

考虑结晶器在线调宽浇次计划的改进蚁群算法

李毅仁^{1,2} 王柏琳^{1,2} 袁帅鹏^{1,2*} 李铁克^{1,2} 王阳^{1,2}

1.北京科技大学经济管理学院,北京,100083

2.钢铁生产制造执行系统技术教育部工程研究中心,北京,100083

摘要:针对炼钢-连铸调度中的浇次计划编制问题,结合结晶器在线调宽技术,以最小化加权成本(包括浇次间炉次切换成本、连铸机停机成本和结晶器在线调宽成本)为目标对传统模型进行改进,建立了新的浇次计划编制模型。同时,借鉴车辆路径问题的优化思路构建了改进的蚁群算法,算法设计了节点排序规则和节点选择规则,并引入奖惩因子和分位参数提高搜索广度和适应性。最后,利用实际生产数据验证了模型及算法的有效性。

关键词:炼钢-连铸;浇次计划;蚁群算法;车辆路径问题;奖惩因子

中图分类号:TP391.9

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An Improved Ant Colony Algorithm for Cast Plan Considering Online-width-adjustment Technology of Crystallizers

LI Yiren^{1,2} WANG Bailin^{1,2} YUAN Shuaipeng^{1,2*} LI Tieke^{1,2} WANG Yang^{1,2}

1.School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083

2.Engineering Research Center of MES Technology for Iron & Steel Production Ministry of Education, Beijing, 100083

Abstract: Aiming at the problems of cast planning in steelmaking-continuous casting scheduling, integrating the online width adjustment technology for the mold, with the objective of minimizing the weighted cost (including the furnace switching cost between heats, downtime cost for the continuous caster, and the online width adjustment cost for the mold), the traditional model was improved, resulting in the development of a new cast planning model. Meanwhile, inspired by the optimization approach used in the vehicle routing problem, an improved ant colony algorithm was proposed. The algorithm included node sorting and selection rules, and the reward-punishment factors and quantile parameters were incorporated to enhance the search breadth and adaptability. Finally, the effectiveness of the proposed model and algorithm were validated by using real production data.

Key words: steelmaking-continuous casting; cast plan; ant colony algorithm; vehicle routing problem; reward and punishment factor

0 引言

钢铁工业是制造强国建设的重要基石。炼钢-连铸作为钢铁生产的核心阶段,其作业计划和调度方案的优劣对企业提质增效至关重要。在炼钢-连铸生产过程中,高温钢水需以炉次为单位组织生产和调度^[1]。其中,浇次计划是在满足工艺约束和交货期要求的前提下,尽可能将多炉次组合成一个浇次进行连续浇铸,并确定各个浇次内炉次的加工顺序,使得浇次数量、连浇的炉次间惩罚费用及未被选炉次最少^[2]。深入研究浇次计划的编制问题对优化钢铁生产过程、提高生产效率具

有极其重要的实用价值^[3]。

浇次计划编制问题的研究主要分为两大类:一是在已知浇次数量的前提下,以炉次间产生的成本最低为目标;二是在浇次数未知的前提下,以最小浇次数为目标。针对第一类问题,唐立新等^[4]在假设炉次全部组浇的基础上,构建了以炉次间惩罚费用最小为目标的最优浇次计划模型,并用遗传算法进行求解。WANG等^[5]以最大化铸机生产效率和相邻板坯尺寸变化的惩罚值为目标,构建了多目标混合整数线性规划模型,提出了一种嵌套变邻域搜索的快速非支配排序遗传算法。崔志华等^[6]在浇次数已知的前提下,以炉次差异产生的成本最小为目标构造了数学模型,并设计了基于禁忌搜索的遗传算法。薛云灿等^[7]将

收稿日期:2024-04-23

基金项目:国家自然科学基金(72301026, 71701016);教育部社科研究基金规划项目(23YJA630090)

浇次计划编制问题转化为旅行商问题,以惩罚费用最小为目标构建了一种改进的粒子群算法。针对第二类问题,SOO等^[8]针对板坯在连铸机上的批次分组问题构建了以最小浇次数为目标的整数规划模型,并采用列生成方法进行求解。李岩等^[9]在已有研究的基础上增加了板坯厚度和交货期约束,以浇次数量最小为目标构建了浇次计划模型,并通过仿真软件进行了求解。唐立新等^[10]在浇次数未知的基础上,以炉次间总惩罚费用、连铸机开浇费用和炉次未排入计划的惩罚费用总和最小为目标构建了浇次计划优化模型,并设计了启发式算法进行求解。李崇等^[11]以惩罚费用最小为目标分别建立了订单分组模型和浇次排序模型,并设计了二阶段启发式算法对问题进行求解。易剑等^[12]针对连铸计划中的组中间包问题,以最小化中间包数、宽度变化次数和钢种交接次数为目标构建了优化模型,并提出了一种混合优化算法。针对类似的问题,杨凡等^[13]构建了混合启发式-交叉熵算法对问题进行了求解。

上述文献均假定同一浇次内的铸坯宽度为定制,不能在线调整。对于考虑宽度柔性的浇次计划编制问题,相关研究报道很少。马天牧等^[14]在连铸工艺生产的基础上,以总惩罚费用最小为目标建立了基于宽度柔性的连浇计划模型,并设计了两层蚁群算法。杨凡等^[15]同样考虑了炉次宽度柔性,且基于分解策略对问题进行求解。刘超等^[16]将浇次计划编制问题抽象为带约束条件的背包装载问题,建立了一体化生产计划排程的模型体系。

综上,目前对考虑在线调宽技术浇次计划编制问题的研究尚不充分,致使已有理论成果在实际的生产管理中存在较大的局限性^[17]。为此,本文针对考虑在线调宽的浇次计划编制问题展开研究,以加权成本最小为目标构建了混合整数规划模型,并将模型转化为一类特殊的车辆路径问题(vehicle routing problem,VRP)。根据问题特点设计了改进的蚁群优化算法,算法集成了炉次排序规则、基于序号的节点转移规则和改进迭代策略,并通过对比实验对算法有效性进行了验证。

1 问题描述

浇次计划在炉次计划和交货期信息已知的情况下根据工艺需求对炉次进行组合,并确定各浇次包含的炉次集合及浇铸顺序。浇次计划编制涉及的工艺约束如下:①不同炉次之间的钢级相同或相近;②板坯厚度必须一致;③板坯宽度在一定

范围内变化;④如果不同宽度的炉次组成同一浇次,则宽度需按非增顺序排列且变化不能太大;⑤浇次中炉次的大小受中间包寿命影响;⑥炉次间的交货期相近。但是,结晶器调宽作业通常采用离线手动和结晶器在线冷态调宽,前者在维修区域进行,后者则需要连铸机停浇后才能调整结晶器尺寸,因此,约束③提到的宽度变化在实际生产中往往是严格控制、不能改变的,对应到浇次计划模型中会严格限定在同一浇次内的炉次应具有相同宽度。

结晶器在线热调宽技术是世界板坯连铸领域中的一项核心技术,可以在浇铸状态下在线改变浇铸板坯的宽度,以满足生产多种规格铸坯的需要,这为多品种的批量化集中生产提供了有效途径^[17]。对于结晶器在线调宽,同一浇次内需要考虑炉次宽度变化次数和宽度变化范围两个约束,此外,在线调宽可以有效优化停机成本、减少浇次数量,合理的浇次计划可以进一步强化这种优化效果,因此,在考虑结晶器在线热调宽技术的应用后,浇次计划编制问题的约束和优化目标都产生了新的变化。

2 考虑在线调宽的浇次计划模型

2.1 符号定义

为便于本文模型的建立,表1列出了相关参数和变量。

表1 参数定义

Tab.1 Parameter definition

符号	含义
i, j	炉次编号, $i, j = 1, 2, \dots, I, I$ 为炉次总数
n	浇次编号, $n = 1, 2, \dots, N, N$ 为浇次总数
I_n	浇次 n 内炉次的数量
s_i	炉次 i 的钢级
w_i	炉次 i 的宽度
d_i	炉次 i 的交货期
C_{\max}^r	同浇次内结晶器在线调宽的最大次数
W_{\max}	同浇次内结晶器在线调宽的最大宽度变化
C_{ij}^s	相邻炉次 i 和 j 之间钢级变化的成本
C_{ij}^d	相邻炉次 i 和 j 之间交货期差异的成本
C_{ij}^w	相邻炉次 i 和 j 之间宽度变化的成本
w_s	钢级变化产生的成本的权重
w_d	交货期差异产生的成本的权重
a	开工成本系数
b	调宽成本系数
F_s	同一序列内不同钢种切换的成本
F_{d1}	相邻板坯宽度由大至小变化的切换成本
F_{d2}	相邻板坯宽度由小至大变化的切换成本
$X_{i,j}$	0-1 决策变量,若炉次 i 和 j 在同一个浇次且 j 是 i 的紧后炉次则为 1; 否则, 为 0
C_n^w	浇次 n 内所有炉次宽度变化次数

2.2 问题模型

本节建立了考虑结晶器在线调宽的浇次计划模型,其表达式如下:

$$\min f = \sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^I (\omega_s C_{ij}^s + \omega_d C_{ij}^d + C_{ij}^w) X_{i,j} + aN + b \sum_{n=1}^N C_n^r \quad (1)$$

约束条件如下:

$$\sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^I X_{i,j} \leq 1 \quad (2)$$

$$X_{i,j} + X_{j,i} \leq 1 \quad (3)$$

$$C_n^r = \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{j=1}^{I_n} ((\omega_i - \omega_j) X_{i,j} > 0) \leq C_{\max}^r \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N I_n \leq I \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{I_n} \sum_{j=1}^{I_n} |\omega_i - \omega_j| \leq W_{\max} \quad (6)$$

$$C_{ij}^s = \begin{cases} 0 & s_i = s_j \\ F_s & s_i \text{ 和 } s_j \text{ 处于同一序列} \\ \infty & s_i \text{ 和 } s_j \text{ 不在一个序列} \end{cases} \quad (7)$$

$$C_{ij}^d = \begin{cases} F_{d1} (d_i - d_j) & d_i \geq d_j \\ F_{d2} (d_i - d_j) & d_i < d_j \end{cases} \quad (8)$$

$$C_{ij}^w = \begin{cases} 0 & \omega_i \geq \omega_j \\ \infty & \omega_i < \omega_j \end{cases} \quad (9)$$

式(1)为目标函数,即最小化加权成本,包括浇次间炉次切换成本、连铸机停机成本和结晶器在线调宽成本;式(2)和式(3)为炉次顺序约束,即每个炉次的前后仅有一个相邻炉次,并且相邻的炉次也是有顺序的;式(4)为浇次内调宽约束,表示组成的浇次内宽度变化小于结晶器在线调宽最大限制;式(5)为浇次组成约束,表示组成的浇次内炉次数要在中间包寿命约束下小于最大炉次数;式(6)为组浇内宽度变化范围;式(7)为钢级变化成本,当同一浇次内相邻两个炉次钢级不同且在同一序列时产生的成本为 F_s ;式(8)为交货期约束成本;式(9)定义了同浇次内结晶器在线调宽的变化成本,当宽度非增变化时,变化成本为 0,否则将其成本设为无穷大。

2.3 车辆路径问题的转化

由于浇次计划编制问题能够视为一类特殊的车辆路径问题,故本节首先对车辆路径问题进行简单概述:给定一个或多个中心仓库、一个车辆集合和一个顾客集合,每辆车都有自己的容量,顾客在空间任意分布,车从每一个顾客处接受货物送到中心仓库,以满足所有顾客订单下得到的总成本最小为最终目标。

图 1 为节点模拟图,共 I 个节点,每一个节点表示一个顾客(即本文问题中的炉次),中心仓库为虚拟节点 C ,节点 i 到节点 j 的配送成本 c_{ij} 即浇

次内炉次的更换成本;一辆车可以看作是一个浇次,假定车辆数为 m (等价于浇次数 n),浇次组成约束可以看作车辆的容量约束,一辆车的配送路径就是一个浇次内的有序炉次集合,在线调宽可以看作是车辆在运行过程中的一类增加可配送顾客数而产生的成本消耗行为,记为 P 。这样浇次计划编制问题即可转化为一类特殊 VRP 问题,目标为配送成本 F 最小, F 的计算表达式如下:

$$F = \sum c_{ij} + am + bP \quad (10)$$

其中, a 为每个车辆(浇次)的启动成本系数, b 为成本消耗行为(在线调宽)系数。

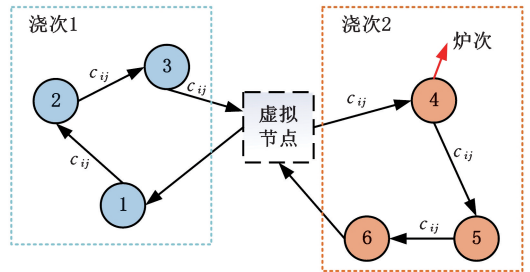


图 1 炉次节点模拟图

Fig.1 Simulated diagram of furnace node

区别于传统的 VRP 问题,由于浇次内炉次宽度存在非增约束,因此节点与节点之间的运输成本不严格对称,即节点 i 到节点 j 的运输成本 c_{ij} 与节点 j 到节点 i 的运输成本 c_{ji} 不一定相同。当节点 i 的炉次宽度小于节点 j 的炉次宽度时, $c_{ij} = \infty$ 。由于中心仓库为虚拟节点,当 i 或 j 为中心仓库时, $c_{ij} = 0$ 。

3 基于邻域搜索的改进蚁群系统

蚁群算法(ant colony optimization, ACO)是一类群智能优化算法,通过模拟蚁群觅食行为实现问题的优化求解^[18]。蚂蚁在觅食时会借助分泌物“信息素”寻找最短路径,信息素会挥发,其浓度与路径长短有关。ACO 设置虚拟蚂蚁对问题进行寻优,蚂蚁各自寻找问题的答案并留下信息素,不断重复,根据信息素浓度越大路径转移概率越大这一原则进行寻优。ACO 通过正反馈进行寻优,具有较强的鲁棒性,在路径规划问题的求解过程中有着巨大的优势^[19]。本节基于 ACO 的优化特点和问题特征知识,设计了特殊觅食规则;为提高前期迭代效率,改进了信息素的更新策略和蚂蚁的状态转移策略;为防止觅食规则影响求解空间导致结果陷入局部最优,在蚁群迭代后对算法的最优解通过 2-sopt 算法进行禁忌搜索,最终形成了改进蚁群系统(improved ant system, IAS),算法流程如图 2 所示。

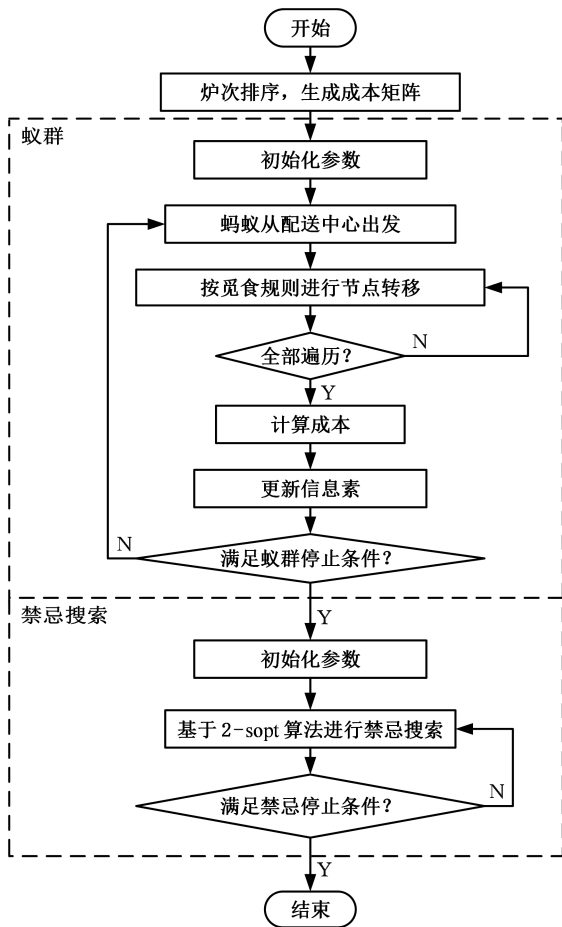


图 2 算法流程图

Fig.2 Flowchart of the algorithm

3.1 浇次计划的编码规则

车辆路径问题为经典的组合优化问题,问题的核心和难点是车和节点的对应关系以及节点的配送顺序(即决策变量 $X_{i,j}$),针对此类特点,本节采用整数编码的方式。蚁群中每只蚂蚁的每一次寻优过程都可得到一个问题的可行解,问题中的 I 个配送节点(炉次)用 I 个不同的整数表示,虚拟中心仓库用 0 表示,这样每一个可行解可以用一个编码长度为 $(N + I + 1)$ 的一维数组来表示。假定浇次总数 N 为 2,客户数 I 为 5(即 5 个炉次)。图 3 给出了一个具体的编码示例,其中 0 表示虚拟节点,两个虚拟节点之间的数组表示一个浇次内炉次的加工顺序。例如,数组 $[1, 3, 5]$ 表示第 1 个浇次内 1 号炉次、3 号炉次和 5 号炉次依次在连铸机浇铸,第 2 个浇次内的炉次同理。

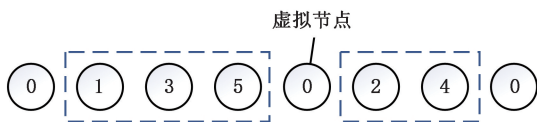


图 3 编码示意图

Fig.3 Encoding diagram

3.2 考虑模型约束的觅食规则

针对本文问题,由于节点间的距离存在非对

称性且同一车辆(浇次)所经过的节点的宽度属性需要呈现非增特性,所以本文在基础的禁忌表下加入特殊的觅食规则从而达到缩小解空间的目的,进而提高求解效率。

3.2.1 炉次排序规则

模型中浇次内炉次的宽度非增变化约束变相减少了问题的可行解,故基于模型中的宽度、钢级和交货期对炉次进行了排序。炉次序号为实数并区别于编码的编号,其中整数部分根据浇次内宽度排序,宽度越大序号越小,宽度相同时序号整数部分相同;对于序号整数位相同的炉次,对炉次的钢级进行不减排序,钢级相同时按交货期进行不减排序,赋予从小到大的小数位序号,三者均相同的炉次赋予相同序号。图 4 为节点排序示意图。

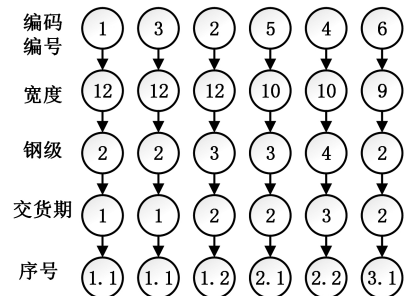


图 4 节点排序示意图

Fig.4 Node sorting diagram

3.2.2 基于序号的节点转移规则

当蚂蚁位于中心节点时,设定蚂蚁向当前炉次序号整数位最小的节点转移。若存在多个满足条件的炉次序号(整数位相同),则随机选取其中一个炉次节点。如图 5 所示,当候选节点序号为 $[1.1, 1.1, 1.2, 2.1, 5.2]$,此时蚂蚁转移到中心节点 0,则下一个节点只在 3 个炉次序号的整数位为 1 的节点中任选一个进行转移。

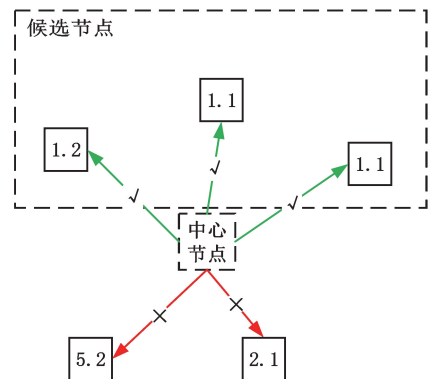


图 5 中心节点转移示意图

Fig.5 Transfer diagram of central node

当蚂蚁位于非中心节点时,设定蚂蚁仅能向比本身炉次序号整数位大(或等于)的节点进行转移。非中心节点的转移示意图见图 6。

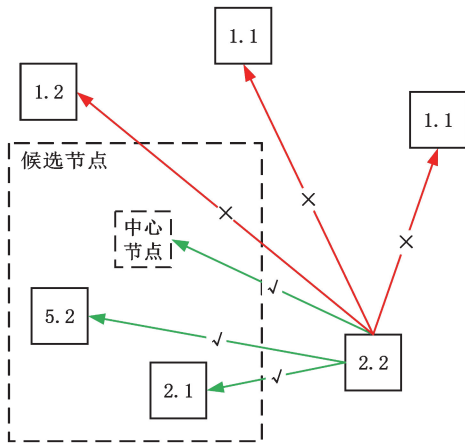


图 6 非中心节点转移示意图

Fig.6 Transfer diagram of non-central node

3.3 信息素更新策略

蚂蚁在走过的路径中会留下蚁群个体均能识别的标记,称之为信息素。信息素是蚂蚁节点转移的基础,也是ACO算法搜索的关键。信息素更新过程中,蚂蚁会依据自己路径的优越性确定信息素的浓度,并且信息素在蚂蚁的寻优过程中会发生挥发。本节算法在信息素的更新过程中借鉴文献[14]对狼群算法奖惩因子的引用,奖惩因子在保留信息素正反馈的前提下加入了信息素的负反馈,从而通过双向反馈加速前期ACO算法的迭代速度;参考交叉熵算法^[10]的分位数参数对所有蚂蚁的路径进行一次筛选,然后对成本特征明显的路径更新信息素。具体规则如下:

在 m 个蚂蚁完成节点转移后,引入分位数 μ_1, μ_2 , 在 m 个路径中选出 $\lceil \mu_1 m \rceil$ ($\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整)个成本最小的路径集合 Ω_{\min} 和 $\lceil \mu_2 m \rceil$ 个成本最大的路径集合 Ω_{\max} , 在集合 Ω_{\min} 和 Ω_{\max} 中信息素的计算表达式如下:

$$\tau_{\min} = \sum_{p \in \Omega_{\min}} (Q/F_p) \quad (11)$$

$$\tau_{\max} = \sum_{p \in \Omega_{\max}} (R/F_p) \quad (12)$$

式中: Q, R 分别为奖励因子和惩罚因子; F_p 为路径 p 的成本; τ_{\min}, τ_{\max} 分别为集合 Ω_{\min} 和 Ω_{\max} 中所有路径的信息素。

对于每次迭代,信息素更新公式如下:

$$\tau(k+1) = \max((1-\rho)\tau(k) + \tau_{\min} - \tau_{\max}, 0) \quad (13)$$

式中: k 为迭代次数; ρ 为信息素挥发速度。

3.4 状态转移策略

状态转移是指蚂蚁在觅食过程中从某一节点转移到下一节点的过程,依据状态转移概率进行转移。状态转移概率由初始转移矩阵和信息素矩阵确定。蚂蚁在节点转移的过程中,为避免在迭代过程中陷入局部最优无法跳出,根据状态转移概率,随机采用轮盘赌和锦标赛两种规则进行转

移。轮盘赌选择法是一种比例选择法,各个节点根据转移概率形成比例,被选择的概率与比例成正比相关,能够使小概率的节点获得被选择的机会;锦标赛选择法是一种贪心选择法,直接选择最大概率的节点进行转移。

根据 3.2 节的觅食规则构建初始状态转移矩阵 \mathbf{P} , \mathbf{P} 中第 i 行第 j 列的元素值 $p_{i,j}$ 计算式如下:

$$p_{i,j} = \begin{cases} 1/c_{ij} & w_i \geq w_j \text{ 且 } i, j \neq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

对于节点 i , 假定其候选节点集合为 J (集合 J 内共 l 个候选节点), 则从节点 i 到候选节点 j ($j \in J$) 的转移概率 x_j 参数的计算公式如下:

$$x_j(k) = \frac{\alpha p_{i,j} \beta \tau(k)}{\sum_{j'=1}^l (\alpha p_{i,j'} \beta \tau(k))} \quad (15)$$

式中: α 为成本权重参数; β 为信息素权重参数; j' 为集合 J 内候选节点的索引。

蚂蚁在中心节点外的节点进行转移时,基于转移概率进行转移。生成随机数 R_a 并与贪心概率 q 进行对比,当 $R_a > q$ 时,按照轮盘赌策略选择节点进行转移;当 $R_a \leq q$ 时,采用锦标赛策略(即贪心策略)选用转移概率最大的节点进行转移。当蚂蚁中心节点外无节点可转移时,则回到中心节点。

3.5 最优解邻域搜索

考虑模型约束的觅食规则虽然在一定程度上缩小了解空间,提高了求解效率,但可能导致求解过程陷入局部最优,因此在蚂蚁觅食结束后对最优解采用 2-sopt 算法进行禁忌搜索,具体搜索方式如下:首先对整数位相同的节点进行 2-sopt 交换,记录禁忌表,并判定候选解内是否有可行解优于最优解,若有则替代最优解,否则,重复迭代直到达到迭代次数或不存在满足交换条件的可行解。图 7 为经典邻域搜索规则 2-sopt 算法的示意图。

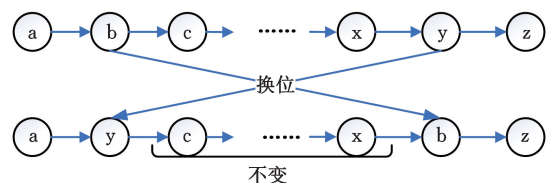


图 7 2-sopt 算法示意图

Fig.7 Schematic diagram of 2-sopt algorithm

3.6 算法步骤

所设计算法的详细步骤如下。

- 1) 根据排序规则将炉次进行排序并赋予节点序号,计算炉次间的成本 c_{ij} ,生成初始状态转移矩阵 \mathbf{P} ;
- 2) 初始化算法参数;

3) 将蚂蚁放入仓库中,基于 3.2 节觅食规则确定候选目的地,并得到各个候选点的转移概率,然后基于 3.4 节状态转移策略进行转移,直到蚂蚁遍历所有节点,生成车辆路径计划;

4) 计算每条路径的成本,将其从小到大排列,基于 3.3 节信息素更新策略选出具有最小成本值的路径;

5) 更新信息素;

6) 判断是否达到最大迭代次数,若达到则转至步骤 7),否则返回步骤 3);

7) 初始化禁忌表,设置禁忌长度 l 和最大禁忌搜索次数 N_{\max}^t ;

8) 通过 2-sopt 算法生成候选解并计算候选解的适应度值,判断是否更新最优解;

9) 判断是否达到最大禁忌搜索次数 N_{\max}^t ,若达到则输出最优解,否则返回步骤 8)。

4 数据实验

4.1 实验设计

为验证本文模型和算法的有效性,本节参考我国某大型钢铁企业炼钢-连铸车间的实际炉次数据,按模型参数对其进行整理,得到以下实验数据:炉次数量 $I = \{40, 60, 80, 100, 120\}$,每个炉次宽度的取值范围为 $[1200, 1650]$ mm,并以 50 mm 为单位进行分布,即 $w_i \in \{1200, 1250, 1300, \dots, 1650\}$ mm;钢级序号 $s_i \in \{1, 2, 3, \dots, 15\}$;交货期 $d_i \in \{5, 6, 7, \dots, 12\}$ d。浇次计划模型参数为: $C_{\max}^r = 5, N = 30, F_s = 5, F_{d1} = 1, F_{d2} = -1, w_s = 0.5, w_d = 0.05, a = 20, b = 1$ 。基于这些数据进行以下实验:① 基于一组 60 个炉次的测试算例验证 IAS 算法的有效性;② 将 IAS 算法与文献[10]中的交叉熵算法(cross entropy, CE)算法、文献[14]中 ACO 算法和文献[15]中的混合算法(hybrid algorithm, HA)进行对比,以此来检验 IAS 算法的优势和不足;③ 将考虑结晶器在线调宽的浇次计划模型与浇次内固定宽度的模型进行对比,以此验证模型的研究意义。

算法代码采用 Python 编写,测试环境为 Intel(R)i5-8265U/8GB, Python 3.7。通过预备实验对算法参数在不同组合水平下进行测试,将每组实验得到的总体目标均值作为响应值(response value, RV),结果如表 2 所示。基于表 2 所示的实验结果,将 IAS 算法的参数设置为:蚂蚁个数 $m = 50$;成本权重参数 $\alpha = 1$;信息素权重参数 $\beta = 2$;信息素挥发速度 $\rho = 0.35$;分位参数 $\mu_1 = \mu_2 = 0.05$;贪心概率 $q = 0.05$;最大迭代次数 $K = 100$;奖励因子 $Q = 15$ 和惩罚因子 $R = 15$ 。

表 2 参数调优实验结果

Tab.2 Results for parameter tuning experiments

序号	α	β	ρ	q	RV
1	1	1	0.15	0.05	135.2
2	1	2	0.15	0.05	136.2
3	2	1	0.15	0.05	137.2
4	2	2	0.15	0.05	136.2
5	1	2	0.25	0.05	137.2
6	1	2	0.35	0.05	134.3
7	1	2	0.45	0.05	135.4
8	1	2	0.35	0.1	136.2
9	1	2	0.35	0.15	142.7
10	1	2	0.35	0.2	151.8
11	1	2	0.35	0.25	151.8
12	1	2	0.35	0.3	154.9

4.2 算法性能实验

本组实验采用一组具有 60 个炉次的算例对算法的效果进行验证,表 3 所示为浇次计划的编制结果,其中 60 个炉次共编制为 7 个浇次,本组实验通过 IAS 算法对原始数据共运行 10 次,运行结果的标准差为 3.4,平均运行时间为 16.94 s,显著缩短了实际生产中基于人工经验的手动编制所用的时间。IAS 算法能够在短时间内得到满足实际生产需要的浇次计划,通过该实验验证了 IAS 算法对问题的求解能力,也展现了在炉次排序规则和基于序号的节点转移规则下对炉次进行组浇的可行性。

表 3 浇次计划编制结果

Tab.3 Results for cast plan

浇次号	炉次顺序
1	29,44
2	13,50,14
3	32,2,39,20,37
4	27,9,24,57,38,40,58,95
5	31,34,55,15,19,49,54,21,60
6	16,18,12,35,11,22,48,5,3,53,42,47,17
7	26,7,10,25,30,1,6,4,46,52,23,28,45,41,43,56,51,8,33,36

表 4 给出了浇次 7 内的炉次顺序结果,可以看出,通过结晶器在线调宽,可使得更多的炉次在同一浇次内,浇次 7 内共进行 5 次调宽,尽管增加了炉次间钢级变化和交货期的成本,但 IAS 算法在宽度约束允许的范围内尽可能地将交货期和钢级相近的炉次进行紧邻排序,并显著降低了连铸机的停机成本,提高了生产效率。

4.3 IAS 对比实验

本文将实验数据分为 5 组不同炉次数的炉次计划,将 IAS 算法与文献中的 CE、ACO 和 HA 算法进行对比分析,3 种对比算法均采用原文中的参数值设置。对于每组算例,设定 4 种算法的最大运行时间均为 $(20+I)s$,其值由一个基数和

表 4 7 号浇次内炉次结果

Tab.4 Results for furnace number within the 7th caster

炉次顺序	钢级量化值	厚度/mm	宽度/mm	交货期/d
26	7	2.5	1650	5
7	7	2.5	1650	6
10	7	2.5	1650	7
25	7	2.5	1650	7
30	7	2.5	1650	8
1	7	2.5	1550	8
6	6	2.5	1550	6
4	6	2.5	1550	10
46	6	2.5	1550	11
52	6	2.5	1550	11
23	6	2.5	1550	12
28	6	2.5	1500	12
45	6	2.5	1500	11
41	7	2.5	1400	6
43	7	2.5	1400	7
56	7	2.5	1400	7
51	7	2.5	1300	9
8	7	2.5	1200	10
33	7	2.5	1200	10
36	7	2.5	1200	10

表 5 算法结果比较

Tab.5 Comparison of algorithm results

炉次数量	IAS		CE		ACO		HA		ANOVA(显著性水平为 0.05)	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	V_F	V_P
40	134.38	4.71	158.58	4.00	146.13	13.14	142.09	9.97	61.24	6.70×10^{-6}
60	131.81	0.58	136.48	0.35	143.98	6.78	137.81	3.12	28.35	7.32×10^{-4}
80	210.16	4.10	244.52	4.83	238.32	5.67	230.14	8.61	157.56	1.52×10^{-5}
100	246.01	5.06	290.37	10.55	297.85	11.56	273.21	19.25	124.32	2.48×10^{-5}
120	336.86	7.17	449.08	18.94	378.90	13.45	375.13	12.90	141.22	1.79×10^{-4}
平均值	211.84	4.22	255.81	7.78	241.04	10.12	231.68	10.77		

HA(235.68)算法的整体目标函数均值。与本文设计的 IAS 算法相比,3 种比较算法中表现最好的是 HA 算法,其目标函数均值在 5 组实验中相较于 IAS 算法分别增大了 5.73%、4.55%、9.51%、11.06%、17.30%,且随着炉次的增加,IAS 算法的优越性显著提高。主要因为实验数据有着较为相近的钢级导致 HA 算法的启发式效率较低,而 IAS 算法的觅食规则能够体现出较强的优越性,并且正负反馈的协同机制能够将蚂蚁较快地引导到优质的路径中,随着迭代次数的增加迭代效率提高,所以产生的解质量提高。在算法稳定性方面,4 种算法中 IAS 的整体标准差(即 5 组实验中标准差的平均值)为 4.22,同样小于 CE(7.78)、ACO(10.12)和 HA(10.77)算法的整体标准差,具体到每组实验,可以看到只有第 2 组实验($I=60$)中 IAS 算法的标准差(0.58)略大于 CE 算法的标准差(0.35),但考虑到 IAS 算法得到的目标值要更小,因此能够认为 IAS 算法不仅具有更高的求解质量,其稳定性也要优于其他 3 种对比算法。

总炉次数量之和得到。设定适应度函数为 $V_{fit} = C_{sum} + 20N + \sum_{n=1}^N C_n^r$, V_{fit} 为目标函数值, C_{sum} 为浇次内相邻炉次产生的成本总和, $\sum_{n=1}^N C_n^r$ 为所有浇次的调宽总次数。浇次内最大炉次数受各个钢厂的中间包影响,实验将浇次内最大炉次数设为 10。4 种算法目标函数的均值、标准差与以及方差分析(analysis of variance, ANOVA;显著性水平为 0.05)结果见表 5,其中 V_F 值表示不同因子对算法性能的影响程度, V_P 值表示每个因子各水平间是否存在显著差异,当 $V_P \leq 0.05$ 时,表明存在显著性差异,否则,不存在显著性差异。

由表 5 可知,不同炉次下 5 组实验 ANOVA 中的 V_P 值均远小于 0.05,表明 4 种算法的实验结果存在显著性差异。IAS 算法的整体目标函数均值(即 5 组实验中目标函数均值的平均值)为 211.84,远小于 CE(255.81)、ACO(241.04)和

此外,表 6 进一步给出了 IAS 算法和对比算法中表现最好的 HA 算法不同目标函数的结果,其中 V_{fit} 、 C_{sum} 、 N 和 $\sum_{n=1}^N C_n^r$ 为总体均值。由表 6 可知,随着规模的增大,IAS 算法无论是在成本方面还是在浇次数方面都获得了更为满意的解。HA 算法设计的启发式规则主要针对原文问题进行了适配,在适应性和可扩展性方面存在一定的局限性,进而导致其求解效果受到影响。而 IAS 算法通过独特的觅食规则、信息素更新规则和状态转移规则,避免了钢级相近时求解效率不佳的缺点,表现出了较强的鲁棒性。

表 6 目标函数的对比结果

Tab.6 Comparison results of objective functions

炉次数量	IAS				HA			
	V_{fit}	C_{sum}	N	$\sum_{n=1}^N C_n^r$	V_{fit}	C_{sum}	N	$\sum_{n=1}^N C_n^r$
40	134.38	29.78	5	5	142.09	53.18	5	5
60	131.81	2.81	6	9	137.81	4.16	6	9
80	210.16	15.96	9	14	230.14	42.52	9	21
100	246.01	17.61	10	20	273.21	33.87	11	24
120	336.86	72.06	12	25	375.13	132.18	13	29

为进一步检验4种算法在收敛速度方面的差异性,以 $I=40$ 的测试数据为例,随机选取一次实验结果,绘制出了4种算法的收敛曲线(基于前150次迭代次数),结果如图8所示,可以看出,与其他3种对比算法相比,IAS算法的早期的收敛速度非常快,能够以更快的速度搜索到更优解,这得益于IAS算法的初始转移矩阵所带来的一个较好的初始解的优势。在进化的中后期,其他3种对比算法逐步陷入局部收敛的状态,而IAS算法始终维持在较优的位置,这进一步证明了本文所设计IAS算法的有效性。

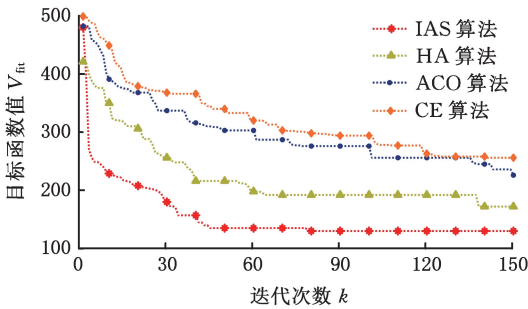


图8 算法收敛曲线

Fig.8 Convergence curves of algorithms

4.4 在线调宽对比实验

本组实验基于第2组实验中实际生产数据提取出的5组炉次数据,将考虑结晶器在线调宽的数学模型与浇次内宽度固定的数学模型进行对比,2个模型均通过IAS算法进行求解,模型参数与第2组实验的设置相同。

表7给出了本组实验2个模型得到的 V_{fit} 、 C_{sum} 、 N 和 $\sum_{n=1}^N C_n^i$ 的总体均值。由表7可知,同样的炉次数据下考虑在线调宽的浇次计划模型能够得到更小的加权成本,说明连铸机在线调宽技术具有一定意义和作用,以及研究考虑连铸机在线调宽的浇次计划编制问题的必要性。

表7 模型结果对比

Tab.7 Comparison of model results

炉次数量	在线调宽				未调宽			
	V_{fit}	C_{sum}	N	$\sum_{n=1}^N C_n^i$	V_{fit}	C_{sum}	N	$\sum_{n=1}^N C_n^i$
40	134.38	29.78	5	5	162.50	2.50	8	0
60	131.81	2.81	6	9	180.15	0.20	9	0
80	210.16	15.96	9	14	302.75	2.77	15	0
100	246.01	17.61	10	20	342.70	2.70	17	0
120	336.86	72.06	12	25	362.80	2.80	18	0

进一步绘制了5组实验目标函数组成部分中的浇次数量和炉次间成本变化的曲线,结果分别如图9和图10所示,可以看出,5组实验下2个模型的浇次数量均有较大的差异,也反映了实际

生产的特点,在面向订单的生产中生产订单品种多样且批量较小,导致有很多小浇次的产生,因此应用结晶器在线调宽技术能够显著减少连铸机在生产过程中的停机次数。本组实验反映了当前的市场需求下在线调宽技术应用的必要性和所设计模型对实际生产的意义。

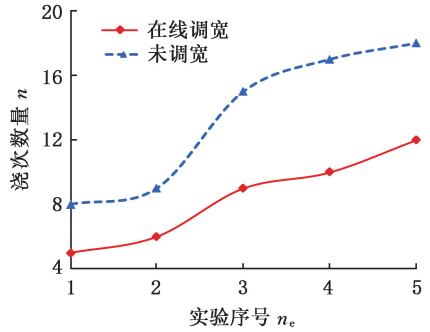


图9 浇次数对比

Fig.9 Comparison of caster numbers

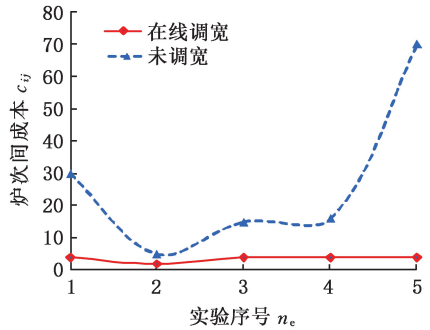


图10 炉次间成本对比

Fig.10 Cost comparison between heats

5 结论

针对炼钢-连铸调度中的浇次计划编制问题,通过融入结晶器在线调宽技术构建了新的浇次计划编制模型,并通过改进蚁群算法对模型进行求解,算法设计了一系列优化技术来提高其求解性能,具体如下:①引入炉次排序规则和初始选择规则,减小了搜索空间,避免了某些不必要解的产生,提高了收敛效率;②引入了狼群算法的奖惩因子,提高了全局搜索能力;③引入了交叉熵算法的分位参数,提高了算法对不同模型问题的适应能力。以国内某大型钢铁企业的实际生产数据为基准,通过与文献中的3种算法的对比展现了在大规模炉次下该算法的高效性,并且验证了两种规则的引入对解空间的减小是有效可行的。

参考文献:

[1] PAN Quanke. An Effective Co-evolutionary Artificial Bee Colony Algorithm for Steelmaking-continuous Casting Scheduling[J]. European Journal of Opera-

- tional Research, 2016, 250(3):702-714.
- [2] LEE M, MOON K, LEE K, et al. A Critical Review of Planning and Scheduling in Steel-making and Continuous Casting in Steel Industry[J]. Journal of the Operational Research Society, 2024, 75(8):1421-1455.
- [3] XU Zhaojun, ZHENG Zhong, GAO Xiaoqiang. Operation Optimization of the Steel Manufacturing Process: a Brief Review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(8): 1274-1287.
- [4] 唐立新, 杨自厚, 王梦光. 炼钢-连铸最优浇次(CAST)计划[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1996, 17(5):96-100.
TANG Lixin, DU Zihou, WANG Mengguang. Model and Algorithm of CAST Plan for Steelmaking-continuous Casting Production Scheduling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1996, 17(5):96-100.
- [5] WANG Yongzhou, ZHENG Zhong, ZHU Mingmei, et al. An Integrated Production Batch Planning Approach for Steelmaking-continuous Casting with Cast Batching Plan as the Core[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 173:108636.
- [6] 崔志华, 高慧敏, 曾建潮. 一种求解连铸生产调度问题的非线性遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(35):205-207.
CUI Zhihua, GAO Huimin, ZENG Jianchao. A Nonlinear Genetic Algorithm to Solve Continuous Casting Production Scheduling[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(35):205-207.
- [7] 薛云灿, 郑东亮, 杨启文. 基于改进离散粒子群算法的炼钢连铸最优炉次计划[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7):1509-1517.
XUE Yuncan, ZHENG Dongliang, YANG Qiwen. Optimum Charge Plan of Steelmaking Continuous Casting Based on the Modified Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(7):1509-1517.
- [8] SOO Y C, MYONG R C, HONG Y. A Lot Grouping Algorithm for a Continuous Slab Caster in an Integrated Steel Mill [J]. Production Planning & Control, 2000, 11(4):363-368.
- [9] 李岩, 刘建荣, 李铁克. 基于约束规划的最优浇次计划模型研究[J]. 冶金自动化, 2007(3):28-30.
LI Yan, LIU Jianrong, LI Tiek. Research on Optimal Cast Planning Model Based on Constraint Programming Approach[J]. Metallurgical Industry Automation, 2007(3):28-30.
- [10] 唐立新, 王梦光, 杨自厚. 炼钢-连铸对于浇次数未知的最优浇次计划模型与算法[J]. 钢铁, 1997(10):19-21.
TANG Lixin, DU Zihou, WANG Mengguang. Model and Algorithm of Cast Plan with Unknown Number of Cast for Steelmaking-continuous Casting Scheduling[J]. Iron & Steel, 1997(10):19-21.
- [11] 李崇, 李苏剑, 谢华. 面向订单的炼钢-连铸计划优化模型与算法研究[J]. 物流技术, 2007(10): 62-64.
LI Chong, LI Sujian, XIE Hua. Study on Order-oriented CC Plan Optimized Model and Algorithm [J]. Logistics Technology, 2007(10):62-64.
- [12] 易剑, 谭树彬, 李维刚, 等. 连铸组中间包问题的MTSP模型及混合优化算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(9):1235-1239.
YI Jian, TAN Shubin, LI Weigang, et al. Hybrid Optimization Algorithm for Solving Combining Tundish MTSP Model on Continuous Casting Plan [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(9):1235-1239.
- [13] 杨凡, 李歧强, 刘珊, 等. 浇次计划编制的混合启发式-交叉熵算法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(9):2241-2247.
YANG Fan, LI Qiqiang, LIU Shan, et al. Hybrid Heuristic-cross Entropy Algorithm for Cast Planning Problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(9):2241-2247.
- [14] 马天牧, 柴天佑, 郑秉霖. 基于宽度柔性的连铸组批计划模型及算法[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(5):1054-1058.
MA Tianmu, CHAI Tianyou, ZHENG Binlin. Model and Algorithm for Continuous Casting Batch Production Planning Based on Width Flexibility[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(5):1054-1058.
- [15] 杨凡, 李歧强, 王桂荣. 柔性宽度浇次计划编制的一种混合改进算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 348-352.
YANG Fan, LI Qiqiang, WANG Guirong. Hybrid Improved Algorithm for Cast Planning Problem with Flexible Width [J]. Control and Decision, 2015, 30(2):348-352.
- [16] 刘超, 王森, 周维, 等. 炼钢-连铸-热轧一体化生产计划排程方法研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(9):81-83.
LIU Chao, WANG Sen, ZHOU Wei, et al. Research of Integrated Scheduling Method of Steelmaking-continuous Casting-hot Rolling [J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(9):81-83.

- High-speed Trains: a Survey in China[J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2021, 31(3):300-315.
- [23] WANG Xuguang, CARDOSO M, BEURIER G. Effects of Seat Parameters and Sitters' Anthropometric Dimensions on Seat Profile and Optimal Compressed Seat Pan Surface[J]. Applied Ergonomics, 2018, 73:13-21.
- [24] LI Wenhua, YU Suihuai, YANG Haicheng, et al. Effects of Long-duration Sitting with Limited Space on Discomfort, Body Flexibility, and Surface Pressure[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2017, 58:12-24.
- [25] National Center for Health Statistics. Plan and Operation of the Third National Health and Nutrition Examination Survey, 1988-94. Series 1: Programs and Collection Procedures[M]. Hyattsville: U. S. Dept. of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Health Statistics, 1994.
- [26] 范沁红, 江星辰, 武学良, 等. 基于理想压力的机车座椅优化设计与舒适度试验研究[J]. 机械工程学, 2022, 58(10):383-394.
- FAN Qinrong, JIANG Xingchen, WU Xueliang, et al. Experimental Research on Optimization Design and Comfort of Locomotive Seat Based on Ideal Pressure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10):383-394.
- [27] 黄深荣, 张志飞, 袁泉, 等. 人体各部位对坐姿静态舒适性的权重系数[J]. 汽车工程, 2016, 38(7):889-895.
- HUANG Shenrong, ZHANG Zhifei, YUAN Quan, et al. Weight Coefficients of Different Body Parts to Whole Body in Terms of Static Comfort in Sitting Posture [J]. Automotive Engineering, 2016, 38(7):889-895.
- [28] SCHNEIDER L, SOGEMEIER D, WEBER D, et al. Effects of a Seat-integrated Mobilization System on Long-haul Truck Drivers Motion Activity, Muscle Stiffness and Discomfort during a 4.5-h Simulated Driving Task[J]. Applied Ergonomics, 2023, 106:103889.
- [29] ANJANI S, LI Wenhua, RUITER I A, et al. The Effect of Aircraft Seat Pitch on Comfort[J]. Applied Ergonomics, 2020, 88:103132.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介:**王金*, 男, 1991年生, 博士、讲师。研究方向为工业设计、人机功效、舒适性。E-mail:344105692@qq.com。
- 本文引用格式:**
王金, 张旭伟, 陈剑平, 等. 以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(3):623-633.
- WANG Jin, ZHANG Xuwei, CHEN Jianping, et al. Research on Comprehensive Motion Model of Dynamic Seats Characterized by Dynamic Dimensions[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):623-633.
-
- (上接第 622 页)
- [17] De MOERLOOSE P, MAENHOUT B. A Two-stage Local Search Heuristic for Solving the Steel-making Continuous Casting Scheduling Problem with Dual Shared-resource and Blocking Constraints[J]. Operational Research, 2023(23):1-2.
- [18] 李焱, 唐倩, 刘联超, 等. 基于改进蚁群算法的汽车混流装配调度模型求解[J]. 中国机械工程, 2021, 32(9):1126-1133.
- LI Yi, TANG Qian, LIU Lianchao, et al. An Improved ACO Algorithm for Automobile Mixed-flow Assembly Scheduling Problems [J], China Mechanical Engineering, 2021, 32(9):1126-1133.
- [19] 路浩, 陈洋, 吴怀宇, 等. 受路网和测量约束的变电站巡检机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2021, 32(16):1972-1982.
- LU Hao, CHEN Yang, WU Huaiyu, et al. Path Planning of Substation Inspection Robot under Road Network and Measurement Constraints[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(16):1972-1982.
- (编辑 胡佳慧)
-
- 作者简介:**李毅仁, 男, 1974年生, 正高级工程师、博士研究生。研究方向为生产计划与调度。发表论文 10 余篇。E-mail:liyiren@hbisco.com。袁帅鹏*(通信作者), 男, 1993年生, 讲师、博士。研究方向为智能优化算法。发表论文 10 余篇。E-mail:yuansp@ustb.edu.cn。
- 本文引用格式:**
李毅仁, 王柏琳, 袁帅鹏, 等. 考虑结晶器在线调宽浇次计划的改进蚁群算法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(3):614-622.
- LI Yiren, WANG Bailin, YUAN ShuaiPeng, et al. An Improved Ant Colony Algorithm for Cast Plan Considering Online-width-adjustment Technology of Crystallizers[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):614-622.