 $x = g_{\text{best}} \pm \frac{L}{2} \ln(1/u)$. 令 $\frac{L}{2} = k|x - g_{\text{best}}|$, 其中 k 为常数, $|x - g_{\text{best}}|$ 可以度量新产生的个体位置与当前最优解集的个体偏差. 则对第 i 个磷虾个体 $X_i(t)$, 其第 d 维的位置更新可以表示为:

$$x_{i,d}(t+1) = g_{\text{best}}^d \pm k|x_{i,d}(t) - g_{\text{best}}^d| \cdot \ln(1/u). \quad (7)$$

2.3 不同种群个体多样化位置更新方式

为了充分发挥优良个体引导作用, 文献 [17] 以等概率方式使磷虾个体在最优值附近进行搜索; 文献 [18] 在其基础上, 引入了群体平均值, 增加了个体位置选择的随机性. 笔者借鉴上述思想, 提出在主种群中进行全局勘探, 采用式 (8) 更新当前磷虾个体的位置:

$$x_{i,d}(t+1) = g_1^d(t) \pm k|x_{i,d}(t) - x_{\text{mean}}(t)| \cdot \ln(1/u), \quad (8)$$

式中: $g_1^d(t)$ 表示当前代的最优解; $x_{\text{mean}}(t)$ 表示当前代的平均解.

在辅种群中, 为了进行局部精细开采操作, 采用式 (9) 更新当前磷虾个体的位置:

$$x_{i,d}(t+1) = k \left| \alpha \left(\frac{x_{i,d}(t) - g_1^d(t)}{2} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{x_{i,d}(t) - g_2^d(t)}{2} \right) \right| \cdot \ln(1/u) \pm g_2^d(t), \quad (9)$$

式中: $g_2^d(t)$ 表示截止到第 t 代为止的全局最优解; α 为调节系数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 且为常数.

通过以上的描述, 笔者提出的协同进化量子磷虾算法 (CEQKHA) 整体流程可以表述如下:

步骤 1 设定算法进化参数信息, 初始化种群 $P(t)$, 循环迭代次数 $t = 1$;

步骤 2 将种群 $P(t)$ 划分为一个主种群和 4 个辅种群分别独立进化;

步骤 3 在获得 $N_i(t)$ 、 $F_i(t)$ 和 $D_i(t)$ 后, 根据式 (1) 获得运动增量 $\frac{dX_i(t)}{dt}$, 完成一次种群进化和更新, 根据式 (2) 获得 $t+1$ 时刻第 i 个磷虾个体的运动位置向量 $X_i(t+1)$;

步骤 4 将辅种群 $Sub_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 中最优个体 $gb_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 传递给主种群 M , 辅种群向主种群进行精英个体交流;

步骤 5 按照 2.2 节的方式对磷虾个体进行量子进化, 并依据式 (8) 和式 (9) 进行更新;

步骤 6 判断是否迭代结束, 没有结束, 则 $t = t+1$, 返回步骤 3, 否则输出最优解, 算法结束.

3 收敛性分析

由式 (1) 和式 (2), 并结合式 (8) 和式 (9) 可以得到

$$X(t+1) = X(t) + G(t). \quad (10)$$

其中, $G(t) = \frac{dX(t)}{dt} = N(t) + F(t) + D(t)$. 可知 $G(t+1)$ 不仅受到上一时刻磷虾位置 $X(t)$ 的影响, 同时也受到 $G(t)$ 的影响, 即

$$G(t+1) = \mu G(t) + \alpha X(t) + \beta. \quad (11)$$

因此, 根据式 (10) 和式 (11), 可以得到

$$X(t+2) - (1+\mu)X(t+1) + (\mu - \alpha)X(t) = \beta. \quad (12)$$

由式 (12) 方程两边的构造可以看出, 其为一个差分方程, 因此给出定理 1.

定理 1 协同进化量子磷虾算法 (CEQKHA) 稳定收敛的充分条件: $\alpha < 0, \frac{\alpha}{2} - 1 < \mu < \alpha + 1$.

证明: 式 (12) 的特征方程为 $\lambda^2 - (1+\mu)\lambda + (\mu - \alpha) = 0$, 特征根为 λ_1 和 λ_2 , 则通解为 $X(t) = k_1\lambda_1^t + k_2\lambda_2^t + c$. 若要满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} X(t) = X^*$, 即当迭代次数无穷时, 磷虾个体的位置趋向于稳定的最优值, 此时要求 $|\lambda_i| < 1, (i = 1, 2)$, 因此根据其判别式:

$$\Delta = (1+\mu)^2 - 4(\mu - \alpha) \geq 0,$$

则可得到

$$\alpha < 0, \frac{\alpha}{2} - 1 < \mu < \alpha + 1.$$

定理 1 得证.

4 仿真分析

利用基准函数 $f_1 \sim f_{18}$ 进行仿真分析, 其中惯性权重 $\omega^n = \omega^f = 0.9, C' = 2$, 最大引导速度为 0.01, 最大扩散速度为 0.005, 觅食速度为 0.02, 种群规模 $NP = 100$, 循环迭代次数为 100. 所有仿真分析均在 Intel(R) Core(TM) i3-3220 处理器, 内存 2.00 GB, Windows 7 系统的计算机上进行, 仿真软件为 Matlab R2009a. 将笔者提出的协同进化量子磷虾算法 (CEQKHA), 与基本磷虾算法 (KHA) [1]、对立搜索磷虾算法 [3] (OKHA) 以及改进磷虾算法 [5] (IKHA) 进行仿真对比分析, 变量取值范围均设定在 $[-100, 100]$ 内, 分别利用单模函数、多模函数进行仿真分析, 并分析进化框架结构和位置更新方式对算法影响.

$$\begin{aligned}
f_1(x) &= \sum_{i=1}^n |x_i| + \prod_{i=1}^n |x_i|; \\
f_2(x) &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2; \\
f_3(x) &= - \sum_{i=1}^n i x_i^2; \\
f_4(x) &= \sum_{i=1}^{n-1} (100 (x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2); \\
f_5(x) &= \sum_{i=1}^n x_i^2; \\
f_6(x) &= \sum_{i=1}^n (x_i + 0.5)^2; \\
f_7(x) &= 418.9829 \cdot n - \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{|x_i|}); \\
f_8(x) &= \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10); \\
f_9(x) &= -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \\
&\quad \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e; \\
f_{10}(x) &= \frac{\pi}{n} \left[10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^n (y_i - 1)^2 \cdot \right. \\
&\quad \left. (1 + 10 \sin^2(\pi y_i + 1)) + (y_n - 1)^2 \right] + \\
&\quad \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4); \\
y_i &= 1 + \frac{x_i + 1}{4}, u(x_i, a, k, m) = \\
&\quad \begin{cases} k(x_i - a)^m, & x_i > a; \\ 0, & -a < x_i < a; \\ k(-x_i - a)^m, & x_i < -a, \end{cases} m = 5; \\
f_{11}(x) &= 0.1 \left[\sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)) \right. \\
&\quad \left. (y_i - 1)^2 + (x_n - 1)^2 (1 + \sin^2(2\pi x_n)) \right] + \\
&\quad \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4); \\
f_{12}(x) &= 4.687 - \sum_{i=1}^n \sin x_i \cdot \left(\sin\left(\frac{i x_i^2}{\pi}\right) \right)^{2m}, m = 10; \\
f_{13}(x) &= (x_1 - 1)^2 + \sum_{i=2}^n i (2x_i^2 - x_{i-1})^2; \\
f_{14}(x) &= \sum_{i=1}^n i x_i^4 + \text{rand}(0, 1); \\
f_{15}(x) &= (e^{-\sum_{i=1}^n (x_i/\beta)^{2m}} - 2e^{-\sum_{i=1}^n x_i^2}) \cdot \prod_{i=1}^n \cos^2 x_i, m = 5; \\
f_{16}(x) &= \left(\left(\sum_{i=1}^n \sin^2(x_i) \right) - \exp\left(-\sum_{i=1}^n x_i^2\right) \right) \cdot \\
&\quad \exp\left(-\sum_{i=1}^n \sin^2 \sqrt{|x_i|}\right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{17}(x) &= (x_1 + 2x_2 - 7)^2 + (2x_1 + x_2)^2; \\
f_{18}(x) &= 0.26(x_1^2 + x_2^2) - 0.48x_1x_2.
\end{aligned}$$

4.1 单模函数对比分析

将笔者提出的 CEQKHA, 利用单模基准函数 $f_1 \sim f_6$ 进行仿真分析, 其中 $f_1 \sim f_3$ 维数为 5, $f_4 \sim f_6$ 维数为 10. 并与基本磷虾算法(KHA)、对立搜索磷虾算法(OKHA)以及改进磷虾算法(ICKHA)进行对比, 其中基准函数的全局最优值均为 0.4 种算法分别独立运行 30 次, 统计获得的最优值、平均值和标准差, 对比分析结果如表 1 所示.

表 1 单模函数仿真对比分析

Tab. 1 Comparison results for unimodal functions

函数	算法	最优值	均值	标准差
f_1	KHA	7.36×10^{-4}	8.97×10^{-3}	6.52×10^{-3}
	OKHA	6.82×10^{-4}	6.15×10^{-3}	2.38×10^{-4}
	IKHA	5.17×10^{-4}	4.05×10^{-3}	6.34×10^{-4}
	CEQKHA	4.36×10^{-4}	3.89×10^{-3}	4.28×10^{-4}
f_2	KHA	4.93×10^{-3}	2.71×10^{-2}	3.25×10^{-3}
	OKHA	2.40×10^{-3}	4.24×10^{-3}	5.13×10^{-4}
	IKHA	3.19×10^{-3}	8.56×10^{-3}	7.25×10^{-4}
	CEQKHA	5.65×10^{-4}	1.79×10^{-3}	1.06×10^{-4}
f_3	KHA	1.78×10^{-5}	4.27×10^{-4}	6.54×10^{-4}
	OKHA	3.23×10^{-6}	5.18×10^{-5}	5.94×10^{-6}
	IKHA	4.93×10^{-6}	1.87×10^{-5}	3.24×10^{-6}
	CEQKHA	2.32×10^{-7}	6.18×10^{-6}	1.56×10^{-8}
f_4	KHA	2.67×10^{-3}	4.91×10^{-2}	7.76×10^{-5}
	OKHA	5.90×10^{-4}	1.52×10^{-3}	5.65×10^{-5}
	IKHA	4.43×10^{-4}	6.56×10^{-3}	5.72×10^{-5}
	CEQKHA	5.17×10^{-4}	2.83×10^{-4}	9.10×10^{-6}
f_5	KHA	4.25×10^{-3}	5.97×10^{-3}	8.24×10^{-6}
	OKHA	1.90×10^{-4}	5.01×10^{-3}	5.63×10^{-6}
	IKHA	5.61×10^{-5}	7.25×10^{-4}	4.56×10^{-7}
	CEQKHA	9.22×10^{-6}	5.20×10^{-4}	6.79×10^{-8}
f_6	KHA	3.82×10^{-4}	9.33×10^{-3}	7.17×10^{-5}
	OKHA	2.44×10^{-4}	1.49×10^{-3}	2.82×10^{-5}
	IKHA	3.45×10^{-4}	7.61×10^{-3}	2.75×10^{-5}
	CEQKHA	7.19×10^{-5}	5.17×10^{-3}	6.71×10^{-6}

从表 1 的统计结果能够看出, 在设定的循环迭代次数范围内, 几种磷虾改进算法(OKHA、IKHA、CEQKHA), 相比基本磷虾算法(KHA)收敛性能都有了一定程度的提高. 另外, 从表 1 还可以看出, 笔者提出的 CEQKHA 在大部分函数上的进化性能都优于其他几种进化算法. 这是由于笔者采用了协同进化框架结构, 并应用量子势阱机制, 提升了个体在整个搜索空间中勘探和开采能力, 因而寻优效果整体优于其他几种改进算法.

为了充分进行算法对比,以 f_5 函数为例进行进一步详细分析,取一次迭代进化收敛如图2所示.从图2可以看出,OKHA和IKHA分别采用了对立搜索方式和局部搜索算子,提高了算法的基本进化性能;而本文算法不仅采用了协同进化框架,而且采用了量子编码提高了个体的全局和局部搜索能力.另外,基本磷虾算法由于搜索的盲目性,初始进化效果不佳,OKHA和IKHA由于采用了对立搜索方式及局部搜索设计,因而提高了进化能力;而本文的CEQKHA寻优迭代效果较好,能够利用较少的迭代次数就能锁定在最优值附近搜索,因而无论是方差和均值性能均优于其他对比算法.

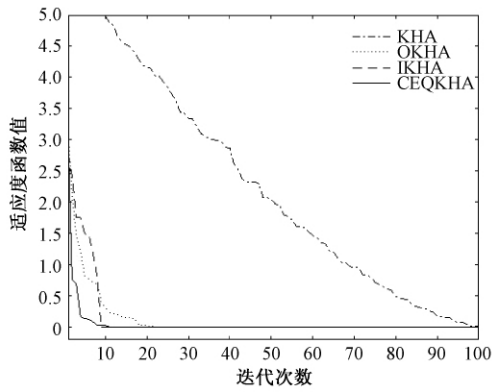


图2 f_5 函数仿真对比结果

Fig.2 Comparison results for function f_5

4.2 多模函数对比分析

将本文算法CEQKHA以多峰基准函数 $f_7 \sim f_9$ 为例进行仿真对比分析,其中3个多峰函数的全局最优值均为0,函数维数均设置为20.对比算法也分别是基本磷虾算法(KHA)、对立搜索磷虾算法(OKHA)以及改进磷虾算法(IKHA).4种算法分别运行30次,对其最优值、平均值及标准差进行统计对比,同时进行单侧 t 检验,并构造检验统计量:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}},$$

式中: n_1 和 n_2 表示运行次数; S_1 和 S_2 表示对比方差; M_1 和 M_2 为对比均值.

检验假设为: $H_0: \mu_1 \geq \mu_2, H_1: \mu_1 < \mu_2, \mu_1$ 和 μ_2 理论最优均值,给定显著性水平0.05,拒绝域为: $W = \{t > t_{0.05}(n_1 + n_2 - 2)\}$,经查表后 $t_{0.05}(58) = 1.672$,统计结果如表2所示.

从表2的统计结果能够看出,当对多模函数进行优化时,本文的CEQKHA相比其他几种

表2 多模函数仿真对比分析

Tab.2 Comparison results for multimodal function

函数	算法	最优值	均值	标准差	$t_{0.05}$
f_7	KHA	6.13×10^{-2}	2.55×10^{-1}	7.63×10^{-2}	8.73
	OKHA	5.87×10^{-4}	5.90×10^{-3}	2.68×10^{-3}	4.17
	IKHA	4.27×10^{-4}	7.85×10^{-3}	2.19×10^{-3}	3.39
	CEQKHA	4.43×10^{-4}	4.52×10^{-3}	6.02×10^{-4}	—
f_8	KHA	5.45×10^{-2}	3.17×10^{-1}	6.53×10^{-2}	6.84
	OKHA	7.18×10^{-3}	3.10×10^{-2}	6.48×10^{-3}	2.99
	IKHA	3.55×10^{-3}	2.56×10^{-2}	8.28×10^{-3}	5.16
	CEQKHA	7.91×10^{-4}	4.23×10^{-3}	4.57×10^{-3}	—
f_9	KHA	6.14×10^{-3}	5.78×10^{-2}	2.80×10^{-3}	9.74
	OKHA	1.52×10^{-4}	7.66×10^{-3}	4.25×10^{-4}	2.62
	IKHA	3.09×10^{-4}	7.15×10^{-3}	6.57×10^{-4}	3.17
	CEQKHA	3.73×10^{-5}	1.35×10^{-4}	5.79×10^{-5}	—

进化算法,在大部分函数上都能取得较好的收敛结果.从多模函数优化对比结果可以看到,算法的进化能力得到了考验,对算法的全局开采能力提出了更高的要求.同时表2还给出单侧 t 检验结果,当显著性水平为0.05时, t 的计算结果均大于1.672,因此拒绝假设 $H_0: \mu_1 \geq \mu_2$,接受 $H_1: \mu_1 < \mu_2$,说明本文算法平均值优于其他对比算法.

4.3 高维函数对比分析

利用高维基准函数 $f_{10} \sim f_{12}$ 为例进行仿真分析,其中函数维数均设置为100,3个高维函数的全局最优值均为0.对比算法也仍然是基本磷虾算法(KHA)、对立搜索磷虾算法(OKHA)以及改进磷虾算法(OKHA).4种算法分别运行30次,对平均值、标准差和平均运行时间进行统计,结果如表3所示.

表3 高维函数仿真对比分析

Tab.3 Comparison results for high-dimension functions

函数	算法	最优值	均值	标准差
f_{10}	KHA	7.19×10^{-2}	4.55×10^{-1}	5.42×10^{-1}
	OKHA	6.39×10^{-3}	5.98×10^{-2}	7.85×10^{-3}
	IKHA	5.64×10^{-3}	3.09×10^{-2}	6.16×10^{-3}
	CEQKHA	1.07×10^{-3}	9.81×10^{-3}	2.08×10^{-3}
f_{11}	KHA	9.27×10^{-2}	8.32×10^{-1}	5.57×10^{-1}
	OKHA	5.43×10^{-3}	2.55×10^{-2}	4.79×10^{-3}
	IKHA	6.38×10^{-3}	6.64×10^{-2}	5.86×10^{-3}
	CEQKHA	1.78×10^{-3}	7.14×10^{-3}	1.35×10^{-3}
f_{12}	KHA	7.24×10^{-2}	6.30×10^{-1}	2.67×10^{-1}
	OKHA	3.80×10^{-3}	1.29×10^{-2}	8.15×10^{-2}
	IKHA	5.22×10^{-3}	3.48×10^{-2}	9.41×10^{-2}
	CEQKHA	1.49×10^{-3}	6.37×10^{-3}	4.25×10^{-3}

当函数的维数达到100维时,对于几种进化算法来说,寻找到最优值都会变得较为困难.从表

3 的统计结果能够看出,整体寻优精度都会有所下降,特别是基本磷虾算法(KHA),函数寻优性能下降明显,性能指标相比其他几种改进的磷虾算法差距较大,甚至有时无法收敛到全局最优值附近.从所有性能指标的对比可以看出,本文算法仍然能够取得较为优越的寻优效果,显示出算法具有较好的鲁棒性.笔者采用的协同进化搜索框架和量子进化行为增强了算法的全局勘探和局部开采能力,使得 CEQKHA 相比其他改进的磷虾算法,如 OKHA 和 IKHA,能够获得更优解.

4.4 算法进化行为影响分析

4.4.1 进化结构影响分析

对笔者提出的 CEQKHA,当不采用协同进化机制时,将算法标记为 CEQKHA_{wce}(CEQKHA with-out cooperative evolution),将 KHA、CEQKHA_{wce} 和 CEQKHA,利用 $f_{13} \sim f_{15}$ 函数进行对比分析,以验证协同进化框架对算法运行结果的影响,各种算法分别独立运行 30 次,函数维数均为 20,对平均值、标准差和平均运行时间进行统计,如表 4 所示.

表 4 协同进化对算法影响对比分析

Tab. 4 Comparison results of cooperative evolution

函数	算法	均值	标准差	运行时间/s
f_{13}	KHA	3.82×10^{-3}	8.97×10^{-2}	1.15
	CEQKHA _{wce}	7.57×10^{-4}	3.86×10^{-3}	3.01
	CEQKHA	3.16×10^{-4}	6.58×10^{-4}	4.16
f_{14}	KHA	5.11×10^{-3}	9.42×10^{-2}	0.94
	CEQKHA _{wce}	5.06×10^{-4}	5.23×10^{-3}	3.17
	CEQKHA	3.83×10^{-4}	9.81×10^{-4}	4.29
f_{15}	KHA	5.13×10^{-3}	8.62×10^{-2}	1.89
	CEQKHA _{wce}	7.43×10^{-4}	7.15×10^{-3}	3.12
	CEQKHA	2.74×10^{-4}	6.78×10^{-4}	4.28

从表 4 的进化结果可以看到,CEQKHA 由于采用了协同进化框架结构和量子进化机制,因此其寻优迭代效果优于 CEQKHA_{wce} 和 KHA,虽然 CEQKHA_{wce} 没有采用协同进化框架结构,但由于量子进化机制优良的进化性能,其寻优效果还是优于 KHA,显示出本文算法良好的进化性能.从表 4 也可以看到,协同进化框架在提高了算法进化性能的同时,也相应地增加了算法的运行时间,因此适用于对时间要求不高而对精度要求较高的场合.

4.4.2 位置更新方式影响分析

文献[13]提出建立最优粒子集合,并采用轮盘赌方式选择粒子作为势阱中心,用于产生下一代个体,笔者没有采用这种方式,而是采用式(26)和式(27)进行个体更新.将笔者采用的磷虾

个体更新方式,以 $f_{16} \sim f_{18}$ 函数为仿真对象,函数维数均为 20,与文献[13]采用的更新方式进行仿真对比.各种算法独立运行 30 次,其统计结果如表 5 所示,其中采用文献[13]更新方式的算法标记为 CEQKHA_{rtw}(CEQKHA with roulette wheel).

表 5 位置更新方式对算法影响分析

Tab. 5 Comparison results of position refresh

函数	算法	均值	标准差	运行时间/s
f_{16}	KHA	5.78×10^{-4}	9.23×10^{-5}	1.70
	CEQKHA _{rtw}	7.13×10^{-5}	6.17×10^{-6}	4.14
	CEQKHA	6.26×10^{-5}	2.64×10^{-6}	4.87
f_{17}	KHA	4.28×10^{-3}	5.57×10^{-4}	1.35
	CEQKHA _{rtw}	7.22×10^{-4}	9.16×10^{-5}	2.67
	CEQKHA	3.50×10^{-4}	3.01×10^{-5}	2.69
f_{18}	KHA	6.51×10^{-3}	6.32×10^{-3}	0.77
	CEQKHA _{rtw}	1.39×10^{-3}	5.17×10^{-4}	2.14
	CEQKHA	7.68×10^{-4}	4.47×10^{-5}	2.58

从表 5 的统计数据可以看到,笔者提出的 CEQKHA 在大部分函数上的平均值和标准差都略优于 CEQKHA_{rtw},只是在时间性能上处于劣势;KHA 的进化性能相对较差,但其运行时间最短.可以看出,本文算法的进化性能得到了提高,但同时也注意到,为了单纯追求算法的寻优效果,运行时间呈现倍数级增长,对应用时机和场合提出了一定的要求.

5 结论

笔者提出了一种协同进化量子磷虾算法(CEQKHA),将进化种群划分为主种群和辅种群,采用具有量子进化的行为模式,将当前最优个体设置为量子势阱中心,并在主种群和辅种群内采用不同的个体更新方式.对所提出的 CEQKHA 进行了收敛性分析和函数仿真分析,显示出所提出算法的优良性能和应用前景.但同时也注意到,受制于进化算法的特性和基本规律,寻找一种既能保证收敛精度又能保证收敛速度的“全优”算法是很困难的.因此,提高算法的运行速度,降低算法的系统开销,将是以后发展方向.

参考文献:

- [1] GANDOMI A H, ALAVVVI A H. Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm [J]. Communications in nonlinear science and numerical simulation, 2012, 17(12): 4831-4845.
- [2] GUO L H, WANG G G, GANDOMI A H, et al. A new improved krill herd algorithm for global numerical

- optimization [J]. *Neurocomputing*, 2014, 138 (8) : 392 – 402.
- [3] SNEHA S, PROVAS K R. Oppositional krill herd algorithm for optimal location of capacitor with reconfiguration in radial distribution system [J]. *Electrical power and energy systems*, 2016, 74 (12) : 78 – 90.
- [4] GUO L H, WANG G G, GANDOMI A H, et al. Chaotic krill herd algorithm [J]. *Information sciences*, 2014, 274 (8) : 17 – 34.
- [5] JENSI R, WISELIN G J. An improved krill herd algorithm with global exploration capability for solving numerical function optimization problems and its application to data clustering [J]. *Applied soft computing*, 2016, 46 (C) : 230 – 245.
- [6] LI P, TANG Y G, HUA C H, et al. An improved krill herd algorithm: krill herd with linear decreasing step [J]. *Applied mathematics and computation*, 2014, 234 (5) : 356 – 367.
- [7] NIU P F, CHEN K, MA Y P, et al. Model turbine heat rate by fast learning network with tuning based on ameliorated krill herd algorithm [J]. *Knowledge-based systems*, 2017, 118 (2) : 80 – 92.
- [8] WANG G G, GANDOMI A H, AMIR H A. An effective krill herd algorithm with migration operator in biogeography-based optimization [J]. *Applied mathematical modeling*, 2014, 38 (s9 – 10) : 2454 – 2462.
- [9] PARAJITA M, PROVAS K R, MUKHERJEE V. Transient stability constrained optimal power flow using oppositional krill herd algorithm [J]. *Electrical power and energy systems*, 2016, 83 (12) : 283 – 297.
- [10] PRASAD S, VINOD K. Optimal allocation of measurement devices for distribution state estimation using multiobjective hybrid PSO-Krill herd algorithm [J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2017, 66: 1 – 14.
- [11] 程适, 陈俊风, 孙奕菲, 等. 数据驱动的发展式头脑风暴优化算法综述 [J]. *郑州大学学报 (工学版)*, 2018, 39 (3) : 22 – 28.
- [12] 李阳阳, 焦李成. 求解 SAT 问题的量子免疫克隆算法 [J]. *计算机学报*, 2007, 30 (2) : 176 – 183.
- [13] HOSSEIN N P. A quantum-inspired gravitational search algorithm for binary encoded optimization problems [J]. *Engineering applications of artificial intelligence*, 2015, 40 (4) : 62 – 75.
- [14] 方伟, 孙俊, 谢振平, 等. 量子粒子群优化算法的收敛性分析及控制参数研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59 (6) : 3686 – 3694.
- [15] NAJMEH S J, SALWANI A, ABDUL R H. Multi-population cooperative bat algorithm-based optimization of artificial neural network model [J]. *Information sciences*, 2015, 294 (2) : 628 – 644.
- [16] SUN J, FENG B, XU W B. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior [C] // *Proc of Congress on Evolutionary Computation*. New York: IEEE, 2004: 325 – 331.
- [17] MOHADESEH S M, HOSSEIN N P, MALIHE M F. A quantum inspired gravitational search algorithm for numerical function optimization [J]. *Information sciences*, 2014, 267 (5) : 83 – 100.
- [18] 曹茂俊, 李盼池, 尚福华. 量子行为引力搜索算法 [J]. *控制与决策*, 2016, 31 (9) : 1678 – 1684.

A Quantum Behaved Krill Herd Algorithm and Its Simulation Analysis

LIU Zhen, LIU Wenbiao, LU Huajie

(College of Coastal Defense Force, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency and easy trap into local optimum for the basic krill herd algorithm, a new quantum behaved krill herd algorithm was proposed. It was named as cooperative evolution quantum krill herd algorithm (CEQKHA) based on cooperative evolution and quantum computation. The population could be divided into two parts, such as main population and sub-population, which could evolve independently and exchange fine individuals. The position of krill herd could be updated by using quantum activity. The best position of krill herd could be set as the center of potential well of delta potential well, and the position of krill herd in the different population could evolve in different way. The convergence of the algorithm was also deduced. Simulation on benchmark functions proved that CEQKHA could get better results and perform better than other algorithms.

Key words: krill herd algorithm; cooperative evolution; quantum; multi-population; potential well

基于多目标蜂群进化优化的微电网能量调度方法

李佳华¹, 马连博¹, 王兴伟¹, 程 适², 邵一川³

(1. 东北大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710119; 3. 沈阳大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

摘 要: 针对微电网能源调度优化问题,提出了使微电网系统运行的经济和环保的双重优化模型,根据调度系统的评估结果对调度方案进行优化. 为求解该模型,提出了基于指标化拥堵距离的多目标蜂群算法(ICABC),通过建立外部档案(EA)来保存搜索过程中的非支配解;同时,为了保持解集的多样性,改进了NSGA-II的拥堵距离策略,基于指标计算拥堵距离能够避免删除密集区域的精英个体,有效地改善了 Pareto 前沿的分布特性. 为验证所提算法的性能,将 ICABC 与经典的 NSGA-II、MOCLPSO 算法在 ZDT 测试集上进行了性能比较与分析. 在验证实验中,将所提的模型和 ICABC 算法应用于解决含有多种分布式电源的微电网能量动态调度中. 仿真结果表明,通过合理安排微电源的出力,所提的方法能够有效降低系统总成本.

关键词: 微电网; 能量调度; 人工蜂群算法; 多目标优化

中图分类号: TP311.1

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.020

0 引言

微电网(micro-grid)是一种面向小型用户群的新型配电网系统. 它将用户、分布式电源和储能系统进行联网控制,支持大电网兼容运行与局部单独运行,具有环境效益高、建设成本低等优势^[1-3]. 其中,微电网内部分布式电源与储能的调度优化是实现微电网经济、技术、环境效益最大化的重要研究方向^[4].

微电网能量调度模型,数学上可归结为在满足微电网系统的能量平衡和其他约束的前提下的复杂优化问题. 考虑到系统规模的急速增长,现有能量调度网络必须满足分布式电源与可再生能源的大规模接入,从经济收益、运行成本、环保效益等角度实现对负荷以多种能源形式的高可靠供给. 显然,微电网能量调度问题含有大规模的非线性、非确定的、有约束的控制变量,本质上是一个复杂的多目标优化问题(multi-objective problem, MOP).

在微电网能量调度方面,文献[5]将二次规划用于优化混合型微电网储能动态经济调度,

使系统在优化储能使用的同时提供负荷需求. 文献[6]采用改进的粒子群优化(PSO)算法结合蒙特卡罗模拟求解目标函数. 文献[7]提出一种基于外部档案的多目标人工蜂群优化算法(multi-objective artificial bee colony, MOABC)用于两目标函数求解,函数模型采用微电源有功出力的二阶多项式表示. 目前主流的解决方案采用线性规划法、加权求和法、非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm, NSGA)和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),但算法仍存在早熟收敛、易陷入局部最优等缺点,而且,算法后期收敛速度慢,精度较差. 人工蜂群算法(artificial bee colony algorithm, ABC)是一种基于蜜蜂群智能搜索行为的优化算法,通过模拟雇佣蜂、跟随蜂和侦查蜂3种觅食蜂的搜索策略和协作原理,结合了全局搜索和局部搜索的方法,具有结构简单、参数较少、收缩能力强和收敛速度快等优点^[8].

结合上述研究现状与面临的问题,笔者设计一种以MT(微型涡轮机)驱动的热电联产(combined cooling and heating power, CCHP)微电网仿

收稿日期:2018-04-07; 修订日期:2018-07-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(6177021519,61503373); 中央基本科研业务费(N161705001)

通信作者:马连博(1981—),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士,主要从事人工智能与复杂网络研究, E-mail: malb@swc.neu.edu.cn.

真模型系统,其中包括风力发电机(WT)、光伏电池(PV)、微型涡轮机(MT)、燃料电池(FC)、柴油机(DE)和分布式储能设备(BS).在此基础上建立满足微电网经济运行和环保的双重优化模型,并采用人工蜂群算法进行优化,从而高效地完成能量调度.

为了有效求解上述模型,笔者提出了一种基于指标化拥堵距离的多目标蜂群算法(ICABC).该算法采用广泛学习策略来保证算法的多样性,避免早熟收敛;通过改进的拥堵距离策略,提高运行速度,保证种群的多样性与收敛性.综上,笔者的贡献主要包括:①设计了以MT驱动的微电网仿真系统和基于此模型的经济环保能量调度模型.②为了有效地解决上述模型,提出基于指标化拥堵距离的多目标蜂群算法ICABC.

1 微电网结构设计

1.1 微电网结构设计

微电网的基本结构如图1所示,微网呈放射状,含有A、B、C 3条馈线:敏感负荷(关键负荷)分布在馈线A;可调节负荷(重要负荷)分布在馈线B;非敏感负荷(一般负荷)分布在馈线C.根据负荷的重要程度划分等级,从而可实现对负荷的分级分层控制.调度系统的并网运行模式通过电网公共连接点(PCC)与上级电网的变电站联系.

微电网系统包括柴油机驱动的常规发电方式、风能和太阳能可再生能源发电方式以及MT驱动的热电联产系统(CCHP).其中供能组件包括风力发电机、光伏电池、微型燃气轮机和燃料电池等;同时,供能组件可为蓄电池充电,当蓄电池满足约束条件时,蓄电池可通过放电为微电网的负荷提供支持.

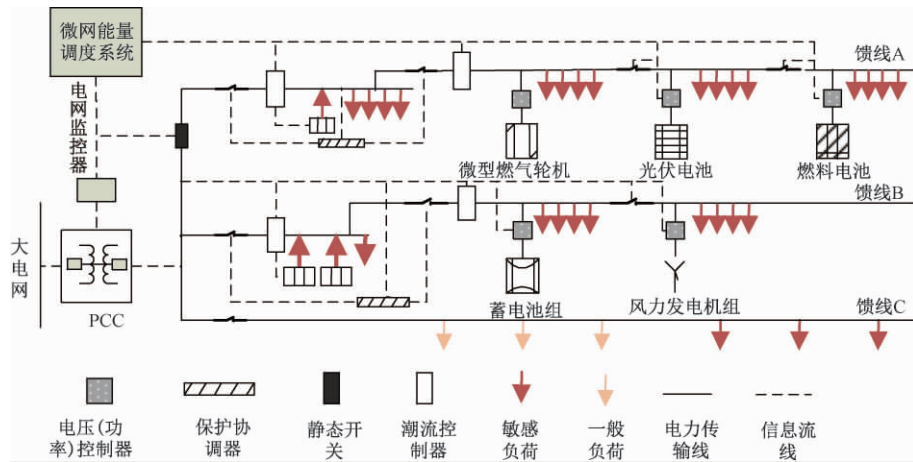


图1 微电网结构图

Fig.1 Microgrid structure

1.2 优化调度结构设计

图2为微电网系统的优化调度模型结构关系图,包含输入、输出、调度系统和优化模块四部分,模块间通过数据交互实现目标优化.

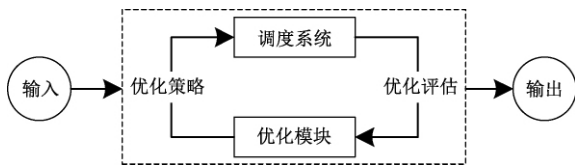


图2 优化调度模型关系图

Fig.2 Relation between modules of scheduling optimization model

在此基础上,笔者设计了包含热电联供的CCHP微电网并网运行控制策略,具体如下:
(1) 先安排不可优化的分布式电源,如风力发电

和光伏发电.(2) 当不可优化的分布式电源不能满足全部负荷需求时,微型涡轮机、燃料电池、柴油机后续进行出力优化.(3) 对分布式电源的总发电成本与购电成本、售电成本进行比较:
①当发电成本大于购电成本时,需从外网购电满足.②当发电成本小于购电成本时,若发电成本小于售电成本时,可将盈余电量向外网售出;若发电成本大于售电成本时,则不多发电,只满足微电网的日常负荷需求即可.

2 仿真模型

2.1 微型涡轮机(MT)的数学模型

对比传统活塞式发电机,微型燃气涡轮机(MT)有以下优势^[9]:可使用氢气、天然气、酒精、以及可再生燃油等作为燃料.热电联供后,发电综

合热效率可达到 80% 以上. 具体地, MT 的数学模型如下:

$$Q'_{MT} = \frac{P'_{MT}(1 - \eta'_{MT} - \alpha)}{\eta'_{MT}}, \quad (1)$$

式中: Q'_{MT} 为涡轮机 (MT) 单位时间内排气余热; P'_{MT} 为单位时间内 MT 的输出功率, kW/h; η'_{MT} 为涡轮机 (MT) 单位时间的发电效率, 取 80%; α 为热损失系数.

$$C'_{MT-FUL} = \frac{C_{GAS}}{L_{GAS}} \times \frac{P'_{MT}}{\eta'_{MT}}, \quad (2)$$

式中: C_{GAS} 为天然气价格, 取 2.95 元/ m^3 ; L_{GAS} 为天然气的净热值, 取 10 g/kW.

C'_{heat} 、 C'_{cool} 为单位时间内涡轮机 (MT) 的制热收益和供冷收益, 可定义为:

$$C'_{heat} = Q'_h \times K_{ph}; \quad (3)$$

$$C'_{cool} = Q'_c \times K_{pc}, \quad (4)$$

式中: Q'_h 、 Q'_c 为涡轮机 (MT) 单位时间排气余热提供的供热量和供冷量; K_{ph} 、 K_{pc} 为供热量和供冷量的售价, 则

$$Q'_h = Q'_{MT} \times \eta_{qre} \times K_{heat}; \quad (5)$$

$$Q'_c = Q'_{MT} \times \eta_{qre} \times K_{cool}, \quad (6)$$

式中: η_{qre} 为涡轮机 (MT) 余热回收效率; K_{heat} 、 K_{cool} 为供热系数和供冷系数.

此外, 涡轮机 (MT) 单位时间的运行维护成本 C'_{MT-OM} 可定义为:

$$C'_{MT-OM} = K_{MT-OM} \times P'_{MT}, \quad (7)$$

式中: K_{MT-OM} 为运行维护成本比例常数, 取 0.42 元/(kW·h).

2.2 燃料电池 (FC) 的数学模型

发电系统中传统火力发电站 70% 的燃烧能量消耗在锅炉和汽轮机等设备上, 并释放大量的有毒物质. 而使用燃料电池发电, 可将燃料的化学能直接转换为电能, 理论上能量转换率为 100%, 实际整个发电系统可达 40% ~ 60%^[10], 故在本文中燃料电池 (FC) 的发电效率 η'_{FC} 取 50%. 其数学模型如下:

$$C'_{FC-FUL} = \frac{C_{GAS}}{L_{GAS}} \times \frac{P'_{FC}}{\eta'_{FC}}. \quad (8)$$

式中: C'_{FC-FUL} 为燃料电池 (FC) 单位时间的燃料消耗成本; P'_{FC} 为单位时间 FC 的输出功率.

此外, 燃料电池 (FC) 单位时间的运行维护成本 C'_{FC-OM} 可定义为:

$$C'_{FC-OM} = K_{FC-OM} \times P'_{FC}, \quad (9)$$

式中: K_{FC-OM} 为运行维护成本比例常数, 取 0.03

元/(kW·h).

2.3 柴油发电机 (DE) 的数学模型

柴油发电机的燃料消耗与其有功功率输出有关^[11], 选用 30 kW 的潍坊柴油发电机组, 主要技术参数如表 1 所示.

表 1 柴油发电机组参数

Tab. 1 Parameters of diesel

机组型号	额定功率	输出电压	额定电流
LT-30GF	30 kW	400 V/230 V	54 A

该机组燃油消耗率为 $K_{DE-FUL} \leq 230$ g/(kW·h), 取燃油消耗率最大值 230 g/(kW·h) 用于柴油发电机的燃料成本计算. 柴油发电机 (DE) 的数学模型如下:

$$C'_{DE-FUL} = C_{DE} \times P'_{DE}, \quad (10)$$

式中: C'_{DE-FUL} 为柴油发电机单位时间的燃料消耗成本; C_{DE} 为柴油价格, 取 9.238×10^{-3} 元/g; P'_{DE} 为单位时间内 DE 的输出功率. 而柴油发电机单位时间内的运行维护成本为:

$$C'_{DE-OM} = K_{DE-OM} \times P'_{DE}, \quad (11)$$

式中: K_{DE-OM} 为比例常数, 取 0.09 元/(kW·h).

2.4 蓄电池 (BS) 的数学模型

考虑到系统对稳定性的需求, 选取蓄电池进行储能, 可平滑供电负荷和分布式发电的出力波动, 实现微电网可调度化^[12]. 其中, 蓄电池的充电状态 (SOC) 一般用剩余电量与额定电量的比值来衡量, 用于控制充放电过程和系统的经济调度. SOC 充电公式可表示为:

$$SOC(t) = (1 - \eta) SOC(t-1) - P_{IN} \Delta t \eta_{IN} / E, \quad (12)$$

式中: η 为蓄电池的自放电率, %/h; P_{IN} 为充电状态 (为负时, 表示电池正在充电); η_{IN} 为充电效率; E 为单位时间 Δt 内 BS 的总容量. SOC 放电公式为:

$$SOC(t) = (1 - \eta) SOC(t-1) - P_{OUT} \Delta t / (E \eta_{OUT}), \quad (13)$$

式中: P_{OUT} 为放电状态 (为正时, 表示电池正在放电); η_{OUT} 表示放电效率.

3 微电网调度模型

3.1 微电网动态经济环保调度的目标函数

微电网环保经济运行的目标是调节微电网和各分布式电源的出力, 使微电网发电成本最小及排放成本最小.

(1) 微电网系统的运行成本 (f_1). 为简化起见, 将各种效益转化为成本, 使运行成本最小、经济效益最高, 即

$$\min f_1 = \sum_t^T \left[\sum_i^N C_{\text{FULi}}^t + \sum_i^N C_{\text{OMi}}^t + C_{\text{EX}}^t + \sum_i^N C_{\text{DCi}}^t + K \cdot C_{\text{GRID}} - C_{\text{heat}}^t - C_{\text{cool}}^t \right], \quad (14)$$

式中: T 为调度时段总数; N 为微电网内分布式电源的总数; C_{FULi}^t 为第 i 个微源 t 时刻的燃料消耗成本; C_{OMi}^t 为第 i 个微源 t 时刻的运行维护成本; C_{EX}^t 为 t 时刻微电网与上级电网的交互收益, 用成本进行表示; C_{DCi}^t 为第 i 个电源 t 时刻的折旧成本; K 表示微电网是否与电网连接; C_{GRID} 为微电网与电网之间的交互成本, 当 C_{GRID} 为正时, 表示微电网正在从上级电网购电, 反之表示微电网正在向上级电网售电; C_{heat}^t 、 C_{cool}^t 为热电联产系统 (CCHP) 的制热收益和制冷收益, 用成本表示。

微电网与上级电网的交互收益 C_{EX}^t 为:

$$C_{\text{EX}}^t = C_K \times P_{\text{GRID}}^t, \quad (15)$$

式中: P_{GRID}^t 为 t 时刻微电网与上级电网的交换功率。当 P_{GRID}^t 大于 0 时, 表示微电网向上级电网购电, C_K 为微电网向上级电网的购电价格; 反之, 当 P_{GRID}^t 小于 0 时, 表示微电网向上级电网售电, C_K 为微电网向上级电网的售电价格。

微电网分布式电源的折旧成本 C_{DC}^t 为:

$$C_{\text{DC}}^t = \frac{DC}{CF \cdot P_{\text{max}} \cdot 8760} \cdot P^t; \quad (16)$$

$$DC = \text{INCOST} \cdot \text{CFR}; \quad (17)$$

$$\text{CFR} = \frac{d(1+d)^L}{(1+d)^L - 1}, \quad (18)$$

式中: DC 为分布式电源 (DG) 每千瓦时的折旧资本; P_{max} 是分布式电源 (DG) 的最大输出功率; CF 为容量因子; INCOST 为分布式电源 (DG) 的安装成本, 元/(kW·h); CFR 为资本回收系数; d 为利率, 取 6%; L 为分布式电源的寿命, 年。

(2) 微电网系统的气体排放处理成本 (f_2)。

风力发电机和光伏电池是清洁能源, 不消耗化石燃料, 无环境污染, 故它们的燃料消耗成本和气体排放处理成本为零。主要考虑 3 种排放气体: NO_x 、 SO_2 、 CO_2 , 其他分布式电源的气体排放处理成本可表示为:

$$\min f_2 = \sum_t^T C_{\text{GAS}}^t; \quad (19)$$

$$C_{\text{GAS}}^t = \sum_i^N \left[\sum_j^3 (\alpha_j \cdot \beta_{ij}) P_i \right]. \quad (20)$$

式中: C_{GAS}^t 为 t 时刻微电网气体排放的处理成本; α_j 为第 j 种气体的处理单价; β_{ij} 为第 i 个微电源排放第 j 种气体的排放系数。

微电网环保经济运行模型的决策变量为:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} P_{\text{MT}}^1, \dots, P_{\text{MT}}^{24} \\ P_{\text{FC}}^1, \dots, P_{\text{FC}}^{24} \\ P_{\text{DE}}^1, \dots, P_{\text{DE}}^{24} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

决策变量 \mathbf{x} 是由 72 个变量组成的向量, 分别由微型涡轮机 (MT)、燃料电池 (FC)、柴油发电机 (DE) 在 24 h 之内的有功出力 P_{MT}^t 、 P_{FC}^t 、 P_{DE}^t 组成。

3.2 约束条件

(1) 功率平衡约束:

$$P_{\text{LOAD}}^t = \sum_i^N P_i^t + P_{\text{GRID}}^t + P_{\text{LOSS}}^t + P_{\text{BS}}^t, \quad (22)$$

式中: P_{LOAD}^t 为 t 时段微电网的负荷需求; $\sum_i^N P_i^t$ 为各分布式电源的出力总和; P_{LOSS}^t 为微电网输电线路上的功率损失; P_{BS}^t 为蓄电池储能出力, 为正时表示电池放电, 为负时表示电池充电。

(2) 分布式电源的功率约束:

$$P_{\text{MIN}} \leq P_i \leq P_{\text{MAX}}, \quad (23)$$

式中: P_{MIN} 是分布式电源的出力下限; P_{MAX} 是分布式电源的出力上限。

(3) 微电网与上级电网的功率传输约束:

$$P_{\text{GRID}}^{\text{MIN}} \leq P_{\text{GRID}}^t \leq P_{\text{GRID}}^{\text{MAX}}, \quad (24)$$

式中: $P_{\text{GRID}}^{\text{MIN}}$ 是 t 时刻传输功率的下限; $P_{\text{GRID}}^{\text{MAX}}$ 是 t 时刻传输功率的上限。

(4) 气体排放约束:

$$Q_{\text{CO}_2}(P_i) \leq L_{\text{CO}_2}; \quad (25)$$

$$Q_{\text{SO}_2}(P_i) \leq L_{\text{SO}_2}; \quad (26)$$

$$Q_{\text{NO}_x}(P_i) \leq L_{\text{NO}_x}, \quad (27)$$

式中: L_{CO_2} 、 L_{SO_2} 和 L_{NO_x} 为 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 的排放上限。

4 ICABC 算法

4.1 基本原理

人工蜂群算法 (ABC) ^[13] 是基于蜂群搜索行为的智能优化算法, 具有较好的全局搜索和局部搜索能力, 在单目标优化方面表现出色。然而, 与单目标优化问题不同, 多目标优化问题需要找到一系列满足一定约束的 Pareto 最优解, 求解难度更大。多目标优化一般涉及两个性能指标: 收敛性和多样性, 使搜索到的非支配解在求解空间分布均匀。为了保持个体的分布均匀, 防止个体在局部聚集, 经典的非支配排序遗传算法 (NSGA-II) ^[14] 采用拥挤度距离, 代替了需要指定共享半径的适应度共享策略, 并在快速排序后的同层比较中作为精英选择标准, 使 Pareto 域中的个体能扩展到

整个 Pareto 域. 基于上述工作, 为了使 ABC 算法能够解决多目标优化问题, 笔者提出了改进拥堵策略与快速非支配排序的多目标人工蜂群算法 (ICABC) 用于求解微电网能量调度问题.

4.2 基本人工蜂群算子

4.2.1 初始化阶段

在初始化阶段, 设定种群的相关参数, 包括种群数量、食物源数量、控制参数、最大循环数和 D 维解空间等. 当所有参数确定后, 对种群进行初始化. 具体如下:

给定食物源 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{id})$ 为种群中第 i 个食物源的位置, D 为问题的维度. 在求解空间中, 每个食物源的位置初始化如下:

$$x_{id} = L_d + \text{rand}_{i,d}(U_d - L_d), \quad d = 1, 2, \dots, D, \quad (28)$$

式中: L_d 和 U_d 分别为整个搜索空间第 d 维的上下界; $\text{rand}_{i,d}$ 是 $(0, 1)$ 内均匀分布的随机数.

4.2.2 雇佣蜂阶段

雇佣蜂搜索到对应的食物源后记录其相关信息(蜜源位置、蜜源花蜜数量), 并与跟随蜂共享信息. 对于每个食物源, 对应雇佣蜂的觅食路线是基于一个随机选择邻居 k 去探索一个新的食物源. 具体来说, 给定 X_i , 其临时位置计算方法如下:

$$V_{i,j} = x_{i,j} + \varphi_{i,j}(x_{i,j} - x_{k,j}), \quad (29)$$

式中: i 为当前正在搜索的个体; j 为随机选择的维度; k 为随机选择的不同于 i 的一个邻居; $\varphi_{i,j}$ 是 $[0, 1]$ 内的随机数; $V_{i,j}$ 是个体 i 产生的新位置.

在获得新的临时食物源之后, 用贪婪法则评估其适应度, 若新个体适应度大于原个体适应度, 则认为新个体更优秀并代替原个体.

4.2.3 跟随蜂阶段

跟随蜂按照雇佣蜂提供的蜜源信息, 确定较好的食物源进一步开采. 在这个阶段跟随蜂根据个体适应度值计算该个体被选择进化的概率, 然后通过轮盘赌的方法选择个体进行更深入的探索. 第 i 个个体的选择概率 P_i 的计算方法如下:

$$P_i = 1 - \text{fit}(x_i) / \sum_{j=1}^N \text{fit}(x_j), \quad (30)$$

式中: N 为种群大小; $\text{fit}(x_i)$ 表示 x_i 的适应度值; P_i 越大意味着跟随蜂在较好的食物源(具有较小的适应度值)附近搜索的次数越多.

4.2.4 侦查蜂阶段

当食物源耗尽或不能在有限数量的周期内得到改善, 对应的雇佣蜂就会变成一只侦查蜂, 其食

物源则通过式(28)随机生成一个新的食物源.

4.3 快速非支配排序

NSGA-II 的快速非支配排序法如图 3 所示. 设种群规模为 N , 将第 t 代产生的新种群 Q_t 与父代 P_t 合并组成 R_t , 种群大小为 $2N$. 然后 R_t 根据支配关系得到一系列非支配 Pareto 解集: F_1, F_2, F_3, \dots (解集级别依次降低). 若 F_1 中非支配解的个数小于 N , 则将 F_1 的 x 个解选择到种群 P_{t+1} . P_{t+1} 中的剩余解将在其余层中继续选择, 直到 F_3 时, 种群 P_{t+1} 的解的个数超过 N , 则需要对 F_3 中的非支配解进行拥挤距离排序, 较好的 r 个个体优先进入 P_{t+1} .

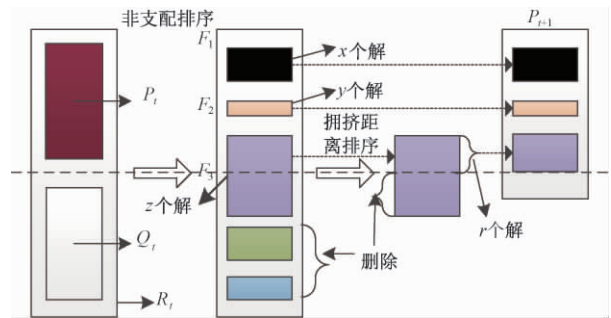


图3 快速非支配排序过程

Fig.3 Process of fast-non-dominated-sort

4.4 基于指标的拥堵距离选择 (DICC) 方法

在非支配排序后, 需对同一层非支配解集进行拥堵距离计算与排序, 如图 3 所示. 首先, 将极端解(各目标上取最大或最小的解)的拥堵距离设为无穷大. 对于其他解 i , 其拥堵距离计算如下:

$$D_i = \sum_{j=1}^M (|f_{i+1,j} - f_{i-1,j}|), \quad (31)$$

式中: D_i 为个体 i 的拥堵距离; M 为目标函数的个数; $f_{i,j}$ 为个体 i 的第 j 个目标函数值. 随着目标函数数量的增加, 非支配解占全部解的比例增加, 识别个体之间的差异(即计算个体之间的相似性)将变得更困难. 上述方法将会一次性删除密集区域中的重要个体, 损害帕累托前沿的多样性. 为此, 使用基于指标的拥堵距离策略^[15], 定义如下:

$$DI_i = \sum_{j=1}^M (|F_{le+}(x_{i+1,j}) - F_{le+}(x_{i-1,j})|), \quad (32)$$

式中: M 为目标个数; $F_{le+}(x_i)$ 为个体 i 基于指标的适应度. 计算如下:

$$\begin{cases} F_{le+}(x_i) = \sum_{x_j \in P} -e^{-I_{le+}(x_j - x_i)/(c-s)}; \\ c = \max_{x_i, x_j \in P} |I_{le+}(x_j - x_i)|, \end{cases} \quad (33)$$

式中: 参数 s 是比例因子.

基于此定义, 算法 1(拥堵距离) 计算流程具

体如下:

步骤1 初始化非支配解集中解的拥挤距离, 即 $DI_i = 0$;

步骤2 通过计算每个目标函数值对个体进行排序; 边界个体被预先设置为无穷大, 以保证在下一个选择过程中的可用性;

步骤3 通过公式 (32) 计算非支配解基于指标的拥挤距离;

步骤4 确定集合中拥挤距离最小的解 DY 并删除;

步骤5 分别通过以下公式重新计算个体 $DY+1$ 和 $DY-1$ 的拥挤距离.

$$DI_{DY+1} = \sum_{j=1}^M (|f_{DY+2,j} - f_{DY-1,j}|),$$

$$DI_{DY-1} = \sum_{j=1}^M (|f_{DY+1,j} - f_{DY-2,j}|);$$

步骤6 如果档案大小仍然超过最大预设大小, 则返回步骤3; 否则, 终止它.

4.5 约束处理

在动态经济调度中, 可行解在目标空间的比例较小, 仅使用惩罚函数处理多目标约束会导致计算速度慢, 不易找到最优解, 进而导致优化的功率不足或过剩, 增加发电成本. 为了解决这一问题, 采用能够处理等式约束的动态策略, 雇佣蜂阶段食物源位置更新的等式约束处理如下:

步骤1 使用式 (29), 更新食物源的前 $D-1$ 维的位置.

步骤2 最终维度由等式约束 (22) 确定. 如果该值在其范围内, 则转到步骤5. 如果它高于边界值, 使其值等于边界值, 然后继续步骤3.

步骤3 设置 $L=1$.

步骤4 维度 L 的值由等式约束 (22) 确定. 如果它在范围内, 则转到步骤5. 如果它高于边界值, 使其值等于边界值, 设置 $L=L+1$, 然后转到步骤4.

步骤5 停止更新过程.

4.6 求解流程

求解流程如图4所示.

5 实验部分

5.1 Benchmark 测试函数

本实验使用两目标 Benchmark 测试函数 ZDT1、ZDT2、ZDT3 和 ZDT6 来评估 ICABC 算法的性能. 比较算法为 MOCLPSO^[16] 和 NSGA-II^[14].

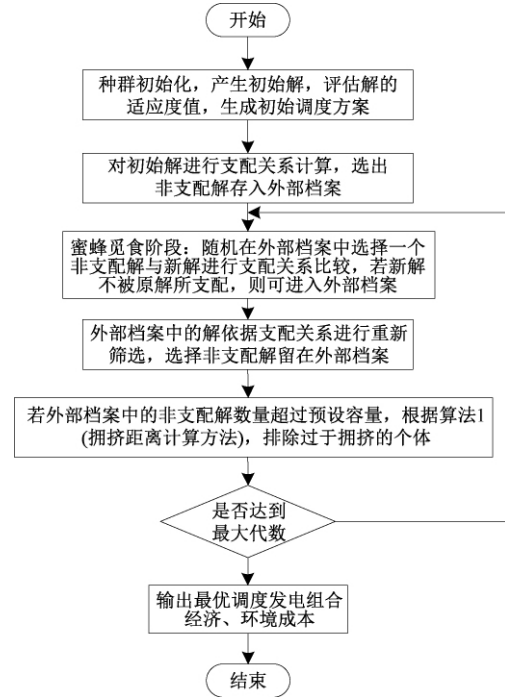


图4 求解流程图

Fig.4 Solution flowchart

测试函数的决策变量为30维, ZDT1 和 ZDT2 分别有凸和凹的 Pareto 前沿, ZDT3 的 Pareto 前沿由几段不连续的凸线组成, ZDT6 的非劣解在 Pareto 前沿分布不连续且密度不均匀, 越靠近 Pareto 前沿解的密度越低, 反之越高. 详细函数描述参考文献 [17-18].

5.2 实验设置

本实验中, ICABC 算法种群大小 $SN=50$, 外部档案大小 $A=100$, MOCLPSO 的种群大小为 50.

NSGA-II 算法采用模拟二进制交叉 (SBX) 和多项式变异生成子代, 种群大小设为 100, 交叉概率 $p_c=0.9$, 突变概率 $p_m=1/n$.

5.3 结果与分析

仅从图5上看, 各算法都具有良好的收敛性与分布性. 为了更准确比较和分析各个算法, 引入收敛性和分布性指标: 收敛性指标用来衡量各解到理想前沿的距离; 分布性指标用来计算各相邻点之间距离的标准差. 收敛性和分布性指标值越小, 说明该算法的收敛性和分布性越好.

各算法在标准测试集 ZDT1、ZDT2、ZDT3、ZDT6 的实验结果如表2所示, 包括20次运行之后收敛性及分布性的平均值、中间值、最优值、最差值和标准差. 在 ZDT1、ZDT2、ZDT3 上, ICABC 的收敛性与多样性均好于其他两个算法.

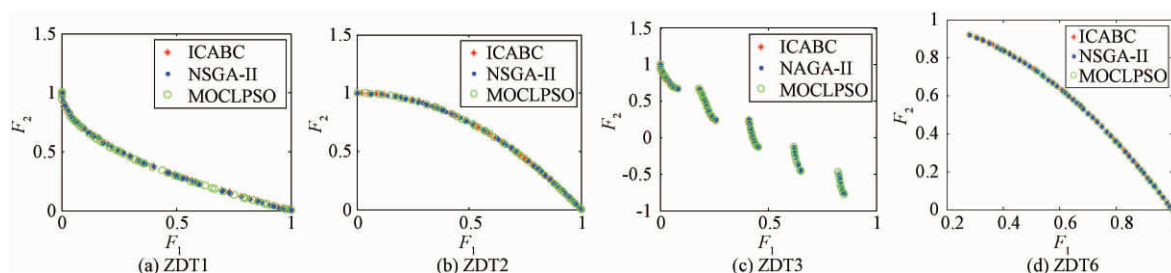


图5 3种算法在ZDT测试函数上的收敛变化曲线

Fig.5 Convergence curves of three algorithms on a set of benchmark problems

表2 3种算法在30维ZDT1、ZDT2、ZDT3和ZDT6上的性能比较

Tab.2 Performance comparison of three algorithms on ZDT1, ZDT2, ZDT3 and ZDT6

性能	ZDT1			ZDT2			ZDT3			ZDT6		
	ICABC	MOCLPSO	NSGAII	ICABC	MOCLPSO	NSGAII	ICABC	MOCLPSO	NSGAII	ICABC	MOCLPSO	NSGAII
平均值	1.00E-03	4.59E-03	7.55E-03	7.53E-04	1.62E-03	8.55E-04	4.30E-03	5.37E-03	6.55E-03	7.55E-04	6.39E-03	7.85E-04
收中间值	1.10E-03	4.69E-03	7.26E-03	7.61E-04	1.83E-03	7.56E-04	4.28E-03	5.46E-03	6.26E-03	7.26E-04	7.88E-04	7.56E-04
敛最优值	9.00E-04	3.32E-03	6.13E-03	6.82E-04	8.82E-04	6.23E-04	3.65E-03	4.97E-03	4.13E-03	6.13E-04	6.75E-04	6.32E-04
性最差值	1.10E-03	5.66E-03	8.83E-03	8.09E-04	2.65E-03	8.73E-04	5.11E-03	5.61E-03	9.63E-03	8.83E-04	2.89E-02	8.43E-04
标准差	1.00E-04	1.00E-03	1.19E-03	4.60E-05	7.36E-04	1.39E-04	5.23E-04	2.49E-04	1.16E-04	1.19E-04	1.26E-02	1.14E-04
平均值	6.27E-01	7.09E-01	6.28E-01	6.22E-01	6.23E-01	6.29E-01	6.51E-01	6.46E-01	6.27E-01	6.18E-01	6.58E-01	6.38E-01
分中间值	6.07E-01	7.03E-01	5.82E-01	6.25E-01	6.38E-01	5.62E-01	6.39E-01	6.18E-01	5.84E-01	5.52E-01	6.46E-01	5.52E-01
布最优值	5.88E-01	6.51E-01	5.74E-01	5.41E-01	4.99E-01	5.14E-01	6.05E-01	5.74E-01	5.77E-01	5.44E-01	5.44E-01	5.64E-01
性最差值	6.87E-01	7.93E-01	7.14E-01	7.00E-01	6.78E-01	7.64E-01	7.08E-01	7.51E-01	7.16E-01	7.34E-01	7.92E-01	7.24E-01
标准差	4.23E-02	5.22E-02	6.80E-02	5.72E-02	7.15E-02	6.83E-02	4.60E-02	6.95E-02	6.84E-02	6.30E-02	1.01E-01	6.40E-02

仅在ZDT3上, ICABC稍差于NSGA-II。进一步分析, 从表2中的数据可以看出, ICABC算法在ZDT1上找到了最小的平均值 $1.00E-03$ 与最小的方差 $1.00E-04$; 性能最差是NSGA-II, 它的平均值为 $7.55E-03$, 方差为 $1.19E-03$ 。这种差异的原因主要是由于以下两点: ①蜂群算法能够更好地避免陷入局部最优, 保持了算法的多样性; ②Pareto排序提供了良好的非支配前沿选择, 提高了算法的收敛性。

在ZDT2上, 也可以看到类似的性能表现: ICABC和NSGA-II在收敛性上的均值分别为 $7.53E-04$ 、 $8.55E-04$, 优于MOCLPSO的均值 $1.62E-03$ 一个数量级; 同时, ICABC的标准差为 $4.60E-05$, 优于MOCLPSO和NSGA-II一个数量级, 平均值分散稳定。由于ZDT3的Pareto前沿由几段不连续的凸线组成, 全部算法在该测试集上表现都有所下滑, 在平均值、中间值、最优值、最差值和标准差上与ZDT2相比均相差一个数量级, 但是仍然可以看出, ICABC优于其他算法。在ZDT6上, ICABC虽然略逊于NSGA-II, 但是依然好过MOCLPSO。综上, ICABC无论是在收敛性还是分布性上, 都优于其他两个算法。

5.4 基于ICABC的微电网能量调度

采用的微电网系统结构如图1所示, 系统基准容量为100 kVA, 基准电压为400 V, 如图6所示为不可控分布式电源WT和PV以最大功率跟踪方式运行的功率曲线图。微电网与上级电网的实时电价以沈阳市电价为标准。

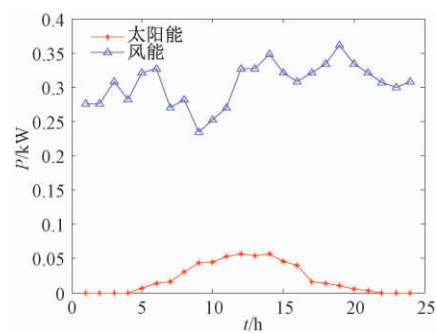


图6 太阳能、风能功率预测图

Fig.6 Forecasting chart of solar energy and wind power

5.5 结果分析

使用本文改进拥堵策略的多目标蜂群优化算法, 将上述经济调度和环境调度模型优化, 得到两目标下的调度方案Pareto前沿如图8所示。图7所示为使用MOCLPSO两目标优化调度Pareto前

沿,与 ICABC 相比,Pareto 前沿既不收敛也不均匀。

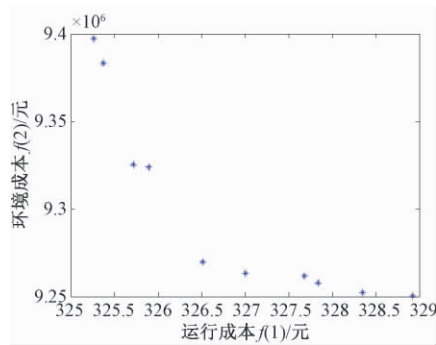


图7 MOCLPSO 在微电网调度模型的 Pareto 前沿

Fig. 7 Pareto front of microgrid scheduling model use MOCLPSO

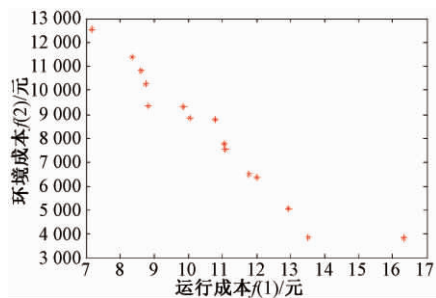


图8 ICABC 在微电网调度模型的 Pareto 前沿

Fig. 8 Pareto front of microgrid scheduling model use ICABC

从图8可看出,在蜂群算法中引入外部档案用于存储非支配解,并使用基于指标的拥堵策略进行非支配解的选择,不仅可以获得有效的收敛解,还可以获得分布广泛而均匀的 Pareto 前沿。

以图8中 Pareto 前沿中的一个折中解为例,在满足经济成本和环境成本最小的目标下,对应的调度方案如图9所示。图9所示的仿真模型试验的调度方案暂且不考虑微电网的热负荷,结果显示,微型涡轮机 MT 的出力基本为零,不为其他一般负荷供电。

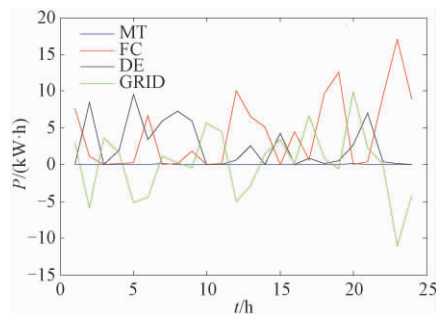


图9 多目标优化调度优化结果

Fig. 9 Optimization result of multi-objective optimization scheduling

燃料电池 FC 由于其发电效率高、污染气体

排放少等优点应该被优先安排。在用电高峰期 (12:00、17:00 – 20:00) 能量调度系统优先安排 FC,柴油发电机 DE 由于其功率输出稳定可作为补充能源为微电网负荷供电。由图6可知,由于太阳光日照因素,太阳能在 10:00 – 15:00 表现积极;而由图9可知,柴油机 DE 在 10:00 – 15:00 出力较弱,在其他时间段表现相对活跃。

由实验结果可知,调度系统能够合理安排分布式电源的出力,故而当技术条件具备,可大力增加太阳能等清洁能源机组数量。由图9可知,在 00:00 – 7:00、22:00 – 24:00 用电低谷期间,微电网在满足负荷要求之外,向上级电网售电获得收益;在用电高峰期微电网向上级电网购电满足负荷需求。结果表明:ICABC 算法能有效降低系统成本及废气处理成本,权衡经济和环境效益,可根据具体微电网环境要求,合理安排能量调度方案。

6 结论

以微电网系统运行的经济和环境作为双重优化目标,设计了以风能、光能、燃料电池、微型涡轮机以及蓄电池为主要供电单位的微电网结构,以典型的并网运行控制策略为例,对多目标动态优化调度的结果进行了比较。在求解方法上结合 ABC 算法,引入非支配排序策略,基于指标计算,改进了个体拥堵评估策略,有效地提高了算法的收敛性,同时改善了 Pareto 前沿的分布特性。算例分析结果证明了 ICABC 算法在工程领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] SERBAN E, SERBAN H. A control strategy for a distributed power generation microgrid application with voltage and current-controlled source converter [J]. IEEE transactions on power electronics, 2010, 25 (12): 2981 – 2992.
- [2] COSTABEBER A, ERSEGHE T, TENTI P, et al. Optimization of micro-grid operation by dynamic grid mapping and token ring control [C] //European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, UK: IEEE, 2011: 1 – 10.
- [3] QING L I, ZHAO X U, YANG L. Recent advancements on the development of microgrids [J]. Journal of modern power systems & clean energy, 2014, 2 (3): 206 – 211.
- [4] CHENGSHAN W, PENG L. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of electric

- power systems, 2010, 34(2): 10–13.
- [5] PAPPALA V S, ERLICH I, ROHRIG K, et al. A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system [J]. IEEE transactions on power systems, 2009, 24(2): 940–950.
- [6] WU H, LIU X, DING M. Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2014, 63(63): 336–346.
- [7] 姚兴佳, 赵骞, 王士荣, 等. 多目标蜂群算法求解微电网调度问题 [J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 58–63.
- [8] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Journal of global optimization, 2007, 39(3): 459–471.
- [9] 翁一武, 苏明, 翁史烈. 先进微型燃气轮机的特点与应用前景 [J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 111–116.
- [10] 衣宝廉. 燃料电池现状与未来 [J]. 电源技术, 1998(5): 216–221.
- [11] 马艺玮, 杨苹, 陈思哲, 等. 含柴油发电机和蓄电池储能的独立微电网频率分层控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1098–1105.
- [12] 彭思敏, 曹云峰, 蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 38–43.
- [13] KARABOGA D, AKAY B. A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm [J]. Applied mathematics & computation, 2009, 214(1): 108–132.
- [14] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE transactions evolutionary computation, 2002, 6(2): 182–197.
- [15] MA L, WANG X, HUANG M, et al. Two-level master-slave RFID networks planning via hybrid multiobjective artificial bee colony optimizer [J]. IEEE transactions on systems man & cybernetics systems, 2017(99): 1–20.
- [16] HUANG V L, SUGANTHAN P N, LIANG J J. Comprehensive learning particle swarm optimizer for solving multiobjective optimization problems [J]. International journal of intelligent systems, 2006, 21(2): 209–226.
- [17] KHARE M, PATHAIK T, KHARE A. A comparison of multiobjective evolutionary algorithms [C]//National Conference on Emerging Trends in Software & NETWORKING Technologies. Noida, UP, India, 2009: 173–195.
- [18] MA L, CHENG S, WANG X, et al. Cooperative two-engine multi-objective bee foraging algorithm with reinforcement learning [J]. Knowledge-based systems, 2017, 133: 278–293.

A Novel Multi-objective Artificial Bee Colony Algorithm for Microgrid Energy Dispatching Model

LI Jiahua¹, MA Lianbo¹, WANG Xingwei¹, CHENG Shi², SHAO Yichuan³

(1. School of Software, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3. College of Information Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: Aiming at the optimization of the energy dispatching in microgrid, a bi-objective optimization model for economic and environmental operations of the microgrid systems was proposed. Then this model was assessed based on the evaluation results of the dispatching system. To be specific, in order to optimize this model, a novel multi-objective artificial bee colony algorithm called ICABC was devised, based on crowding-distance with performance indicators. This algorithm incorporated an external archive (EA) to preserve non-dominated solutions; and a novel crowding-distance method called DICC was used to maintain the diversity of solutions. DICC was essentially a updated version of traditional crowding-distance strategy in NSGA-II. It aimed to avoid the removal of elite individuals in dense areas effectively while enhance the diversity of obtained non-dominated solutions. With rigor experimental evaluations on a set of benchmark problems, it showed that ICABC had more powerful performance compared with NSGA-II and MOCLPSO. Then, ICABC was applied to resolve the proposed model for dynamic dispatching of microgrid with multiple distributed generations. Simulation results exhibited that the proposed method and model effectively reduced the total system cost by rationally arranging the output of the distributed generations.

Key words: microgrid; energy dispatching; artificial bee colony algorithm; multi-objective problem

基于广义粒子群优化模型的工艺规划方法研究

文笑雨, 罗国富, 李 浩, 肖艳秋, 乔东平, 李晓科

(郑州轻工业学院 河南省机械装备智能制造重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要: 在广义粒子群优化模型基础上, 结合工艺规划问题的特性, 设计了求解工艺规划问题的改进广义粒子群优化算法. 该算法采用当前粒子与个体极值库、种群极值库进行交叉操作的方式, 使粒子能够从个体极值和种群中获取更新信息, 引入变邻域搜索算法作为粒子的局部搜索策略. 实例测试结果显示, 与其他算法相比, 本文算法在求解工艺规划问题时具有更高的求解效率和更好的稳定性.

关键词: 广义粒子群优化算法; 工艺规划; 变邻域搜索; 组合优化

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.009

0 引言

工艺规划的输入是产品的设计数据, 输出为产品具体的制造信息, 它对制造系统的性能有着重要的影响^[1]. 由于柔性制造系统和数控加工中心的广泛应用, 许多零件在生产加工时, 存在大量的柔性工艺可供选择, 同时, 每道加工工序还有众多可选的加工资源, 这使得工艺规划问题成为一个典型的 NP(non-deterministic polynomial) -Complete 问题, 传统的方法很难有效地解决该问题^[1].

近年来, 越来越多的智能优化算法被应用于解决现代制造系统中的工艺规划问题, 如粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)^[1]、殖民竞争算法^[2]、蚁群算法^[3-4]、蝙蝠算法^[5]、遗传算法^[6](GA)、禁忌搜索^[6](TS) 和模拟退火算法^[6](SA) 等. 在上述方法中, PSO 算法是一种基于群体智能理论的优化算法. 传统的 PSO 适合于处理连续优化问题, 随着研究的深入, 许多学者对传统的 PSO 进行改进, 将其广泛应用于诸多复杂的组合优化问题中, 如旅行商问题^[7]、作业车间调度问题等^[8-9]. 其中, 高海兵等^[7]提出的广义粒子群优化(general PSO, GPSO) 模型建立了一种将 PSO 应用于组合优化问题的通用思路, 在应用 GPSO 模型求解工艺规划问题时, 值得进一步去探索更加有效的粒子全局更新策略和局部搜索策略.

笔者在广义粒子群优化模型基础上, 结合工艺规划问题的特性, 设计了基于个体极值库和种群极值库的粒子全局更新策略, 引入变邻域搜索算法作为粒子的局部搜索策略, 提出了求解工艺规划问题的改进 GPSO(improved GPSO, IGPSO) 算法, 并使用已有工艺规划文献中的 6 个典型零件对提出的算法进行了测试, 验证了提出算法的有效性.

1 工艺规划问题描述

本文研究的工艺规划问题可被描述为: 某待加工零件具有多种加工特征, 每种加工特征具有不同的可选加工工艺, 每一种可选加工工艺可能包含多道加工工序, 每道加工工序可以在若干台可选机器上进行加工, 被加工零件的不同特征之间具有一定的次序约束关系. 工艺规划的目的是在已有加工资源和加工约束的情况下, 确定被加工零件的工艺路线, 从而使得某项指标达到最优. 在本文中, 选择待加工零件的加工时间作为优化目标, 并进行如下假设:

- (1) 同一零件的不同工序不能被同时加工;
- (2) 在 0 时刻, 所有的机器都是可用的;
- (3) 每道工序的加工时间被定义为常数;
- (4) 一个零件在一台机器上加工完成之后, 它被立刻传送至工艺路线中的下一台机

收稿日期:2018-05-30; 修订日期:2018-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775517); 河南省高等学校重点科研项目(15A460037); 河南省产学研合作计划项目(172107000019); 郑州轻工业学院博士科研基金资助项目(2014BSJJ0023)

作者简介: 文笑雨(1988—), 女, 河南南阳人, 郑州轻工业学院讲师, 博士, 主要从事工艺规划、车间调度、智能优化算法方面的研究, E-mail: xiaoyuup@ gmail. com.

器,零件在不同机器之间的传输时间被定义为常数;

(5) 机器加工每道工序的准备时间和工序加工顺序是相互独立的,并被包含在每道工序的加工时间中。

为了形象地描述所研究的问题,针对某待加工零件详细说明如何进行工艺规划操作。表 1 给出了某零件的加工工艺信息表。

该零件包含有 9 个加工特征,有 5 台机器可供选择对零件不同的工序进行加工。确定该零件的工艺路线需要经过三个步骤:第一,确定不同加工特征的顺序,该顺序必须满足不同特征之间的次序约束关系;第二,确定每种加工特征具体的加工工艺;第三,对具有可选加工机器的工序确定具体的加工机器。

表 1 某零件的加工工艺信息表

Tab. 1 Machining process information of a part

特征	可选工艺	可选加工机器	加工时间	约束
F_1	O_1	M_1, M_2	13, 8	在 F_2 , F_3 之前
	O_2-O_3	$M_2, M_3/M_3, M_4$	9, 11/12, 9	
F_2	O_4-O_5	$M_2, M_3/M_4$	23, 17/18	—
	$O_6-O_7-O_8$	$M_3, M_5/M_3, M_4/M_4$	9, 12/7, 13/10	
F_3	O_9	M_1, M_4	27, 23	—
F_4	$O_{10}-O_{11}$	$M_3, M_5/M_1, M_5$	5, 8/6, 12	在 F_7 , F_8 之前
	O_{12}	M_4, M_5	17, 22	
F_5	O_{13}	M_3, M_4, M_5	43, 47, 46	—
F_6	$O_{14}-O_{15}$	$M_1, M_4, M_5/M_3, M_4$	18, 19, 21/17, 14	—
F_7	O_{16}	M_2, M_3, M_5	31, 28, 34	在 F_9 之前
F_8	O_{17}	M_2, M_3, M_5	10, 13, 7	—
F_9	O_{18}	M_3, M_4	32, 36	—

当该零件的工艺路线确定之后,可以计算出该零件的总加工时间。基于上述问题描述,本文研究的工艺规划问题优化目标为零件的总加工时间 (processing time, PT) 最短,具体计算方法如下所示:

$$\text{Min } PT = OT + TT, \quad (1)$$

式中: OT 为零件的工序加工时间; TT 为零件在不同机器之间的传输时间。

$$OT = \sum_{i=1}^n OT_i. \quad (2)$$

式中: OT_i 为工艺路线中第 i 道工序的加工时间; n 为零件的工艺路线中包含的工序数目。

$$TT = \sum_{i=1}^{n-1} TT_{M_i, M_{i+1}} \times \Omega(M_i, M_{i+1}). \quad (3)$$

如果零件相邻的两道工序在不同的机器上进行加工,则需要一定的机器传输时间, $TT_{M_i, M_{i+1}}$ 为从工艺路线中第 i 道工序的加工机器 M_i 转换到第 $i+1$ 道工序的加工机器 M_{i+1} 所需要的传输时间。

$$\Omega(M_i, M_{i+1}) = \begin{cases} 1, & \text{if } M_i \neq M_{i+1}; \\ 0, & \text{if } M_i = M_{i+1}. \end{cases} \quad (4)$$

当相邻两道工序在相同的机器上加工时,式(4)为 0; 当相邻两道工序在不同的机器上加工时,式(4)为 1。

2 IGPSO 求解工艺规划问题

2.1 广义粒子群优化算法模型

高海兵等^[7]通过对传统 PSO 核心优化机理的分析,忽略粒子的具体更新策略,总结出了 GPSO 模型,其基本流程如图 1 所示。笔者在 GPSO 模型下设计求解工艺规划问题的 IGPSO 算法,接下来将分别介绍基于 IGPSO 算法的工艺规划方法主要组成部分以及算法流程。

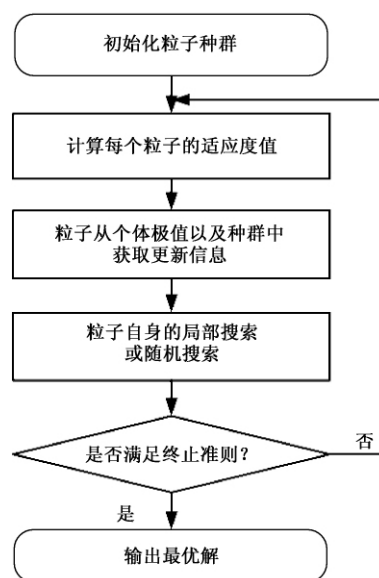


图 1 广义粒子群优化模型^[7]

Fig. 1 General particle swarm optimization model

2.2 粒子的编码与解码

每一个粒子代表零件的一条具体的工艺路线,笔者采用文献[1]中的编码与解码方法对粒子进行编码与解码操作。每一个粒子包含三段长度不同的序列:第一段为特征序列;第二段为可选工艺序列,这两段序列的长度均等于零件的总特征数;第三段为可选机器序列,该序列的长度等于零件的总工序数。以表 1 中的零件为例,一种可行的粒子编码方案如图 2 所示。特征序列代表的含

义为该零件特征加工顺序为: $F_4-F_1-F_8-F_7-F_5-F_9-F_2-F_3-F_6$.

特征序列:

4	1	8	7	5	9	2	3	6
---	---	---	---	---	---	---	---	---

可选工艺序列:

1	2	1	2	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

可选机器序列:

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

图2 粒子对应的编码方案

Fig.2 Corresponding encoding scheme for a particle

可选工艺序列的第 i 个位置的数字 k , 代表了第 i 个特征选择第 k 种可选加工工艺进行加工, 如图2中可选工艺序列中第二个位置为2, 则代表特征2从它的可选工艺集 $\{O_4-O_5, O_6-O_7-O_8\}$ 中选择第2种加工工艺, 即 $O_6-O_7-O_8$ 进行加工. 可选机器序列中第 i 个位置的数字 k , 代表了零件的第 i 道工序从可选加工机器集中选择第 k 个加工机器, 如图2中可选机器序列第1个位置为2, 则代表工序1从它的可选加工机器集 $\{M_1, M_2\}$ 中选择了第二个机器, 即 M_2 进行加工.

该编码方案经解码后代表所确定的零件工艺路线为: $O_{12}(M_4)-O_1(M_2)-O_{17}(M_2)-O_{16}(M_3)-O_{13}(M_3)-O_{18}(M_3)-O_6(M_3)-O_7(M_3)-O_8(M_4)-O_9(M_4)-O_{14}(M_4)-O_{15}(M_4)$.

2.3 初始化粒子种群

粒子种群中的每一个粒子代表零件的一种工艺规划方案. 按照编码操作, 每一个粒子包含三段序列, 均采用随机初始化的方法进行初始化操作. 每个粒子随机初始化编码之后, 利用文献[10]的约束调整方法调整编码方案, 然后使用解码操作对其进行解码, 获得具体该粒子所代表的零件工艺路线; 根据具体的工艺路线, 计算该工艺路线下零件的总加工时间, 将染色体所对应工艺路线的总加工时间直接作为适应度值.

2.4 粒子的全局更新策略

IGPSO中粒子的全局更新采用文献[1]中的交叉操作来实现. 为了避免进行无效的交叉操作, 设定个体极值库, 保存粒子在搜索过程中发现的最好的若干个解(一般取2~3个)^[11]. 为了避免算法过早收敛, 设定种群极值库保存整个搜索过程中发现的最好的若干个解(一般取整个种群的20%~30%). 当前粒子通过与个体极值库和种群极值库中不同的粒子进行交叉操作, 获取更新信息.

2.5 粒子的局部搜索策略

采用变邻域搜索算法作为粒子的局部搜索策略, 详细步骤如下:

步骤1 根据粒子的编码方案, 定义3种邻域结构 $N1$ 、 $N2$ 、 $N3$. 其中, $N1$ 为交换操作, 即随机选择粒子中特征序列上不同的两个位置, 将这两个位置上的数值进行交换; $N2$ 为插入操作, 随机选择粒子中特征序列的一个位置, 将这个位置上的数值插入到该序列的任意其他位置之前; $N3$ 为变异操作, 随机选择粒子中可选工艺序列、可选加工机器序列中的一个位置, 根据其可选加工资源情况, 选择另外一种加工资源. 设定外循环最大迭代次数 $MaxIterOut$, 内循环最大迭代次数 $MaxIterIn$. 令 $i=0, l=0$. i 代表当前内循环次数, l 代表当前外循环次数.

步骤2 随机挑选一种邻域结构, 产生当前粒子 $Pcurr$ 的邻域解 $P1$.

步骤3 当 i 大于 $MaxIterOut$ 时, 输出 $Pcurr$; 否则, 顺序执行.

步骤4 当 l 大于 $MaxIterIn$ 时, 令 $i=i+1$, 若 $P1$ 的适应度值小于 $Pcurr$, 则令 $Pcurr=P1$, 跳转到步骤3; 当 l 小于或等于 $MaxIterIn$ 时, 顺序执行.

步骤5 令 $k=1$, k 代表当前使用的邻域结构编号.

步骤6 根据 Nk 随机产生 $P1$ 邻域解 $P2$. 如果 $P2$ 的适应度值小于 $P1$, 则令 $P1=P2, k=1$, 跳转到步骤6(继续按照当前邻域结构进行搜索); 如果 $P2$ 的适应度值大于 $P1$, 则令 $k=k+1$, 如果 k 小于等于3, 跳转到步骤6(继续搜索下一个邻域). 如果 k 大于3, 顺序执行.

步骤7 令 $l=l+1$, 跳转到步骤4.

2.6 IGPSO 求解工艺规划的总流程

步骤1 设定算法参数: 种群规模 $PopSize$; 种群极值库规模 $GlobSize$; 个体极值库规模 $SelfSize$; 最大迭代次数 $MaxGen$; 粒子全局搜索的概率 $GlobProb$; 粒子局部搜索的概率 $LocalProb$; 变邻域搜索中外循环最大迭代次数 $MaxIterOut$; 内循环最大迭代次数 $MaxIterIn$.

步骤2 随机初始化种群和个体极值库, 挑选种群中适应度值最好的20%个粒子存入种群极值库.

步骤3 依据粒子全局搜索的概率, 依次对种群中的粒子进行全局搜索, 更新个体极值库和种群极值库.

步骤 4 依据粒子局部搜索的概率,依次对种群中的粒子进行局部搜索,更新个体极值库和种群极值库。

步骤 5 如果循环达到最大迭代次数,则输出种群极值库中最好的个体作为优化结果;如果循环没有达到最大迭代次数,则跳转到步骤 3。

3 计算结果及分析

3.1 算例及计算结果

上述提出的 IGPSO 算法用 C++ 语言编程实现. 本文的测试实例包含对 6 个不同的零件进行工艺规划,以验证提出算法的有效性. 零件 1 包含 14 个加工特征 20 道可选加工工序;零件 2 包含 15 个加工特征 16 道可选加工工序;零件 3 包含 11 个加工特征 14 道可选加工工序;零件 4 包含 13 个加工特征 13 道可选加工工序;零件 5 包含 7 个加工特征 9 道可选加工工序;零件 6 包含 14 个加工特征 18 道可选加工工序. 零件图和具体的加工信息表见文献[1]. 笔者假定在车间中有 5 台机器用于零件加工,零件在不同机器之间的传输时间见文献[1]. 算法参数设置如下:种群规模设定为 200,种群极值库规模设定为 40,个体极值库规模设定为 3,最大迭代次数设定为 100,粒子全局搜索的概率设定为 0.8,粒子局部搜索的概率设定为 0.3,变邻域搜索中外循环最大迭代次数设定为 20,内循环最大迭代次数设定为 20。

使用笔者提出的 IGPSO 算法针对 6 个零件独立计算 20 次,统计了 20 次运行中获得零件工

艺路线对应加工时间的最好值、平均值以及平均收敛代数,具体计算结果以及与其他算法的对比如表 2 所示,其中,SA、GA 和 MPSO(改进 PSO)算法的计算结果均来自文献[1]. 笔者提出的 IGPSO 获得的最优工艺路线如表 3 所示。

表 2 IGPSO 计算结果及与其他算法的对比

Tab. 2 Results obtained by IGPSO and the comparisons with other algorithms

零件	算法	最好值	平均值	平均收敛代数
1	SA ^[1]	342	344.6	51.20
	GA ^[1]	342	343.8	46.20
	MPSO ^[1]	341	341.5	34.20
	IGPSO	341	341.0	16.75
2	SA ^[1]	187	190.2	46.30
	GA ^[1]	187	188.5	41.10
	MPSO ^[1]	187	187.0	33.10
	IGPSO	187	187.0	17.75
3	SA ^[1]	176	179.2	55.80
	GA ^[1]	176	177.5	50.60
	MPSO ^[1]	176	176.0	39.50
	IGPSO	176	176.0	11.75
4	SA ^[1]	222	222.0	70.30
	GA ^[1]	222	222.0	45.20
	MPSO ^[1]	222	222.0	31.80
	IGPSO	222	222.0	21.80
5	SA ^[1]	212	212.2	60.70
	GA ^[1]	212	212.0	51.30
	MPSO ^[1]	212	212.0	42.50
	IGPSO	212	212.0	41.55
6	SA ^[1]	361	363.4	98.10
	GA ^[1]	360	361.1	83.70
	MPSO ^[1]	359	360.5	72.30
	IGPSO	358	360.25	55.85

表 3 IGPSO 获得的最优工艺路线

Tab. 3 Optimal process plans obtained by IGPSO

零件	IGPSO 获得的最优工艺路线
1	$O_1(M_4) \rightarrow O_6(M_4) \rightarrow O_{11}(M_4) \rightarrow O_{18}(M_4) \rightarrow O_5(M_4) \rightarrow O_7(M_4) \rightarrow O_8(M_4) \rightarrow O_9(M_4) \rightarrow O_{10}(M_4) \rightarrow O_4(M_4) \rightarrow O_3(M_4) \rightarrow O_2(M_4) \rightarrow O_{12}(M_4) \rightarrow O_{13}(M_4) \rightarrow O_{14}(M_4) \rightarrow O_{15}(M_4) \rightarrow O_{16}(M_4) \rightarrow O_{17}(M_4) \rightarrow O_{19}(M_4) \rightarrow O_{20}(M_4)$
2	$O_{16}(M_4) \rightarrow O_1(M_4) \rightarrow O_2(M_4) \rightarrow O_{14}(M_4) \rightarrow O_6(M_4) \rightarrow O_7(M_4) \rightarrow O_{15}(M_4) \rightarrow O_3(M_4) \rightarrow O_4(M_4) \rightarrow O_5(M_4) \rightarrow O_9(M_4) \rightarrow O_{13}(M_4) \rightarrow O_8(M_4) \rightarrow O_{11}(M_4) \rightarrow O_{12}(M_4) \rightarrow O_{10}(M_4)$
3	$O_1(M_4) \rightarrow O_2(M_4) \rightarrow O_6(M_4) \rightarrow O_5(M_4) \rightarrow O_3(M_4) \rightarrow O_4(M_4) \rightarrow O_{14}(M_4) \rightarrow O_{12}(M_4) \rightarrow O_{13}(M_4) \rightarrow O_9(M_4) \rightarrow O_{10}(M_4) \rightarrow O_{11}(M_4) \rightarrow O_8(M_4) \rightarrow O_7(M_4)$
4	$O_3(M_1) \rightarrow O_2(M_1) \rightarrow O_{13}(M_1) \rightarrow O_1(M_1) \rightarrow O_4(M_1) \rightarrow O_{10}(M_1) \rightarrow O_{11}(M_1) \rightarrow O_5(M_1) \rightarrow O_6(M_1) \rightarrow O_7(M_1) \rightarrow O_8(M_1) \rightarrow O_9(M_1) \rightarrow O_{12}(M_1)$
5	$O_1(M_2) \rightarrow O_3(M_2) \rightarrow O_5(M_2) \rightarrow O_6(M_5) \rightarrow O_9(M_5) \rightarrow O_4(M_5) \rightarrow O_7(M_5) \rightarrow O_8(M_4) \rightarrow O_2(M_4)$
6	$O_{16}(M_4) \rightarrow O_2(M_4) \rightarrow O_{14}(M_2) \rightarrow O_3(M_2) \rightarrow O_8(M_2) \rightarrow O_9(M_2) \rightarrow O_{10}(M_2) \rightarrow O_5(M_2) \rightarrow O_6(M_1) \rightarrow O_7(M_1) \rightarrow O_1(M_1) \rightarrow O_{11}(M_1) \rightarrow O_{12}(M_1) \rightarrow O_{18}(M_1) \rightarrow O_{17}(M_1) \rightarrow O_{15}(M_1) \rightarrow O_{13}(M_1) \rightarrow O_4(M_1)$

从表2可以看出,针对零件1~零件5,使用本文提出的IGPSO算法在20次独立运行中每次均都能够找到最优解.在最好值上,针对零件1,IGPSO算法的计算结果优于SA和GA,与MPSO的计算结果相同.针对零件2、零件3、零件4和零件5,4种算法在最好值上的计算结果相同,但是与SA、GA和MPSO算法相比,笔者提出的IGPSO算法的平均收敛代数较少.针对零件6,笔者提出的IGPSO在最好值、平均值和平均收敛代数上均优于其他3种算法.

3.2 计算结果分析

整体来说,4种算法在本文的测试实例中显示的性能从优到劣顺序为:IGPSO > MPSO > GA > SA.虽然在零件1~零件5的测试中,SA算法获得了最优解,但是与其他3种算法相比,它所获得的平均值比较大,平均收敛代数也比较大.这是因为SA是一种局部搜索算法,计算结果比较依赖于初始解.相比SA,全局搜索能力比较好的GA获得的计算结果更加稳定,平均收敛次数低于SA,在零件6的测试中,获取了比SA更好的解.在零件1~零件5的测试中,MPSO获得的最好值与GA相同,平均值小于或等于GA获得的结果,平均收敛代数均优于GA.在零件6的测试中,MPSO获得了更小的最优解.这是因为,与GA的并行全局搜索策略相比,MPSO在粒子的全局更新策略上有所不同,当前粒子通过与个体极值和种群极值库中的粒子进行交叉操作,迅速向解空间中较好的区域进行移动,因此,MPSO平均收敛代数小于GA.在零件1~零件5的测试中,IGPSO取得了与MPSO相同的最好值,在平均值上略优于MPSO获得的计算结果,平均收敛次数优于MPSO.在对零件6的测试中,IGPSO获得了新的最优解,平均值与平均收敛次数也优于MPSO获得的结果.与MPSO相比,笔者提出的IGPSO在算法的局部搜索策略上引入了变邻域搜索算法,增强了粒子的局部搜索能力,因此算法的平均收敛次数较少,且在零件6的测试中发现了新的最优解.通过不同测试实例的计算结果可以证明,笔者提出的算法IGPSO在求解工艺规划问题上具有一定优势.

4 结束语

笔者设计了一种IGPSO算法求解柔性工艺规划问题,计算结果显示,与其他算法相比,笔者提出的IGPSO算法在求解工艺规划问题时具有更高的求解效率和更好的稳定性.

在今后的研究工作中,可以从工艺规划问题建模和求解算法设计两个方向进一步深入研究.在工艺规划问题建模上,考虑进一步研究面向绿色制造模式的工艺规划问题建模方法;在求解算法设计上,笔者设计的IGPSO算法,是通过改变GPSO算法的操作算子,对算法的收敛和发散进行控制.近年来,涌现出了一些新型的群体智能优化算法,能够将数据挖掘的思想融入群体智能优化算法设计中,如头脑风暴优化算法^[12],为算法的设计提供了一种新思路.因此,考虑在今后的研究工作中,对基于头脑风暴算法的柔性工艺规划方法进行进一步的研究.

参考文献:

- [1] LI X Y, GAO L, WEN X Y. Application of an efficient modified particle swarm optimization algorithm for process planning [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 67(5/8): 1355 - 1369.
- [2] LIAN K L, ZHANG C Y, SHAO X Y, et al. Optimization of process planning with various flexibilities using an imperialist competitive algorithm [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2012, 59(5/8): 815 - 828.
- [3] 武轩. 复杂零件工艺路线重用与优化技术及在数控机床中的应用[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2014.
- [4] 黄风立, 顾金梅, 张礼兵, 等. 基于禁忌制造特征动态调整的STEP-NC工艺路线蚁群优化方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(5): 596 - 602.
- [5] 范孝良, 吴学华, 赵爱林, 等. 一种基于蝙蝠算法的工艺规划方法[J]. 图学学报, 2015, 36(6): 856 - 861.
- [6] YUSOF Y, LATIF K. Survey on computer-aided process planning [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 75(1/4): 77 - 89.
- [7] 高海兵, 周驰, 高亮. 广义粒子群优化模型[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 1980 - 1987.
- [8] 彭传勇, 高亮, 邵新宇, 等. 求解作业车间调度问题的广义粒子群优化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 911 - 917.
- [9] 潘全科, 王文宏, 朱剑英, 等. 基于粒子群优化和变邻域搜索的混合调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 323 - 328.
- [10] LI W D, ONG S K, NEE A. Optimization of process plans using a constraint-based tabu search approach [J]. International journal of production research, 2004, 42(10): 1955 - 1985.

(下转第87页)

响应面法优化脱硅稻壳基活性炭对恩诺沙星的吸附

张宾朋¹, 韩秀丽^{1,2}, 方书起^{1,2}, 常 春^{1,2}

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

摘 要: 以脱硅稻壳残渣(DRH)为原料制备活性炭(AC), 并用其处理含抗生素恩诺沙星(ENR)的废水. 采用响应面分析方法(RSM)中的中心设计模型(CCD)优化吸附过程中的条件(吸附时间, 吸附剂量, ENR浓度, pH). 最终得到吸附恩诺沙星的较优工艺条件是: 吸附时间 355.3 min, 吸附剂量 $0.40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, ENR浓度 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.69, 预测的最大吸附量是 $429.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 吸附平衡数据符合 Langmuir 和 Koble-Corrigan 吸附模型, 温度为 298 K 时的最大单层吸附量为 $444.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 研究表明, 脱硅稻壳基活性炭基于成本低和吸附量大的特点, 是处理含恩诺沙星废水的理想材料.

关键词: 恩诺沙星; 活性炭; 响应面法; 吸附机理; 稻壳

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.030

0 引言

恩诺沙星是新一代氟喹诺酮类抗生素, 作为生长促进剂和预防性药物在家禽养殖领域广泛使用, 同时产生大量的含恩诺沙星的废水^[1-2]. 水环境中的抗生素会导致抗药性细菌大量繁殖, 危害水生态系统平衡. 吸附法操作简便、高效, 是处理含抗生素废水的重要方法^[3-5]. Genc等^[6]利用膨润土作为吸附剂处理抗生素废水, 成本低, 但是吸附效果不好; Fernandez等^[7]利用离子交换树脂吸附处理抗生素废水, 效果很好, 但是成本高, 且制备过程产生大量废弃物. 脱硅稻壳残渣是工业上生产白炭黑后的废弃物, 可以用其制备成活性炭来处理有毒的抗生素废水, 成本低, 效率高. 本文利用中心设计模型优化了稻壳基活性炭吸附恩诺沙星的条件, 为处理抗生素废水提供了新的方法.

1 实验部分

1.1 材料与试剂

脱硅稻壳残渣取自郑州凯乐生物能有限公司, 盐酸恩诺沙星($\text{C}_{19}\text{H}_{23}\text{ClFN}_3\text{O}_3$, 体积分数 $\geq 98\%$) 购于河南省海正生物科技有限公司.

1.2 活性炭的制备

取脱硅稻壳残渣 10 g 放置在管式炉中, 990°C 条件下, 水蒸气活化 20 min, 产率为 12%. 然后研磨, 过筛, 取粒径 0.150~0.180 mm 的活性炭备用. 利用比表面分析仪测得活性炭比表面积为 $1019.9 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

1.3 吸附实验方法

把一定量的活性炭加入到含 20 mL ENR 溶液的锥形瓶, 用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 和 NaOH 把溶液的 pH 调整到所需条件. 混合物在恒温振荡箱中振荡, 直到溶液浓度不再变化, 迅速取出溶液进行离心. 溶液中 ENR 的含量通过 UV-755B 紫外可见分光光度计(上海莱伯泰科仪器有限公司)在波长 275 nm 处检测其吸光度, 再通过标准曲线计算出其浓度. 通过下列公式计算其吸附量:

$$q_t = (C_0 - C_t) V / m, \quad (1)$$

式中: C_0 和 C_t 分别是 ENR 溶液的初始浓度和 t 时刻的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 是溶液的体积, L; m 是活性炭的质量, g.

2 结果与讨论

2.1 吸附过程变量的优化

2.1.1 中心设计模型的建立

利用 State-Ease 公司开发的 Design Expert

收稿日期:2017-03-12; 修订日期:2017-09-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21176227); 河南省科技攻关项目(162102210002).

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

Software 软件对实验进行设计,如表 1 所示.

表 1 实验因素水平和范围
Tab. 1 Experimental parameters levels and rang

因素	水平				
	$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
X_1 / min	20	120	220	320	420
$X_2 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$X_3 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	150	200	250	300	350
X_4	1	3.5	6	8.5	11

注: 吸附时间为 X_1 (min); 吸附剂量为 X_2 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); 溶液浓度为 X_3 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); pH 为 X_4 被选作 4 个独立变量, 吸附量 q_e ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 作为响应值, 每个变量有 5 个水平.

2. 1. 2 模型分析

响应面实验设计及其对应条件下的实验响应值如表 2 所示.

表 2 实验设计及其对应的吸附量
Tab. 2 Experimental design and adsorption capacity at different conditions

编号	X_1 / min	$X_2 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$X_3 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	X_4	$q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
1	120.0	0.50	200.00	3.50	318.5
2	320.0	0.50	200.00	3.50	345.7
3	120.0	0.70	200.00	3.50	260.2
4	320.0	0.70	200.00	3.50	278.5
5	120.0	0.50	300.00	3.50	352.0
6	320.0	0.50	300.00	3.50	381.8
7	120.0	0.70	300.00	3.50	334.7
8	320.0	0.70	300.00	3.50	355.5
9	120.0	0.50	200.00	8.50	296.0
10	320.0	0.50	200.00	8.50	337.5
11	120.0	0.70	200.00	8.50	231.3
12	320.0	0.70	200.00	8.50	268.1
13	120.0	0.50	300.00	8.50	357.3
14	320.0	0.50	300.00	8.50	397.6
15	120.0	0.70	300.00	8.50	332.2
16	320.0	0.70	300.00	8.50	348.4
17	20.0	0.60	250.00	6.00	270.7
18	420.0	0.60	250.00	6.00	366.6
19	220.0	0.40	250.00	6.00	391.1
20	220.0	0.80	250.00	6.00	292.9
21	220.0	0.60	150.00	6.00	250.0
22	220.0	0.60	350.00	6.00	424.7
23	220.0	0.60	250.00	1.00	309.8
24	220.0	0.60	250.00	11.00	303.2
25	220.0	0.60	250.00	6.00	348.5
26	220.0	0.60	250.00	6.00	361.0
27	220.0	0.60	250.00	6.00	349.0
28	220.0	0.60	250.00	6.00	346.5
29	220.0	0.60	250.00	6.00	350.0
30	220.0	0.60	250.00	6.00	355.0

恩诺沙星吸附的最终回归函数以编码形式表示如下:

$$Y = 351.68 + 17.61X_1 - 23.91X_2 + 36.38X_3 - 2.99X_4 - 2.92X_1X_2 - 1.05X_1X_3 + 2.43X_1X_4 + 8.86X_2X_3 - 2.45X_2X_4 + 5.09X_3X_4 - 8.49X_1^2 - 2.66X_2^2 - 3.82X_3^2 - 11.53X_4^2. \quad (2)$$

决定系数 R^2 常常用来判断模型与实验的拟合度. R^2 为 0.977, 表明模型适合该吸附实验; 校正相关系数为 0.955, 表明 95.5% 的实验结果都可以用该模型解释. 由回归函数可以得出吸附过程的较优工艺条件为: 吸附时间 355.3 min, 吸附剂量 $0.40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, ENR 浓度 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 7.69, 预测得到的最大吸附量是 $429.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 为了验证预测结果的精确性, 在该较优条件下进行了 3 组平行实验, 最终得到的吸附量平均值为 $434.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 结果表明, 该模型可以准确地用于 ENR 吸附实验的预测.

ENR 吸附实验的方差分析如表 3 所示, P 值和 F 值作为判断参数显著性的指标, P 值小于 0.05 时, 表明参数对吸附量的影响显著. 该模型 P 值小于 0.000 1, 表示模型的拟合结果非常显著, 而失拟项 “Lack of Fit” 的 P 值为 $0.0563 > 0.05$, 表示失拟项不显著. 从显著性方面分析, 4 个吸附过程的变量中, 吸附时间、吸附剂量和初始浓度对吸附量的影响很大, 而 pH 值对吸附量的影响相对较小; 从交互作用来说, 吸附剂量和初始浓度的交互作用最明显.

2. 1. 3 3D 图形分析

各变量的三维响应面曲线图如图 1 所示, 从图中可以看出吸附过程变量对吸附量的影响以及变量之间的交互作用. 图 1(a)、(b)、(c) 可以看出, 恩诺沙星的吸附量随着时间先增加, 然后有少量的减少, 这种现象可能是由于随着吸附达到平衡, 又发生了解吸作用. 从图 1(a)、(d)、(e) 可以看出, 随着吸附剂量的增加吸附量逐渐减小. 从图 1(b)、(d)、(f) 看出, 溶液初始浓度的增加有利于吸附过程的发生. 从图 1(c)、(e)、(f) 可以看出, 溶液 pH 值对吸附量的影响, 随 pH 值增加, 吸附量先增加后减小.

2. 2 吸附等温线模型

在固-液吸附系统中, 等温线模型是描述吸附现象的重要模型^[8]. 本实验选取初始浓度为 $100 \sim 380 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 7 的恩诺沙星溶液, 并加入 $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的活性炭, 振荡 6 h 至反应达到平衡, 考察温度和浓度对吸附过程的影响. 选取了

表 3 模型的方差分析

Tab. 3 Analysis of variance for selected factorial model for adsorption capacity

方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值	状态
模型	60 160. 83	14	4 297. 20	44. 90	<0. 000 1	significant
X_1	7 440. 41	1	7 440. 41	77. 73	<0. 000 1	
X_2	13 723. 68	1	13 723. 68	143. 38	<0. 000 1	
X_3	31 763. 40	1	31 763. 40	331. 85	<0. 000 1	
X_4	213. 98	1	213. 98	2. 24	0. 155 6	
X_1X_2	135. 96	1	135. 96	1. 42	0. 251 8	
X_1X_3	17. 56	1	17. 56	0. 18	0. 674 5	
X_1X_4	94. 85	1	94. 85	0. 99	0. 335 3	
X_2X_3	1 255. 59	1	1 255. 59	13. 12	0. 002 5	
X_2X_4	96. 35	1	96. 35	1. 01	0. 331 6	
X_3X_4	415. 14	1	415. 14	4. 34	0. 054 8	
X_1^2	1 974. 87	1	1 974. 87	20. 63	0. 000 4	
X_2^2	193. 76	1	193. 76	2. 02	0. 175 3	
X_3^2	401. 05	1	401. 05	4. 19	0. 058 6	
X_4^2	3 644. 73	1	3 644. 73	38. 08	<0. 000 1	
残差	1 435. 75	15	95. 72	—	—	—
失拟项	1 290. 98	10	129. 10	4. 46	0. 056 3	not significant
总离差	61 596. 58	29	—	—	—	—

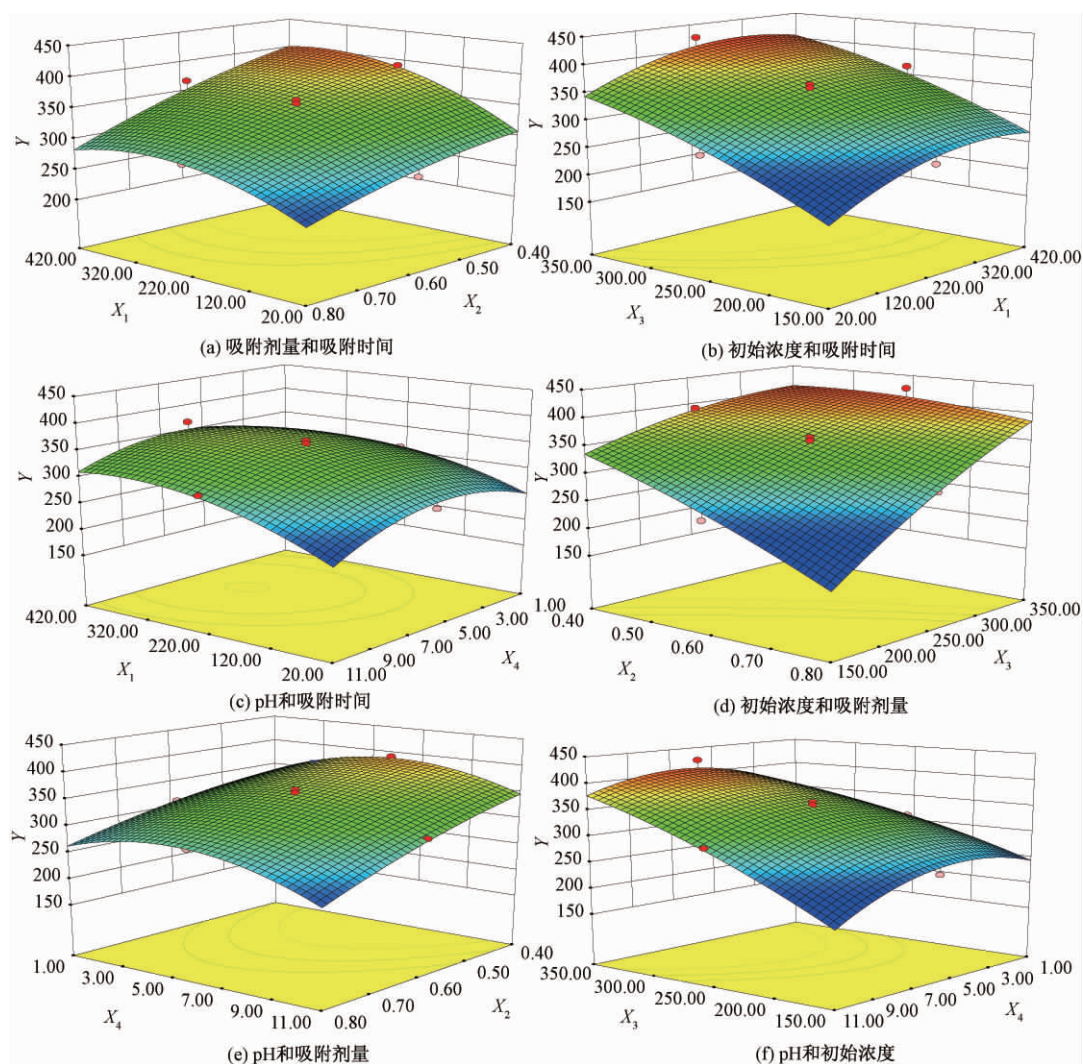


图 1 吸附变量的交互作用立体图

Fig. 1 3D Surface model graphs of adsorption capacity versus

3 种等温线模型: Langmuir(式 3)、Freundlich(式 4) 和 Koble-Corrigan(K-C) (式 5) 模型,研究恩诺沙星的吸附过程. 上述 3 种模型在不同温度条件下的非线性拟合曲线如图 2 所示.

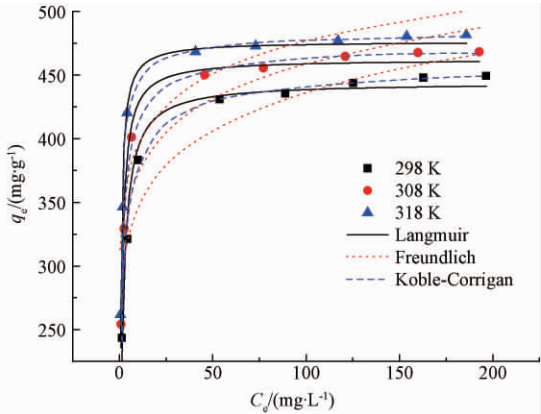


图 2 平衡吸附等温线模型 (Langmuir, Freundlich, Koble-Corrigan)

Fig. 2 Equilibrium adsorption isotherms
(Langmuir, Freundlich, Koble-Corrigan)

Langmuir:
$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}; \tag{3}$$

Freundlich:
$$q_e = K_F C_e^{1/n}; \tag{4}$$

K-C:
$$q_e = \frac{A C_e^M}{1 + B C_e^M}, \tag{5}$$

式中: C_e 是吸附平衡时溶液浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; q_e 是平衡吸附量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; q_m 是最大的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; K_L 是与吸附能量有关的 Langmuir 常数, $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$; K_F 是描述系统相对吸附量的 Freundlich 常数; A 、 B 和 M 是 K-C 模型常数.

在 298、308 和 318 K 3 个温度条件下,用非线性回归分析法得到不同模型下的拟和参数分析如表 4 所示,Langmuir 模型中,相关系数 R^2 均大于 0.97,而且 q_m 和 K_L 随着温度增加而增大,呈现一定的规律,因此该模型可以很好地描述恩诺沙星吸附;K-C 模型中,相关系数 R^2 值最大,且 A 、 B 和 M 模型常数随温度增加有规律的变化,因此,该模型也能很好地描述恩诺沙星吸附. 由于 Freundlich 模型的相关系数较低,所以不能用来

描述该吸附过程.

2.3 不同 pH 条件下的吸附机理

由于恩诺沙星的离解常数 $pK_{a1} = 6.1$, $pK_{a2} = 7.7$,所以在其水溶液中,恩诺沙星有 3 种离子形态存在. 当溶液 pH 值小于 pK_{a1} 时,溶液中恩诺沙星主要以阳离子的形式 ENR^+ 存在,这主要是由于恩诺沙星分子上的哌嗪基得到一个质子之后整个离子带正电荷. 此时,恩诺沙星与活性炭之间主要靠 ENR^+ 上的仲胺基和活性炭表面羟基官能团的阳离子交换连接在一起. 溶液 pH 值大于 pK_{a2} 时,恩诺沙星分子上的羧基官能团失去一个质子,从而使恩诺沙星在溶液中大部分以阴离子形式 ENR^- 存在. 此时,恩诺沙星与活性炭之间主要靠 ENR^- 上去质子化的羧基官能团和活性炭表面的羟基或羧基之间的氢键连接在一起. 除此之外,表面络合等也对吸附有一定的作用. 当溶液 pH 值在 pK_{a1} 和 pK_{a2} 之间时,由于上述两种情况均存在,最终恩诺沙星离子显示电中性 ENR^0 . 此时,吸附的机理与恩诺沙星在阳离子形式时的机理相同.

经过测定,实验所使用的活性炭等电点在 7.5 ~ 8.0. 当 pH 值小于 pK_{a1} 时,活性炭表面带正电荷,与 ENR^+ 有较强的静电排斥,严重影响吸附反应的发生;随着溶液 pH 值的增加,恩诺沙星离子的 ENR^+ 形式逐渐变为 ENR^0 形式,静电排斥减弱;当 pH 值增加到大于 pK_{a2} 时,活性炭表面带负电荷,与 ENR^- 又存在较强的静电排斥,吸附反应又受到影响.

3 结论

利用响应面分析方法中的 CCD 模型对脱硅稻壳基活性炭吸附恩诺沙星的吸附过程变量进行优化,得到较优的吸附变量为: 吸附时间 355.3 min, 吸附剂量 $0.40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, ENR 浓度 $350.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 7.69, 预测的最佳吸附量为 $429.4\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 实验结果与预测结果误差在 2% 以内. 分析了恩诺沙星在不同 pH 条件下的吸附机理. 利用吸附等温线模型对吸附过程进行分析,

表 4 恩诺沙星吸附的等温线参数
Tab. 4 Isotherm parameters for ENR adsorption

T/K	Langmuir 模型			Freundlich 模型			K-C 模型			
	$q_m / (\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	R^2	$K_F / (\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{mg}^{1/n})^{-1}))$	$1/n$	R^2	A_K	$B_K / (\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	M	R^2
298	444.2	0.770	0.973	274.1	0.101	0.887	412.5	0.895	0.696	0.996
308	462.5	1.210	0.974	301.4	0.091	0.874	595.9	1.251	0.708	0.995
318	476.2	1.960	0.973	328.9	0.080	0.833	883.7	1.820	0.752	0.989

Langmuir 和 Koble-Corrigan 模型可以很好地描述吸附过程。

参考文献:

- [1] 刘博,薛南冬,张石磊,等. 热处理技术去除鸡粪中氟喹诺酮类抗生素及影响因素研究[J]. 环境工程,2015(2): 84-87+68.
- [2] 朱琳,张远,渠晓东,等. 北京清河水体及水生生物体内抗生素污染特征[J]. 环境科学研究, 2014(2): 139-146.
- [3] 郑佳伦,刘超翔,刘琳,等. 畜禽养殖业主要废弃物处理工艺消除抗生素研究进展[J]. 环境化学, 2017(1): 37-47.
- [4] ZHOU Qing, LI Zheqin, SHUANG Chendong, et al. Efficient removal of tetracycline by reusable magnetic microspheres with a high surface area[J]. Chemical engineering journal, 2012, 210: 350-356.
- [5] MEHRJOUEI M, MULLER S, MOLLER D. Energy consumption of three different advanced oxidation methods for water treatment: a cost-effectiveness study[J]. Journal of cleaner production, 2014, 65: 178-183.
- [6] GENC N, DOGAN E C, YURTSEVER M. Bentonite for ciprofloxacin removal from aqueous solution[J]. Water science and technology, 2013, 68: 848-855.
- [7] FERNANDEZ A M L, RENDUELES M, DIAZ M. Competitive retention of sulfamethoxazole (SMX) and sulfamethazine (SMZ) from synthetic solutions in a strong anionic ion exchange resin[J]. Solvent extraction and ion exchange, 2014, 32: 763-781.
- [8] 韩秀丽,宋阿娟,白净,等. 改性荷叶对 1,4-苯二酚吸附性能的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(3): 25-29.

Response Surface Methodology for Optimization of Enrofloxacin Adsorption by Using Activated Carbon Derived from the Residue of Desilicated Rice Husk

ZHANG Binpeng¹, HAN Xiuli^{1,2}, FANG Shuqi^{1,2}, CHANG Chun^{1,2}

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

Abstract: Activated carbon (AC) prepared from residue of desilicated rice husk (DRH) was investigated for the removal of antibiotic enrofloxacin (ENR) from aqueous solution. The operating variables including contact time, adsorbent dosage, ENR concentration and solution pH were optimized using central composite design (CCD) under response surface methodology (RSM) approach. The better conditions for ENR adsorption were found out to be 355.3 min contact time, 0.40 g·L⁻¹ adsorbent dosage, 350.0 mg·L⁻¹ ENR concentration, pH 7.69 with predicted adsorption uptake of 429.4 mg·g⁻¹. The experimental equilibrium data agreed well with the Langmuir adsorption model and Koble-Corrigan adsorption model. The maximum monolayer adsorption capacity of AC was found to be 444.2 mg·g⁻¹ at 298K. This study indicated that AC based on DRH was a promising candidate because of the lower cost and larger adsorption capacity for the removal of ENR from aqueous solution.

Key words: enrofloxacin; active carbon; response surface methodology; adsorption mechanism; rice husk

文章编号:1671-6833(2018)06-0069-05

高温吸附热泵中传质通道强化蒸汽生成的实验研究

刘周明¹, 盛遵荣¹, 叶松¹, 姚志敏¹, 薛冰¹, 魏新利^{1,2}

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

摘 要: 为了强化直接接触换热法高温吸附热泵生成过热蒸汽的效率, 在反应器内分别设置了通道直径为反应器内径的 10% 和 20% 的传质通道. 实验结果表明: 与未加通道的实验结果作对比, 加装 10% 内径的通道后, 出口蒸汽温度的最高温度提高 23 °C, 达 236 °C, 蒸汽的生成量增加 26%, 蒸汽与沸石质量比的平均值增大 14%, 蒸汽生成的时间增加 1.8%; 加装 20% 内径的通道后, 出口蒸汽温度的最高温度提高 11 °C, 达 202 °C, 蒸汽的生成量增加 5.6%, 蒸汽与沸石质量比的平均值几乎不变, 蒸汽生成的时间增加 25.3%, 即大尺寸通道的蒸汽生成速率较快, 小尺寸通道的蒸汽生成温度和质量较高.

关键词: 传质通道; 吸附热泵; 非平衡吸附; 过热蒸汽; 生成速率

中图分类号: TK11⁺5

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.027

0 引言

诸多工业过程产生了大量废水和废气. 高温废水废气可以利用换热器及热管技术回收利用, 而低品位余热却很难回收. 热泵技术作为回收利用低品位能源的一种技术, 在制冷方面的研究较为广泛^[1-3]. 相比之下, 吸附热泵用于热泵方向特别是制高温蒸汽的研究相对缺乏^[4-6]. 吸附热泵制取高温蒸汽, 相对于吸收热泵和蒸汽压缩热泵制高温蒸汽有温升高和工质对环境危害小的优点^[7]. 13X 沸石-水工质对具有吸附热高、蒸发潜热较大、高温下热稳定性强的优点. Oktariani 等^[8]利用以上工质对直接控制生成蒸汽系统作了理论和实验分析. Xue 等^[9-10]在数值模拟的基础上, 对高温吸附热泵产生蒸汽的传递现象进行了分析, 发现利用 80 °C 热水与沸石直接接触可以生成高于 150 °C 的高温蒸汽, 证实了利用低温水获得中高温蒸汽的可行性, 为连续制取蒸汽奠定了理论基础. 设计传质通道在强化吸附制冷效率中有一些研究^[11-12], 但是对于从结构上如何强化高温吸附热泵中蒸汽的生成速率尚无实验研究.

在沸石吸附床层加装不同尺寸的传质通道, 研究其对强化蒸汽生成过程的影响. 考察沸石温

度, 蒸汽出口处温度和生成速率的变化特性, 结合平衡吸附和非平衡吸附理论进行分析, 探索合理的传质通道尺寸, 为优化反应器结构提供参考.

1 实验介绍

1.1 实验材料与装置

采用 13X 沸石为吸附剂, 因其吸附性能优良, 且与水接触无明显体积变化. 沸石平均直径为 2.2 mm. 反应器为自主设计, 材料为 304 不锈钢. 下部封头为标准椭圆封头, 与反应器焊接连接. 上封头为圆形平板封头, 采用快拆不锈钢卡箍与反应器连接. 反应器内径为 80 mm, 高为 115 mm, 壁厚为 4 mm, 进水口由 3 个 DN8 接管组成. 传质通道由孔径 $\varphi = 0.613$ mm 的不锈钢网自主弯折而成, 其厚度忽略不计. 所有管路均进行绝热处理, 反应器外壁分别用厚度为 30 mm 的硅酸铝纤维和 20 mm 的聚苯乙烯保温棉保温.

实验装置如图 1 所示, 采用 K 型热电偶测温度, 电子天平测冷凝后的蒸汽质量, GL220 便携式记录仪记录数据. 反应器内热电偶分布如图 2 所示, $T_{1/3b}$ 、 $T_{2/3b}$ 分别为轴向 1/3、2/3 处侧边沸石温度; $T_{1/3c}$ 、 $T_{2/3c}$ 、 T_{top} 分别为轴向 1/3、2/3 处、顶部中心蒸汽温度.

收稿日期:2017-05-06; 修订日期:2017-08-20

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

通信作者:薛冰(1982—), 男, 河南郑州人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事吸附热泵研究, E-mail: xuebing@zzu.edu.cn.

1.2 实验过程

制作高为 110 mm 的传质通道,直径 D 分别为 8 mm (反应器内径的 10%)、16 mm (反应器内径的 20%),分别占填充层体积的 1%、4%。无传质通道时可装填沸石 360 g,设置传质通道时,去除相应通道中的沸石。每次实验前称取相应质量沸石,放入加热炉预热,预热至 80 °C。

实验时首先标定恒温水槽液位,然后将预热好的沸石置入反应器内。反应器密封完毕后,打开进水管路,进水流量设为 2.2 L/h,开启数据记录仪开始采集各测温点数据,并打开冷凝器。待有蒸汽溢出时,每 15 s 读取一次蒸汽质量。当顶部测温点温度降低到水的沸点温度以下时关闭进水管路。记录最终蒸汽产量,排出反应器内的自由水。随后取出湿沸石并称重记录。最后标定恒温水槽最终液位以确定此次反应的总用水量。

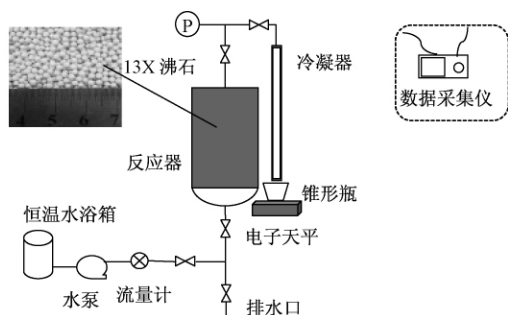


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

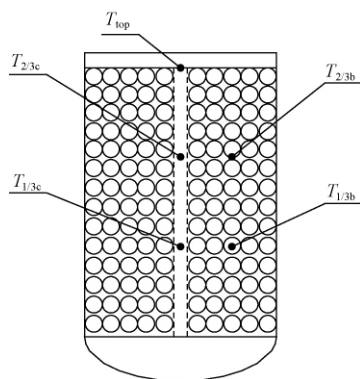


图2 反应器内测温点分布图

Fig.2 Thermocouple distributions inside of packed bed

2 实验系统性能评估

2.1 实验评价参数

实验中反应器内部连通大气,产生常压蒸汽。实验测量蒸汽质量 $m_{s,out}$; 蒸汽最高温度 T_{max} ; 系统温升 ΔT ; 评估参数需考虑蒸汽与沸石质量比 $m_{s,out}/m_z$; 蒸汽生成时间与进水时间比 t_g/t_i 。

2.2 质量守恒

蒸汽生成实验过程中,进出反应器的水遵守质量守恒。进入反应器的水一部分转化为蒸汽;一部分被沸石吸附;一部分以自由水的形式存在。

$$m_{w,in} = m_{s,out} + m_{ads} + m_{acc}; \quad (1)$$

$$m_{w,in} = \rho \frac{\pi d^2}{4} (h_1 - h_2), \quad (2)$$

式中: $m_{w,in}$ 为进入反应器内水的质量, kg; m_{ads} 为沸石吸附水质量, kg; m_{acc} 为自由水质量, kg。 $m_{ads} + m_{acc}$ 为自由水与实验前后沸石质量增量之和, kg。

2.3 能量平衡

蒸汽生成过程遵守能量守恒,进水所含热量 $Q_{w,in}$ 与吸附热 Q_{ads} 之和,等于蒸汽所含热量 $Q_{s,out}$ 与反应器内物料累积的热量 Q_{acc} 之和,

$$Q_{w,in} + Q_{ads} = Q_{s,out} + Q_{acc}. \quad (3)$$

$$Q_{w,in} = C_{p,w} m_{w,in} (T_{w,in} - T_{ref}), \quad (4)$$

式中: $C_{p,w}$ 为水的比定压容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $T_{w,in}$ 为进水温度, °C; T_{ref} 为进水温度参考值, °C。

$$Q_{ads} = m_z (x_{eq} - x_{ini}) \Delta H_{ads}; \quad (5)$$

$$Q_{s,out} = m_{s,out} [C_{p,w} (T_{b,p} - T_{ref}) + \gamma + C_{p,s} (T_s - T_{b,p})], \quad (6)$$

式中: m_z 为沸石质量, kg; x_{eq} 为沸石平衡吸水量, (千克-水)/(千克沸石); x_{ini} 为沸石初始含水量, (千克-水)/(千克沸石); ΔH_{ads} 为沸石吸附热, J; $T_{b,p}$ 为水的沸点, °C; γ 为水的汽化潜热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{p,s}$ 为蒸汽的比定压容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_s 为蒸汽温度, °C。

$$Q_{acc} = m_z C_{p,z} (T_{z,fin} - T_{z,ini}) + m_r C_{p,r} (T_{r,fin} - T_{r,ini}) + (m_{ads} + m_{acc}) C_{p,w} (T_{w,fin} - T_{ref}), \quad (7)$$

式中, $C_{p,z}$ 为沸石的比定压容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $T_{z,fin}$ 为沸石的最终温度, °C; $T_{z,ini}$ 为沸石的初始温度, °C; m_r 为反应器的质量, kg; $C_{p,r}$ 为反应器的比定压容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $T_{r,fin}$ 为反应器的最终温度, °C; $T_{r,ini}$ 为反应器的初始温度, °C; $T_{w,fin}$ 为水的最终温度, °C。

3 实验结果与分析

分别加装两个尺寸的传质通道,对反应床层温度和蒸汽温度随时间的变化进行分析,揭示此过程中传质通道对蒸汽生成的影响。

3.1 沸石温度、蒸汽温度和质量变化特性

图3所示为未加装传质通道时反应器内沸石温度、蒸汽温度和蒸汽质量随时间的变化。热水从底部通入沸石填充层,1/3处出现温度快速增加

的情况,表明蒸汽到达此处. 1/3 处径向温差较小,表明测温点以下传质均匀. 1/3 处的最高温度呈尖状,最高约 216 °C,说明此处保持在峰值时间较短,因为液面离此处较近. 当液面到达 1/3 处,温度迅速降低到水的沸点 100 °C. 径向两个位置均在同一时间降到水的沸点,表明液面在此处较为水平. 2/3 处经历了相似的温度变化趋势,但最高温度比 1/3 处高 30 °C,并且保持时间较长. 温度较高是因为此处沸石吸附蒸汽释放了更多吸附热;温度较长时间保持在峰值表明蒸汽已到达此处,而液面相对较远. 2/3 处径向温差达 30 °C,主要是测温点下部传质不均匀性叠加造成的. 径向两个点温度降低到沸点有 15 s 的时间差,这主要是由水液面不平造成的,因此增加填充层高度时需要适当考虑添加空隙层以保证上升的液面在同一水平线上. 在总进水时间一半的时候,出口处温度开始快速提升,达到峰值 213 °C 时,蒸汽的质量开始线性增加,直至液面到达床层顶部,温度降低到水的沸点,蒸汽生成实验结束.

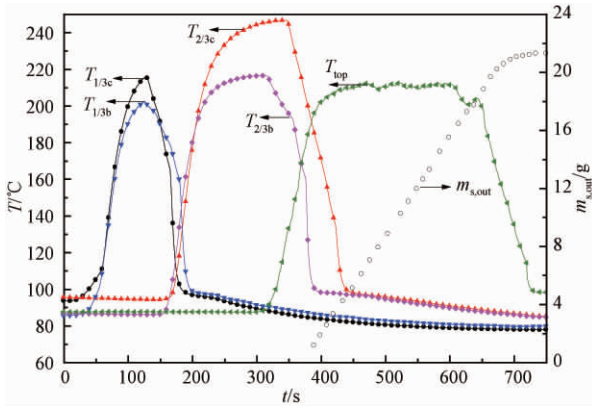


图3 无传质通道时温度及蒸汽质量随时间变化图

Fig.3 Temperatures and steam quality variation chart without mass transfer channel

图4为加装8 mm传质通道时反应器内沸石温度、出口处蒸汽温度和质量随时间的变化. 以图3为基准有以下变化: 1/3处径向温差几乎为零,说明通道使得蒸汽从两侧溢出; 2/3处径向温差为-10 °C,主要是通道内存在大量测温点下部产生的蒸汽. 通道内两测温点温升均比对应高度处的沸石温升提前,原因是通道降低了传质阻力.

图5所示为加装16 mm传质通道时反应器内沸石温度、出口处蒸汽温度和质量随时间的变化. 同样以图3为基准,有以下变化: 1/3处径向温差变为-10 °C,主要是初始蒸汽温度较低; 2/3处径向温差几乎为零,表明通道增大了通道内蒸汽与沸石间的换热面积.

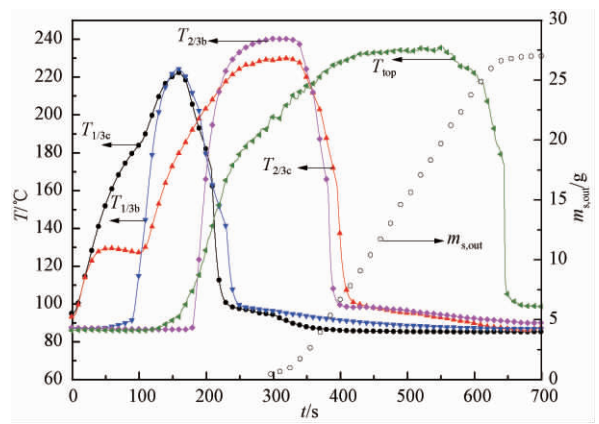


图4 10%传质通道时温度及蒸汽质量随时间变化图

Fig.4 Temperatures and steam quality variation chart with mass transfer channel at 10% of inner diameter

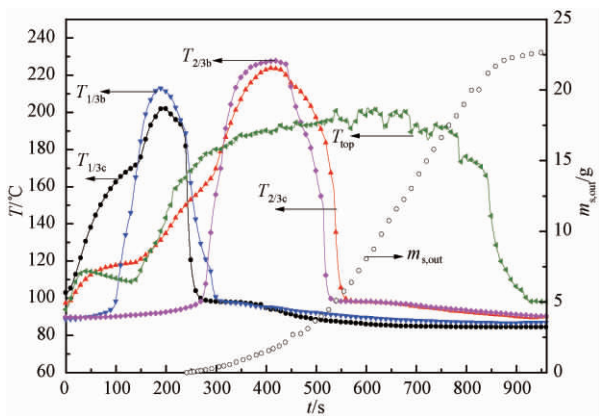


图5 20%传质通道时温度及蒸汽质量随时间变化图

Fig.5 Temperatures and steam quality variation chart with mass transfer channel at 20% of inner diameter

3.2 蒸汽最高温度及蒸汽与沸石质量比

表1为无通道、加装8 mm通道和16 mm通道时,每个条件3组实验所测蒸汽温度峰值 T_{ave} 和蒸汽与沸石质量比 $m_{s,out}/m_z$ 的平均值. 与无通道实验结果相比,8 mm通道的 T_{ave} 比其高出11%,表明该通道有效促进局部非平衡吸附特性. 而16 mm通道的 T_{ave} 与其相差无几,说明此通道对非平衡吸附特性的影响被对蒸汽-沸石间换热的影响削弱了. 对比 $m_{s,out}/m_z$ 平均值,发现8 mm通道、16 mm通道分别比无通道时高出14%、8%,说明通道促进平衡吸附进程,但是通道过大会导致沸石量减少,吸附热不足以使更多水变成蒸汽,从而对该值影响较小.

表1 不同通道直径下蒸汽温度及质量比的平均值

Tab.1 The average value of steam temperature and mass ratio under different channel diameters

D/mm	$T_{ave}/^{\circ}\text{C}$	$m_{s,out}/m_z$
0	212	0.064 4
8	235	0.073 5
16	212	0.069 7

3.3 蒸汽生成时间分析

由图 3~5 可知,3 组实验中蒸汽均产生于进水 200 s 以后.为反映通道对蒸汽生成时间的影响,考察蒸汽生成时间 t_g 与总时间 t_t 的比值.以蒸汽质量 20 g 时刻为基准,无通道、8 mm 通道、16 mm 通道对应的 t_g/t_t 分别为 0.447, 0.465, 0.700.

可以发现,相同蒸汽产量情况下, t_g/t_t 随通道直径呈正增长趋势;同时,将时间无量纲化,考察蒸汽质量随无量纲时间的变化,如图 6 所示,其中 $t_{w,feed}$ 为进水时间.图 6 中 8 mm、16 mm 通道下第一拐点均比无通道下第一拐点提前.以上两点同时说明通道增大了蒸汽溢出面积,降低了传质阻力,增加了蒸汽溢出的时间长度,其意义在于可以应用于对蒸汽时长要求较高的场合.

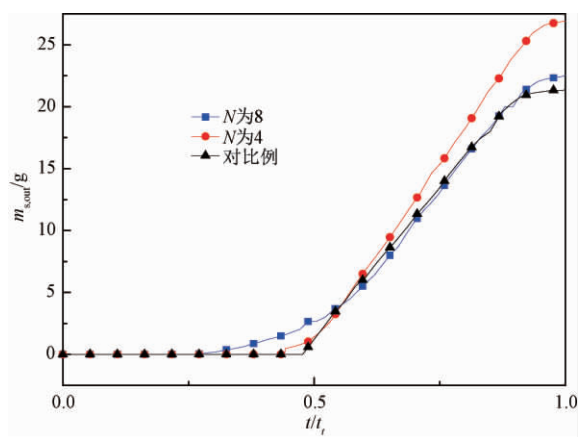


图 6 不同传质通道下蒸汽质量随无量纲时间变化图

Fig. 6 The mass change of steam quality in different mass transfer channels with dimensionless time

3.4 误差分析

用高斯误差函数计算实验结果的不确定度,若某个变量的计算式为 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 则其间接法测量的标准误差 E 的计算式如下:

$$E(y) = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} e_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} e_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} e_n\right)^2}, \quad (8)$$

式中: e_n 代表 x_n 的直接测量标准误差.

根据上式可得,进水误差 E 为:

$$E(m_{w,in}) = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{h_1 - h_2}\right)^2}. \quad (9)$$

假设水的密度在整个蒸汽生成过程中为定值,恒温水槽直径及液位变化的误差均为 1 mm, 则 $E(m_{w,in})$ 最大误差范围为 $\pm 2.04\%$. ($m_{ads} + m_{acc}$) 由天平直接称量得到,不确定度为 ± 0.01 g.

蒸汽质量误差的定义为:

$$E_s = \frac{m_{s,cal} - m_{s,out}}{m_{s,cal}} \times 100\%, \quad (10)$$

式中: $E_{s,err}$ 为蒸汽质量衡算误差; $m_{s,cal}$ 为理论蒸汽质量.

3 组实验蒸汽质量及误差如表 2 所示,产生误差的主要原因为:部分蒸汽在反应器顶部及冷凝器的管道壁上凝结;冷凝器冷凝效果欠佳,造成部分蒸汽未能冷凝.

表 2 3 组实验中蒸汽质量及误差

Tab. 2 Steam quality and error in the three groups of experiment

D/mm	$m_{s,cal}/\text{kg}$	$m_{s,out}/\text{kg}$	$E_s/\%$
0	24.32	21.45	11.80
8	29.59	27.06	8.55
16	24.42	22.65	7.25

本实验所用 K 型热电偶的测量精度为 1.5°C , 则蒸汽最高温度和系统温升的不确定度分别为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 3^\circ\text{C}$.

4 结论

在直接接触式换热器生成高温蒸汽的研究基础上,通过对比不同传质通道尺寸下的实验结果,得出以下结论:

(1) 传质通道引起轴向同一高度处的径向温度变化,通道内温升较沸石内温升显著提前,说明通道是主要的传质区.

(2) 两种直径传质通道均使得蒸汽生成质量与所用沸石质量的比值增大,但小通道更为明显.小通道同时提升了蒸汽最高温度,明显改善了蒸汽最终性能.

(3) 相同蒸汽产量下,蒸汽生成时间与进水时间的比值随通道增大而增大.通道延长了蒸汽溢出时间.

参考文献:

- [1] SAHA B B, EI-SHARKAWAY I I, SHAHZAD M W, et al. Fundamental and application aspects of adsorption cooling and desalination [J]. Applied thermal engineering, 2016, 97: 68–76.
- [2] ASKALANY A A, SAHA B B. Derivation of isosteric heat of adsorption for non-ideal gases [J]. International journal of heat & mass transfer, 2015, 89: 186–192.
- [3] 吴静怡, 王如竹. 连续回热型吸附式热泵的动态仿

- 真与实验[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(1): 1-4.
- [4] DE LANGE M F, VAN VELZEN B L, OTTEVANGER C P, et al. Metal-Organic frameworks in adsorption-driven heat pumps: The potential of alcohols as working fluids[J]. *Langmuir the ACS journal of surfaces & colloids*, 2015, 31(46): 12783-12796.
- [5] 张仙平, 杨磊, 魏新利, 等. R744 混合自然工质热泵系统特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(5): 44-48.
- [6] MUTHUKUMAR P, SATHEESH A. Analysis of crossed van't Hoff metal hydride based heat pump[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2013, 38(26): 11415-11420.
- [7] 沈志强, 牟锐, 李元志, 等. 人工湿地生物沸石快速吸附-再生性能与再生机理研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1242-1247.
- [8] OKTARIANI E, TAHARA K, NAKASHIMA K, et al. Experimental investigation on the adsorption process for steam generation using a zeolite-water system[J]. *Journal of chemical engineering of Japan*, 2012, 45(5): 355-362.
- [9] OKTARIANI E, NODA A, NAKASHIMA K, et al. Potential of a direct contact adsorption heat pump system for generating steam from waste water[J]. *International journal of energy research*, 2012, 36(11): 1077-1087.
- [10] XUE B, IWAMA Y, TANAKA Y, et al. Cyclic steam generation from a novel zeolite-water adsorption heat pump using low-grade waste heat[J]. *Experimental thermal & fluid science*, 2013, 46(46): 54-63.
- [11] 姚志敏, 薛冰, 盛遵荣, 等. 开式高温吸附热泵生成蒸汽系统的耐久性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(4): 791-799.
- [12] 王如竹, 王丽伟, 吴静怡. 吸附式制冷与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 79-80.

Experimental Study on the Enhancement of Steam Generation by Utilizing Mass Transfer Passage in a High-temperature Adsorption Heat Pump

LIU Zhouming¹, SHENG Zunrong¹, YE Song¹, YAO Zhimin¹, XUE Bing¹, WEI Xinli^{1,2}

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

Abstract: Mass transfer passage was used inside the packed bed of zeolite to enhance steam generation efficiency in a novel adsorption heat pump by utilizing a direct-contact heat exchange method. Ratios of the passage to inner diameter of the packed bed were 10% and 20%. Experimental results from 10% passage showed that the maximum generated steam temperature reached 236 °C, which increased by 23 °C compared to that without passage. Meanwhile the mass of steam increased by 26%, mass ratio of steam to dry zeolite ($m_{s,out}/m_z$) increased by 14%, and steam generation time increased by 1.8%. Experimental results from 20% passage showed that the maximum steam temperature only increased by 11 °C; steam mass increased by 5.6%, $m_{s,out}/m_z$ was almost unchanged; steam generation time increased by 25.3%. Superheated steam generation rate was faster for large passage, while the maximum temperature and mass of generated steam were higher for small passage.

Key words: mass transfer passage; adsorption heat pump; non-equilibrium adsorption; superheated steam; steam generation efficiency

折流板安装角对扇叶型折流板换热器性能影响

谭国锋^{1,2}, 王珂^{1,2}, 王永庆², 王丹²

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要: 利用 CFD 分析软件 Fluent 分别建立了安装角度为 30° 、 45° 、 60° 3 种扇叶型折流板换热器周期性模型, 对不同的流态进行数值模拟计算, 研究了折流板安装角对扇叶型折流板换热器性能的影响. 结果显示: 壳程流体在折流板引导下呈斜向流动, 斜向流动能够有效抑制流体诱导振动; 筒体附近流体流速较高, 中心区域流速较低; 不同流态下, 随着安装角增大, 换热器壳程压降降低, 综合性能增高. 安装角 30° 时换热器传热系数大于另外两者.

关键词: 扇叶型折流板; 换热器; 斜向流动; 流体诱导振动; 传热性能

中图分类号: TQ051.5; TH49

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.011

0 引言

换热器作为热量交换的重要设备在化工、能源等工业领域占有重要地位, 厂家投入大量成本来保障换热器的正常高效的运行^[1-3]. 在换热器运行过程中, 壳程流体冲刷管束会产生流体诱导振动, 换热管与邻近管子、折流板之间相互碰撞摩擦, 最终导致换热管破损失效^[4,5]. 据不完全统计, 流体诱导振动导致的换热器损坏数约占换热器损坏总数的 30%, 说明流体诱导振动是换热器损坏的重要原因^[6]. 笔者提出的扇叶型折流板换热器采用倾斜的扇形折流板来取代传统的弓形折流板, 使壳程流体沿斜向流动, 在壳程雷诺数相同的情况下降低了流体横向速度分量, 提高了换热器的抗振性能. 图 1 为扇叶型折流板换热器结构简图, 每组折流板由六片倾斜安装的类型折流板沿轴线周向排布而成, 各组折流板沿壳体轴向平行排布. 其中, 折流板与壳体横截面之间所夹锐角称为安装角.

笔者利用 Fluent 数值模拟的方法, 对比研究了安装角不同的扇叶型折流板在不同流态下的流动及传热性能, 文中使用的方法和得出的结论可以为相关工作者提供理论依据.

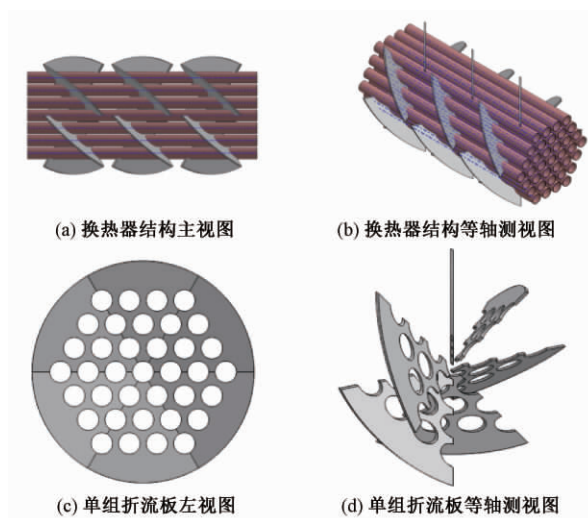


图 1 扇叶型折流板换热器结构简图

Fig.1 Structure diagram of blade baffle heat exchanger

1 周期性模型的建立

通过图 1 可以看出: 换热器壳程结构有较强的对称性和周期性, 因此利用 Flunet 建立周期性模型进行模拟计算^[7], 计算区域模型如图 2 所示, 结构参数见表 1.

图 2 所示为安装角 45° 时周期性模型, 模型长度为 150 mm. 为对比研究, 另建立了安装角 30° 和安装角 60° 的模型, 模型长度分别为 90 mm、260 mm.

收稿日期:2017-11-12; 修订日期:2017-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51476147,51376163); 河南省高等学校重点科研项目(18A470005)

通信作者:王珂(1970—), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事换热器结构完整性及强化传热研究,
Email: kewang@zzu.edu.cn.

表1 换热器主要结构参数表

Tab.1 Main structural parameters of heat exchanger

筒体内径/mm	换热管型号	换热管中心距/mm	换热管数量	布管方式	折流板厚度/mm	安装角/°
258	$\Phi 25 \times 2$	32	37	三角形排布	3	30/45/60

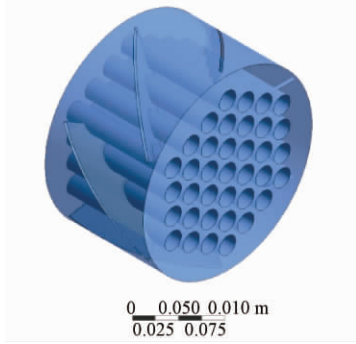


图2 安装角45°时换热器周期性模型

Fig.2 Periodic model of heat exchanger with 45° installation angle

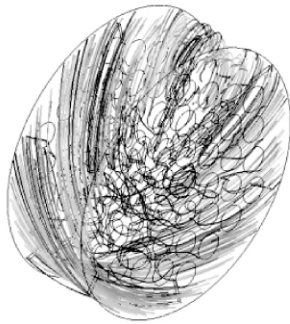
2 边界条件及求解设置

换热器壳侧流体为液态水,计算中忽略重力及壳体外壁对外散热,壳程进口采用速度进口,出口采用压力出口。进口流体温度设置为293.15 K,管壁温度设置为343.15 K 恒壁温。压力速度耦合采用 SIMPLE 算法;动量、能量、湍动能和湍流耗散率离散采用二阶迎风格式。湍流模型采用 Realizablek- ϵ 模型,该模型对于计算反压梯度、回流、旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流等具有较好的预测效果。其湍流运动黏度 ν_t 、湍动能 k 和湍能耗散率 ϵ 的关系式如下:

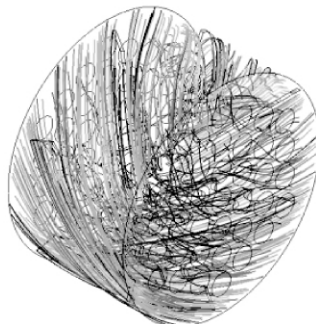
$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \Gamma - \epsilon; \quad (2)$$

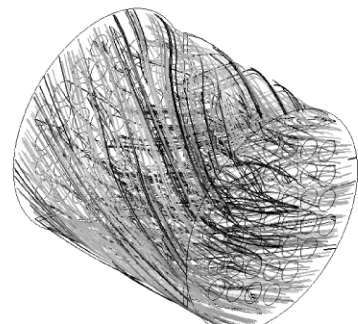
$$\frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \Gamma \epsilon - C_2 \frac{k^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (3)$$



(a) 安装角30°流线图



(b) 安装角45°流线图



(c) 安装角60°流线图

图3 不同安装角 $Re = 100\ 00$ 周期性模型流线图Fig.3 The streamlines of periodic model with different installation angle under $Re = 100\ 00$

$$\Gamma = -u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad (4)$$

式中: ν_t 为运动黏度, m^2/s ; k 为湍动能, m^2/s^2 ; ϵ 为湍能耗散率, m^2/s^3 ; u 为平均流速, m/s ; Γ 为广义扩散系数, 无量纲; 各个常数为 $C_\mu = 0.09$, $C_1 = \max[0.43, u/u_t + 5]$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.2$.

3 计算结果分析

3.1 流场分布及压降分析

换热器壳程流体雷诺数计算公式为:

$$Re = \frac{\rho u d_e}{\mu}, \quad (5)$$

式中: ρ 为壳程流体密度, kg/m^3 ; u 为壳程流体流速, m/s ; d_e 为当量直径, m ; μ 为壳程流体动力黏度, $Pa \cdot s$.

正三角形布管当量直径计算公式为^[8]:

$$d_e = \frac{4 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} p_t^2 - \frac{\pi}{4} d_o^2 \right)}{\pi d_o}, \quad (6)$$

式中: p_t 为换热管中心距, m ; d_o 为换热管外径, m .

换热器壳程雷诺数 10 000 时,计算得出安装角为 30°、45°、60°的扇叶型折流板周期性模型流线图如图 3 所示。

通过图 3 可以看出由于折流板的引导作用不同安装角下壳程流体流动较为规律,整体呈斜向流动,这种流动状态能有效地降低流体横向速度分量,提高壳程流体诱导振动的临界速度,增强了换热器的抗振性能。

换热器壳程雷诺数 10 000 时,安装角 30°的扇叶型折流板横截面速度云图如图 4 所示。

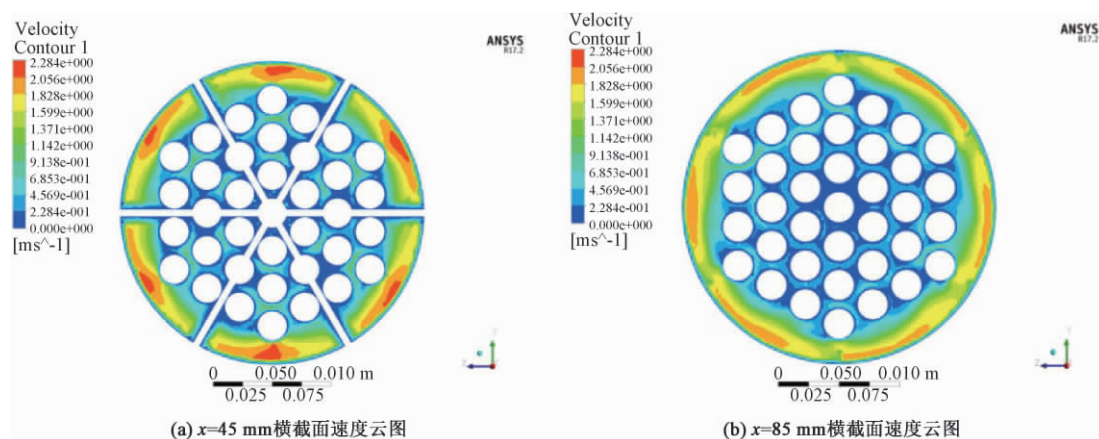


图4 安装角30°时横截面速度云图

Fig.4 Cross section velocity contours at 30° installation angle

由图4可以看出流速较高的区域主要分布在筒体周围,而中心区域流速较低.这是因为折流板的引导使得壳程流体螺旋流动产生的离心力导致壳体周围流速升高中心区域流速降低.在该类换热器优化设计中,可以适当减少中心区域布管并增加筒体周围布管,以更加有效地利用换热面积提高换热器传热性能.

图5为不同安装角的扇叶型换热器壳程单位长度压降随壳程雷诺数变化的曲线.通过图5可以看出,不同流态下,安装角不同时,换热器壳程压降随雷诺数的变化趋势相同:随着雷诺数增大,壳程压降增大.安装角为30°、45°和60°时换热器壳程单位长度压降分别为0.250~7.308 kPa/m、0.085~2.770 kPa/m和0.027~0.607 kPa/m,随着安装角的增大,壳程压降减小.不同雷诺数下安装角60°时壳程压降最低,比安装角30°和45°时分别降低了89.3%~91.7%、68.3%~78.1%,表明安装角为60°时换热器壳程阻力最小.

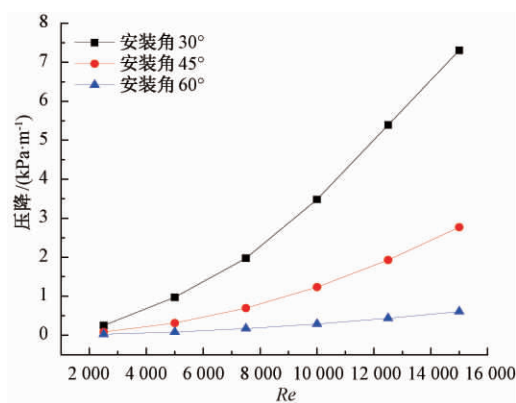


图5 壳程压降随雷诺数变化曲线

Fig.5 Shell side pressure drop versus Re

3.2 壳程传热性能分析

图6为不同安装角的扇叶型换热器壳程传热

系数随壳程雷诺数的变化曲线.通过图6可以看出,不同流态下,安装角不同时,换热器壳程传热系数随雷诺数的变化趋势相同:随着雷诺数增大,壳程传热系数增大.随着安装角的增大,传热系数减小.不同雷诺数下,安装角为30°的换热器壳程传热系数高于另外两者,比安装角45°和60°时分别提高了9.4%~19.3%、26.6%~31.7%,表明3种安装角中安装角为30°时换热器传热性能最好.

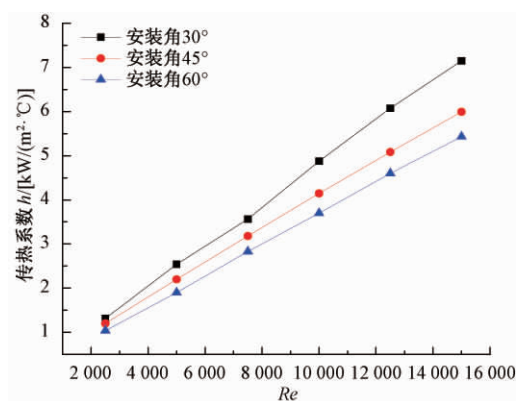


图6 传热性能随雷诺数变化曲线

Fig.6 Heat transfer coefficient versus Re

3.3 壳程综合性能分析

换热器传热与阻力综合性能 η 计算式如下^[9]:

$$\eta = \frac{h}{\Delta p}, \quad (7)$$

式中: h 为壳程传热系数, kW/(m²·°C); Δp 为壳程流体压降, kPa.

图7为不同安装角的扇叶型折流板换热器壳程综合性能随壳程雷诺数的变化曲线.通过图7可以看出,不同流态下,安装角不同时,换热器壳程综合性能随雷诺数的变化趋势相同:随着雷诺

数增大,壳程综合性能减小.不同流态下,安装角 60° 时换热器壳程综合性能均明显高于另外两者,表明安装角 60° 时换热器的传热与阻力综合性能最好.

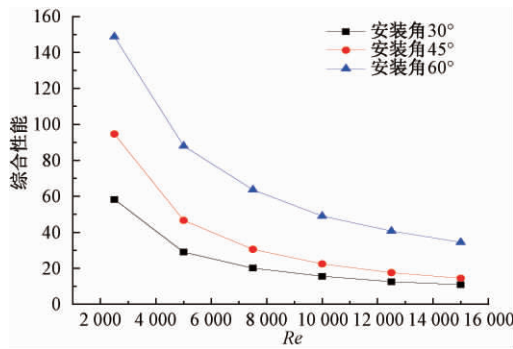


图7 壳程综合性能随雷诺数变化曲线

Fig.7 Comprehensive performance versus Re

4 结论

(1) 不同安装角下壳程流体流动较为规律,整体呈斜向流动.

(2) 随着安装角增大,壳程压降减小,换热器流动传热综合性能增大,安装角 60° 时,换热器壳程压降小于其他两种情况换热性能优于其他两种安装角;扇叶型折流板换热器壳程中心区域流体流速较低,筒体附近区域流体流速较高,优化设计时可以适当调整管束结构布置,中间区域增大管间距,筒体周围区域减小管间距.

(3) 不同流态下,随着安装角增大,换热器传热性能降低,3种工况下安装角 30° 时换热器传热性能最好.

参考文献:

- [1] MAAKOUL A E, LAKNIZI A, SAADEDDIN E S, et al. Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole, helical and segmental baffles [J]. Applied thermal engineering, 2016, 109: 175 – 185.
- [2] OZDEN, E, TARI I. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger [J]. Energy conversion and management, 2010, 51(5): 1004 – 1014.
- [3] YOU Y, CHEN Y, XIE M, et al. Numerical simulation and performance improvement for a small size shell-and-tube heat exchanger with trefoil-hole baffles [J]. Applied thermal engineering, 2015, 89: 220 – 228.
- [4] KHUSHNOOD S, NIZAM L A. Experimental study on cross-flow induced vibrations in heat exchanger tube bundle [J]. China ocean engineering, 2017, 31(1): 91 – 97.
- [5] GAWANDE S H, KESTE A A, NAVALE L G, et al. Design optimization of shell and tube heat exchanger by vibration analysis [J]. Modern mechanical engineering, 2011, 1(1): 6 – 11.
- [6] 赖永星, 王贺郑, 田苗苗. 换热管与折流板孔之间的间隙对换热管振动特性影响分析 [J]. 压力容器, 2007, 24(6): 30 – 33.
- [7] 王定标, 胡祥报, 郭茶秀, 等. 大型纵流壳程换热器三维流动与传热数值模拟 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(3): 13 – 17.
- [8] 董其伍, 吴金星, 刘敏珊, 等. 孔板支撑换热器壳程流场的数值预测 [J]. 压力容器, 2003(8): 4 – 7.
- [9] 董聪, 陈亚平, 吴嘉峰, 等. 三分螺旋折流板换热器水-水传热壳侧综合性能 [J]. 化工学报, 2012, 63(3): 721 – 727.

Study on Performances of Blade Baffle Heat Exchanger with Different Baffle Installation Angles

TAN Guofeng^{1,2}, WANG Ke^{1,2}, WANG Yongqing², WANG Dan²

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Three periodic models with different installation angles of the blade baffle heat exchanger were established by the CFD analysis software Fluent. The installation angles were 30° , 45° , 60° , respectively. And the performance of heat exchanger with different installation angles was investigated. Results showed that in the diversion of the baffle, the shell-side flow became sideling flow, which could restrain the flow induced vibration effectively. The velocity of the fluid in the near wall region was higher than that of the central region. With the increase of the installation angle, the shell-side pressure drop decreased, the comprehensive performance and the heat transfer coefficient of the heat exchanger increased. When the installation angle was 30° the heat transfer coefficient was larger than the other two.

Key words: blade baffle; heat exchanger; sideling flow; flow induced vibration; heat transfer performance

改性柚皮对水体中盐酸环丙沙星的动态吸附研究

邹卫华, 符艳真, 刘鹏磊, 刘 晓, 万怡贝

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:以改性柚皮为吸附剂对水体中的盐酸环丙沙星(CIP)进行动态吸附实验,考察了吸附柱高度、CIP初始浓度和流速对穿透曲线的影响,分别用Thomas模型、The bed-service time(BDST)模型和传质模型对动态吸附实验数据拟合.结果表明,随着柱高的增加、初始浓度以及流速的减小,穿透时间延长;吸附量实验值 q_e 与Thomas模型预测值 q_0 较为接近,且 $R^2 > 0.9500$,表明Thomas模型能够描述该动态吸附过程;BDST模型可以准确预测穿透时间和饱和时间,穿透时间的预测值和实验值间的最大误差为1.32%;传质模型预测的理论穿透曲线和实际穿透曲线的趋势一致.

关键词:改性柚皮; 盐酸环丙沙星(CIP); 动态吸附; Thomas模型; BDST模型; 传质模型

中图分类号: X703

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.022

0 引言

盐酸环丙沙星(CIP)是第三代氟喹诺酮类抗生素,它具有高效、低毒、口服效果好等性质,常被用作人药和兽用药,在水产养殖等领域也有广泛应用.目前,处理CIP废水的方法主要有光降解、离子交换及氧化法^[1-3]等,其中吸附法是一种简单有效的方法之一^[4].使用生物质材料作吸附剂去除水体中的抗生素的研究国内外已有报道,Zhang等^[5]研究了菌菇菌糠对废水中的磺胺类抗生素的吸附;Hu等^[6]报道花生壳对头孢拉丁具有较好的吸附性能;Ashrafi等^[7]采用NaOH改性稻壳,可以有效地吸附水中的诺氟沙星.

笔者以改性柚皮为吸附材料,研究其对水体中CIP的吸附性能.目前,我国柚子产量比较大,柚皮占总重的44%~54%,含有大量纤维素、半纤维素、色素和一些低分子化合物^[8],采用NaOH改性可以使其表面官能团 $-\text{COOCH}_3$ 水解为 $-\text{COO}-$,增加羧基的数量,有利于吸附水体中CIP.由于动态吸附是实际废水处理的主要工作方式,故而笔者研究其对水体中CIP的动态吸附行为,分别考察柱高、流速及CIP初始浓度等因素对吸附性能的影响.

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

改性柚皮制备:用蒸馏水洗净柚皮,烘干粉碎,取0.45~0.9 mm柚皮浸泡于 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的NaOH溶液中3 h,洗至中性,烘干备用.

盐酸环丙沙星、NaOH、HCl等试剂均为分析纯.

主要仪器:紫外-可见分光光度计(Shimadzu UV-3000);蠕动泵(BT100-2J).

1.2 实验方法

采用可调速玻璃吸附柱,将一定量的改性柚皮装入吸附柱中(玻璃柱高45 cm,内径为2.2 cm),用去离子水浸泡1 h,用蠕动泵将一定浓度的CIP溶液(初始pH值为5.30)自上而下通入吸附柱中,间隔一定时间取样,用紫外分光光度计在波长为275.5 nm分析流出液中CIP的浓度.使用盐酸研究吸附饱和和改性柚皮吸附柱的脱附再生性能.

1.3 数据分析

在一定浓度和流速条件下,吸附柱最大吸附量 q_{total} 和单位吸附量 q_e 可通过下面公式计算:

$$q_{\text{total}} = \frac{QA}{1000} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{\text{total}}} C_{\text{ad}} dt; \quad (1)$$

$$q_e = q_{\text{total}}/m, \quad (2)$$

收稿日期:2017-02-06; 修订日期:2017-07-10

基金项目:河南省基础与前沿技术计划项目(162300410016)

作者简介:邹卫华(1967—),女,河南省平顶山人,郑州大学副教授,主要从事环境分析方面的研究,E-mail: whzhou@zzu.edu.cn

式中, t_{total} 为吸附达到饱和所需的时间, min; Q 为体积流速, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$; C_{ad} 为被吸附的 CIP 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; m 为柱中吸附剂质量, g.

2 结果与讨论

2.1 吸附柱高对穿透曲线的影响

CIP 初始浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 流速为 $5.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 在不同柱高条件下, 改性柚皮对水体中 CIP 吸附的穿透曲线如图 1 所示, 吸附参数见表 1. 由图 1 可知, 随着柱高的增加, 改性柚皮对 CIP 的吸附量增大. 因为柱高的加会导致传质区长度增加, 吸附剂与吸附质之间的接触时间增长, 从而提高了吸附效率.

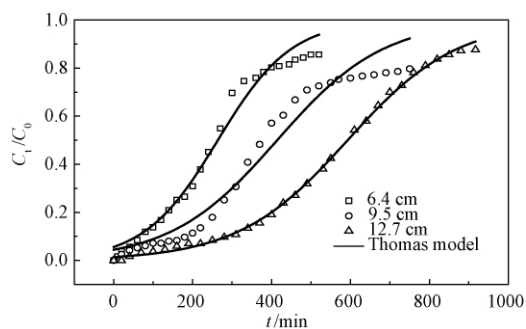


图1 不同柱高下实验穿透曲线与 Thomas 模型拟合曲线的比较

Fig.1 Comparison of the experimental and predicted breakthrough curves obtained at different bed depths according to the Thomas model

2.2 CIP 的初始浓度对穿透曲线的影响

控制溶液流速为 $5.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 吸附柱高度为 9.5 cm , 考察 CIP 溶液浓度对流出曲线和吸附参数的影响, 结果见图 2 和表 1. 可以看出, CIP 溶液浓度越高, 改性柚皮对它的吸附效率增加, 吸附点位的利用率也增大. 因此, 在相同流速和柱高下, 溶液浓度越大, 改性柚皮对 CIP 的吸附量越大, 达到饱和和吸附的时间缩短, 流出曲线的斜率增大.

2.3 流速对穿透曲线的影响

流速是吸附柱操作中的重要参数, 它直接影响吸附剂与吸附质接触时间, 从而影响吸附的传质速率. 实验选取 3.0 、 5.4 、 $8.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 3 个流速, 在初始浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 柱高为 9.5 cm 条件下的穿透曲线如图 3 所示. 吸附参数见表 1.

当流速由 $3.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $8.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 吸附柱的穿透时间分别由 460 min 减少至 250 min , 这是由于随着流速的增加, 使 CIP 与

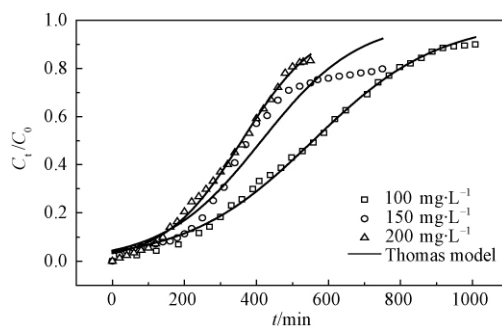


图2 不同浓度下实验穿透曲线与 Thomas 模型拟合曲线的比较

Fig.2 Comparison of the experimental and predicted breakthrough curves obtained at different initial concentrations according to the Thomas model

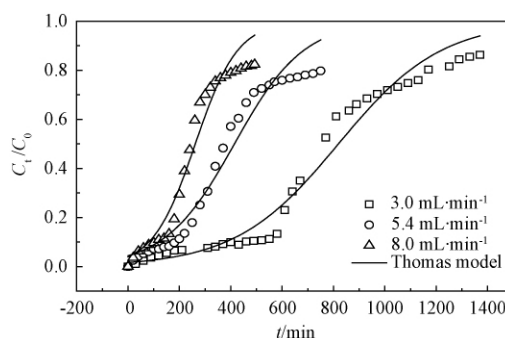


图3 不同流速下实验穿透曲线与 Thomas 模型拟合曲线的比较

Fig.3 Comparison of the experimental and predicted breakthrough curves obtained at different flow rates according to the Thomas model

改性柚皮的接触时间减少, 吸附量降低, 穿透时间和饱和时间均缩短.

2.4 改性柚皮对 CIP 的动态吸附模型研究

2.4.1 Thomas 模型

Thomas 模型是 Thomas 在 1944 年提出的用来研究柱状吸附床的吸附动力学模型, 可以估计吸附质的平衡吸附量和吸附速率常数^[9]. 其表达式如下:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{\text{th}} q_0 x}{Q} - k_{\text{th}} C_0 t\right)}, \quad (3)$$

式中: k_{th} 是 Thomas 速率常数, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$; q_0 是平衡时吸附剂的单位吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; x 是柱中吸附剂的质量, g; C_0 是吸附质的初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_t 是吸附质的流出浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q 是柱流速, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

由 Thomas 方程对实验数据进行非线性拟合, 计算结果见表 1. 从表 1 可知, 随着柱高和吸

表 1 不同操作条件时改性柚皮的吸附量及 Thomas 模型参数

Tab. 1 Adsorptive capacity of modified grapefruit peel and Thomas model parameters under various condition

$C_0 /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$v /$ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	$Z /$ cm	$q_{\text{total}} /$ mg	$q_e /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_{\text{Th}} /$ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$)	$q_0 /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	R^2
150	5.4	6.4	195	271	0.079	269	0.980 4
150	5.4	9.5	303	281	0.059	274	0.955 1
150	5.4	12.7	429	298	0.052	304	0.998 7
100	5.4	9.5	293	271	0.059	270	0.995 4
200	5.4	9.5	326	302	0.054	312	0.978 5
150	3.0	9.5	344	319	0.035	320	0.970 8
150	8.0	9.5	299	277	0.086	273	0.953 5

附液初始浓度的增加, k_{Th} 值逐渐降低, 而饱和吸附量 q_0 却增大. 随着溶液流速增大, k_{Th} 值逐渐增加, 而饱和吸附量 q_0 逐渐减小, 这是因为随着流速的增大, 接触时间相应减小, 吸附剂中的活性点位利用率降低, 导致 q_0 减小. 不同实验条件下, 根据 Thomas 模型计算所得的 q_0 与实验值 q_e 吻合良好, 相关系数 R^2 均大于 0.950 0, 说明 Thomas 模型能较好地描述改性柚皮吸附柱对 CIP 的动态吸附行为, 由 Thomas 模型的假设可知该吸附过程中内部扩散和外部扩散均非限速步骤.

2.4.2 The bed-service time (BDST) 模型

BDST 是描述柱高、时间、浓度和吸附参数的模型^[10], 其线性表达式为:

$$t = \frac{N_0}{C_0 F} Z - \frac{1}{k_a C_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_t} - 1 \right), \quad (4)$$

式中: C_t 为流出液浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_0 为溶液初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; N_0 为吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; F 为溶液流速, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$; k_a 为 BDST 模型速率常数, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; t 为溶液流过柱的时间, min; Z 为柱高, cm.

$$\text{令 } a = N_0 / (FC_0), b = \frac{1}{k_a C_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_t} - 1 \right).$$

则 BDST 模型的简化表达式为:

$$t = aZ - b. \quad (5)$$

利用 BDST 模型参数 a 和 b , 可以预测其他实验条件下的穿透时间^[11].

在新流速下, $a' = \frac{N_0}{C_0' F'}$, 则

$$a' = \frac{F}{F'} a = \frac{Q}{Q'} a, \quad (6)$$

$$b' = b = \frac{1}{k_a C_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_t} - 1 \right). \quad (7)$$

在不同柱高条件下, 选取 C_t/C_0 值分别为

0.2、0.4、0.7, 以 $t-Z$ 作图(图 4). 根据式(5)进行线性拟合分析, 所得模型参数见表 2. 随着 C_t/C_0 比值的增加, 吸附容量 N_0 增大, 其值越大表明在短时间内不易被穿透, 而随着 C_t/C_0 比值的增加, 速率常数 k_a 降低. 拟合曲线的相关系数 R 均大于 0.970 0, 说明可以用 BDST 模型来预测该吸附柱的穿透时间和饱和时间.

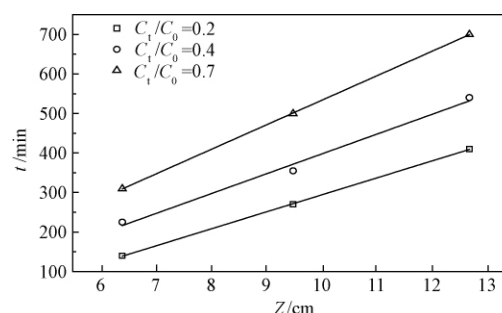


图 4 不同柱高条件下 C_t/C_0 为 0.2、0.4、0.7 的 $t-Z$ 直线图 ($C_0 = 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Q = 5.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 4 The lines of $t-Z$ at values of C_t/C_0 are 0.2, 0.4, 0.7 ($C_0 = 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Q = 5.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)

保持柱高不变, 利用表 2 中的参数, 根据式(6)和(7)预测新流速下(例如 $C_0 = 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Q = 3.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)的穿透时间, 结果见表 3. 由表 3 可知, 在 C_t/C_0 比值为 0.2、0.4、0.7 处的预测时间分别为 597、770、971 min, 实验时间分别为 602、760、970 min, 其相对误差分别为 0.83%、1.32%、0.10%, 表明 BDST 模型可以预测在改变运行参数时的穿透时间.

2.4.3 传质模型

在静态吸附研究中, Freundlich ($R^2 = 0.963 4$) 模型可以较好描述改性柚皮对 CIP 的等温吸附行为, 其表达式为 $q_e = 1.598 C_t^{0.564}$. 传质模型是根据静态吸附的等温线数据预测动态吸附的理论穿透

表 2 改性柚皮吸附 CIP 的 BDST 模型参数 ($C_0 = 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Q = 5.4 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$)

Tab.2 The calculated constants of BDST model for the adsorption of ciprofloxacin hydrochloride ($C_0 = 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Q = 5.4 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$)

C_t/C_0	$a/$ ($\text{min}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$b/$ min	$k_a \times 10^5 /$ ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	$N_0 \times 10^{-3} /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	R
0.2	42.86	135.28	6.832	9.129	0.999 7
0.4	50.04	103.74	2.606	10.659	0.977 7
0.7	61.91	86.86	-6.598	13.197	0.999 9

表 3 BDST 模型对 $C_0 = 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Q = 3.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时穿透时间的预测 ($Z = 9.5 \text{ cm}$)

Tab.3 Predicted breakthrough time based on the

BDST constants for $C_0 = 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Q = 3.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ($Z = 9.5 \text{ cm}$)

C_t/C_0	$a' /$ ($\text{min}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$b' /$ min	$t_c /$ min	$t_e /$ min	$E /$ %
0.2	77.15	135.28	597	602	0.83
0.4	90.07	85.61	770	760	1.32
0.7	111.44	86.86	971	970	0.10

曲线,并与实验穿透曲线进行比较.其表达式为:

$$\frac{h}{h_s} = \frac{\int_{C_b}^C dC / (C - C_t)}{\int_{C_b}^{C_e} dC / (C - C_t)} = \frac{V_t - V_b}{V_e - V_b}, \quad (8)$$

式中: h 和 h_s 分别是吸附柱高度和吸附带高度, cm; V_b 和 V_e 分别是达到穿透点和饱和点时所消耗的废水体积, mL; V_t 是不同时刻在 V_e 之内的废水处理体积, mL; C_b 和 C_e 分别是达到穿透点和饱和点时流出液的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_t 是对应于每个 q_e 的平衡浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (q_e 为 Freundlich 模型计算所得).

根据传质模型的方法,对 $C_0 = 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Q = 3.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $Z = 9.5 \text{ cm}$ 条件下的实验穿透曲线进行预测.将不同时间流出液的浓度 C_t 代入 Freundlich 方程 $q_e = 1.598C_t^{0.564}$ 中得到相应的 q_e 值,画出 C_t - q_e 的平衡曲线.根据传质模型方程(式 8),计算得到理论的 $(V_t - V_b) / (V_e - V_b)$ 值.以 C_t/C_0 对理论 $(V_t - V_b) / (V_e - V_b)$ 值作图,即可得到预测的理论穿透曲线,并与实验穿透曲线比较见图 5.可以看出,预测的理论穿透曲线与实验穿透曲线的趋势基本相同,说明可以用传质模型预测改性柚皮吸附水体中 CIP 的动态穿透曲线.

2.5 动态解吸

0.1 mol·L⁻¹ 的 HCl 在 3.0 mL·min⁻¹ 的洗脱流速下对吸附饱和后柚皮吸附柱进行解析实验,吸附解吸循环 3 次,再生率达到 75%,吸附饱和

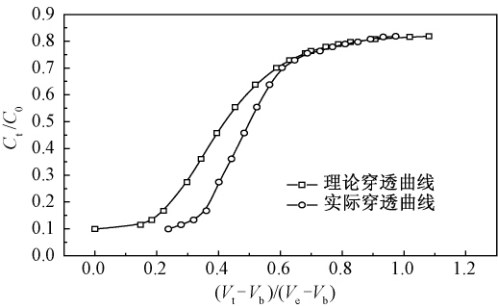


图 5 穿透曲线的实验值与传质模型预测值的比较 ($C_0 = 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Q = 3.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, $Z = 9.5 \text{ cm}$)

Fig.5 Comparison of the experimental and predicted breakthrough curves according to the mass transfer

model ($C_0 = 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Q = 3.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, $Z = 9.5 \text{ cm}$)

的改性柚皮可以用 0.1 mol·L⁻¹ 的 HCl 进行脱附再生.

3 结论

(1) 改性柚皮吸附柱高度、CIP 初始浓度和流速对穿透时间的影响很大,随着吸附柱高度的增加以及 CIP 浓度和流速的降低,穿透时间会延长.

(2) Thomas 模型能够很好地描述改性柚皮对 CIP 的动态吸附穿透曲线;BDST 模型能够较好地预测吸附柱在新流速条件下的穿透时间和饱和时间;传质模型可以预测不同条件下的穿透曲线.

参考文献:

[1] DOORSLAER X V, DEMEESTERE K, HEYN-
DERICKX P M, et al, UV-A and UV-C induced pho-
tolytic and photocatalytic degradation of aqueous cipro-
floxacin and moxifloxacin: Reaction kinetics and role
of adsorption [J]. Applied catalysis b environmental,
2011, 101(3/4): 540-547.

[2] WANG C J, LI Z, JIANG W T, et al. Cation ex-
change interaction between antibiotic ciprofloxacin and
montmorillonite [J]. Journal of hazardous materials,

- 2010, 183(1-3): 309-314.
- [3] ZHANG H, HUANG C H, Adsorption and oxidation of fluoroquinolone antibacterial agents and structurally related amines with goethite [J]. *Chemosphere*, 2007, 66(8): 1502-1512.
- [4] HOMEM V, SANTOS L. Degradation and removal methods of antibiotics from aqueous matrices—a review [J]. *Journal of environmental management*, 2011, 92(10): 2304-2347.
- [5] ZHOU A X, ZHANG Y L, LI R, et al. Adsorptive removal of sulfa antibiotics from water using spent mushroom substrate, an agricultural waste [J]. *Desalination and water treatment*, 2016, 57(1): 388-397.
- [6] HU Z J, WANG N X, TAN J, et al. Kinetic and equilibrium of cefradine adsorption onto peanut husk [J]. *Desalination and water treatment*, 2012, 37(1/3): 160-168.
- [7] ASHRAFI S D, KAMANI H, JAAFARI J, et al. Experimental design and response surface modeling for optimization of fluoroquinolone removal from aqueous solution by NaOH-modified rice husk [J]. *Desalination and water treatment*, 2016, 57(35): 16456-16465.
- [8] HUANG H Y, LUO L D, ZHANG H, et al. Adsorption of congo red from aqueous solutions by the activated carbons, prepared from grapefruit peel [J]. *Applied mechanics and materials*, 2014, 529: 3-7.
- [9] 孔郑磊, 李晓晨, 杨继利, 等. 改性荔枝皮对水中 Pb(II) 的动态吸附特性 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(10): 1186-1192.
- [10] HAN R P, ZOU L N, ZHAO X, et al. Characterization and properties of iron oxide-coated zeolite as adsorbent for removal of copper(II) from solution in fixed bed column [J]. *Chemical engineering journal*, 2009, 149(1-3): 123-131.
- [11] ZOU W H, ZHAO L, ZHU L. Adsorption of uranium(VI) by grapefruit peel in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves [J]. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 2012, 295(1): 717-727.

Fixed Bed Column Study for Ciprofloxacin Hydrochloride Removal from Solution Using Modified Grapefruit Peel

ZOU Weihua, FU Yanzhen, LIU Penglei, LIU Xiao, WAN Yibei

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

Abstract: In this study, the adsorption capacity of modified grapefruit peel to ciprofloxacin hydrochloride (CIP) was investigated in the fixed-bed column technique. The effects of initial CIP concentration, flow rate, and column height on the breakthrough characteristics of the adsorption system were studied. With the increase of adsorption column height or decrease of initial concentration and flow rate, the breakthrough time were increased. The Thomas model was applied to the experimental data to determine the characteristic parameters of the column that were useful for process design. The R^2 of Thomas model was more than 0.950 0 and the experimental values q_{exp} was similar to theoretical values q_e . It was indicated that Thomas model is suitable for describe the dynamic adsorption. The bed depth service time (BDST) model was applied to predict the breakthrough time and saturated time under different conditions. The results showed that BDST model could predict breakthrough time accurately and maximum error were less than 1.32%. The theoretical breakthrough curve according to mass transfer model was accord with experimental breakthrough curve in the column process.

Key words: modified grapefruit peel; ciprofloxacin hydrochloride; column adsorption; Thomas model; BDST model; mass transfer model

聚乳酸立构复合晶体的表面形貌及其力学性能

刘艳萍^{1,2}, 魏航航^{1,2}, 李倩^{1,2}

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 微纳成型技术国家级国际联合研究中心, 河南 郑州 450001)

摘 要: 采用溶液共混法制备了相同质量比的左旋聚乳酸(PLLA)和右旋聚乳酸(PDLA)的立构复合物. 采用差示扫描量热仪、偏光显微镜、原子力显微镜、共聚焦显微镜和纳米压痕仪研究了聚乳酸立构复合物晶体的表面形貌及其力学性能的变化. 结果表明, 样品质量比为1:1时能够形成立构规整度较高的立构复合晶体; 晶体表面出现比较明显的凹陷现象, 这是由于结晶后分子链的收缩导致的; 样品晶区的硬度和模量相比非晶区有所提升.

关键词: 聚乳酸; 立构复合晶体; 表面形貌; 力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.017

0 引言

近年来,聚乳酸(PLA)因其优异的生物相容性、可生物降解性及良好的力学性能而受到广泛关注. Drumright^[1]通过聚乳酸的水解和降解实验,研究了聚乳酸的降解机理以及在替代塑料制品和石油方面的应用. Zhang等^[2]对聚乳酸的合成、性能、共聚改性等方面的研究进展做了综述,并且讨论了聚乳酸在生物医学方面的应用. 据其聚合物分子链旋光性的不同,可分为左旋聚乳酸(PLLA)、右旋聚乳酸(PDLA)以及消旋聚乳酸(PDLLA). 当PLLA与PDLA以一定比例共混时,可形成一种立构复合体^[3]. 它不同于PLLA和PDLA各自的均聚物,主要体现在以下3个方面^[4]: ①共混物具有较高的熔融温度,比PLLA和PDLA各自均聚物的熔点高出近50℃; ②立构复合晶体是以 3_1 螺旋构象堆积的三斜晶体,属于 β 晶型; ③相比于PLLA和PDLA各自的均聚物,它具有更加优异的冲击性能和力学性能.

Tsujii H等^[5-6]研究了PLLA和PDLA的配比、相对分子质量、结晶温度及时间等因素对立构复合物的影响,结果表明:当相对分子质量较小的PLLA和PDLA($M_w < 50\,000$)等量混合时能形成比较完全的立构复合体. Sun等^[7]研究了左右旋

聚乳酸混合物的结晶行为,发现立构复合晶体可以作为成核剂促进单一均聚物的成核. 但是对于立构复合晶体的表面形貌研究较少,而晶体的表面形貌是反映材料性能的重要因素. 基于此,笔者研究了相同配比情况下,分子量相同的PLLA和PDLA共混所形成的共混物在不同温度下的结晶速率,并在此基础上研究了晶体的表面形貌以及材料晶区与非晶区力学性能的差异.

1 试验方案

1.1 试验原材料

PLLA: 重均相对分子质量为50 000, 长春圣博玛生物材料有限公司; PDLA: 重均相对分子质量为50 000, 长春圣博玛生物材料有限公司; 二氯甲烷: 分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司; 甲醇: 分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司.

1.2 样品制备

采用溶液共混法,选取二氯甲烷为溶剂,原料在50℃的烘箱中干燥24 h. 将PLLA与PDLA按相同质量比例充分溶解在二氯甲烷中,浓度为2 g/dL,再用大量的甲醇作为沉淀剂,经絮凝沉淀后,将其置于真空干燥箱中50℃干燥24 h,得到相同比例的共混物; 热压薄膜样品在真空压膜机中制得,控制薄膜厚度为100 μm .

收稿日期:2017-04-22; 修订日期:2017-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372286,51503186); 国际科技合作专项项目(2015DFA30550); 中国博士后科学基金面上项目(2016M592309); 河南省自然科学基金项目(162300410036)

作者简介:刘艳萍(1986—),女,河南温县人,郑州大学讲师,博士,主要从事高分子结晶研究, E-mail: ypliu@zzu.edu.cn.

1.3 试验内容

1.3.1 差示扫描量热仪(DSC)测试

使用美国 TA 公司的 DSC(Q2000),称取 5 mg 的混合物,在 10 mL/min 的氮气保护下,将混合物样品按照以下的 DSC 温度流程进行测试:从室温以 10 °C/min 升温到 250 °C,恒温 5 min 消除热历史,而后以 10 °C/min 的降温速度降至室温,最后再以 10 °C/min 升温到 250 °C. 单一的左、右旋聚乳酸的 DSC 测试流程为:从室温以 10 °C/min 升温到 200 °C,恒温 5 min 消除热历史,而后以 10 °C/min 的降温速度降至室温,最后再以 10 °C/min 升温到 200 °C.

1.3.2 偏光显微镜(POM)测试

采用日本 Olympus 公司 BX51 型偏光显微镜以及 Linkam 热台研究球晶的生长过程,观察淬火后的结晶形态. 经熔融压片薄膜样品放入热台中,实验条件设定为:20 °C/min 的升温速率从室温加热至 250 °C,恒温 5 min 后,以 40 °C/min 快速降

温至 187 °C,等温 60 min,跟踪观察此条件下结晶形貌,并记录球晶生长直径.

1.3.3 原子力显微镜(AFM)测试

采用美国 Agilent 公司 7500 型原子力显微镜观察球晶的表面形貌,选用接触模式,扫描区域为 80 μm × 80 μm.

1.3.4 共聚焦显微镜(LSCM)测试

采用日本 Olympus 公司的 OLS4100 型激光共聚焦显微镜观察球晶表面形貌,与 AFM 的测试结果形成对比,进而说明立构复合晶体表面形貌的特殊性.

1.3.5 纳米压痕测试

采用美国 Agilent 公司 G200 型纳米压痕仪进行力学性能的测试,应用连续刚度法(CSM)及 Berkovich 三棱锥形的金刚石压头对试样不同位置进行压入测试. 以球晶中心为圆心,沿着半径生长方向以 15 μm 为间隔依次向外打点,为了对比,在非晶区也以 15 μm 为间隔依次打点进行压痕测试. 所用纳米压痕仪参数如表 1 所示.

表 1 纳米压痕实验参数

Tab.1 Nanoindentation experiment parameters

表面接触速率/(nm·s ⁻¹)	压入深度/nm	应变速率/s ⁻¹	连续位移/nm	频率/Hz	表面接触距离/nm	泊松比
10	2 000	0.05	2	45	1 000	0.4

2 结果与讨论

2.1 温度对立构复合体熔融与结晶行为的影响

图 1 是 PLLA 和 PDLA 及其相同质量比的共混物的二次升温曲线图. 从图 1 可以看出,PLLA、PDLA 在 165 ~ 170 °C 有一个强的熔融峰,其峰值分别为 165 °C、170 °C;共混物在 210 °C 左右有一个强的熔融峰,比单一组分的熔融温度高 45 ~ 50 °C. 此图可作为共混物在结晶实验中设定热台温度及等温结晶温度的依据.

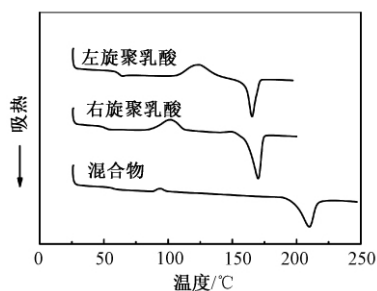


图 1 PLLA, PDLA 与两种聚合物等质量混合的共混物的 DSC 曲线

Fig.1 DSC melting trace of the PLLA, PDLA and their blends with the weight ratio 1:1

将薄膜样品以 20 °C/min 的速度升温至

250 °C 熔融完全后,以 40 °C/min 快速降温至高出单一均聚物熔点的温度充分结晶,因为结晶温度在均聚物熔点之上,故此时得到的晶体为立构复合晶体,没有均聚物晶体生成. 图 2 是相同配比的 PLLA 和 PDLA 共混物晶体在不同温度下的生长速率图. 从图 2 可以看出,随着温度的升高,晶体的生长速率逐渐降低,当晶体培养温度较低时,晶体生长速率过快,不利于得到直径确定的单一晶体.

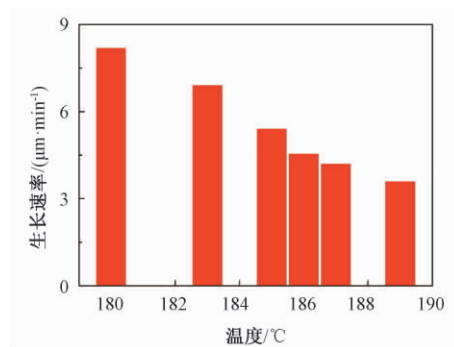


图 2 不同温度下晶体的生长速率

Fig.2 The growth rate of crystal under different temperature

选取 187 °C 作为晶体生长的温度,此时生长速率为 4.0 μm/min,图 3 分别代表结晶时间为 20、40、60 min 时晶体形貌图. 从图 3 可以明显地

观测到,随着结晶时间的延长,晶体逐渐变大,60 min时晶体直径达到400 μm 左右,而且球晶出现了非常明显的十字消光现象。

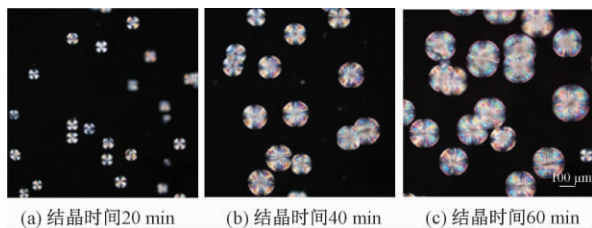


图3 不同直径的立构复合晶体的偏光图片

Fig.3 POM photographs of the stereocomplex crystal with different diameter

2.2 立构复合晶体的表面形貌

图4为利用原子力显微镜观察得到的球晶表面形貌图.采用接触模式,受限于原子力显微镜的最大扫描量程为80 $\mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$,因此选取直径为80 μm 的球晶进行扫描.从图4(b)可以明显地看到,球晶中心凹陷,凹陷程度沿半径方向逐渐降低,到边缘处达到最小,球晶边缘处为整个晶体的地势最高点.在二维拓扑图上,也可以从颜色深浅区别判断球晶的大致形貌,中间颜色比较暗,证明是凹陷的;边缘处颜色比较亮,证明相对于中心区域是凸出的。

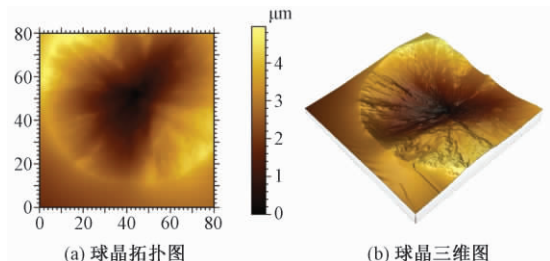


图4 晶体的AFM拓扑图和三维形貌图

Fig.4 The AFM topological photograph and three-dimensional topography of the crystal

图5是利用奥林巴斯共聚焦显微镜观察到的球晶表面形貌图以及三维图像,可以作为原子力显微镜观察到图像的佐证.从图5可以明显地看到球晶的凹陷现象,此次测量的球晶直径在200 μm 左右,也进一步表明凹陷现象不会因为球晶的生长而消失.球晶发生凹陷是由于立构复合晶体的链构象为 3_1 构象,单一均聚物晶体的链构象为 10_3 构象,立构复合晶体的分子链排布较为密实^[8],因此得到的立构复合晶体表面存在凹陷结构。

2.3 立构复合晶体晶区与非晶区的力学性能

图6(a)是利用纳米压痕检测仪器,采用Berkovich压头连续地设置一系列压痕点,分别以球晶

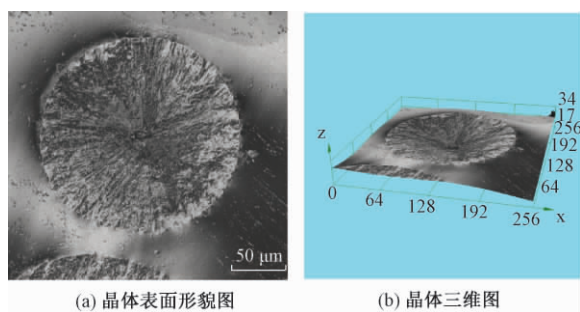


图5 奥林巴斯共聚焦显微镜得到的晶体表面形貌图和三维图

Fig.5 The surface and three-dimensional photographs of the crystal with Olympus confocal microscopy

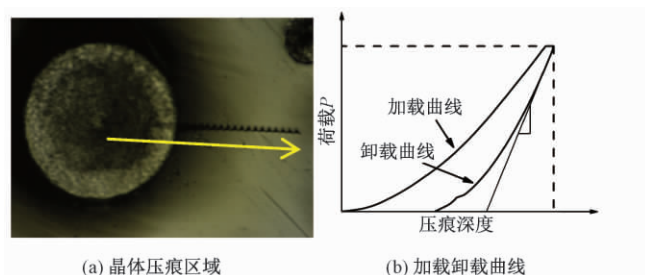


图6 晶体的纳米压痕区域以及典型的纳米压痕测试加载卸载曲线

Fig.6 Nanoindentation area of the crystal and the curves of typical loading and unloading in nanoindentation test^[9]

中心为原点,沿径向以15 μm 为间隔依次打点.作为对比,在非晶区沿一直线打相同个数的点,每两点之间间隔也为15 μm ,压痕最大深度为设备默认的2000 nm,检测打点位置的硬度和弹性.图6(b)显示了纳米压痕典型的加载和卸载曲线.通过该曲线的卸载曲线,可以测量材料的弹性模量 E 和硬度 H .其中,硬度可由公式(1)计算得出:

$$H = P_{\max} / A, \quad (1)$$

式中: P_{\max} 为最大负载; A 为最大负载时的接触面积.

弹性模量可以通过式(2)计算得出:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (2)$$

式中: E_r 为压痕过程减小的弹性模量; ν 为泊松比,PLLA的泊松比为0.4.

对于金刚石压痕仪,其弹性模量为 $E_i = 114 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu_i = 0.07$.压痕过程中,弹性模量 E_r 的减少,由方法Oliver-Pharr可知,通过卸载曲线的数据,由公式(3)计算得出:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{dp}{dh} \cdot \frac{1}{\sqrt{A}}, \quad (3)$$

式中: $\frac{dp}{dh}$ 为卸载曲线的斜率。

图 7 是选取压入深度趋于稳定的阶段 100 ~ 200 nm 的实验值,分别计算出球晶区和非晶区在 100 ~ 200 nm 硬度和模量的平均值为纵坐标,横坐标为其打点位置距圆心的距离,最后得到每个压痕点硬度值与模量值。从图 7 可以明显地看到,由晶区至非晶区的过渡区域,材料的模量和硬度逐渐趋于稳定,并且低于晶区的模量和硬度,这是由于结晶后分子链有序排列,一定程度上提升了材料的模量和硬度^[10]。

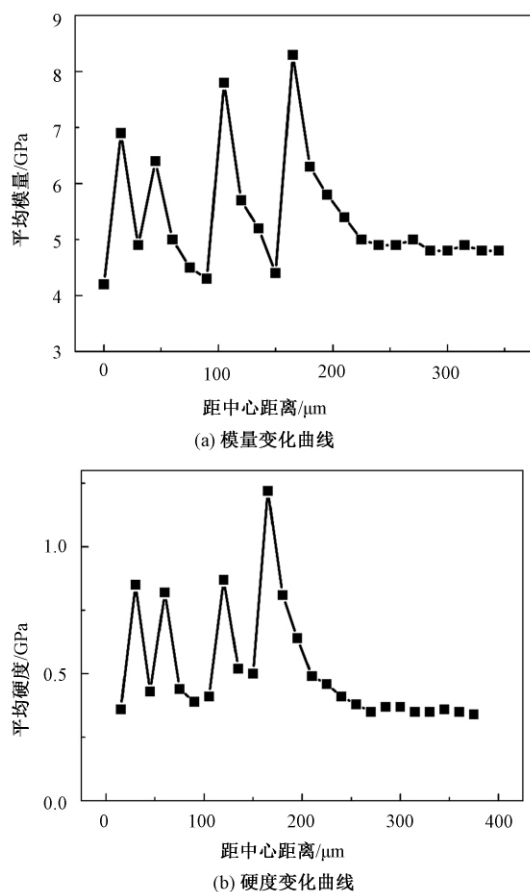


图 7 沿晶体半径方向的平均模量和硬度变化趋势图,晶体半径为 200 μm

Fig. 7 The trend of average hardness and modulus in the radial direction of the crystal, the radial was 200 μm

3 结论

(1) DSC 研究结果表明,溶液成膜法制备的相同配比的 PLLA 和 PDLA 共混物能形成立构度比较高的聚乳酸立构复合物,没有单一的均聚物晶体生成。

(2) 原子力显微镜和奥林巴斯激光共聚焦显微镜研究结果表明,球晶表面有凹陷结构,是由于立构复合的分子链结晶后收缩率较大导致的,DSC 结果上可以看出样品没有分相。

(3) 纳米压痕数据表示,晶区模量和硬度相对于非晶区有一定程度的提升,并且从晶区到非晶区的过渡区域,模量和硬度呈现一定程度的下降趋势,这是由于样品发生结晶行为之后,分子链的排列从无序变为有序,材料的模量和硬度随着分子链排布的规整性有一定的提升。

参考文献:

- [1] DRUMRIGHT R E, GRUBER P R, HENTON D E. Polylactic acid technology [J]. Advanced materials, 2000, 12(23): 1841 – 1846.
- [2] ZHANG G, YANG J, FENG X, et al. Progress in study of polylactides [J]. Progress in chemistry, 2000, 12(1): 89 – 102.
- [3] TSUJI H. Poly(lactide) stereocomplexes: formation, structure, properties, degradation, and applications [J]. Macromolecular bioscience, 2007, 5 (12): 569 – 597.
- [4] WOO E M, CHANG L. Crystallization and morphology of stereocomplexes in nonequimolar mixtures of poly(l-lactic acid) with excess poly(d-lactic acid) [J]. Polymer, 2011, 52(26): 6080 – 6089.
- [5] TSUJI H, IKADA Y. Stereocomplex formation between enantiomeric poly(lactic acid) s. XI. mechanical properties and morphology of solution-cast films [J]. Polymer, 1999, 40(24): 6699 – 6708.
- [6] TSUJI H, HYON S H, IKADA Y. Stereocomplex formation between enantiomeric poly(lactic acid) s. 3. calorimetric studies on blend films cast from dilute solution [J]. Macromolecules, 1991, 24(20): 5651 – 5656.
- [7] SUN J, YU H, ZHUANG X, et al. Crystallization behavior of asymmetric plla/pdla blends. [J]. Journal of physical chemistry b, 2011, 115(12): 2864 – 2869.
- [8] ZHANG J, SATO H, TSUJI H, et al. Infrared spectroscopic study of $\text{ch}_3 \cdots \text{oc}$ interaction during poly(l-lactide) /poly(d-lactide) stereocomplex formation. [J]. Macromolecules, 2005, 38(5): 1822 – 1828.
- [9] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. Journal of materials research home, 2011, 7 (6): 1564 – 1583.
- [10] 石素宇,王利娜,许文仲,等. 微注射成型 HDPE 制品的结构和力学性能 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(6): 24 – 27.

The Morphology and Mechanical Properties of Poly(Lactic Acid) Stereocomplex Crystal

LIU Yanping^{1,2}, WEI Hanghang^{1,2}, LI Qian^{1,2}

(1. School of Mechanics&Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Micro-nano Moulding Technology National Center for International Joint Research, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The surface morphology and the difference in mechanical properties between crystalline region and amorphous region of the stereocomplex crystal were studied in this paper. The same mass ratio of Poly(L-lactic acid) (PLLA) and poly(D-lactic acid) (PDLA) stereocomplex was prepared by solution blending. Differential Scanning Calorimeter, Polarizing Microscope, Atomic Force Microscope, Confocal Laser Scanning Microscope and Nano Indentation Tester were used to list the surface morphology of PLA stereocomplex crystal and the diversification of mechanical properties. The result showed that a high degree of stereo-tacticity of PLLA/ PDLA blend could be achieved from the mass ratio of 1/1 for sample. The research also showed that obviously depression phenomenon on the surface of crystal was formed due to the contraction of the molecular chain. Furthermore, the hardness and modulus of crystalline region were improved compared to the amorphous region.

Key words: poly(lactic acid) ; stereocomplex crystal; surface morphology; mechanical properties

(上接第 63 页)

与工程学院,2009.

[11] 何铁芳. 基于改进广义粒子群优化的开放式车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学机械科学

[12] 程适,陈俊风,孙奕菲,等. 数据驱动的发展式头脑风暴优化算法综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018,39(3): 22-28.

Research on Process Planning Problems Based on General Particle Swarm Optimization Model

WEN Xiaoyu, LUO Guofu, LI Hao, XIAO Yanqiu, QIAO Dongping, LI Xiaoke

(Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: An Improved General Particle Swarm Optimization (IGPSO) algorithm was proposed for process planning problem based on the GPSO model and the characteristics of process planning problem. Crossover operations were utilized to achieve the particles to obtain updated information from individual extreme library and population extreme library. Variable Neighborhood Search algorithm was introduced as a local search strategy for particles. A set of instances have been conducted to examine the proposed algorithm and the comparisons among other algorithms appeared in current literature were also presented. The experimental results showed the proposed algorithm had higher efficiency and better stability in solving process planning problems.

Key words: general particle swarm optimization; process planning; variable neighborhood search; combination optimization

基于电导增量法的太阳能光伏阵列 MPPT 仿真

梁亮¹, 詹智民², 邓小磊³, 叶磊², 陈根永¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 湖北华中电力科技开发有限责任公司, 湖北 武汉 430077; 3. 国网河南禹州市供电公司, 河南 禹州 461670)

摘要: 针对太阳能光伏阵列最大功率跟踪控制问题, 利用 PSCAD/EMTDC 软件测量了光照强度从 0 到 1200 W/m² 和温度从 0 到 100 °C 条件下光伏阵列的短路电流及开路电压, 结果表明: 恒温条件下, 随着光照强度的升高, 开路电压及短路电流均逐渐增大; 恒光强条件下, 随着运行温度的升高, 开路电压逐渐减小, 而短路电流逐渐增大. 然后采用滞环比较的方法产生控制脉冲, 从跟踪速度和精度两方面对基于电导增量法的 MPPT 控制策略进行了改进, 建立仿真模型并实验, 完成最大功率跟踪控制, 实验结果表明光伏阵列最大输出功率会随着光照强度的增大而增大.

关键词: 光伏阵列; 电导增量法; 最大功率点跟踪; 仿真模型; 数据分析

中图分类号: TM615

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.029

0 引言

太阳能发电技术前景广阔且发展迅速, 但其目前存在发电效率低, 输出特性非线性等限制, 因此对其最大功率点运行的研究十分必要. 此外, 光照强度的变化, 环境温度和太阳能电池板粉尘聚集都会对光伏发电系统的输出造成很大影响^[1-2].

MPPT 控制的目的是使光伏发电系统能够在多变的环境条件下自动获得理想的最大功率点运行. 目前为光伏发电而发展起来的 MPPT 方法有许多, 例如扰动观察法、恒定电压法、电导增量法等^[3-5], 以及在这些分类的基础上, 根据实际情况和各种方法的优缺点进行相应改进的方法. 综合考虑各种 MPPT 方法, 可以看出电导增量法是其中效果较好的一种, 它的最大优点在于能够快速准确地使系统工作在最大功率点, 不会像扰动观测法那样在最大功率点附近反复振荡, 并且当外界光照等条件剧烈变化时, 电导增量法能够快速准确地进行追踪, 系统运行效果较好^[6].

笔者将利用 PSCAD/EMTDC 软件实现基于电导增量法的 MPPT 控制仿真. 首先通过仿真对不同光照强度和不同运行温度下光伏阵列的短路

电流及开路电压进行测量分析, 然后采用滞环比较的方法产生控制脉冲, 搭建 MPPT 控制仿真电路, 进行光照强度为 1 000 W/m²、运行温度为 25 °C 条件下的最大功率追踪, 并研究了恒温下不同光照强度对光伏阵列最大功率点的影响.

1 光伏电源的数学模型及物理模型

1.1 光伏电源等效电路及数学模型

依据光伏电源内部结构和电路特性, 可建立光伏电源的数学模型公式^[7]:

$$I_{VD} = I_0 \left(e^{\frac{qU_{VD}}{AkT}} - 1 \right); \quad (1)$$

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(U_{oc} + I_L R_s)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{U_D}{R_{sh}}; \quad (2)$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{VD} - \frac{U_D}{R_{sh}} - \frac{U_D}{R_s}; \quad (3)$$

$$U_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right), \quad (4)$$

式中: A 为 P-N 结曲线常数; I_{VD} 为内部等效二极管的 P-N 结反向饱和电流; I_{sc} 为光伏电源短路电流; U_D 为等效二极管端电压; U_{oc} 为光伏电源开路电压; q 为电子电荷; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度.

1.2 光伏并网的拓扑结构

要实现 MPPT 功能必须有电路拓扑的支

收稿日期:2017-04-10; 修订日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507155); 河南省国际科技合作计划项目(162102410071)

通信作者:陈根永(1964—), 男, 河南禹州人, 郑州大学教授, 主要从事电力系统相关研究, E-mail: ezzucgy@163.com.

持. 现有光伏发电系统并网的拓扑主要有单极式和双极式两种, 图 1 和图 2 为这两种拓扑的结构.

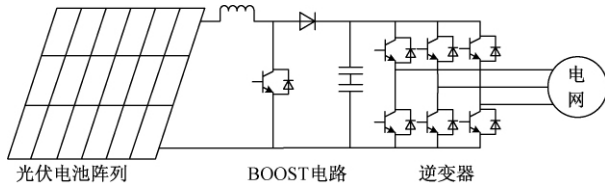


图 1 双极性光伏并网逆变器

Fig. 1 Bipolar photovoltaic grid-connected inverter

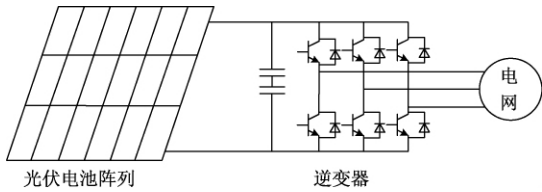


图 2 单极性光伏并网逆变器

Fig. 2 Unipolar photovoltaic grid-connected inverter

如图所示, 双极性结构含升压斩波电路 (boost converter), 单极性则不含. 光伏发电一般采用图 3 所示的双级式并网结构, 第一级为 DC-DC 直流变换, 采用 Boost 电路拓扑结构, 目的是将光伏电池阵列输出直流电压升高到一个合适的水平, 并且实现最大功率跟踪控制. 第二级是 DC-AC 变换, 采用三相全控桥逆变电路, 从而实现并网. 本文仿真基于双极性拓扑结构, 实现最大功率跟踪控制^[8].

2 光伏阵列开路电压和短路电流的测量

光伏阵列开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 是 PSCAD/EMTDC 软件中 MPPT 元件的重要参数, 不仅和光伏阵列结构密切相关, 还与光照强度瞬时值 G 及电池运行温度瞬时值 T 有关^[9]. 这里设定光伏阵列由 11 个模块串联而成, 每个模块由 10 个光伏电池堆并联, 而每个光伏电池堆由 36 个光伏电池单元串联构成, 光照强度 G 与运行温度 T 为可变量, 建立图 3 所示仿真模型.

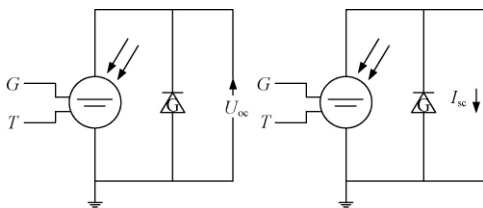


图 3 测量 U_{oc} 和 I_{sc} 仿真模型

Fig. 3 The artificial model to measure U_{oc} & I_{sc}

2.1 温度对开路电压和短路电流的影响

现控制光照强度瞬时值 $G = 1\,000\text{ W/m}^2$, 设置温度梯度为 0、25、50、75、100 °C. 观察仿真波形, 记录对应的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} , 如表 1 所示.

表 1 $G = 1\,000\text{ W/m}^2$ 条件下开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc}

Tab. 1 Short-circuit current U_{oc} and open-circuit voltage I_{sc} under the condition $G = 1\,000\text{ W/m}^2$

$T/^\circ\text{C}$	U_{oc}/V	I_{sc}/A	$T/^\circ\text{C}$	U_{oc}/V	I_{sc}/A
0	331.7	24.4	75	305.2	26.2
25	330.5	25.0	100	292.3	26.9
50	318.0	25.6			

由表 1 可知, 在适当的运行温度范围内 (0 ~ 100 °C), 当光照强度 G 保持恒定时, 随着电池运行温度 T 的升高, 开路电压 U_{oc} 逐渐减小, 而短路电流 I_{sc} 逐渐增大.

2.2 光照强度对开路电压和短路电流的影响

现控制电池运行温度瞬时值 $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$, 设置光照强度梯度为 0、200、400、600、800、1 000、1 200 W/m^2 . 观察仿真波形, 记录对应的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} , 如表 2 所示.

表 2 $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc}

Tab. 2 Short-circuit current U_{oc} and open-circuit voltage I_{sc} under the condition $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$

$G/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	U_{oc}/V	I_{sc}/A	$G/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	U_{oc}/V	I_{sc}/A
0	0	0	800	327	20.0
200	305	5.0	1 000	331	25.0
400	316	10.0	1 200	333	30.0
600	323	15.0			

由表 2 可知, 在适当的光照强度范围内 (0 ~ 1 200 W/m^2), 当运行温度 T 保持恒定时, 随着光照强度 G 的升高, 开路电压 U_{oc} 逐渐增大, 短路电流 I_{sc} 也逐渐增大, 且与 G 成正比例关系. 当光照强度为 0 时, 开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 均为 0.

3 MPPT 控制的仿真

光伏系统中的 MPPT 控制策略, 就是先根据实时检测光伏电源的瞬时输出功率, 经过一定的控制算法预测当前工况下光伏电源可能的最大功率输出点, 然后通过改变当前的阻抗或电流、电压等方式来满足最大功率输出的要求^[10].

3.1 电导增量法的原理

电导增量法通过不断比较光伏电源工作时的

电导增量和瞬间电导,进而改变控制信号^[11]. 光伏电源最大功率点处的光伏电源输出功率 P 与输出电压 U 满足条件:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0. \quad (5)$$

从而可得:

$$\frac{I}{U} + \frac{dI}{dU} = G + dG = 0, \quad (6)$$

式中: dP 为输出功率 P 的增量; dU 为输出电压 U 的增量; dI 为电流 I 的增量; G 为瞬间电导; dG 为瞬时电导 G 的增量.

用 ΔU 和 ΔI 代替 dU 和 dI , 可得:

$$dI(t_2) \approx \Delta I(t_2) = I(t_2) - I(t_1); \quad (7)$$

$$dU(t_2) \approx \Delta U(t_2) = U(t_2) - U(t_1). \quad (8)$$

进一步推导,可得系统运行点与最大功率点的判据如下,其中 t_1 和 t_2 为两相邻的时间点.

$$(1) G + dG \approx \frac{I}{U} + \frac{I(t_2) - I(t_1)}{U(t_2) - U(t_1)} > 0, \text{ 则}$$

$U < U_{MPP}$, 需要适当增大参考电压来达到最大功率点;

$$(2) G + dG \approx \frac{I}{U} + \frac{I(t_2) - I(t_1)}{U(t_2) - U(t_1)} < 0, \text{ 则}$$

$U > U_{MPP}$, 需要适当减小参考电压来达到最大功率点;

$$(3) G + dG \approx \frac{I}{U} + \frac{I(t_2) - I(t_1)}{U(t_2) - U(t_1)} = 0, \text{ 则}$$

$U = U_{MPP}$, 这时系统正工作在最大功率点处.

3.2 在 PSCAD/EMTDC 软件上搭建仿真模型

该模型追踪算法采用的是电导增量法,元件输入为光伏阵列输出电压 V_{pvX} 和输出电流 I_{pvX} .

模型主电路如图 4 所示. 光伏阵列的输入为光照强度变量 G 与温度变量 T , 输出连接至三相逆变器直流电容, V_{Fdc} 为实际直流电容电压, 三相逆变器由 6 个 IGBT 元件组成, 光伏阵列经无源逆变后向电阻负载提供有功功率, 其中 I_{Fa} 、 I_{Fb} 与 I_{Fc} 为三相输出电流.

图 5 所示为控制电路. 光伏阵列输出电压 V_{pvX} 和输出电流 I_{pvX} 经惯性环节输入 MPPT 元件, 元件输出是最大功率点对应的电压 D , 该电压信号 D 加上电阻压降信号 F 之后可得直流电容的电压参考信号 V_{dref} . 将该电压与实际直流电容电压 V_{Fdc} 相减, 再通过 PI 校正环节, 可得参考输出电流幅值信号 I_M , 最后通过电流初相位、幅值 I_M 及频率合成三相输出电流参考信号 I_{aref} 、

I_{bref} 和 I_{cref} .

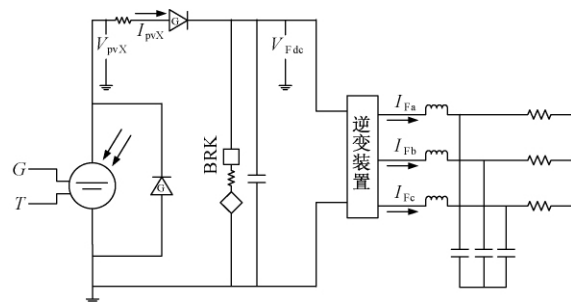


图 4 MPPT 仿真模型

Fig. 4 The main artificial model of MPPT

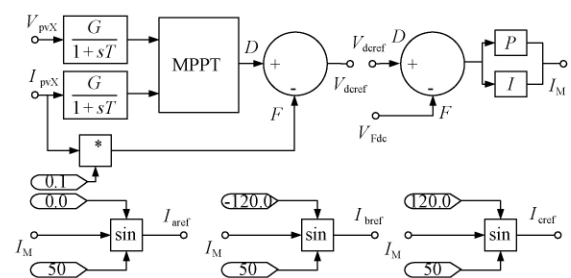


图 5 控制电路

Fig. 5 The control circuit of MPPT

三相逆变器的触发脉冲产生电路如图 6 所示. 图中 err_A 、 err_B 与 err_C 为各项电流的误差信号, H_on 为开通信号, H_off 为关断信号, $g_1 \sim g_6$ 为生成的驱动脉冲信号.

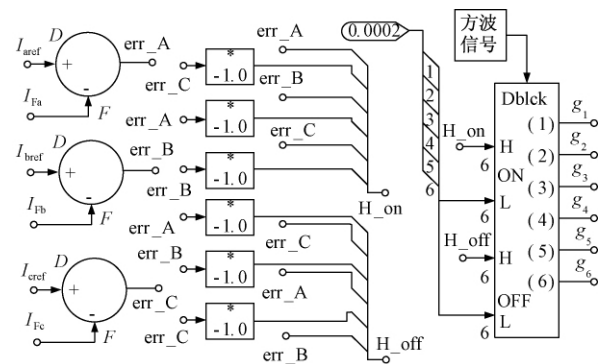


图 6 触发脉冲产生电路

Fig. 6 The trigger pulse generating circuit

产生触发脉冲采用了滞环比较的方法,并利用了 PSCAD 提供的脉冲发生元件,这里以编号 1 和 4 的 IGBT 的脉冲产生方法为例说明该电路原理. 产生器件 1 开通信号的 H 端接 A 相电流的误差信号 err_A , L 输入为滞环死区 (0.000 2 kA), 则当参考电流信号大于实际输出电流 0.2 A 时, 开通驱动信号为 1, 器件 1 导通; 产生器件 1 关断信号的 H 端接 A 相电流的误差信号 err_A , L 输入为滞环死区 (0.000 2 kA), 则当实际输出电流大于参考电流信号 0.2 A 时驱动信号为 0, 器件 1

关断. 器件 4 的驱动信号正好与器件 1 的反相.

3.3 仿真波形观测与分析

设置仿真总时长 10.0 s, 仿真步长 50 μ s, 绘图步长 250 μ s, 依此设置仿真参数并运行.

逆变器 A 相输出电流和参考电流的仿真波形如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 直流电压能较好的跟踪参考电压指令, 逆变器输出电流可以良好的跟踪参考电流, 输出是 50 Hz 基波正弦信号.

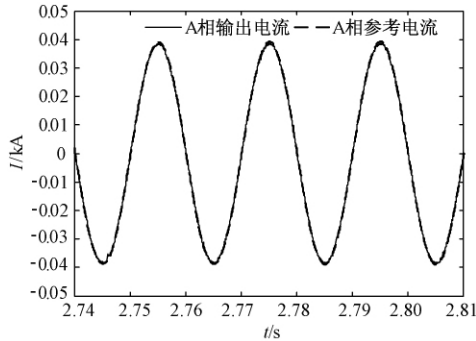


图 7 A 相电流波形

Fig. 7 The simulation waveform of A phase current

光伏阵列的输出电压电流和输出功率仿真波形分别如图 8 和图 9 所示.

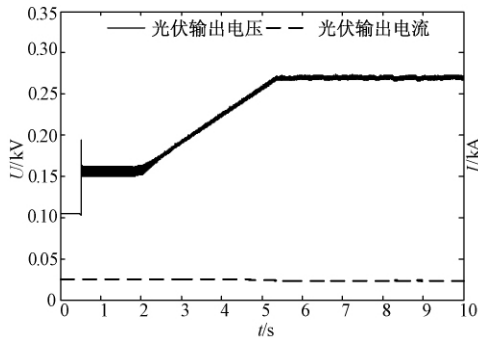


图 8 光伏输出电压电流波形

Fig. 8 The simulation waveform of photovoltaic output voltage and current

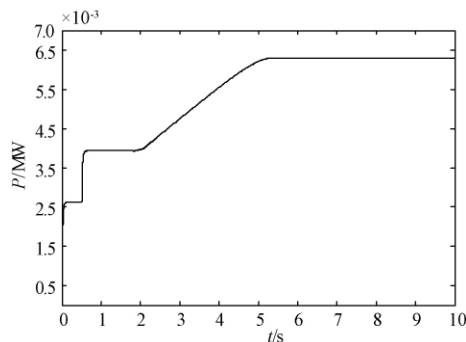


图 9 输出功率波形

Fig. 9 The simulation waveform of output power

设定孔径起点为 2.0 s, 长度为 8.0 s, 可得光伏阵列的 $P-U$ 曲线如图 10 所示. 根据以上仿真波形图可以看出, 大约 5.4 s 之后光伏阵列输出达到稳定状态, 稳定后的输出电压约为 269 V, 输出电流约为 23.4 A, 最大功率达到 6.3 kW. 根据图 10 可以看出, 对应最大功率的输出电压也基本为 270 V, 最大功率约为 6.3 kW, 即说明该模型实现了光伏发电 MPPT 控制, 输出功率达到当前光照条件和温度条件下的最大值.

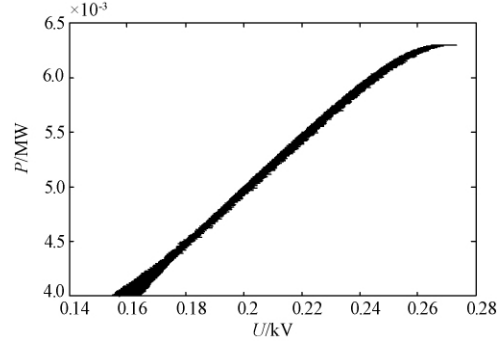


图 10 光伏阵列的 $P-U$ 波形

Fig. 10 The $P-U$ waveform of photovoltaic array

3.4 不同光照强度下的最大功率点

控制电池运行温度 $T = 25^\circ\text{C}$ 不变, 设定光照强度梯度为 0, 200, 400, 600, 800, 1 000, 1 200 W/m^2 . 设置仿真电路参数, 观察波形并记录最大功率点及相应的 U_{MPP} , 如表 3 所示.

表 3 $T = 25^\circ\text{C}$, 不同光照强度下的最大功率点

Tab. 3 MPP under different solar irradiance levels

when $T = 25^\circ\text{C}$

$G/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	$P_{\text{M}}/$ kW	$U_{\text{MP}}/$ V	$G/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	$P_{\text{M}}/$ kW	$U_{\text{MPP}}/$ V
0	0	0	800	5.00	269
200	0.16	32	1000	6.30	270
400	0.60	63	1200	3.10	105
600	1.40	95			

可见在一定光照强度范围内, 保持运行温度 T 恒定, 光伏阵列最大输出功率会随着光照强度的增大而增大, 当 $G = 1\,000\text{ W}/\text{m}^2$ 时最大输出功率 P_{M} 达到最大值, 此光照强度为最适宜的值.

4 结论

笔者通过对光伏阵列的开路电压和短路电流进行仿真分析, 得出以下结论: 温度保持恒定, 随着光照强度的升高, 开路电压逐渐增大, 短路电流逐渐增大. 当光照强度为 0 时, 开路电压和短路电流均为 0; 光照强度保持恒定, 随着运行温度的升

高,开路电压逐渐减小,而短路电流逐渐增大。

然后针对光伏发电系统的特点,利用 PSCAD/EMTDC 软件建立了基于电导增量法的 MPPT 控制仿真模型,该模型使用了 MPPT 元件,逆变环节的触发脉冲采用电流滞环比较的方法,模型整体简洁有效,具有良好的稳定性,能够迅速有效地实现对光伏发电的最大功率追踪,输出功率可较快达到当前光照强度与温度条件下的最大值。最后分析了不同光照强度对最大功率点的影响,从而确定了光伏发电的最佳光照强度。

参考文献:

- [1] MAHDI A, TANG W, WU Q. Improvement of a MPPT algorithm for PV systems and its experimental validation [C]//International Conference on Renewable Energies & Power Quality. Granada, Spain: EA4EPQ, 2010: 107 – 110.
- [2] 许天. 并联式支路光伏发电系统的研究与仿真 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 25 – 28.
- [3] HOHM D P, ROPP M E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed [C]// Photovoltaic Specialists Conference, Texas: IEEE, 2000: 1699 – 1702.
- [4] GHAZANFTI J, FARSANGI M. Maximum power point tracking using sliding mode control for photovoltaic array [J]. Iranian journal of electrical & electronic engineering, 2013, 9(3): 189 – 196.
- [5] 叶满园. 以电导增量法实现 MPPT 的单机光伏并网逆变器 [J]. 电力电子技术, 2006, 40(2): 30 – 32.
- [6] 徐鹏威, 刘飞, 刘邦银, 等. 几种光伏系统 MPPT 方法的分析比较及改进 [J]. 电力电子技术, 2007, 41(5): 3 – 5.
- [7] 苏建徽, 余世杰. 硅太阳能电池工程用数学模型 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409 – 412.
- [8] 杨文杰, 曾德容. 光伏发电接入微网运行控制仿真研究 [J]. 电器开关, 2011(1): 48 – 54.
- [9] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [10] 王岩. 光伏发电系统 MPPT 控制方法的研究 [D]. 北京: 华北电力大学电气与工程学院, 2007.
- [11] 余运俊, 张翔, 王时胜, 等. 电导增量法光伏发电 MPPT 研究综述 [J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2440 – 2444.

PV Array MPPT Simulation Based on the Conductance Increment Method

LIANG Liang¹, ZHAN Zhimin², DENG Xiaolei³, YE Lei², CHEN Genyong¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Hubei Central China Technology Development of Electric Power CO. LTD, Wuhan 430077, China; 3. Yuzhou Power Supply Company, Yuzhou 461670, China)

Abstract: This paper focused on the problem of MPPT control for PV arrays. Under the solar irradiance levels from 0 to 1 200 W/m² and the ambient temperatures from 0 to 100 °C, the short circuit current and open circuit voltage of PV array have been measured using PSCAD/EMTDC software. And the result showed that in the condition of constant temperature, the open circuit voltage and short circuit current increased with the increase of illumination intensity; in the condition of constant light intensity, the open circuit voltage decreased and the short-circuit current increased with the increase of temperature. The hysteresis loop was used to generate the control pulse. The MPPT control method based on conductance increment method has been improved from the two aspects of tracking speed and accuracy. A simulation model of system was built to achieve MPPT control. Finally, the experimental result showed that the maximum output power of the PV array increased with the increase of illumination intensity.

Key words: PV array; conductance increment method; maximum power point tracking; simulation model; data analysis

基于脑电图的三分类前臂运动方向解析

逯 鹏, 张利朋, 胡玉霞, 陈书立, 李新建

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对基于非侵入式脑机接口技术的右臂运动方向的判别问题, 采用自主运动实验范式, 将右臂自主运动脑电图(EEG)划分为规划和执行两阶段分别进行分析, 并根据复杂神经活动的特点, 采用WPD(小波包)与CSP(共空间模式)融合的方法进行EEG特征提取, 进一步利用SVM(支持向量机)对多维特征进行分类. 实验得到三分类(左、右和静止)平均85%的分类正确率. 实验结果表明, 该组合方法能够较好解析右臂运动方向.

关键词: EEG; 右臂; 运动方向; WPD; CSP

中图分类号: R318.04; TP391.4

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.004

0 引言

同一肢体不同运动方向的解析能够为BCI(脑机接口)系统提供更多的控制指令. 相较于多肢体控制^[1], 单肢体控制在一些领域有着天然的优势(如鼠标, 假肢的控制). 目前, 利用脑电图(EEG)解析简单肢体运动(如左、右手运动)^[2-3]的工作已能在训练条件下达到针对一般被试较高的两分类识别率. 在此基础上, 神经生理学研究表明, 运动方向、速度等复杂脑神经活动与EEG之间存在关联关系^[4-5]. 然而, 进一步通过EEG解析运动方向等信息主要有三方面困难: 一是简单意识判别中常用的提示信号会对复杂意识判别产生严重干扰; 二是复杂意识活动中的脑区定位范围更精细和复杂; 三是复杂脑神经活动的EEG频段范围较窄且有差异^[6].

指导上述问题的解决途径包括: 2004年, Meckes等^[7]研究定位前臂运动方向相关脑区时, 发现与运动方向关联脑区并不在运动区, 需进一步通过实验确定. 2009年, Wang等^[8]采用延迟执行动作任务的实验范式设计技术, 减少提示信息干扰, 进一步利用独立分量分析PPC(后顶叶皮层区)的EEG数据得到80.25%的两分类正确率. 2014年, Keum等^[9]结合EEG与fNIRS(近红

外光学脑功能成像)两种方法对手臂运动方向(向左、向右、向前、向后与停止)采用单次两分类识别, 得到了平均高于80%的正确率.

前期的研究者主要针对单次两分类任务进行研究, 笔者针对单次三分类运动方向进行识别, 增加运动方向的识别类别. 围绕上述目标, 首先, 设计被试者自主运动的实验范式; 然后, 采用全通道(64导)数据, 分析运动准备和运动执行两个过程的脑区电势变化, 确定运动方向关联脑区; 最后, 通过WPD与CSP融合的方法进行特征提取和分类, 实现三分类运动方向解析. 笔者设计了可有效避免提示信息干扰的实验, 并增加了任务识别类别, 为基于EEG的手臂运动方向研究提供了参考.

1 实验部分

提示信息会显著增加EEG的成分复杂性^[10], 为了避免干扰, 设计无提示信息的实验范式, 实时记录被试者运动状态.

精心选择被试者5名(两女三男, 右利手), 身体健康, 被试者在完全自愿的情况下参与实验. 被试者与脑电采集系统均在屏蔽室中, 室内灯光适中. 被试者坐在一个舒适的高靠背椅子上, 全身肌肉处于放松状态.

收稿日期:2017-11-18; 修订日期:2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(161473265); 河南省科技厅科技攻关计划项目(172102310393); 河南省教育厅高等学校重点研究计划项目(17A120004); 河南省高校科技创新团队计划项目(17IRTSTHN013)

作者简介: 逯鹏(1974—), 男, 河南滑县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事脑-机接口、复杂视觉图像信息处理、复杂网络等研究, E-mail: lupeng@zzu.edu.cn.

实验开始后,被试者开始自主执行规定动作,手腕放置位置如图 1. 在每个 Trial 的开始被试者的右臂自然放在原点,被试者自主进行右臂运动,运动结束时按下相对应的按键;每个 Trial 结束后,被试者休息约 2 s 后(避免返回时运动规划信息干扰)右臂重新回到原点.然后,自主进行下一个 Trial 的实验;被试者听到“实验结束”的提示音后实验结束,实验流程如图 2 所示.



图 1 手腕位置示意图

Fig.1 Wrist position sketch map

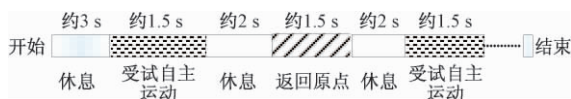


图 2 实验流程图

Fig.2 Experimental flow chart

每组实验 4 min, 每名被试者一次做 5 组实验, 各组实验之间有 4 min 休息时间. 脑电信号采集采用美国 Neuroscan 公司的 64 导 EEG 采集系统, EEG 的采样频率为 1 000 Hz, 10 ~ 20 国际标准电极位置, 实验过程中电极阻抗值小于 5 k Ω .

使用手臂运动感应装置和肌电记录手臂的运动情况, 给 EEG 数据添加标签点.

2 方向数据叠加处理

利用 EEG 识别前臂运动方向要解决与运动方向信息相关联脑区的定位问题. 由于脑电信号中包含了大量的噪声干扰和伪迹信号, 因此要进行数据预处理. 实验表明, 运动方向相关的脑区并不在运动区^[7], 确定关联脑区是获取正确 EEG 的前提. 首先, 采用平均叠加技术获得运动规划与执行过程 EEG 中的 ERP(事件相关电位)成分, 并通过分析各个通道 ERP 在不同运动方向时的变化分析相关脑区, 最后通过绘制脑地形图确定与运动方向最相关的关联脑区.

首先, 将被试者的数据分为左、右和静止三类, 图 3 为每个 Trial 的数据构成, 将运动执行时刻作为数据起始点, 取 $[-1\ 999, 200]$ ms 的数据进行离线分析, 静止类的数据用休息时的 2 200 ms 数据; 然后, 对每名被试者的数据的每个通道分别进行 1 ~ 45 Hz 的带通滤波; 最后, 将每类信号的对应通道进行多次叠加并画出整个头部脑地形图(图 4)和相应通道 ERP(图 5).

图 4 表明, 在前臂做左右不同方向的运动时,

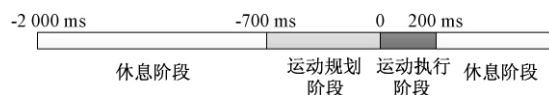


图 3 由休息、运动规划和执行三个阶段构成的离线数据

Fig.3 The offline data consisted of three stages: rest, movement planning and execution

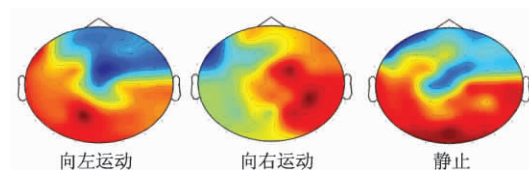


图 4 不同方向任务时脑地形图

Fig.4 The Brain topographic maps of different directions

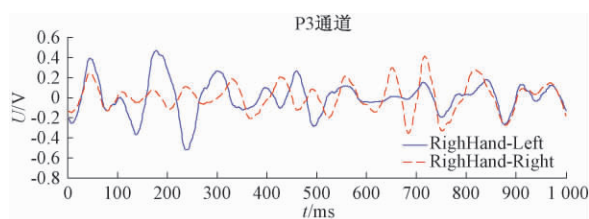


图 5 关联通道的 ERP

Fig.5 The ERP of associated channel

在大脑顶枕部出现同侧电势受到抑制对侧电势受到激发的现象; 在前臂保持静止时大脑顶枕部没有出现单侧电势增加的现象. 关联通道波形如图 5 所示, 在被试者前臂向右运动开始前的 300 ms 左右(被试在 500 ms 时刻运动)在顶枕区左侧通道(P1、P3、P5、CP3、CP5、TP7)的 ERP 出现峰值. 分析结果表明, 被试者在没有刺激程序的实验条件下, 自主运动的思维规划阶段发生在运动执行之前约 400 ms, 运动方向相关脑区在 PPC 区及其附近.

3 运动方向信息解析方法

被试前臂不同方向的运动过程中, 脑区相应的神经元被激活引起颅外电势在空间和时间上改变^[11], 因此如何获取 EEG 的空间和频域特征是手臂运动方向解析的关键.

3.1 基于小波包和共空间模式的特征提取

首先采用 WPD(小波包)分解 EEG 重构低频部分, 然后采用 CSP 共空间模式提取多通道 EEG 的空域特征. 采用 WPD 与 CSP 相结合的方法提取特征, 不仅能有效利用 WPD 的时频特征, 而且能弥补 CSP 缺乏频域信息的缺陷. 特征提取过程如图 6 所示.

3.2 方向特征提取过程

从预处理后的数据中, 截取每个 Trial 的运动执行阶段之前 600 ms 和之后 300 ms 数据进行模

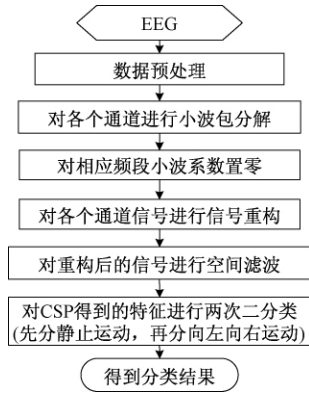


图6 基于WPD与CSP的算法流程图

Fig.6 Algorithm flow chart based on WPD and CSP
型训练和分类.

从预处理后的数据中选取与运动方向相关的导联(CP1、CP2、CP3、CP4、CP5、CP6、P1、P2、P3、P4、P5、P6),采用WPD以‘db4’小波对每个导联的信号进行8层分解.

输入信号采样频率为1 000 Hz,得到 $S(8,0) \sim S(8,255)$ 共256个窄带信号.其中 $S(8,0), S(8,1), S(8,2), S(8,3), S(8,7)$ 对应的子带频率为 $[0, 9.8]$ Hz.前臂运动方向信号集中在 $1 \sim 10$ Hz^[12],选取 $S(8,0), S(8,1), S(8,2), S(8,3), S(8,7)$ 共5个子带进行信号重构.

得到具有频域特征的矩阵 $E_{H \times L}$,其中 H 是通道数, L 是采样点数,归一化后的脑电数据的协方差矩阵为:

$$C = \frac{EE^T}{\text{tr}EE^T} \quad (1)$$

用 C_1 和 C_2 分别表示右手向左和右手向右两种状态下的空间协方差矩阵,得到协方差矩阵 C_i :

$$C_i = C_1 + C_2. \quad (2)$$

将 C_i 表示成 $C_i = U_i \lambda_i U_i^T$, U_i 为矩阵 C_i 的特征向量, λ_i 是对应特征值.通过该变化,特征值按照降序进行了排列,与其对应的特征向量也重新进行了排列.然后用主成分分析法进行白化:

$$P = \sqrt{\lambda_i^{-1}} U_i^T. \quad (3)$$

则 C_1, C_2 可变为:

$$S_1 = PC_1 P^T, S_2 = PC_2 P^T. \quad (4)$$

S_1 与 S_2 有相同特征向量,即若 $S_1 = B \lambda_1 B^T$,则 $S_2 = B \lambda_2 B^T$,且 $\lambda_1 + \lambda_2 = I$. S_1, S_2 有相同特征向量 B , I 是单位矩阵.由于两类矩阵特征值之和为 I ,则 S_1 最大特征值所对应的特征向量使 S_2 有最小特征值.

将白化后的脑电数据投影在特征向量 B 的

前 m 和后 m 列特征向量上,能够得到最佳的分类特征.投影矩阵为:

$$W = B^T P. \quad (5)$$

截取的脑电数据 E 最终可变为:

$$Z = WE. \quad (6)$$

取将投影后的信号 $Z_{2 \times m \times n}$ 做如下变化:

$$f_i = \lg \frac{\sum_{j=1}^n z_{ij}^2}{n}. \quad (7)$$

将变化后的 f 作为运动方向特征值,利用SVM(支持向量机)进行分类识别^[13-14].

3.3 运动方向特征识别

CSP属于两分类算法,不能直接应用解决三分类运动方向信息解析.针对该问题,笔者采用两次二分类的方法解决运动方向单次三分类问题.即先对静止和运动状态进行识别,再对运动方向进行识别,最后采用SVM(支持向量机)通过构造超平面对高维特征进行分类.

4 结果分析

分别对5名被试者($S_1 \sim S_5$, 20~25周岁,右利手)进行了6组实验,得到400个样本数据.其中,每名被试的80%数据做训练,20%数据做测试,结果如表1所示.

表1 5名被试分类识别正确率

Tab.1 The correct rate of 5 subjects					%
实验次序	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
第1次	83	85	88	86	85
第2次	86	88	83	91	90
第3次	85	91	90	88	86
第4次	85	83	90	81	91
第5次	90	85	86	86	86
平均	86	86	87	87	88

表1显示,5名被试者平均三分类识别率大于85%,最低识别率为81.6%,最高识别率为91.6%,结果优于文献[8]的80.25%二分类识别率;优于文献[9]的二分类平均80%以上识别率;优于文献[15]利用小波包系数用作特征平均65%的三分类识别率.

5 结束语

对基于EEG的前臂运动方向解析方法进行了研究.设计被试者自主运动的实验范式,利用WPD与CSP结合的方法提取出信号特征,通过SVM对右手前臂进行三分类(左、右和静止)识

别. 结果表明上述方法, 在增加了运动方向分类数的前提下, 达到了两分类的识别率. 该工作增加了现有 BCI 系统的控制指令编码, 为探索非侵入式解析精细运动规划信息提供可能性.

参考文献:

- [1] 李明爱, 田晓霞, 孙炎珺. 基于改进 GHSOM 的运动想象脑电信号自适应识别方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1064 – 1071.
- [2] ONOSE G, GROZEA C, ANGHELESCU A, et al. On the feasibility of using motor imagery EEG-based brain-computer interface in chronic tetraplegics for assistive robotic arm control: a clinical test and long-term post-trial follow-up [J]. Spinal cord, 2013, 50(8): 599 – 608.
- [3] WANG D, MIAO D, BLOHM G, et al. Multi-Class motor imagery EEG decoding for brain-computer interfaces [J]. Frontiers in neuroscience, 2012, 6: 151 – 158.
- [4] YANG L, LEUNG H, PLANK M, et al. EEG activity during movement planning encodes upcoming peak speed and acceleration and improves the accuracy in predicting hand kinematics [J]. IEEE journal of biomedical and health informatics, 2015, 19(1): 22 – 28.
- [5] EISENBERG M, SHMUELOF L, VAADIA E, et al. Functional organization of human motor cortex: directional selectivity for movement [J]. Journal of neuroscience, 2010, 30(26): 8897 – 8905.
- [6] LACHAUX J P, AXMACHER N, MORMANN F, et al. High-frequency neural activity and human cognition: past, present and possible future of intracranial EEG research [J]. Progress in neurobiology, 2012, 98(3): 279 – 301.
- [7] MECKES M P, SEPULVEDA F, CONWAY B A. 1st order class separability using EEG-based features for classification of wrist movements with direction selectivity [C] // 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. San Francisco, CA: IEEE, 2004: 4377 – 4379.
- [8] WANG Y, MAKEIG S. Predicting intended movement direction using EEG from human posterior parietal cortex [C]. San Diego: Lecture Notes In Artificial Intelligence, 2009.
- [9] KHAN M J, HONG M J, HONG K S, et al. Decoding of four movement directions using hybrid NIRS-EEG brain-computer interface [J]. Frontiers in human neuroscience, 2014, 8(5): 412 – 432.
- [10] TRACY W, ARIAN M, FRANCESCO M, et al. Nicotine effects on brain function during a visual oddball task: a comparison between conventional and EEG-informed fMRI analysis [J]. Journal of cognitive neuroscience, 2012, 24(8): 1682 – 1694.
- [11] GROSBAS M H, BEATON S, EICKHOFF S B. Brain regions involved in human movement perception: A quantitative voxel-based meta-analysis [J]. Human brain mapping, 2012, 33(2): 431 – 454.
- [12] PUUYA A, STEFAND C, LUCA A. How capable is non-invasive EEG data of predicting the next movement? A mini review [J]. Frontiers in human neuroscience, 2013, 7(124): 124.
- [13] 张震, 张英杰. 基于支持向量机与 Hamming 距离的虹膜识别方法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(363): 25 – 29.
- [14] 李凌均, 陈超, 韩捷, 等. 全矢量支持向量机回归频谱预测方法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 78 – 82.
- [15] 曹玉珍, 张庆学. 基于运动相关脑电特征的手运动方向识别 [J]. 天津大学学报, 2014(9): 836 – 841.

Three Classification Forearm Movement Direction Information Decoding Based on EEG

LU Peng, ZHANG Lipeng, HU Yuxia, Chen Shuli, LI Xinjian

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

Abstract: This study aimed to study of forearm movement direction based on non-invasive brain machine interface technology. An autonomic movement experimental paradigm and was designed, the EEG (electroencephalograph) signal of two stages of autonomous motion planning and execution was anaused. Method that combines the WPD (wavelet packet decomposition) and CSP (common spatial patterns) was used to extract characteristics. The SVM (support vector machine) was further used to classify multidimensional characteristics. Experiment on subjects withess the average 80% accuracy of three classifications (left, right and static). The results showed that the combined method could effectively resolve direction information of EEG.

Key words: EEG; Forearm; movement direction; WPD; CSP; SVM

二〇一八年总目次

土木与交通工程

- 不确定因素下的综合运输网络容量可靠性分析 马庚华, 杜牧青, 张小丽 (1-1)
- 废橡胶裂解炭黑改性沥青混合料的黏弹特性研究
..... 冯振刚, 孙安石, 张东阳, 李新军, 栗培龙 (1-7)
- 单轴荷载作用下混凝土强度代表体尺寸定量研究 王 娟, 王会娟, 许耀群, 武霄鹏 (1-12)
- 高应力下圆钢管混凝土柱界面粘结性能研究
..... 郑 亮, 张大鹏, 郭 宏, 闫舒茂, 王 龙, 武艳龙 (1-18)
- EGR 对二甲醚 HCCI 发动机燃烧特性的影响 黄锦耀, 严诗伦, 陈朝阳 (1-24)
- 基于相交道路左转饱和交通量的 MULTIBAND 改进模型 常玉林, 郑献予, 张 鹏 (1-29)
- 碳化腐蚀预应力空心板疲劳特性试验研究 杜朝伟, 郑元勋, 蔡迎春, 甘 超, 韩钰晓 (1-36)
- 下伏采空区对路基稳定性的影响研究 杨利民, 郭进军, 韩易辰, 郝莹莹 (1-42)
- 考虑塑性体积应变的扰动状态本构模型改进 崔允亮, 项鹏飞, 王新泉, 张世民 (1-47)
- 铅-磁流变阻尼器在减震结构中的位置优化 张香成, 陈 娜, 罗 芳, 赵 军, 徐赵东 (2-44)
- SHPB 恒应变率加载试验技术研究 梁书锋, 武 宇, 刘殿书, 李晓璐, 张会歌 (2-50)
- 棕麻纤维加筋砂的三轴试验研究 马 强, 邢文文, 李丽华, 胡 兴 (2-56)
- 胶粉改性土-膨润土固结压缩特性试验 何 俊, 颜 兴, 胡晓瑾, 王小琦 (2-61)
- 废胎胶粉与 HDPE/SBS 三掺复合改性沥青性能研究 何 锐, 黄 鑫, 耿九光, 陈华鑫 (2-67)
- 紊流强度与积分尺度对结构平均风压与脉动风压雷诺数效应影响研究
..... 白 桦, 郭聪敏, 刘健新 (2-73)
- 砂层注浆模型试验水泥含量检测方法研究 潘荣凯, 杨 平, 陈 亮, 蒋兴起 (4-1)
- 考虑温度场的架空钢芯铝绞线线股应力研究 张 猛, 张玉莹, 赵桂峰, 肖 宇 (4-7)
- 炭黑改性沥青混合料的动态响应主曲线分析 栗培龙, 马松松, 李建阁, 张东阳 (4-12)
- FSAE 方程式赛车车架的设计与轻量化 袁守利, 林家辉 (4-18)
- 氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体对氢发动机散热影响研究 罗亚萍, 邱兆文 (4-25)
- 不同掺合料对土坯墙泥浆抗压强度影响研究 童丽萍, 李 聪 (5-85)
- 机场道面沥青加铺结构分区域差异设计研究
..... 李炜光, 国 洋, 汤 豆, 郑敏楠, 延丽丽, 杨婉怡 (5-91)

化工与材料

- 搅拌罐内流场及脱硫剂分散数值模拟 王建明, 何讯超, 郑林彬 (1-78)
- IITD 算法在滑油管路模态参数辨识中的应用 边 杰, 霍常青, 王 平, 唐 广 (1-84)
- 微生物燃料电池处理废水产电及其驱动监控系统的研究
..... 田 野, 杨嘉敏, 成少安, 陆俊弘, 李艳宾, 杜玉坤 (1-90)
- $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{USY}$ 催化纤维素醇解制备乙酰丙酸乙酯 常 春, 安 冉, 孔鹏飞 (2-80)
- 退火温度对 Nb 掺杂 TiO_2 薄膜结构与性能的影响 苏雷生, 林 钰, 董 林, 辛荣生 (2-86)
- 利用废渣一次烧结制备微晶玻璃釉面砖的研究
..... 卢红霞, 吕泽刚, 程向前, 辛 玲, 侯铁翠 (2-92)
- 科学层面的安全定义及其内涵、外延与推论 吴 超, 杨 冕, 王 秉 (3-1)
- 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 (3-5)
- 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 (3-82)
- 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 (3-87)
- 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 (3-93)
- Fe_3O_4 磁性壳聚糖微球固定化脂肪酶研究 韩秀丽, 谷鹏举, 方书起, 陈俊英 (4-30)
- 零价铁对上流式固定床中生物氧化三价砷的影响 万俊锋, 蔡利芳, 张玉聪, 王 岩 (4-36)
- 基于 CFD 的电动汽车驱动电机冷却流道对比研究
..... 沈 超, 余 鹏, 杨建中, 张东伟, 魏新利 (4-41)
- 反应时间和碳磷比对单级好氧除磷的影响 彭赵旭, 韩 微, 彭志远, 雷志超, 陈 干 (4-46)
- 响应面法优化脱硅稻壳基活性炭对恩诺沙星的吸附 张宾朋, 韩秀丽, 方书起, 常 春 (6-64)
- 高温吸附热泵中传质通道强化蒸汽生成的实验研究
..... 刘周明, 盛遵荣, 叶 松, 姚志敏, 薛 冰, 魏新利 (6-69)
- 折流板安装角对扇叶型折流板换热器性能影响 谭国锋, 王 珂, 王永庆, 王 丹 (6-74)
- 改性柚皮对水体中盐酸环丙沙星的动态吸附研究
..... 邹卫华, 符艳真, 刘鹏磊, 刘 晓, 万怡贝 (6-78)
- 聚乳酸立构复合晶体的表面形貌及其力学性能 刘艳萍, 魏航航, 李 倩 (6-83)

信息工程

- 均衡策略粒子群算法在图像分割中的应用 夏星宇, 高 浩, 王创业 (1-59)
- 基于 FAST 特征点改进的 TLD 目标跟踪算法 毛晓波, 周晓东, 刘艳红 (2-1)
- 一种基于改进适应度的多机器人协作策略 曾庆山, 冯珊珊 (2-6)
- 基于深度卷积神经网络的羽绒图像识别 杨文柱, 刘 晴, 王思乐, 崔振超, 张宁雨 (2-11)
- 基于网络的视觉皮层演化博弈研究 逯 鹏, 张 微, 李亚萍, 刘素杰 (2-18)

新型四足步行机器人串并混联腿的轨迹规划与仿真研究	高建设, 王玉闯, 刘德平, 王保糖 (2-23)
一种基于共轭梯度法的广义单隐层神经网络	孙 峰, 龚晓玲, 张炳杰, 柳毓松, 王延江 (2-28)
基站协作系统中基于 GAMP 算法的 RZFBF 预编码实现	王忠勇, 冯双丽, 袁正道, 张园园 (2-33)
基于网络层次分析法的电网发展诊断模型研究	王正阳, 詹智民, 罗 宾, 刘行波, 李源林, 叶 磊, 陈根永 (2-39)
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 (3-10)
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 (3-15)
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 (3-22)
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 (3-29)
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 (3-34)
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 (3-40)
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 (3-45)
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 (3-51)
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 (3-56)
基于 DRNN 网络的轮式机器人鲁棒 H_{∞} 控制	彭金柱, 卞英楠, 周树亮 (4-64)
运动准备电位单次检测技术研究	逯 鹏, 牛 新, 刘素杰, 胡玉霞, 胡航航 (4-70)
一种自适应低剂量 CT 图像质量改善算法	蒋慧琴, 徐玉凤, 马 岭, 杨晓鹏, Toshiya Nakaguchi (4-75)
变时滞耦合不确定复杂网络修正函数投影同步	方 洁, 杜海明, 刘 娜 (4-81)
基于改进的 LSTM 深度神经网络语音识别研究	赵淑芳, 董小雨 (5-63)
基于自动编码器和 SVM 的轴承故障诊断方法	雷文平, 吴小龙, 陈超宇, 林辉翼 (5-68)

电气工程

计及谐波因素的配电网损耗量化计算与建模仿真	魏超峰, 李琼林, 蒋建东, 唐钰政, 王 纯 (1-53)
基于洛伦兹力的无轴承电机优化与特性分析	吴华春, 杨石平 (1-67)
基于遗传算法的地铁车站引导标识布点探析	穆瑞杰 (1-73)
基于隐马尔科夫模型的石油钻井事故预警方法	朱晓东, 袁坤杰, 王艳玲 (4-51)
基于特征值的单机无穷大电力系统随机稳定性分析	张 振, 刘艳红 (4-58)
基于电导增量法的太阳能光伏阵列 MPPT 仿真	梁 亮, 詹智民, 邓小磊, 叶 磊, 陈根永 (6-88)
基于脑电图的三分类前臂运动方向解析	逯 鹏, 张利朋, 胡玉霞, 陈书立, 李新建 (6-93)

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 (3-62)
- 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 (3-67)
- 1m 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 (3-72)
- 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 (3-77)
- 基于 MEMD 与 MMSE 的滚动轴承退化特征提取方法
..... 李凌均, 金 兵, 马艳丽, 韩 捷, 郝旺身 (4-86)
- 汽车鼓式制动器的多工况热-力耦合仿真分析 张三川, 郭向利, 田金坤 (4-92)
- 基于差速驱动的 AGV 驱动单元分析与改进设计 赵华东, 江 南, 雷超帆 (5-73)
- 搅拌罐内基于 EDEM-FLUENT 耦合的多相流混合数值模拟 王建明, 邱钦宇, 何讯超 (5-79)

智能计算

- 菌群优化方法及其应用研究综述 晏晓辉, 朱云龙, 张智聪, 吕赐兴, 李 帅, 蚁文洁 (5-1)
- 考虑多滑动窗口的中继卫星调度模型及启发式算法 何敏藩, 朱燕麒, 贾学卿 (5-11)
- 基于编辑传播的多源图像表观迁移 刘世光, 宋志超 (5-22)
- VR+药效团: 一种交互可视的虚拟筛选系统
..... 何高奇, 龚博杰, 陈 诚, 郁明强, 卢兴见, 李洪林 (5-28)
- 一种基于 RGB-D 的人体关节点定位方法 张青建, 韩建平 (5-33)
- 基于多元媒体数据的教育舆情情绪可视化 梁翊涛, 王长波 (5-39)
- 面向联合作战的网电对抗态势可视化系统设计与实现 张 阳, 司光亚, 王艳正 (5-45)
- 图像去模糊的自适应交替方向乘子重叠组稀疏方法
..... 王 杰, 李胜光, 宋一帆, 白 珂, 马天磊 (5-52)
- 位置数据稀疏约束下的疑犯时空位置预测 段 炼, 党兰学, 李 铭, 高 超, 朱欣焰 (5-58)
- 群体智能优化算法 程 适, 王 锐, 伍国华, 郭一楠, 马连博, 史玉回 (6-1)
- GP 算法在图像分析上的应用综述 毕 莹, 薛 冰, 张孟杰 (6-3)
- 改进鲸鱼群算法及其在炼钢连铸调度中的应用 曾 冰, 王梦雨, 高 亮, 董昊臻 (6-14)
- 两阶段三存档集约束优化算法 (TSDA) 李二超, 李 进 (6-23)
- 一种应用于函数优化问题的多种群人工蜂群算法 王守娜, 刘 弘, 高开周 (6-30)
- 基于单纯形的改进精英人工蜂群算法 金 叶, 孙越泓, 王加翠, 王 丹 (6-36)
- 一种量子行为磷虾算法及其仿真分析 刘 振, 刘文彪, 鲁华杰 (6-43)
- 基于多目标蜂群进化优化的微电网能量调度方法
..... 李佳华, 马连博, 王兴伟, 程 适, 邵一川 (6-50)
- 基于广义粒子群优化模型的工艺规划方法研究
..... 文笑雨, 罗国富, 李 浩, 肖艳秋, 乔东平, 李晓科 (6-59)

《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

本刊被下列数据库及文摘收录:

- 美国《化学文摘》(CA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《科学文摘》(SA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》

- 《万方数据系统》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国无机分析化学文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《工程机械文摘》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《电子科技文摘》

郑州大学学报(工学版)
Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxueban)

双月刊 (1980年创刊)

第39卷 第6期 总第162期 2018年11月10日

Journal of Zhengzhou University
(Engineering Science)

Bimonthly (Started in 1980)

Vol.39 No.6 Sum No.162 Nov 10, 2018

主管单位 河南省教育厅
主办单位 郑州大学
出版单位 《郑州大学学报(工学版)》编辑部
电子信箱 gxb@zzu.edu.cn
地 址 河南省郑州市科学大道100号(450001)
电 话 (0371)67781276 67781277
主 编 李燕燕
副 主 编 梁 静
印刷单位 山西同方知网印刷有限公司
发行范围 国内外公开发行
征 订 处 全国各地邮政局
发行单位 河南省邮政发行局

Administrated by The Education Department
of Henan Province
Sponsored by Zhengzhou University
Edited & Published by Editorial Board of Journal of
Zhengzhou University
E-mail gxb@zzu.edu.cn
Address No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, China
Telephone (0371)67781276 67781277
Chief Editor LI Yanyan
Executive Chief Editor LIANG Jing
Printed by Shanxi Tongfang Knowledge Network Printing Co., Ltd
Distributed by Publishing Trading Corporation,
P.O.B.782, Beijing 100011, China

中国标准刊号: ISSN 1671-6833
CN 41-1339/T

定价: 20.00元

邮发代号: 36-232