文章编号: 1001-4543(2025)03-0288-10 DOI: 10.19570/j.cnki.jsspu.2025.03.007

基于改进 NSGA-II 算法的多批次小批量铝合金熔铸生产排程

钟应龙[a], 田浩彬[b], 李学磊[b], 曾文蕾[c], 许彰理[b], 李芳芳[b]

(上海第二工业大学 a. 能源与材料学院; b. 智能制造与控制工程学院;
c. 工程训练与创新教育中心, 上海 201209)

摘 要: 针对铝合金铸锭多规格、小批量的生产特点, 结合现有生产规则, 在优先考虑订单交期与规格等因素的基础上, 提出了一种基于改进 NSGA-II 算法的铝合金熔铸生产排程算法。该算法采用分组编码方式, 通过构建适应度函数, 并结合模拟退火算法, 以交货时间、铸锭有效利用率等为主要优化目标, 对熔铸生产排程方案进行改进。实验结果表明, 改进后的 NSGA-II 算法能够减少长锭数量、缩小同铸锭的交期差异, 有利于提升熔铸生产效率, 降低生产成本与能耗, 为铝合金熔铸行业的节能减排提供了可行思路与方法。

关键词: 铝合金铸锭; 生产排程; 非支配排序遗传算法 II; 模拟退火算法; 组合优化
中图分类号: TP205 **文献标志码**: A

Multi-Batch Small-Lot Aluminum Alloy Melting and Casting Production Scheduling Based on an Improved NSGA-II Algorithm

ZHONG Yinglong[a], TIAN Haobin[b], LI Xuelei[b], ZENG Wenlei[c],
XU Zhangli[b], LI Fangfang[b]

(a. School of Energy and Materials; b. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering; c. Engineering Training and Innovation Education Center, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of aluminum alloy ingots with multiple specifications and small batch sizes, combined with the existing production rules, and giving priority to factors such as order delivery time and specifications, an aluminum alloy melting and casting production scheduling algorithm based on the improved NSGA-II algorithm was proposed. The algorithm adopted the group coding method, and by constructing the fitness function and combining with the simulated annealing algorithm, the melting and casting production scheduling scheme was improved by taking the delivery time and the effective utilization rate of ingots as the main optimization objectives. The experimental results show that the improved NSGA-II algorithm can reduce the quantity of long ingots and narrow the delivery time difference of the same ingot, which is conducive to improving the casting production efficiency, reducing the production cost as well as the energy consumption, and providing feasible ideas and methods for energy saving and emission reduction in the aluminum alloy melting and casting industry.

Keywords: aluminum ingots; production scheduling; non-dominated sorting genetic algorithm II; simulated annealing algorithm; combinatorial optimization

收稿日期: 2025-01-06
通信作者: 李芳芳 (1987–), 女, 浙江湖州人, 讲师, 博士, 主要研究方向为材料成型和高级排程。E-mail: ffli@sspu.edu.cn

0　引言

生产排程是指对生产过程中各个环节的操作时间、顺序及资源配置进行合理规划和管理的过程, 以此来减少原材料的浪费, 同时提高生产效率。这一过程通常涉及复杂的多目标和多约束 [1]。铝合金熔铸排程问题是一种属于 NP 难的组合优化问题, 通过运用优化理论, 能够改进铝合金熔铸企业的排程计划, 从而降低等待时间, 优化生产负荷, 提升整体生产效率和产能。

生产排程和组合优化问题是国内外学者关注的研究重点。目前, 生产排程的研究主要集中在模型构建和求解算法的设计方面。非支配排序遗传算法 II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 是一种基于非支配排序的多目标优化遗传算法, 通过将个体根据支配关系进行排序, 并使用拥挤度比较进行选择, 从而实现高效的多目标优化搜索 [2]。分组遗传算法 (grouping genetic algorithm, GGA) 由 Falkenauer [3] 提出, 是针对分组装箱问题设计的一种改进遗传算法, 具有计算效率高、全局搜索能力强、收敛性好和适应性强等特点 [4-5]。模拟退火算法 (simulated annealing algorithm, SA) 通过在大范围搜索空间内寻找问题的最优解, 具备较强的变异能力 [6-7]。将它们结合应用于优化问题, 尤其是涉及分组或分区的场景时, 可以取得更优的效果 [8]。

然而, 生产排程技术在很大程度上受制于行业特点, 不同领域的生产流程、设备需求、原材料特性以及市场环境存在明显差异。此外, 企业之间的生产工艺也多种多样, 某些复杂工艺需要求采用更加精细的排程策略, 以保障生产流程的顺利运行。因此, 生产排程技术通常缺乏通用性 [9-10]。由于铝合金熔铸排程问题具有独特的复杂性和重要性, 相关领域的研究仍显不足, 其独特的工艺和生产特点使得排程更具挑战性。

总体来看, 铝合金熔铸生产排程的主要特点有: ① 多规格、小批量, 产品种类繁多; ② 约束条件复杂, 通常需综合考虑任务、设备、优先级、目标函数及约束条件等因素; ③ 优化目标多样, 主要涉及生产成本、生产能力、生产效率等指标。

而铝合金熔铸排程存在的痛点主要有以下方面: ① 铸锭组合方式众多, 排程过程中难以全面枚举和优化所有可能性, 导致设备资源分配不均、生产效率低下, 进而影响整体产能和交货周期; ② 排程的结果需要满足多个约束条件, 在实际操作中容易出现约束冲突的情况, 影响生产计划的可行性和稳定性。

相比之下, 钢铁制造业已经在一定程度上引入了算法优化排程, 但钢铁产品通常尺寸范围较小且同规格生产批量较大, 而铝合金生产企业面临的则是多样化规格的小批量订单需求 [11-13], 这种特点容易导致生产调配不合理的问题。综上所述, 在铝合金熔铸生产领域开展深入研究, 具有较大的创新空间, 也具备重要的实际应用价值。

基于上述问题, 本文提出了一种改进 NSGA-II 算法应用于铝合金熔铸生产排程之中, 将分组编码方式、模拟退火算法与 NSGA-II 结合, 并在传统排程目标函数的基础上, 引入订单铸锭占用比例作为铝合金熔铸排程的优化指标。实验结果表明, 改进后的遗传算法在收敛速度和解的质量上均有显著提升。通过对比不同方案的长锭数量、交期差异率和适应度等指标, 验证了该算法的优越性, 并展示了其在提升生产效率和降低成本方面的巨大潜力。该研究为铝合金熔铸生产提供了一种高效、灵活且智能的排程优化方案, 丰富了该领域的研究内容。

1　铝合金熔铸生产排程模型构建

铝合金的熔铸区域排产流程和组炉方式分别如图 1、2 所示。

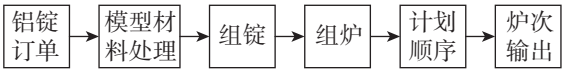

图 1　铝合金熔铸区域排产流程

Fig. 1　Aluminum alloy melting and casting area scheduling flow

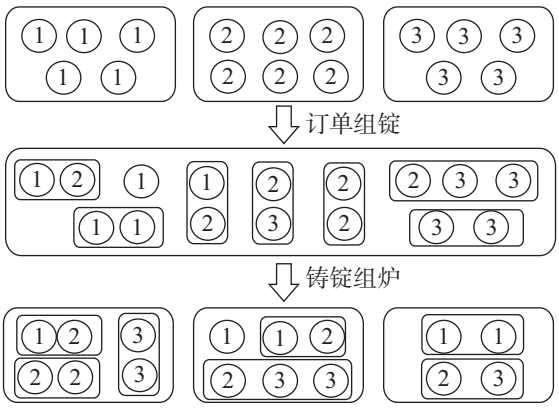

图 2　铝合金熔铸订单组锭及铸锭组炉示意图

Fig. 2　Aluminum alloy melting and casting order group ingot and ingot group furnace schematic diagram

熔铸排产主要包括以下步骤: 首先, 接收并分析客户订单, 明确各订单的具体需求与交货期限; 然后, 开展作业计划管理, 综合当前铸锭库存量与熔铸生产线能力, 制定生产计划; 接着, 进行熔铸区域的详细排程, 安排组锭和组炉的具体铸锭号和炉号, 以协调各工序之间的衔接; 最后, 确定铸锭计划顺序与最终的炉次输出。

在铸锭的排程过程中, 为了明确铸锭分组结果, 设置如下决策变量, 表示第 i 条短锭是否在第 j 条长锭中:

$$X_{ij}=\begin{cases}1, i \text{ 在 } j \text{ 中}\\ 0, i \text{ 不在 } j \text{ 中}\end{cases} \tag{1}$$

$$i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m; \quad X_{ij}\in\{0,1\}$$

式中: $X_{ij}=1$ 表示第 i 条短锭在第 j 条长锭中; $X_{ij}=0$ 表示第 i 条短锭不在第 j 条长锭中; n 为短锭个数; m 为方案的长锭个数。

1.1 目标函数的选取

铝合金熔铸排产是一个多目标优化问题, 需要进行不同方面的权衡, 包括成本、利润、时间等。本文选取的 3 个目标函数分别为订单铸锭占用比例最大、同炉铸锭长度均匀性最优、铸锭交期平衡性最优。

(1) 订单铸锭占用比例最大。订单铸锭占用比例是衡量铝合金熔铸生产效率和资源利用水平的重要指标, 用来表示所有排程短锭长度与长锭最大限制长度的比值, 即

$$T_1=\max\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{X_{ij}D_i}{\max D_j}\right)^k \tag{2}$$

式中: k 为启发式指数因子; D_i 为第 i 条短锭的长度; D_j 为第 j 条长锭的长度。

(2) 同炉铸锭长度均匀性最优。为优化由短锭拼接而成的各长锭的长度分配, 需关注铸锭长度的均衡性, 避免某些长锭产生余料。在此过程中, 长度分配的合理性对资源利用效率和生产成本控制有直接影响。下式给出了各长锭长度利用率的标准差, 用以衡量长度分配的平衡性:

$$T_2=\min\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(D_j-\bar{D})^2} \tag{3}$$

式中, $\bar{D}$ 为同炉长锭长度的平均值。

(3) 铸锭交期平衡性最优。订单需满足交货时间要求, 拖延期限会严重影响企业信誉。因此, 关注交期平衡性至关重要, 可以避免组成同一根长锭的短锭交期相差过大, 从而防止部分短锭拖期, 确保整体交货的及时性和可靠性。以下公式表示组成各长锭的短锭交货日期的标准差, 旨在衡量短锭交期的平衡性:

$$T_3=\min\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(C_i-\bar{C})^2} \tag{4}$$

式中: $\bar{C}$ 为组成长锭的短锭交货日期的平均值; C_i 为第 i 条短锭的交货日期。

1.2 约束条件

为了优化组锭排程并确保资源的高效利用, 需要明确短锭在排程过程中的参与规则。所有属于集合 A 的 n 根待排程短锭中, 每条短锭只参与一次组锭排程:

$$\sum_{i\in A}X_{ij}=1, \qquad j=1,2,\cdots,m \tag{5}$$

所组成的长锭必须在长度和质量上满足特定的标准范围, 若其尺寸偏小, 将导致材料的浪费和资源的低效利用; 若其尺寸偏大, 则可能超出设备的加工能力。由 i 条短锭组成的第 j 条长锭的长度和质量范围在铸锭的限定值之内:

$$\min D_j \leqslant \sum_{i\in A}X_{ij}D_i \leqslant \max D_j \tag{6}$$

$$\min W_j \leqslant \sum_{i\in A}X_{ij}W_i \leqslant \max W_j \tag{7}$$

式中: D_j 和 D_i 分别表示长锭长度和短锭长度; W_j 和 W_i 分别表示长锭质量和短锭质量。

为了确保组成的长锭交货日期合理且符合生产计划的要求, 第 j 条长锭的交货日期是组成该长锭的所有短锭中交货日期的最小值:

$$C_j=\max\sum_{i\in A}C_iX_{ij}, \qquad j=1,2,\cdots,m \tag{8}$$

式中: C_j 为长锭交期; C_i 为短锭交期; i 属于待排程短锭集合 A; j 属于 m 根长锭集合。

2 改进 NSGA-II 算法设计

在铝合金熔铸生产排程中, 多个目标之间存在潜在的冲突, 传统的排程方法难以全面满足复杂工业场景下的多重需求。因此, 本文采用多目标优化策略, 以求在多个目标之间找到一个平衡解。

为了在多个目标之间找到一组 Pareto 最优解, 向决策者提供更加全面、灵活的优化方案, 通过引入结合模拟退火算法的非支配排序分组遗传算法 (Hybrid-GSA-NSGAII) 来处理多个相互冲突的目标, 生产管理者可以利用算法生成的 Pareto 前沿, 依据不同的权重偏好选择最佳方案。NSGA-II 用来指导种群的选择和生成过程, 具体而言, 使用 NSGA-II 的非支配排序机制对种群进行排序和筛选, 以确保在每一代中保留一组多样化且优质的 Pareto 前沿解。同时, 采用 NSGA-II 的拥挤距离计算来维持种群的多样性, 避免种群过早收敛。

2.1　编码方式

在铝合金铸锭组批问题中, 可将其类比为一维装箱问题。对于装箱问题, 编码方式是算法设计中的关键环节, 它决定了如何表示问题的解决方案。遗传算法中常见的编码方式包括二进制编码、浮点编码和序列编码等, 但在某些情况下可能无法满足问题的需求。

相对于普通编码, 分组编码的染色体由两部分组成: 第 1 部分是短锭部分, 第 2 部分是长锭部分。短锭部分有 n 个基因, 分别代表每根短锭; 长锭部分有 m 个基因, 分别表示每根长锭。图 3 所示为 $i=9$, $j=4$ 时的编码方式。

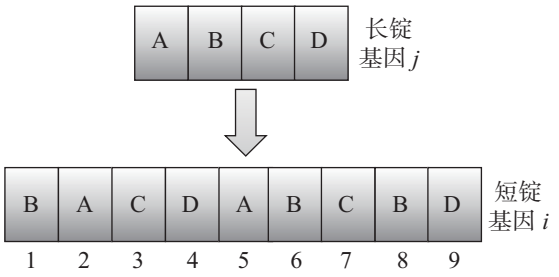

图 3　分组编码方式

Fig. 3　Grouping coding method

2.2　适应度函数

NSGA-II 根据适应度值评定结果的优劣, 针对熔铸组锭排程的实际条件, 把需要优化的指标作为约束铸锭优化问题的适应度函数:

$$f=\omega_1 T_1-\omega_2 T_2-\omega_3 T_3 \tag{9}$$

通过采用自适应加权优化的策略, 设定合适的权重系数, 将这一组合问题转化为单一目标函数。式中, ω_1、ω_2、ω_3 分别表示铸锭有效利用率、铸锭长度平衡性、交期平衡性的权重参数, 用于平衡各个指标的重要性, 需要满足 $\omega_1+\omega_2+\omega_3=1$。

鉴于上述 3 个目标间缺乏显著关联性, 为了使各目标函数值处于同一尺度上, 首先对它们进行归一化处理:

$$(T_{p_j})_{\text{norm}}=\frac{T_{p_j}-\min(T_p)}{\max(T_p)-\min(T_p)+\varepsilon} \tag{10}$$

式中: $(T_{p_j})_{\text{norm}}$ 为第 j 个长锭的第 p 个目标的归一化后的结果; T_{p_j} 为第 j 个长锭的第 p 个目标值; $\max(T_p)$ 和 $\min(T_p)$ 分别为第 i 个目标值在当前种群中的最大值和最小值。

随后计算每个目标函数归一化后的方差, 以衡量其变异程度:

$$\text{var}(T_{p_{\text{norm}}})=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}((T_{p_j})_{\text{norm}}-\overline{T}_{p_{\text{norm}}})^2 \tag{11}$$

式中, $\overline{T}_{p_{\text{norm}}}$ 表示归一化目标函数值的平均值。

根据归一化后的方差计算每个目标的权重:

$$\text{var}(T_{p_{\text{norm}}})_{\text{total}}=\sum_{p=1}^{3}\text{var}(T_{p_{\text{norm}}}) \tag{12}$$

$$\omega_t=\frac{\text{var}(T_{p_{\text{norm}}})}{\text{var}(T_{p_{\text{norm}}})_{\text{total}}} \tag{13}$$

根据自适应权重对归一化后的目标函数值进行加权求和, 代入式 (9), 得

$$f=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(\omega_1(T_{1_j})_{\text{norm}}-\omega_2(T_{2_j})_{\text{norm}}-\omega_3(T_{3_j})_{\text{norm}}) \tag{14}$$

通过归一化和自适应权重调整的方法, 可以确保不同目标函数在优化过程中的合理性和稳定性, 从而有效探索解空间并得到优秀解。

2.3　快速非支配排序和拥挤距离比较算子

快速非支配排序操作 (fast non-dominated sorting) 是 NSGA-II 的核心部分之一。它用于将种群中的个体根据其支配关系进行分类, 形成不同等级的非支配前沿 (Pareto 前沿)。对于种群中的每一对个体 p 和 q, 如果个体 p 支配个体 q, 则将 q 加入 $s(p)$ 中, 并将 q 的 $n(q)$ 加 1; 如果个体 q 支配个体 p, 则将 p 加入 $s(q)$ 中, 并将 p 的 $n(p)$ 加 1。如果 $n(p)=0$ (即 p 不被其他个体支配), 则将 rank(p) 设为 1, 并加入第一前沿集合 F_1。迭代计算后续前沿, 直到所有个体都被分配到相应的前沿中。

拥挤距离 (crowding distance) 是用于度量个体在其所在非支配前沿中的密集程度的指标。拥挤

距离越大, 表示该个体周围的解较少, 即个体更 “孤立”。在选择阶段, 拥挤距离用于维持种群的多样性, 使得 Pareto 前沿上的解能够均匀分布。拥挤距离的具体表示方法:

$$d_i = \sum_{k=1}^{m}(|f_k^{i+1} - f_k^{i-1}|) \tag{15}$$

式中: f_k^{i+1} 和 f_k^{i-1} 分别表示个体 i 在第 k 个目标 f_k 上的相邻个体目标值; $|f_k^{i+1} - f_k^{i-1}|$ 表示个体 i 在 f_k 上的拥挤距离。

2.4 交叉与变异

采用基于铸锭分组位置的交叉算子, 在第 1 个和第 2 个父代基因中分别随机取一个交叉点, 把第 1 个父代截取点前的基因片段插入到第 2 个父代的截取点之间。随后检查新生成的父代长锭基因中重复出现的短锭基因, 将它们从现有父代基因中移出, 随后再次插入空余父代长锭中。至此, 新生成的父代具有新的基因排列。交叉方式如图 4 所示。

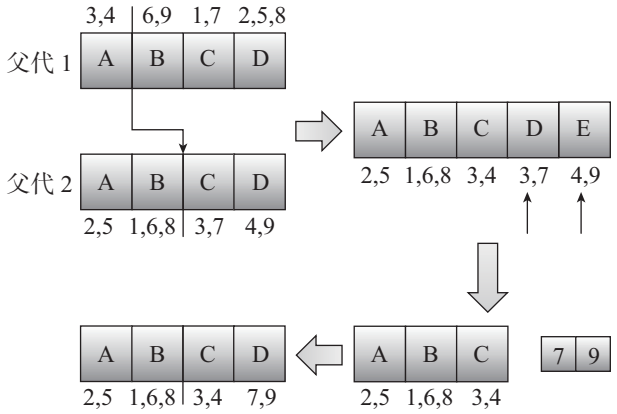

图 4 交叉方式

Fig. 4 Cross-cutting approach

变异算子旨在改善局部搜索能力并增加种群多样性。在执行变异操作时, 首先消除一个现有的组。通过基本位变异, 在染色体的基因位上随机选择一个起始点, 以确定变异的起始位置。接下来, 计算哪些物品尚未分配到铸锭中。然后, 使用启发式分配方法将未分配的物品进行合理分配, 遍历染色体的每一个组, 按照当前填充水平降序排序。剩余物品采用最佳适应度下降法进行分配, 如果某个长锭还有足够的空间, 就将短锭放入其中; 若所有长锭均无足够空间, 则新建一个长锭, 以减少新长锭的数量。

使用模拟退火算法进一步优化方案。首先初始化起始温度、冷却率、最小温度等参数, 在当前解的基础上随机交换长锭中的短锭生成邻域解, 并计算当前个体和邻域解的适应度。应用 Metropolis 准则, 如果邻域解的适应度优于当前个体的适应度, 接受邻域解; 如果邻域解的适应度不如当前个体的适应度, 以一定的概率接受邻域解, 根据差值和当前的 “温度” 参数来计算接受该解的概率:

$$P = \exp(\Delta f / T) \tag{16}$$

式中: T 为当前温度; Δf 为变异后个体的适应度与原个体适应度的差值。通过逐步降温, 直至达到最低温度并返回最终的个体。

通过这些优化措施, 可以在变异操作的基础上进一步改善染色体, 帮助遗传算法更快地找到高质量的解, 并且能够提高算法的收敛速度和解的质量。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据

为确保实验案例的合理性与数据分布的均衡性, 本文以国内某家铝合金熔铸加工企业的实际订单生产数据为对象, 运用随机生成技术产生模型相关数据。实验数据生成方法如下:

首先, 收集该铝加工企业一个排程周期的订单数据, 内含 100 根铝合金短锭的各项关键信息, 包括订单量、产品类型、规格尺寸、交货期限等。根据收集铸锭的参数信息, 厚度位于 520~580 mm, 宽度位于 1.2~1.7 m, 长度位于 2.2~2.8 m, 待排程订单的交期分布于 1~20 天。将这些分别组成长度不超过 7 m 且不短于 4 m、质量不超过 15 t 且不少于 7 t 的长锭, 使各规格符合要求, 且组成同一根长锭的短锭交期接近, 同时关注铸锭分配的均匀性。实验数据如表 1 所示 (所有数据详见附录 A), 设备信息如表 2 所示。

3.2 参数设置

配置算法各参数值如下: 种群规模 pop 设置为 100, 最大迭代次数 gen = 200, 交叉概率 $p_c = 0.8$, 变异概率 $p_m = 0.3$。初始温度 $T = 100$, 冷却率 alpha = 0.995, 最小温度 Min_T = 0.005。分别采用 GGA、标准 NSGA-II 和 Hybrid-GSA-NSGAII 对模型进行求解。

表 1　熔铸生产排程实例

Tab. 1　Example of fusion casting production scheduling

短锭序号	厚度/mm	宽度/mm	长度/m	剩余交货期限/d	体积/m^3	m/kg
1	580	1 640	2 494	3	2.37	6 400
2	530	1 200	2 261	5	1.43	3 880
3	526	1 250	2 286	15	1.50	4 050
			⋮			
98	530	1 200	2 687	15	1.70	4 610
99	580	1 624	2 332	2	2.19	5 930
100	573	1 250	2 785	8	1.99	5 380

表 2　熔铸炉规格介绍

Tab. 2　Introduction to furnace specifications

炉号/号	名称	最大容量/t	最小容量/t	加工时间/h
1	75 t 熔铸炉	80	45	6
2	50 t 熔铸炉	55	30	6

3.3　结果对比

为比较 GGA、NSGA-II 和 Hybrid-GSA-NSGAII 的实验结果, 从最大适应度、方案最小长锭数、使用的平均长锭数、同铸锭交期差异率、收敛代数进行对比, 验证求解效果, 两种算法对 100 根短锭的问题实例分别独立运行 20 次, 并获得相关性能指标, 分别取平均值后对比结果如表 3 所示, 其中 Hybrid-GSA-NSGAII 的结果详见附录 B, 同铸锭交期差异率:

$$\mathrm{DTD}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\max C_i-\min C_i)\times 100\% \tag{17}$$

表 3　算法结果比较

Tab. 3　Comparison of algorithm results

算法设置	方案最小长锭数/根	平均长锭数/根	同铸锭交期差异率/%	最大适应度	运行时间/s
GGA	45	46.01	6.56	0.232 6	19.4
NSGA-II	44	44.74	4.89	0.348 2	36.5
Hybrid-GSA-NSGAII	43	43.78	4.22	0.371 4	34.3

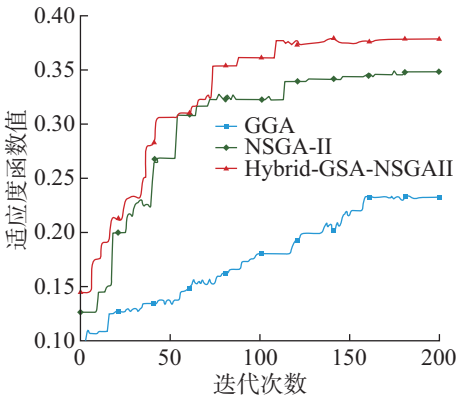

图 5　适应度值随迭代次数变化曲线图

Fig. 5　Plot of change in fitness value with number of iterations

由表 3 和图 5 可知, 通过比较方案最小长锭数、平均长锭数、同铸锭交期差异率、适应度值和运行时间等关键指标, 结果显示 Hybrid-GSA-NSGAII 相较于 GGA 和 NSGA-II 在多个性能指标上均展现出优越性。具体而言, 该算法在最小化长锭数、降低铸锭交期差异率以及提升最大适应度方面均取得了更优表现, 这表明其在提高解决方案的质量方面具有显著优势。尽管在运行时间方面, Hybrid-GSA-NSGAII 算法并非最为高效, 但在算法选择过程中, 需要结合具体应用场景和性能需求进行综合考量, 以实现最优的算法配置和性能平衡。在其他关键性

能指标上的优异表现, 使其成为解决该问题的一个有力方案。

4 结 论

针对铝合金熔铸制造企业排程结果有所欠缺和效率低的问题, 提出了一种基于改进 NSGA-II 的铝合金熔铸生产排程算法, 通过对算法的分析, 最终得出的结论如下:

(1) 采用快速非支配排序和拥挤距离比较的策略, 并引入模拟退火算法来增强全局搜索能力, 使得解的质量提高, 在实际排程结果中带来改进。

(2) 通过一系列的实验将 Hybrid-GSA-NSGAII 与标准 NSGA-II 和 GGA 的排程结果比较, 证明 Hybrid-GSA-NSGAII 算法在实际生产排程中可以较好地保留适应度较高的个体, 保持种群的多样性, 避免过早陷入局部最优解, 能够进行合理分组, 对铝合金熔铸排程具有一定的参考价值。

综上所述, 本文不仅为铝合金熔铸生产排程问题提供了一种有效的解决方法, 还为工业生产领域的智能化、自动化和可持续发展提供了有益的探索。未来可以继续深化算法优化, 拓展实际应用, 以进一步推动工业制造排程技术的进步和相关产业的升级。

参考文献:

[1] 周秋艳, 肖满生, 张龙信, 等. 多约束条件下生产排程智能优化技术 [J]. 计算机科学, 2021, 48(3): 239-245.

[2] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[3] FALKENAUER E. The grouping genetic algorithms: widening the scope of the GAs [J]. Belgian Journal of Operations Research Statistics & Computer Science, 1993, 33(1): 79-102.

[4] WANG L H, LI Q Q, ZHANG B Y, et al. Robust multiobjective optimization for energy production scheduling in microgrids [J]. Engineering Optimization, 2018, 51(2): 332-351.

[5] 杨亚男, 贾渊. 基于改进遗传算法的摄像机自标定方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 188-191.

[6] 李朝迁, 裴建朝. 新型模拟退火遗传算法在路径优化的应用 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 52-55.

[7] 余修武, 穆静, 刘永. 基于遗传模拟退火优化的 DV-Hop 定位算法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2024, 52(3): 149-155.

[8] 马林, 秦阳, 秦嘉豪, 等. 大型星座混合模拟退火遗传算法测控任务规划 [J]. 宇航学报, 2023, 44(11): 1757-1766.

[9] 蔺宇, 张宗达. 某钢铁企业精益策略解决多机排产转运问题 [J]. 工业工程与管理, 2014, 19(6): 83-88.

[10] 岳峰丽, 焉伟豪, 张孟枭, 等. 铸旋铝合金车轮生产工艺研究进展 [J]. 科技导报, 2024, 42(3): 123-136.

[11] 郑忠, 张诗雨, 王永周, 等. 炼钢厂生产调度排程的建模方法研究进展评述 [J]. 钢铁, 2023, 58(11): 69-83.

[12] 邓灏, 唐希浪, 蔡忠义, 等. 基于改进遗传算法的多无人机搜索航路规划 [J]. 电光与控制, 2024, 31(4): 12-17.

[13] 樊云飞. 基于遗传算法的复杂集装箱装载问题研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2022.

附录 A

附表 A 熔铸生产排程实例完整数据

短锭序号	厚度/m	宽度/mm	长度/mm	剩余交货期限/d	体积/m^3	m/kg
1	580	1 640	2 494	3	2.37	6 400
2	530	1 200	2 261	5	1.43	3 880
3	526	1 250	2 286	15	1.50	4 050
4	580	1 624	2 512	6	2.37	6 390
5	530	1 200	2 348	9	1.49	4 030
6	530	1 200	2 451	18	1.56	4 210
7	520	1 535	2 441	14	1.95	5 260
8	526	1 250	2 330	10	1.53	4 140
9	530	1 678	2 582	15	2.30	6 200
10	530	1 200	2 348	20	1.49	4 030
11	580	1 250	2 619	8	1.90	5 130

续表

12	526	1 250	2 383	14	1.57	4 230
13	530	1 450	2 667	15	2.05	5 530
14	530	1 660	2 692	18	2.37	6 390
15	580	1 300	2 440	7	1.84	4 970
16	520	1 500	2 472	10	1.93	5 210
17	530	1 450	2 333	14	1.79	4 840
18	573	1 680	2 352	2	2.26	6 110
19	580	1 300	2 564	6	1.93	5 220
20	520	1 500	2 024	17	1.58	4 260
21	530	1 450	2 541	10	1.95	5 270
22	530	1 250	2 334	8	1.55	4 170
23	520	1 535	2 317	19	1.85	4 990
24	530	1 250	2 511	5	1.66	4 490
25	530	1 450	2 351	12	1.81	4 880
26	580	1 624	2 561	2	2.41	6 510
27	580	1 200	2 241	4	1.56	4 210
28	520	1 260	2 579	15	1.69	4 560
29	530	1 450	2 281	20	1.75	4 730
30	520	1 250	2 271	13	1.48	3 990
31	530	1200	2 365	6	1.50	4 060
32	580	1200	2 348	5	1.63	4 410
33	580	1 250	2 712	10	1.97	5 310
34	530	1 680	2 554	15	2.27	6 140
35	520	1 200	2 532	7	1.58	4 270
36	580	1 200	2 322	4	1.62	4 360
37	530	1 200	2 707	10	1.72	4 650
38	530	1 660	2 564	14	2.26	6 090
39	530	1 200	2 669	4	1.70	4 580
40	573	1 680	2 300	5	2.21	5 980
41	580	1 200	2 324	7	1.62	4 370
42	530	1 680	2 521	18	2.24	6 060
43	520	1 200	2 698	12	1.68	4 550
44	530	1 250	2 522	18	1.67	4 510
45	580	1 678	2 346	6	2.28	6 160
46	580	1 200	2 756	11	1.92	5 180
47	580	1 200	2 287	17	1.59	4 300
48	573	1 640	2 258	8	2.12	5 730
49	530	1 200	2 591	4	1.65	4 450
50	573	1 640	2 534	7	2.38	6 430
51	530	1 677	2 516	15	2.24	6 040
52	530	1 200	2 444	17	1.55	4 200
53	580	1 200	2 696	20	1.88	5 070
54	573	1 450	2 374	14	1.97	5 330
55	573	1 450	2 301	18	1.91	5 160

续表

56	580	1 350	2 479	6	1.94	5 240
57	530	1 350	2 565	15	1.84	4 960
58	580	1 200	2 213	8	1.54	4 160
59	580	1 200	2 738	15	1.91	5 150
60	580	1 200	2 265	15	1.58	4 260
61	573	1 200	2 258	7	1.55	4 190
62	573	1 449	2 296	16	1.91	5 150
63	530	1 352	2 707	10	1.94	5 240
64	573	1 250	2 560	2	1.83	4 950
65	580	1 350	2 404	7	1.88	5 080
66	530	1 200	2 372	15	1.51	4 070
67	530	1 200	2 503	6	1.59	4 300
68	530	1 200	2 489	14	1.58	4 270
69	530	1 200	2 715	13	1.73	4 660
70	530	1 200	2 384	20	1.52	4 090
71	530	1 300	2 791	17	1.92	5 190
72	578	1 330	2 520	13	1.94	5 230
73	578	1 330	2 496	5	1.92	5 180
74	530	1 624	2 036	6	1.75	4 730
75	580	1 200	2 310	12	1.61	4 340
76	580	1 250	2 732	3	1.98	5 350
77	530	1 250	2 608	20	1.73	4 670
78	530	1 300	2 272	14	1.57	4 230
79	580	1 250	2 598	10	1.88	5 090
80	530	1 624	2 644	4	2.28	6 140
81	530	1 624	2 247	9	1.93	5 220
82	530	1 220	2 541	16	1.64	4 440
83	580	1 200	2 355	6	1.64	4 430
84	530	1 250	2 728	17	1.81	4 880
85	530	1 624	2 650	15	2.28	6 160
86	575	1 640	2 350	12	2.22	5 980
87	580	1 250	2 291	4	1.66	4 480
88	575	1 640	2 527	1	2.38	6 430
89	573	1 200	2 699	7	1.86	5 010
90	573	1 635	2 038	7	1.91	5 160
91	580	1 250	2 255	9	1.63	4 410
92	520	1 260	2 035	12	1.33	3 600
93	580	1 200	2 794	18	1.94	5 250
94	520	1 540	2 226	15	1.78	4 810
95	530	1 624	2 786	9	2.40	6 470
96	520	1 500	2 441	11	1.90	5 140
97	580	1 250	2 444	4	1.77	4 780
98	530	1 200	2 687	15	1.70	4 610
99	580	1 624	2 332	2	2.19	5 930
100	573	1 250	2 785	8	1.99	5 380

附录 B

附表 B　Hybrid-GSA-NSGAII 最优方案排程结果

熔铸炉号	长锭号	短锭号	熔铸炉号	长锭号	短锭号	熔铸炉号	长锭号	短锭号
75#1	3	[45,18,40]	75#3	4	[44,82]	50#2	27	[76,79]
75#1	5	[91,97,87]	75#3	7	[100,64]	50#2	28	[89,61]
75#1	16	[48,50,90]	75#3	8	[34,42]	50#2	29	[86,88]
75#1	22	[32,36,27]	75#3	9	[52,66]	50#3	30	[93,46]
75#1	23	[83,41,58]	75#3	10	[51,9]	50#3	32	[95,80]
75#2	33	[54,55,62]	75#3	11	[26,1]	50#3	34	[37,39]
75#2	41	[47,60,75]	75#4	12	[68,70]	50#3	35	[71,78]
75#2	2	[25,29,17]	75#4	14	[53,59]	50#3	36	[35,43]
75#2	6	[31,2,5]	75#4	15	[22,24]	50#4	37	[4,99]
75#2	13	[74,81,85]	75#4	17	[10,6]	50#4	39	[72,73]
50#1	20	[7,23,94]	75#4	18	[15,19]	50#4	40	[77,84]
50#1	25	[28,30,92]	75#4	19	[56,65]	50#4	42	[14,38]
50#1	31	[8,12,3]	75#4	21	[57,63]	50#4	43	[69,98]
50#1	38	[16,20,96]	75#4	24	[13,21]	—	—	—
75#3	1	[11,33]	50#2	26	[49,67]	—	—	—

简　讯

我校获批 “中国商业联合会食品保鲜科学与技术重点实验室”

近日, 中国商业联合会公示了拟认定重点实验室 (第四批) 名单, 由我校牵头, 联合上海海事大学、上海复命新材料科技有限公司申报的 “中国商业联合会食品保鲜科学与技术重点实验室” 位列其中, 标志着我校重点科研平台的建设工作取得新进展。

重点实验室主要研究领域涵盖精控温蓄冷材料、绝热保冷材料和智能气调保鲜材料等关键技术的开发与应用, 旨在解决食品保鲜技术瓶颈, 推动食品行业、农业、冷链物流业和相关领域科技进步。实验室将依托能源与材料学院科研基础设施, 结合上海海事大学在物流与冷链技术方面的优势, 以及上海复命新材料科技有限公司在新型材料研发与产业化方面的经验, 形成产学研紧密结合的运行模式, 为实验室的长期发展提供硬件支持和区域优势。该重点实验室的获批建设将推动我校多学科交叉融合, 增强学科内涵建设与社会服务能力, 同时为食品保鲜产业培养高水平科研创新人才。