

蚁群算法的基本原理及应用综述

肖艳秋, 焦建强, 乔东平, 杜江恒, 周坤

(郑州轻工业学院机电工程学院, 河南 郑州 450002)

【摘要】 蚁群算法是一种群体智能仿生启发式算法, 从提出至今已在不同领域的优化问题中已经得到广泛的应用。首先介绍蚂蚁的觅食行为和人工蚁群算法的基本原理, 然后介绍基本蚁群算法及其改进在路径优化、生产调度、图像处理等方面的应用情况, 最后对蚁群算法在未来的发展及应用进行总结。

【关键词】 蚁群算法; 智能算法; 车辆路径; 生产调度; 组合优化

【中图分类号】 TP18

【文献标识码】 A

【文章编号】 2095-3518 (2018) 03-69-04

1 前言

随着人们对智能计算领域的研究不断深入, 设计了一类用于求解优化问题的群体智能算法^[1], 例如蚁群算法、遗传算法以及粒子群算法等, 这类算法的设计源自于对自然界中群体性动物行为活动(自然过程)的模拟。该类智能启发式算法为解决NP-hard类问题提供了新的方法, 蚁群算法(Ant Colony Algorithm, ACA)作为其中一种刚兴起的群体智能仿生算法, 是由意大利学者M.Dorigo等^[2]于20世纪90年代初, 依据模拟蚂蚁的觅食行为提出的。

蚁群算法是一种具有的较强的鲁棒性、并行分布式计算和易与其他算法相结合等优点的算法, 最早被用于解决旅行商问题(Travelling Salesman Problem, TSP), 在其他领域中各类优化问题上也逐渐得到了应用, 并取得了显著的应用效果^[2]。但是蚁群算法存在容易进入局部最优、搜索最优路径时间过长以及寻找最优路径的收敛速度慢等不足之处, 不利于高效率、高精度的求解优化问题。Marco Dorigo和Thomas Stutzle等^[2-3]针对蚁群算法的不足之处做了大量的研究工作, 为能够更有效的解决不同领域不同特征的优化问题, 提出了精英蚁群优化算法、最大最小蚂蚁系统等多种改进策略^[4]。本文对蚁群算法的寻优过程、原理和蚁群算法的应用等进行了概括, 最后对全文加以总结。

2 蚁群算法基本原理及模型

2.1 蚁群算法的基本原理

真实的蚂蚁个体是一类具有随机行为的简单个体, 但其组成的群体具有较强的自组织性和智能性, 使蚂蚁能够在觅食过程中快速找到蚁巢到食物源的最短路线。依据真实蚂蚁的觅食特点抽象出的人工蚂蚁在随机搜索自身周围环境时, 当遇到一个从未经过的交叉路口后, 人工蚁会从其余未经过的路径中随机选择一条继续搜索, 同时在路径上遗留具有挥发的特殊性物质——信息素。在搜寻最短路径的过程中蚂蚁走过的路径长度越短, 留在路径上的信息素就会越多, 影响该路径周围环境中其他蚂蚁选择该路径的概率就越大; 反之, 对该路径周围的蚂蚁的

影响力就越小。当后来蚂蚁经过此路口时, 对具有信息素浓度较大的路径选择概率就越大, 即在寻找路径的过程中蚁群个体之间的协作形成了一种正反馈机制。最终最短路径上积累的信息素越来越多, 其余路径上的信息素随时间的推移不断挥发, 信息素对指导蚁群搜寻蚁巢和食物源之间最优或是接近最优的路径具有决定性作用。可见, 蚁群个体之间通过感知路径上的信息素形成的这种间接的交流方式, 是蚁群能够快速找到蚁巢到食物源的最短路径的关键所在。

2.2 蚁群算法的基本模型

蚁群个体之间通过信息素间接进行信息交流, 由简单的蚂蚁个体组成的集体能够完成单个蚂蚁难以完成的一些复杂工作。基本蚁群算法的数学模型通过对n个城市的经典TSP问题^[5]分析给出。

(1) n个城市的经典TSP问题, 是人工蚂蚁从n个城市任选一个为起始城市, 开始随机访问下一个城市且对其余城市仅访问一次, 最终回到起始城市, 最终目的是寻找一条最短的访问路线。人工蚂蚁在寻优过程中, 依据不同路径上信息量以及启发式信息等来计算状态转移概率^[3]如(1)式:

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

$p_{ij}^k(t)$ 表示在t时刻蚂蚁k由元素(城市)i转移到元素(城市)j的转移概率; α 和 β 分别表示信息素和启发式信息在蚁群搜索路径过程的相对重要程度; $\tau_{ij}(t)$ 是t时刻城市i与城市j之间路径上的信息量; 这里用禁忌表 $tabu_k(k=1, 2, \dots, m)$ 来记录第k只蚂蚁当前已经走过的元素(城市)集合, 说明式(1)不会再次选择禁忌表中的元素(城市), 保证了求解最优路径选择的合法性。

(2) 为了使蚂蚁在遍历所有的元素(城市)之后, 留下的信息素所含信息的有效性, 就要对遗留的信息素进行更新处理。一般选用Ant-Cycle模型来更新信息素, 由此t+n时刻在城市i与城市j之间路径上的信息量可按式(2)进行更新:

【第一作者】肖艳秋(1980-), 男, 河南开封人, 副教授, 博士, 研究方向: 数字化设计与制造、车联网。

【通讯作者】焦建强(1988-), 男, 河南商丘人, 在读硕士研究生, 研究方向: 数字化设计与制造、优化调度。

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \\ \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ 表示信息素挥发系数, 则 $1-\rho$ 表示信息素残留因子; $\tau_{ij}(t)$ 表示本次循环中城市 i 与城市 j 之间路径上的信息量; 初始时刻 $\tau_{ij}(0) = 0$; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在城市 i 与城市 j 之间路径上的信息量。

3 蚁群算法的改进

蚁群算法应用越来越受到国内外学者的青睐, 不仅在离散型组合优化问题方面取得了不菲的应用效果, 同时最近几年随着该算法的不断完善与改进在求解连续型优化问题时也取得了显著的应用效果。蚁群算法的改进方式和策略也随着解决不同边界、不同学科以及不同领域的各种问题, 学者们提出了大量的改进方式与策略, 依据蚁群算法求解问题的基本模型和流程, 为能够加快蚁群算法收敛速度、提高算法的运行性能、避免局部最优和提高全局搜索能力等, 主要的改进策略主要有三方面: **蚁群算法的信息素更新策略改进、路径的选择策略改进、蚁群算法与其他算法的融合。**

3.1 蚁群算法的信息素改进策略

为提高蚁群算法的收敛速度和算法运行性能, **适当的改进信息素的更新策略**, 已经成为探索研究蚁群算法中的一项要课题。文献^[6]提出了一种采用更新局部信息素策略的修正蚁群算法(ACS), 能够提高未经访问的路径被选的概率和加强算法的全局搜索能力; 应用空间全局信息素更新策略, 加强已获得局部最优路径上的信息素的浓度, 以致于能够增强算法的正反馈作用以及加快算法的收敛速度。

文献^[7]针对连续域问题, 为提高搜索全局最优解和收敛速度的能力, 以及平衡收敛速与收敛速度, 提出了一种自适应调整信息素挥发的解更新方式与信息分享机制的改进蚁群算法。首先是为避免通过式高斯函数取样时得不到新解而进入局部最优, 对高斯函数的均值位置移动增加搜索范围, 所以获得的新候选解 $x_{ij}^{new} = \rho\mu_{ij} + ran\,dn \times \sigma_{ij}$; 为充分利用全局最优解的分享机制获得的最优候选解的形式为(3)。

$$x_{ij}^{new} = \rho\mu_{ij} + \xi \times [(1-\eta) \times \sigma_{ij}^1 \times ran\,dn + \eta \times \sigma_{ij}^2 \times ran\,dn] \quad (3)$$

信息素的改进还有其他方式, 例如, 最大最小蚂蚁系统中算法只增加每一次循环中找到的最优路径上的信息素^[8]; 先使局部最优路径上的信息素随着路径长度减少而增大, 后强化全局中本次迭代的最小路径的信息素更新策略^[9]等。信息素的更新策略作为蚁群算法的核心组成部分^[10], 在整个算法的寻优过程起着不可忽视的作用, 指导整个蚁群中所有蚂蚁个体对路径的搜索行为, 为能够有效的应用蚁群算法解决优化问题, 不断改进与完善信息素的更新策略、变化机制必不可少。

3.2 路径选择策略的改进

合理的改进蚁群算法在寻优过程中路径的选择策略, 有利于减小蚁群算法易陷入局部最优的可能性, 以及有利于提高算法的性能。修正的蚁群算法^[6]使用一种改进的路径选择策略来指导蚂蚁最初阶段的寻优, 能够快速找到可接受的有效解, 并且积累系统当前的信息状态, 该算法能够有效提高算法的收敛速

度并且使算法具有一定的随机操作, 有利于提高蚁群算法的性能。

文献^[11]为使蚁群中蚂蚁个体在搜索路径时具有较强的平衡能力, 以迭代次数的中间值为临界, 启发式因子和期望启发式因子随迭代次数的增加而随之变化的自适应调整策略如式(4); 以及为减少搜索过程中的无效路径, 将分别分配在起点和终点蚂蚁同时进行搜索。该算法能够有效提高搜索最优路径的有效性、蚂蚁个体之间的协作能力及搜索成功路径的概率。

$$(\alpha, \beta) = \begin{cases} a = \begin{cases} 4N/N_{mid}, & 1 \leq N \leq N_{mid} \\ 4, & N_{mid} \leq N \leq N_{max} \end{cases} \\ \beta = \begin{cases} (3N_{mid} - N)/N_{mid}, & 1 \leq N \leq N_{mid} \\ 2, & N_{mid} \leq N \leq N_{max} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

文献^[12]为能够更好的解决复杂环境下机器人路径规划问题, 引入一种新的动态搜索诱导算子进行路径选择; 文献^[13]设计了一种加快算法收敛速度和缩短搜索时间的近邻路径选择策略; 文献^[14]则在搜索过程中将确定性选择、随机选择与动态调整策略结合。算法中路径选择策略的改进可以让选择的随机性增强、选择的范围更广、不会轻易地过早停滞而进入局部最优的情况。

3.3 蚁群算法与其他算法的融合

蚁群算法的并行性和优良的分布式计算能力, 使蚁群算法与其他算法容易结合, 改进后的混合算法在搜索最优路径的过程中能够同时兼顾全局和局部, 改善蚁群算法的不足, 进行优势互补, 提高算法对优化问题求解的整体性能。从蚁群算法提出至今, 已经对蚁群算法与遗传算法、粒子群算法以及神经网络算法等算法的结合进行了研究^[15]和应用。

文献^[16]提出了一种利用遗传算法较强的全局搜索能力以及结合蚁群算法的反馈机制的改进算法。应用遗传算法能够进行交叉和变异的能力, 在满足一定的条件下对蚂蚁群体进行交叉变异操作得到新的种群, 该新种群作为蚁群算法的初始种群对配电网状态进行精细估计, 能够更准确的反应配电网状态。

文献^[17]提出了蚁群算法与粒子群算法综合应用的混合算法, 混合算法能够更准确更高效地求解供应链合作伙伴选择的问题。利用粒子群算法较强的全局随机搜索能力, 首先根据供应链连接弧上的初始信息素, 作为构建蚁群算法的部分初始化信息素矩阵, 然后蚁群算法进行初始处理后去求解问题, 筛选供应链中选择合作伙伴问题中的劣质解。

随着对蚁群算法与其他算法融合的不断深入研究, 蚁群算法的功能更强大、应用领域更广阔、能够解决更多优化领域中的具体问题。能够与蚁群算法融合的算法还包括人工鱼群算法^[18]、模拟退火算法^[19]、人工免疫算法^[20]等。蚁群算法与其他算法的融合使该算法的研究不论是广度还是深度都有了长足的发展, 应用范围也在不断拓展, 伴随着算法的发展, 蚁群算法与其它算法的综合应用研究有广阔的前景。

4 蚁群算法的应用

随着对蚁群算法的理论和实际应用的研究不断深入, 蚁群算法从开始应用于求解经典的 TSP 问题^[5], 到求解各领域的优化问题以及具有不同边界条件的优化问题, 例如, 车辆路径问题

(vehicle routing problem, VRP)、生产调度问题(Product Scheduling Problem, PSP)、图像处理、机器人路径规划、**聚类问题**以及**网络路由等**,并且取得了不菲的应用成果。蚁群算法作为一种新型的随机启发式寻优算法,为求解优化问题开辟了新途径,下文介绍蚁群算法在不同领域的具体应用。

4.1 蚁群算法在VRP的应用

VRP在这个发展迅速、资源快速消耗、有限资源内最大利益化的时代里,已成学术界重点关注的问题,更是亟待能够有效解决此类的路径优化问题。VRP是Dantzig和Ramser^[21]等在20世纪60年代末提出的,其目的是在一定的限制条件下,制定出满足客户需求的合理车辆行驶路径。在求解优化领域中研究热点之一的VRP的诸多算法中,刚兴起不久的蚁群算法在求解VRP上逐渐得到了有效的应用。

文献^[22]对蚁群优化算法改进后用于应急救援车辆的路径规划,因时间是险情发生过程中应急救援考虑的关键因素,所以在路径构建策略时引入了时间因素;为使全局信息素在权重不断变化的情况下更新合理,同时应用精英策略的更新信息素和限制信息素范围的最大最小蚂蚁系统算法思想,有利于避免算法容易进入局部最优的局面和过早收敛的情况。

文献^[23]中在给定的时间周期内,以一定的服务频率满足客户的需求,制定满足客户需求的合理服务路径问题,针对此问题提出了一种改进的蚁群算法。该算法把奖惩机制添加到蚂蚁选择下一路径的转移概率中,并且采用基于2-opt算法的线路内与线路间先后两阶段的局部优化策略,该文献通过经典实例证明改进后的算法能够提高全局搜索以及跳出局部最优的能力。

文献^[24]针对求解VRP提出了自适应的改进蚁群算法,该算法是以求解TSP的蚁群算法为基础的,在考虑车辆线路规划实际需求的同时还考虑现实中车辆遇到的各种各样的外界因素,结合自适应转移策略和融合节约法^[24]对算法的转移规则、信息素更新规则做进一步的改进,以克服基本蚁群算法计算时间过长、容易陷入局部最优而过早停滞等不足。

VRP作为组合优化领域中更接近于实际情况的研究课题,蚁群算法在VRP领域中应用空间越来越广阔,例如,物流配送的VRP^[25];同时进行提货和送货的VRP^[26];以及多目标时间窗VRP^[27]等。把蚁群算法有效的应用在VRP上,有利于解决车辆路径优化问题,对合理分配车辆资源、提高工作效率以及缓解交通压力有重要的研究意义。

4.2 蚁群算法在PSP中的应用

PSP^[28]是一种在实际情况的限制下,以完成生产工作所需时间最短、成本最低、资源最少等标准,对具体的操作顺序进行合理布置的问题,对蚁群算法求解具有高度复杂特性的生产调度问题的研究工作已经引起了国内外学者的广泛关注。

文献^[29]针对多目标柔性车间调度问题,提出了一种两阶段的分层Pareto优化框架的改进蚁群算法。首先第一阶段结合GT算法排产规则评估等将全局最优解分配到精英历史档案中,以及第二阶段使用第一阶段的精英档案进行第二阶段的计算,能够通过大量的过滤算法去除较差的分配解。

文献^[30]提出了基于蚁群算法的重新调度方法,求解具有不确定时间动态混合流程车间的PSP。一方面是通过限制蚂蚁运动范围,压缩可用路线的策略,以缩短蚂蚁对新方案的搜索周

期;另一方面状态转移的可能性启蒙功能更便于探索低浓度信息素的路径,提高全局的搜索能力及算法的性能。

文献^[31]针对流程工业生产调度问题的连续、实时、复杂等特性,提出适用解决此类问题的连续域蚁群算法。该算法利用连续域网格对问题进行建模,采用缩小范围的重新划分方法,引入最大-最小蚂蚁系统算法思想以及估算产值的方法,该文献通过算例验证了能够提高该算法的求解精度,同时保证了算法的收敛速度和解的可行性。

蚁群算法在生产调度领域中更多问题上得到了应用,例如求解满足不同客户需求的智能制造下的动态生产调度问题^[32];批量混合流水线的生产调度^[33];单起重机多生产两阶段的生产调度^[34]等。PSP作为优化领域的一项重要研究内容,因蚁群算法本身具有的特点已经成为求解PSP的有效算法之一,随着蚁群算法的不断发展,在PSP上的应用将更加广泛。

4.3 蚁群算法在图像处理中的应用

图像处理是对一副质量相对比较差的可视图像,采取的一系列方法提取其高质量图像信息的技术,其中分割法、邻域平均法、阈值平均法等传统的方法对图像背景的复杂性、目标特征的多样性和噪声影响等问题难以克服,而由于蚁群算法具有离散性、并行性等特点,比较适用于求解此类复杂的图像处理问题,例如图像特征提取、图像分割、图像修复、图像边缘检测等。

文献^[35]根据蚁群算法的全局智能化搜索能力以及自适应性,提出了一种对海面图像特征提取的新型蚁群算法,该算法首先是把蚂蚁群体按不同的限制条件分为多个不同种类的蚁群,然后让这些不同种类的蚂蚁群体寻找到其相对应的觅食区(不同特征的数据类聚中心)的觅食过程,能够提高蚁群算法对海面图像特征的识别率。

文献^[36]提出了将蚁群算法应用于图像分割中,该算法基于数字图像的离散性以及蚁群算法的模糊聚类能力,引入基于统计学和人工参与的方法查找聚类中心,对彩色图像分割具有较好的效果。

文献^[37]针对图像恢复问题提出的集成遗传算法的混合蚁群算法。该算法将遗传算法的最优群体信息,转变成蚁群算法最初阶段的信息素浓度矩阵,并用该矩阵对退化函数的参数进行计算,最终获得精确估计的原始图像,以达到克服噪声影响的目的、提高视觉效果。

蚁群算法在图像处理领域中还有其他的应用,例如,为保证铁路正常的运行必须对轨道表面进行图像检测处理^[38];遥感图像分类问题^[39];以及变电站中隔离开关的运行状态问题^[40]等。由于蚁群算法的发展年限比较短,在理论或是模型上的研究都没有遗传、粒子群和神经网络等其他智能算法成熟,对蚁群算法的研究随着科学的进步也不断深入和完善^[41,42]。

5 结束语

蚁群算法作为一种新型的仿生启发式算法受到了越来越多的学者关注,并且逐渐成为一项重要的研究课题,但蚁群算法,为了能够解决实际的优化问题蚁群算法的各种改进策略也不断被学者提出,蚁群算法的模型也越来越丰富和完善。文中通过对自然蚁群觅食的行为、基本原理和基本模型的简要概括,以及其在各领域优化问题上的应用,表明随着社会的进步蚁群算法

理论研究的不断深入、实际应用也会越来越广泛。因为蚁群算法依旧存在着很多的不足之处,因此,无论是蚁群算法的理论、模型、改进策略等各方面都是一个长久的研究内容,未来蚁群算法在各个领域将会展现出强大的生命力和具有更为广阔的发展前途。

参考文献

- [1]李智.智能优化算法研究及应用展望[J].武汉轻工大学学报,2016,35(4):1-9.
- [2]Dorigo M,Maniezzo V,Colormi A.Positive Feedback as a Search Strategy[J].Technical Report,1991:91-016.
- [3]段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展[J].控制与决策,2004,19(12):1321-1326.
- [4]Maniezzo V,Gambardella L M, Luigi F D. Ant colony optimization. New Optimization Techniques in Engineering[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2004:422-423.
- [5]黎高海,冯博琴,朱利.智能优化算法求解TSP问题[J].控制与决策,2006,21(3):241-247.
- [6]Dorigo M,Gambardella L M.Ant colony system:A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J].IEEE Transon Evolutionary Computation,1997,1(1):53-56.
- [7]周焱,葛洪伟,苏树智.基于信息素的自适应连续域混合蚁群算法[J].计算机工程与应用,2017,53(6):156-161.
- [8]刘霞,杨超.最小-最大车辆路径问题的蚁群算法[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2012,13(3):336-341.
- [9]赵伟,蔡兴盛,曲慧雁.一种基于惩罚函数和新信息素更新方式的蚁群算法[J].计算机工程与科学,2013,35(3):103-107.
- [10]李洋,刘艳娜.蚁群算法信息素更新方式的评价研究[J].科技创新与生产力,2016(3):65-67.
- [11]吴天羿,许继恒,刘建永,等.多策略蚁群算法求解越野路径规划[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2014,15(2):158-164.
- [12]游晓明,刘升,吕金秋.一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用[J].控制与决策,2017,32(3):552-556.
- [13]陶利民,郭俊恩.带有近邻选择策略和遗传算子的蚁群算法[J].微电子学与计算机,2010,27(4):179-181.
- [14]刘闻.蚁群算法及其应用研究[D].北京邮电大学,2013:24-33.
- [15]倪庆剑,张志政.蚁群算法及其应用研究进展[J].计算机应用与软件,2008,25(8):12-16.
- [16]张纯,王立斌.遗传-蚁群算法的配电网状态估计[J].现代电子技术,2016,39(19):165-168.
- [17]卢志刚,申康.基于粒子群蚁群算法的供应链合作伙伴选择研究[J].计算机工程与科学,2016(5):946-953.
- [18]Fei T, Zhang L, Chen L, et al. A Fish Swarm Ant Colony Algorithm for the Vehicle Routing Problem[J]. International Journal of Simulation -- Systems, Science & Techno, 2016:1473-8031.
- [19]Liu K, Zhang M. Path Planning Based on Simulated Annealing Ant Colony Algorithm[C].International Symposium on Computational Intelligence and Design,2016:461-466.
- [20]Wang T,Dong S,Wu S,et al.Numerical simulation of hydrocarbon migration in tight reservoir based on Artificial Immune Ant Colony Algorithm: A case of the Chang 8 1, reservoir of the Triassic Yanchang Formation in the Huaqing area, Ordos Basin, China[J].Marine & Petroleum Geology, 2016,78:17-29.
- [21]Dantzig GB, Ramser J H. The Truck Dispatching Problem[J].Management Science,1959,6(1):80-91.
- [22]李紫瑶.应急救援车辆路径寻优——基于多目标改进蚁群算法[J].技术经济与管理研究,2011(9):7-10.
- [23]蔡婉君,王晨宇,于滨,等.改进蚁群算法优化周期性车辆路径问题[J].运筹与管理,2014(5):70-77.
- [24]邵晓红,李璐.改进节约法下的物流配送路径优化问题[J].辽宁工程技术大学学报,2016(6):667-672.
- [25]张家善.基于改进蚁群算法的物流配送车辆路径优化研究[D].辽宁工程技术大学,2014.
- [26]Kalayci C B, Kaya C. An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery[J]. Expert Systems with Applications,2016,66:163-175.
- [27]刘云,张惠珍.多目标带时间窗的车辆路径问题的单亲遗传混合蚁群算法[J].公路交通科技,2016,33(6):95-100.
- [28]高立青,王延章,徐喜荣.基于最短时间碎片的在线生产调度算法研究[J].系统工程理论与实践,2015,35(12):3074-3082.
- [29]赵博逸,高建民,陈琨.求解多目标柔性作业车间调度问题的两阶段混合 Pareto 蚁群算法[J].西安交通大学学报,2016,50(7):145-151.
- [30]Qin W,Zhang J,Song D.An improved ant colony algorithm for dynamic hybrid flow shop scheduling with uncertain processing time[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2017:1-14..
- [31]赵澄,王万良,徐新黎.基于蚁群算法的带中间存储的流程工业生产调度研究[J].高校化学工程学报,2013(5):872-876.
- [32]颜颂涛,石宇强,陈柏志.智能制造下的个性化定制动态生产调度[J].西南科技大学学报,2017,32(2):84-89.
- [33]刘洋洋,王华昌,李建军.基于遗传蚁群算法的批量塑件混合流水生产调度研究[J].模具工业,2013,39(5):9-13.
- [34]Hindi K S, Fleszar K. A constraint propagation heuristic for the single-hoist, multiple-products scheduling problem[J].Computers & Industrial Engineering,2004,47(1):91-101.
- [35]郭革.蚁群算法在海面图像识别系统中的应用[J].舰船科学技术,2015(4):215-218.
- [36]Lu C, Yang X, Qi S. Color image segmentation based on the ant colony algorithm[C].International Congress on Image and Signal Processing,2015:438-442.
- [37]Feng Y, Lu H, Zeng X. Image Restoration Based on Hybrid Ant Colony Algorithm[J].2015,13(4):1298.
- [38]汪炫紫,孙究坤,高飞.轨道表面图像处理算法研究[J].计算机技术与发展,2015(9):182-186.
- [39]Wang M, Wan Y, Ye Z, et al. Remote sensing image classification based on the optimal support vector machine and modified binary coded ant colony optimization algorithm[J].Information Sciences, 2017,402:50-68.
- [40]赵锐,尚文,王桐,等.基于图像处理的变电站中隔离开关的状态研究[J].计算机测量与控制,2016,24(10):240-241.
- [41]张小莉,闫宏印,徐秋菊.基于改进蚁群算法的阈值医学图像分割[J].北京交通大学学报,2016,40(5):40-44.
- [42]Zhang C, Peng H. Image edge detection based on hybrid ant colony algorithm[J].Scientific Bulletin of National Mining University,2016:138-143.