

计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目：基于 CVRP 的炼钢—连铸一体化批量计划研究
作者：周亚罗，孙鑫，刘文广，张瑞成
收稿日期：2023-05-08
网络首发日期：2023-06-28
引用格式：周亚罗，孙鑫，刘文广，张瑞成. 基于 CVRP 的炼钢—连铸一体化批量计划研究[J/OL]. 计算机集成制造系统.
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.5946.TP.20230628.0916.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于CVRP的炼钢—连铸一体化批量计划研究

周亚罗¹, 孙鑫¹⁺, 刘文广², 张瑞成¹

(1. 华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063210;

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山 063200)

摘要: 为加强生产资源配置, 使炼钢-连铸之间的生产协调有序, 在独立的 CVRP 炉次计划和浇次计划模型基础上, 将容量限制和撤销惩罚作为炼钢与连铸工序的衔接约束, 建立了基于 CVRP 的炼钢-连铸一体化批量计划模型, 并利用改进的遗传算法 (GA-LNS) 算法进行了模型的求解。GA-LNS算法采用遗传交叉、变异概率自适应调整、融合大邻域搜索算法 (LNS) 拆分与重构的思想以及精英搜索, 提高了算法的搜索能力与解的质量。最后, 采用 CVRP 算例和实际生产数据进行了模型验证和一体化批量计划编制, 验证了模型的正确性与算法的有效性, 为企业批量计划编制提供了新思路。

关键词: 炼钢-连铸; 批量计划; 车辆路径问题; 改进遗传算法

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

CVRP-based integrated steelmaking-continuous casting batch planning study

ZHOU Yaluo¹, SUN Xin¹⁺, LIU Wenguang², ZHANG Ruicheng¹

(1. School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Shougang Jingtang Limited Iron & Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, China)

ABSTRACT: In order to enhance the allocation of production resources and to enable coordinated and orderly production between steelmaking and continuous casting, a CVRP-based integrated steelmaking-continuous casting batch planning model was established based on the independent CVRP furnace planning and pouring planning models, with capacity limits and withdrawal penalties as the convergence constraints between steelmaking and continuous casting processes, and the model was solved using an improved genetic algorithm (GA-LNS) algorithm. The GA-LNS algorithm uses genetic crossover, adaptive adjustment of variance probabilities, the idea of fusing large neighbourhood search algorithm (LNS) splitting and reconstruction, and elite search to improve the search capability and solution quality of the algorithm. Finally, model validation and integrated batch planning are carried out using the CVRP algorithm and actual production data to verify the correctness of the model and the effectiveness of the algorithm, providing a new idea for enterprise batch planning.

Keywords: Steelmaking-continuous casting; Batch planning; Vehicle path problem; Improved genetic algorithm

1 引言

在炼钢-连铸工序智能化发展生产过程中, 钢铁企业设备大型化、制造规模化的特点与客户合同所需要的多品种、小批量、定制化产品之间的矛盾日渐凸显^[1], 同时对钢铁企业如何及时响应生产订单提出了更高的要求。依靠人工经验进行批量计划编制存在着效率低、随意性强以及工序间整体

收稿日期: 2023-05-08; 修改日期: 2023-06-12

Received 08 May 2023; accepted 12 June 2023

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2018209201); 唐山市科技局科技计划资助项目(22130213G)

Foundation items: Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China(No. F2018209201), and the Science and Technology Plan of Tangshan Science and Technology Bureau, China(No. 22130213G)

协调性差等问题，因此探索制定快捷高效的批量计划编制方法成为钢铁企业亟待解决的问题。

炼钢-连铸一体化批量计划^[2]是接收由合同计划提供的待生产板坯的成份、规格等信息后，根据各工序的生产约束，首先编制炉次计划，然后将炉次计划结果作为浇次计划的输入，编制出浇次计划，指导炼钢-连铸过程有序生产。批量计划编制是一个大规模、多约束、多目标的组合优化问题，整数规划与组合优化从广泛的意义上说，两者的领域是一致的，都是在有限个可供选择的方案中寻找满足一定标准的最优方案，不少研究将批量计划问题视为整数规划问题：王悦晓^[3]、贾树晋^[4]、叶虎^[5]等人分别考虑不同方面的炼钢工艺，构建炉次批量计划问题的 0-1 整数规划模型；YI 等^[6]考虑炉次在双股连铸机上连铸浇筑导致板坯宽度上不相同的因素、GONGSHU 等^[7]考虑板坯在钢级、尺寸规格差异以及重量要求，都通过建立多目标混合整数规划模型对批量计划进行求解。但批量计划的整数规划模型求解属于 NP 问题，其难度远大于一般线性规划问题，因此许多学者将批量计划模型表示为路径问题和装箱问题^[8]进行简化求解：杨凡^[9]提出了一种带容量约束的旅行商浇次计划模型，将炉次分为几个小组，利用混合启发式-交叉熵算法进行浇次计划的求解；薛云灿改进粒子群算法，对所提出的伪商旅问题模型求解最优炉次计划^[10]和最优浇次计划^[11]。其中，选取路径问题的类型很重要，否则会出现路径问题与批量计划问题不适用的情况，需要添加约束条件进行解决。以上文献都只是考虑单个阶段做出合理的批量计划模型和算法，根据炼钢-连铸连续化生产的特点，编制一体化批量计划更加贴合企业的实际情况，有助于各阶段的生产协调。张文学^[12]面对不同生产工艺的冶铸轧批量计划问题，分析连铸-轧制工艺约束并编制一体化策略，提出了将约束传播技术嵌入基于划分方法的聚类分析算法中的求解算法；WANG^[13]改变以往顺序编制炼钢-连铸批量计划的方法，建立了以连铸工序作为核心的一体化批量计划模型，利用改进的 NSGA-II 算法结合局部搜索策略进行问题求解；吴双平^[14]对炼钢-连铸-热轧区段的生产计划与调度进行了深入的研究，采用基于精英保留下的遗传算法，首先求解热轧批量计划，然后以热轧批量计划作为输入逆推炼钢与连铸的批量计划，并开发了生产计划与调度仿真系统；卢义^[15]建立了多商旅问题下的批量计划模型，将多目标蚁群算法求解的炉次计划的 pareto 最优解作为浇次计划的输入，得到炼钢-连铸一体化批量计划，又在得到的批量计划中考虑连铸与热轧之间的约束衔接，利用多目标遗传算法求解热轧计划，最终获得冶铸轧一体化批量计划。上述文献采用顺推或逆推方式实现了一体化批量计划的制定，但未充分考虑计划编制之间的关系，不能达到一体化计划的全局最优。

综上所述，本文充分考虑炉次、浇次计划的相互联系及相互制约关系，将容量限制和撤销惩罚作为衔接约束，构建了带容量约束的车辆路径问题（Capacitated Vehicle Routing Problems, CVRP）下的炼钢-连铸一体化批量计划模型。相较于其他模型，CVRP 问题表示批量计划不需要再添加任何条件和约束，经过问题约束的转化后就可以求解批量计划，减少了求解目标函数的数量。遗传算法作为求解路径问题常用的方法，在求解时间和最优解上都有不错的性能优势，但存在人为经验决定交叉变异概率，过早收敛、易陷入局部最优等缺陷，本文采用遗传交叉、变异概率自适应调整、融

合大邻域搜索算法（LNS）拆分与重构的思想以及精英搜索方法，用改进的遗传算法（Genetic Algorithm - Large neighborhood search, GA-LNS）进行炼钢-连铸一体化批量计划的全局最优求解。

2 炼钢-连铸一体化批量计划

2.1 问题描述

炼钢-连铸批量计划^[16-17]的编制分为炼钢阶段的炉次计划和连铸阶段的浇次计划，炉次计划是将合同中的生产板坯按照基本信息和炼钢生产工艺要求进行合理组合，追求板坯之间钢级、宽度、交货期差异最小，最大成材率以及最少无委材，形成多个炉次为基本单位的生产批次；浇次批量计划是在满足连铸阶段生产工艺要求，以炉次计划作为基础，尽可能多的将钢级、规格相似的炉次组合成一个浇次，使浇次数量、连浇炉次间的成本费用最少，降低生产成本，提高设备的使用效率。

炼钢-连铸阶段的生产对象和约束条件如表 1 所示。

表 1 生产对象和约束条件

生产工序	生产对象	约束条件
炼钢阶段	炉次	板坯钢级应相近；
	(炉次计划)	板宽度差异最小；
		板宽交货期相近；
连铸阶段	浇次	炉次内板坯的总重量小于炉容
		炉次钢级尽量相同；
		炉次宽度差异最小；
		交货期相近；
		浇次中炉次数目受中间包寿命影响

2.2 CVRP 问题下的批量计划模型

车辆路径问题（Vehicle Routing Problems, VRP）是经典的组合优化问题，而 CVRP 问题带有容量约束是 VRP 问题的延伸^[18]。即存在一组客户，其坐标以及运输需求已知，要求 k 辆具有容量限制的车从车厂出发装载客户的运输需求并返回原始车厂处，使所有车辆行驶的总距离最短且每辆车尽可能满足客户需求。

炼钢-连铸批量计划问题属于典型的组合优化问题，与 CVRP 问题的求解相似，都是将被优化个体按照条件约束进行目标上的寻优组合，二者只在问题模型的目标函数和约束条件上有差别。将炼钢-连铸批量计划归结为 CVRP 问题，可以在组合批次数目未知的情况下，同时求解多个最优组合，把最小化钢级、宽度、交货期差异的多个目标，转化为寻找路径最短的单个目标，从而减少求解目标的数量。

采用 CVRP 问题表示批量计划问题模型，需要进行表 2 中批量计划 CVRP 问题转化。

表 2 批量计划 CVRP 问题转化

CVRP 问题	CVRP 问题下的炉次计划模型	CVRP 问题下的浇次计划问题
---------	-----------------	-----------------

客户	合同板坯: n 表示合同数, $n=1, \dots, N$	炉次: q 表示预编炉次数, $q=1, \dots, Q$
每辆车的容量限制	炉容: G	中间包寿命 (浇次内所含炉次数): LA
客户需求	合同板坯 n 的重量: g_n	单个炉次
客户之间的距离	<p>合同板坯之间因钢级、宽度、交货期的总惩罚值:</p> $C_{nn'} = \alpha_1 C_{nn'}^1 + \alpha_2 C_{nn'}^2 + \alpha_3 C_{nn'}^3$ $C_{nn'}^1 = \begin{cases} ST_n - ST_{n'} & 0 \leq ST_n - ST_{n'} < ST \\ Value & \text{其他} \end{cases}$ $C_{nn'}^2 = \begin{cases} W_n - W_{n'} & 0 \leq W_n - W_{n'} < W \\ Value & \text{其他} \end{cases}$ $C_{nn'}^3 = T_n - T_{n'} $ <p>ST_n 表示板坯 n 的钢级量化指标; W_n 表示板坯 n 的宽度; T_n 表示板坯 n 的交货期; $Value$ 是一个很大的数。</p>	<p>炉次之间因钢级、宽度、交货期的总惩罚值:</p> $C_{qq'} = \alpha_1 C_{qq'}^1 + \alpha_2 C_{qq'}^2 + \alpha_3 C_{qq'}^3$ $C_{qq'}^1 = \begin{cases} ST_q - ST_{q'} & 0 \leq ST_q - ST_{q'} < ST \\ Value & \text{其他} \end{cases}$ $C_{qq'}^2 = \begin{cases} W_q - W_{q'} & 0 \leq W_q - W_{q'} < W \\ Value & \text{其他} \end{cases}$ $C_{qq'}^3 = T_q - T_{q'} $ <p>ST_q 表示炉次 q 的钢级量化指标; W_q 表示炉次 q 的宽度; T_q 表示炉次 q 的交货期。 $Value$ 是一个很大的数。</p>
N 个客户安排到 K 个车辆中	<p>N 个合同安排到 Q 个炉次中去:</p> $X_{nq} = \begin{cases} 1 & \text{若第 } n \text{ 个合同属于第 } q \text{ 个炉次} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ <p>每个炉次内所安排的合同板坯:</p> <p>需满足炉次生产约束:</p> <p>(a) 单个合同板坯只能安排到一个炉次中;</p> $\sum_{q=1}^Q X_{nq} \leq 1, \quad n=1, \dots, N$ <p>(b) 余材量不能为负值;</p> $Y_q \geq 0, \quad q=1, \dots, Q$ <p>(c) 第 q 个炉次的总重量等于炉容;</p> $\sum_{n=1}^N (g_n \cdot X_{nq}) + Y_q = G, \quad q=1, \dots, Q$	<p>Q 个炉次安排到 M 个浇次中去:</p> $X_{qm} = \begin{cases} 1 & \text{若第 } q \text{ 个炉次属于第 } m \text{ 个浇次} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ <p>每个浇次内所安排的炉次</p> <p>需满足浇次生产约束:</p> <p>(a) 单个炉次只能安排到一个浇次中;</p> $\sum_{m=1}^M X_{qm} \leq 1, \quad q=1, \dots, Q$ <p>(b) 表示第 m 浇次的所含炉次数小于中间包寿命;</p> $\sum_{q=1}^Q X_{qm} < LA, \quad m=1, \dots, M$ <p>(c) 表示第 m 浇次至少含有 1 个炉次;</p> $1 \leq \sum_{q=1}^Q X_{qm}, \quad m=1, \dots, M$
所有车辆行驶总距离最短	<p>合同板坯之间的钢级、宽度以及交货期差异最小:</p> $f_1 = \sum_{q=1}^Q \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N C_{nn'} X_{nq} X_{n'q}$	<p>炉次之间的钢级、宽度以及交货期差异最小:</p> $f_1' = \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^Q \sum_{q'=1}^Q C_{qq'} X_{qm} X_{q'm}$
每辆车尽可能满足客户需求	<p>余材量最少:</p> $f_2 = \alpha_4 \cdot \sum_{q=1}^Q \left(G - \sum_{n=1}^N X_{nq} \cdot g_n \right)$	<p>中间包寿命与浇次包含的炉次数差异最小:</p> $f_2' = \alpha_4 \cdot \sum_{m=1}^M \left(LA - \sum_{q=1}^Q X_{qm} \right)$

图 1 为批量计划 CVRP 问题模型, 公式 (1) 与 (2) 是限制公式, 均对炉次与浇次计划问题分别有不同的含义。

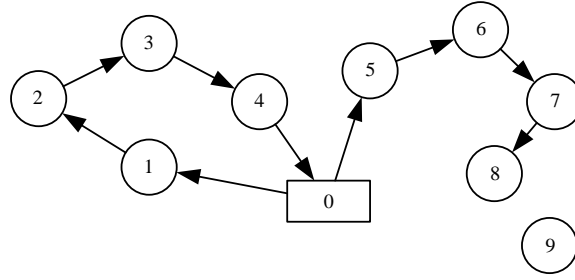


图 1 批量计划 CVRP 问题模型

限制公式表示如下：

$$\sum_{d=5}^8 X_{dh} \cdot Z_d + X_{9h} \cdot Z_9 \leq U \quad (1)$$

$$\sum_{d=5}^9 \sum_{d'=5}^9 \alpha_1 C_{dd'}^1 + \alpha_2 C_{dd'}^2 + \alpha_3 C_{dd'}^3 \leq Value \quad (2)$$

其中阈值 $Value$ 是由于钢级和宽度差异超出其中的最大限制。

对于炉次计划，图 1 表示有 9 块合同板坯已按照合同板坯之间因钢级、宽度、交货期的总惩罚值安排在图中，0 为虚拟车厂，路线 1~4 是组成一个炉次的板坯组合，路线 5~8 是还未被安排好的板坯组合，9 号板坯如要与 5~8 号板坯组合成炉次要满足限制公式。

此时， $h=1, \dots, Q$ ， $d=d'=n=1, \dots, N$ ， $U=G$ ， $Z_d=g_n$ ；公式 (1) 表示 9 号板坯加入到 5~8 号板坯组合中总重量没有超过炉容；公式 (2) 表示 5~9 号板坯之间的钢级、宽度和交货期惩罚值没有超过阈值 $Value$ 。

对于浇次计划，图 1 表示有 9 个炉次已按照炉次之间因钢级、宽度、交货期的总惩罚值安排在图中，0 为虚拟车厂，路线 1~4 是组成一个浇次的炉次组合，路线 5~8 还未被完全安排好的炉次组合，9 号炉次如要与 5~8 号炉次组合成浇次要满足限制公式。

此时， $h=1, \dots, M$ ， $d=d'=n=1, \dots, P$ ， $U=LA$ ， $Z_d=Z_9=1$ ；公式 (1) 表示 9 号炉次加入到 5~8 号炉次组合中需要浇次 m 中所含炉次数没有超过中间包寿命；公式 (2) 表示 5~9 号炉次之间的钢级、宽度和交货期惩罚值没有超过阈值 $Value$ 。

2.3 一体化批量计划模型与求解

根据 1.2 节构建的炼钢-连铸 CVRP 问题下的批量计划模型，可分别求出最优炉次计划与最优浇次计划，但得出的计划只是单独考虑所在工序的约束条件与目标。一体化生产计划不是追求局部每个计划的目标惩罚最小，而寻求一体化生产批量计划的全局优化，因此本文在原有基础上将两阶段的容量（数量）约束作为惩罚约束条件，使模型统一起来构建新的目标函数。编制炉次计划时，若炉次内板坯的总重量太少，为满足生产需要会使余材量增加，炉次产生的余材不仅会导致资源的浪费，还会增加连铸时的成本，故将炉次计划约束 (a) 更改为公式 (3)：

$$0 \leq Y_q \leq G \times (1-r), \quad q=1, \dots, Q \quad (3)$$

其中 r 表示炉容比，根据实际需要确定。

编制浇次计划时,尽可能地将炉次组成浇次,当相同品种和规格炉次的数量超过 LA , 所剩的炉次与其它品种和规格的炉次组合会导致成本大大增加。此时,将剩余较少炉次的浇次计划取消,故将浇次计划约束(c)改为公式(4):

$$LA_{\min} \leq \sum_{q=1}^Q X_{qm}, \quad m=1, \dots, M \quad (4)$$

其中 LA_{\min} 表示浇次内炉次数量的下限,根据需要确定。

炼钢-连铸一体化批量计划目标函数如公式(5)所示:

$$\min f = f_1 + f_2 + f'_1 + f'_2 + f_3 \quad (5)$$

$$f_3 = \sum_{n=1}^N \beta_n (1 - X_{nq}) \quad (6)$$

其中 β_n 表示合同板坯的撤销惩罚,目标函数 f_3 的计算有两个部分,分别是在编制炉次计划时未满足公式(3)而撤销板坯的惩罚和编制浇次计划时未满足公式(4)而撤销的炉次惩罚。目标函数中的撤销板坯和炉次惩罚体现了炼钢-连铸相互耦合的一体化生产计划,实现了炼钢-连铸工序的有效衔接。

炼钢-连铸一体化批量计划流程如图2所示:

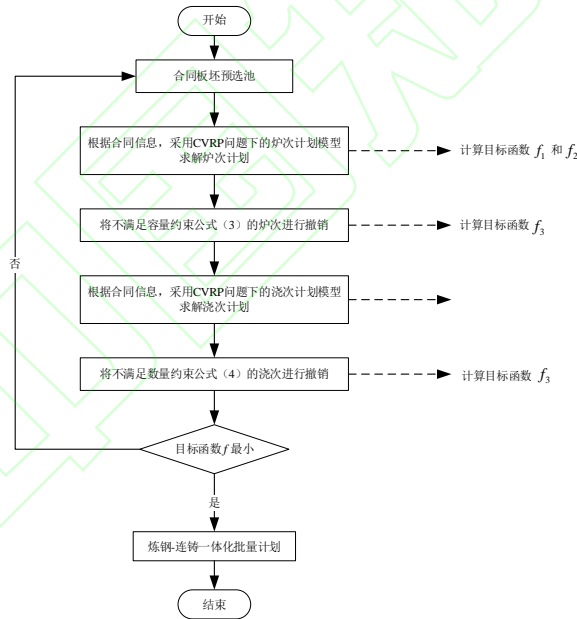


图2 一体化批量计划流程

3 改进遗传算法

3.1 染色体编码与解码

改进的遗传算法(GA-LNS)求解炉次计划与浇次计划时均采用实数的编码方式,因 CVRP 问题的需要,需设一个虚拟的车厂。虚拟车厂编码为0,客户节点编码为1,2,3,...,N,假设有7个客户需要服务,则染色体可为{1,3,5,4,6,2,8,7}。

解码时采用一种贪婪准则划分实数编码的方式，如染色体{1,3,5,4,6,2,8,7}根据运输需求以及限制公式可得 3 条子路径，分为 0-1-3-5-0，0-4-6-2-8-0，0-7-0。

3.2 种群初始化

根据编码与解码方案，种群中染色体用随机数序列生成的方法达到种群规模，以此作为第一代种群。

3.3 适应度值计算

对于炉次计划的染色体适应度计算公式 $Z_1 = f_1 + f_2$ ，对于浇次计划的染色体适应度计算公式 $Z_2 = f'_1 + f'_2$ 。

3.4 遗传算子

3.4.1 选择算子

选择算子采用轮盘赌选择策略与精英保留策略结合的方法。轮盘赌选择策略的出发点是适应度值越高的个体被选择的概率越大，本文需要适应度值越小的个体被选择的概率越大，需要进行如下适应度值的转换。

步骤 1：计算种群中所有染色体的适应度值 $f(i)$ ；

步骤 2：找出种群中适应度值最高的值 $f(\max)$ ，依照公式（7）进行适应度值的转换；

$$f'(i) = f(\max) \times \xi - f(i) \quad (7)$$

其中， $f'(i)$ 代表适应度值转换后每条染色体的适应度值； ξ 为大于 1 的系数，根据实验 $\xi = 1.2$ 。

步骤 3：依据公式（8）计算每条染色体的选择概率 $p(i)$ ；依据公式（9）计算每条染色体的累计概率 $q(i)$ ；

$$p(i) = f'(i) / \sum_{i=1}^N f'(i) \quad (8)$$

$$q(i) = \sum_{j=1}^i p(j) \quad (9)$$

步骤 4：每次产生一个[0,1]之间的随机数 r ，当 $q(i) < r \leq q(i+1)$ 时选择第 $i+1$ 的个体作为子代个体；

步骤 5：重复步骤 4 直到到达种群上限。

步骤 6：精英保留策略直接将父代种群前 20% 的优秀个体复制到下一代，防止在操作中将优秀个体遗漏掉。

3.4.2 交叉算子

交叉算子采用图 3 部分交叉的方法。例如，两个个体 A 与 B 如图 3-(a)所示，进行虚线内基因片段的交叉后如图 3-(b)所示，由于产生了非法解，所以依据 5-2，6-4，7-8 的对应原则将虚线外的重复基因进行替换如图 3-(c)所示。

A	315	248	679	315	567	679	312	567	489
B	891	567	243	891	248	243	791	248	563
	(a)			(b)			(c)		

图 3 部分交叉方法图示

3.4.3 变异算子

变异算子对种群变异个体采用轮盘赌的方法从两点基因交换操作、基因片段逆序操作以及基因片段插入操作中选出一种进行。各变异操作如下：

两点基因交换操作：随机生成两个变异点，将变异点上的基因进行交换；

基因片段逆序操作：随机生成两个变异点，将变异点之间的基因片段进行逆序；

基因片段插入操作：随机生成一个变异点，将某一基因片段插入到变异点之前。

3.4.4 改进自适应交叉和变异概率

种群在进化的过程中，选择算子的前期应具有较大的概率进行交叉操作寻找更优的个体，后期为了避免将优秀个体破坏掉所以将概率减小。本文依据公式（10）进行当代选择概率的选取。

$$R_c(m) = \frac{R_c(\max) - (R_c(\max) - R_c(\min))}{M/m} \quad (10)$$

其中， m 代表当前为第 m 代； M 为最大运行迭代次数； $R_c(m)$ 代表第 m 代的选择概率； $R_c(\max)$ 和 $R_c(\min)$ 为最大选择概率和最小选择概率。

遗传算法会随着迭代次数逐步的陷入局部最优，所以变异概率应随着迭代次数逐渐增大，使种群跳出局部最优。本文依据公式（11）进行当代变异概率的选取。

$$R_m(m) = \frac{R_m(\min) + (R_m(\max) - R_m(\min))}{M/m} \quad (11)$$

其中， m 代表当前为第 m 代； M 为最大运行迭代次数； $R_m(m)$ 代表第 m 代的变异概率； $R_m(\max)$ 和 $R_m(\min)$ 为最大变异概率和最小变异概率。

3.5 改进大邻域搜索算法

本文在遗传算法的寻优阶段结合了 LNS 算法拆分与重构的思想，提出自基因节点数下的改进删除算子，并使用轮盘赌的方法将删除和插入算子进行组合，采用 Metropolis 准则接受新解，提高算法在解空间的搜索范围且避免了过早收敛；又提出精英搜索策略，能在较优的解集中挖掘更优的解，增强了算法的局部搜索能力。

3.5.1 删除算子

按照一定的规则从已有染色体中删除部分基因点，分为以下四种删除规则。

(1) 随机删除算子

随机选取 c 个基因点，直接从原有路线中删除。随机删除算子增加了邻域搜索的随机性。

(2)最大节约成本删除算子

将所有基因点按公式（12）进行节约成本的计算并排序，选取前 c 个节约成本较大的基因点从原有路线中删除，目的是进一步减小总行驶距离。

$$D_i = d_{h,i} + d_{i,j} - d_{h,j} \quad (12)$$

其中， D_i 表示 i 点的节约成本； h 表示 i 的前基因点； j 表示 i 的后基因点； $d_{i,j}$ 表示基因点 i 与 j 之间的距离。

(3)随机路径删除算子

对染色体进行解码，随机对一条子路线上的所有基因点进行删除，删除的基因点数量与 c 的大小无关，只与子路线中基因点数量有关。随机路径删除算子能够在算法前期减少子路线的数量，达到快速收敛的目的。

(4)平均距离最大路径删除算子

对染色体进行解码，将所有的子路线按公式（13）进行平均距离的计算并排序，平均距离最大的子路线上的所有基因点进行删除，删除的基因点数量与 c 的大小无关，只与子路线中基因点数量有关。目的是将最坏路径上的基因点进行重新分配，进一步减小总行驶距离。

$$AD_i = l_i / n_i \quad (13)$$

其中， AD_i 表示第 i 条子路线的平均距离； l_i 表示第 i 条子路线的总行驶距离； n_i 表示第 i 条子路线上基因点的数量。

3.5.2 插入算子

插入算子按照一定的规则将染色体删除的基因点按照规则插入到染色体中分为以下两种插入规则。

(1)贪婪插入规则

该插入规则是选取一个已删除的基因点，遍历插入到剩余基因点之中，选取增加总距离最小的最优插入位置进行插入，重复上述过程，直到所有已删除的基因点都插入到染色体中。

(2)后悔值插入规则^[19]

后悔值是选择一个已删除的基因点，计算其最优插入位置的增加距离与其他插入位置的增加距离之差。后悔值插入规则是选取其中后悔值最大的位置进行该基因点的插入，重复上述过程，直到所有已删除的基因点都插入到染色体中。后悔值越高表示未来进行基因点插入会花费更多的成本，所以优先插入后悔值高的位置。

3.5.3 自适应基因节点数与接受准则

(1)自适应基因节点数

上述删除算子有关删除的基因数量 c 会按照公式（14）随着迭代次数变化而减小，目的是加快收敛速度。

$$c = \text{ceil}\left(Q - (Q-1) \cdot \frac{m}{M}\right) \quad (14)$$

$$Q = \frac{L}{5} \quad (15)$$

其中, $\text{ceil}(\cdot)$ 表示向上取整函数; Q 为节点系数与染色体长度有关; L 为染色体长度; m 代表当前为第 m 代; M 为最大运行迭代次数。

(2)接受准则

经过删除算子与插入算子对染色体的操作后, 其适应度值会有所改变, 一味的接受比原来更好的染色体会陷入局部最优。本文采用模拟退火算法的 Metropolis 接受准则, 令 T 为当前退火温度, $\Delta f = f'(s) - f(s)$, 其中 $f'(s)$ 与 $f(s)$ 分别为新解与旧解的适应度值。当 $\Delta f < 0$, 则接受新解; 否则计算接受概率 $e^{-(\Delta f/T)}$, 产生 $[0,1]$ 随机数 $rand$, 当 $e^{-(\Delta f/T)} > rand$ 时接受新解。Metropolis 链长为 L , 退火温度会随着迭代次数的增加而减小, 当迭代次数到达链长 L 时终止迭代。

3.5.4 精英搜索策略

精英搜索策略只针对于优秀的个体进行两点交换和片段交换操作, 停止条件为运行到规定的最大次数或者找到了比当前染色体适应度更优的值。精英搜索策略缺点是使算法增加了运行时间, 但对解的改善是显著的。

两点交换: 该操作与变异操作的两点基因交换相同;

片段交换: 随机生成两个基因片段进行交换。

3.6 算法流程

GA-LNS算法的流程图如图4所示。

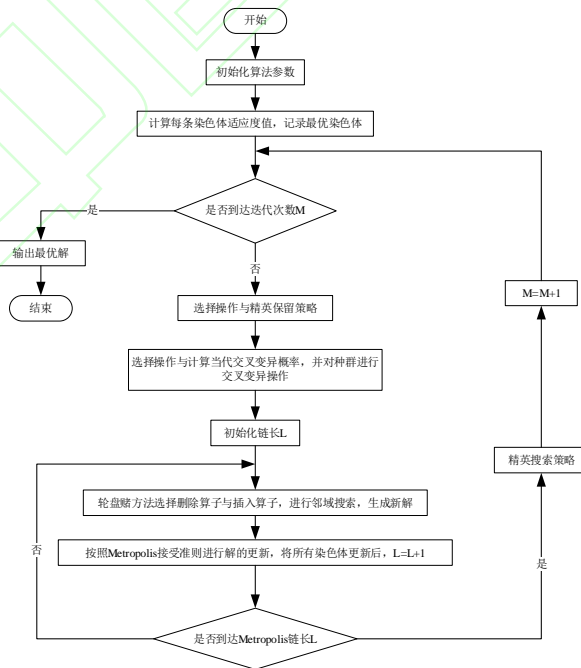


图 4 GA-LNS 算法流程图

- 步骤 1: 算法参数初始化, 初始化种群 pop ;
- 步骤 2: 将每条染色体进行解码, 依据适应度计算公式, 计算适应度值并记录最优染色体;
- 步骤 3: 进行轮盘赌选择操作, 并将精英染色体直接复制到下一代;
- 步骤 4: 计算当代交叉变异概率, 进行交叉变异操作;
- 步骤 5: 将交叉变异后的种群染色体进行 Metropolis 接受准则下的删除和插入算子操作, 并到达链长 L 时终止;
- 步骤 6: 将种群优秀个体进行精英搜索策略的邻域搜索操作, 找到更优的解或者达到最大运行次数时终止;
- 步骤 7: 重新进行适应度计算, 记录最优染色体;
- 步骤 8: 判断是否达到迭代条件, 若达到迭代条件, 则输出最优解; 否则, 转到步骤 3。

4 算例验证及结果分析

4.1 算法性能分析

为了验证本文改进的遗传算法 (GA-LNS) 性能, 首先使用 CVRP 经典算例中的 N76k14 算例进行测试, 算例 N76k14 代表 76 个客户安排到 14 个车辆中, 其最优解为 1032。结果与传统遗传算法^[20] (Genetic algorithm, GA) 和遗传模拟退火算法^[21] (Genetic simulated annealing algorithm, GA-SA) 进行比较, 仿真实验均在 MATLAB R2021a 上进行。算法实验参数如表 3 所示。

表 3 算法实验参数

算法参数	GA-LNS	GA	GA-SA
种群数量	120	1000	120
最大迭代次数	1000	1000	1000
交叉概率	0.2~0.6	0.6	0.6
变异概率	0.1~0.7	0.1	0.1
Metropolis 链长	10	—	10
初始温度	0.025	—	0.025
温降系数	0.99	—	0.99
精英搜索次数	10	—	—

注: “—” 表示该算法无此类算法参数。

程序均独立运行 20 次, 取最优结果, 迭代曲线对比图如图 5 所示。从图中可以看出 GA 算法和 GA-SA 算法寻优结果分别为 1318.13、1083.93; 而本文 GA-LNS 算法在 112 代就达到了收敛, 寻优结果为 1053.47, 与已知最优结果最为接近, 寻优得到的最佳路径见图 6。从收敛速度和寻优结果来看, 本文设计的 GA-LNS 算法性能优于其它两种算法。

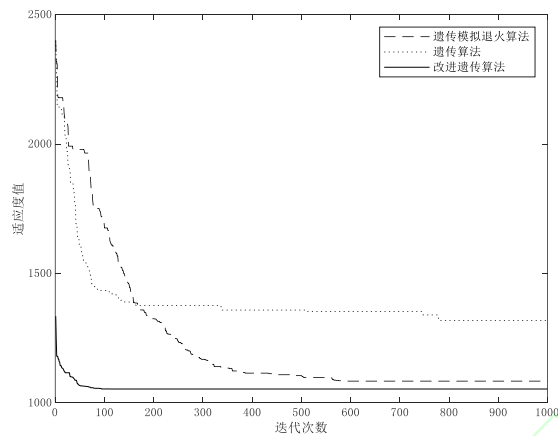


图 5 迭代曲线对比图

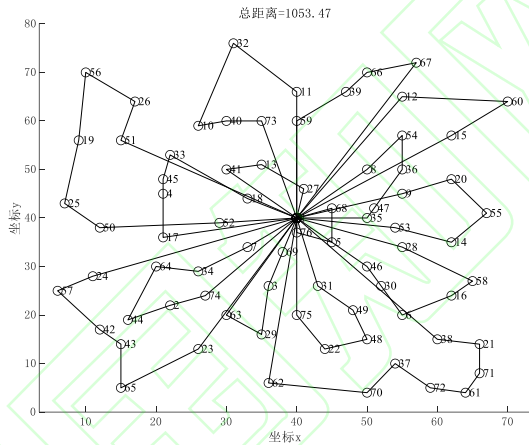


图 6 GA-LNS 算法的最佳路径图

为分析不同数据规模下算法的稳定有效性，本文采用 10 种不同规模的算例进行了仿真实验，并与文献[22]中的遗传算法（GA）和遗传禁忌搜索算法（Genetic tabu search algorithm，GA-TS）进行了比较。结果表明 GA-LNS 算法在算例中的寻优值都比 GA 和 GA-TS 算法寻优值更好，而且前 3 个算例改善了已知最优解，充分说明了本文设计算法是稳定有效的，测试结果如表 4 所示。

表 4 测试结果

算例	已知最优解	GA ^[22]	GA-TS ^[22]	GA-LNS	
		最优值	最优值	最优值	偏差
N22K4	375	393	390	375	0%
N23K3	569	569	569	568	-0.17%
N30K4	534	516	508	508	-4.87%
N33K4	835	860	850	839	0.47%
N51K5	521	539	531	524	0.57%
N76K7	683	735	705	689	0.87%
N76K8	735	774	763	746	1.49%

N76K10	832	915	896	842	1.20%
N101K8	817	893	860	834	2.08%
N101K14	1077	1238	1127	1107	2.79%

4.2 模型验证

在实验数据与惩罚参数设置完全相同的条件下, 本文 CVRP 模型与文献[10]提出的伪商旅问题下的炉次计划模型进行了未知编制炉次数的对比实验。采用文献[10]的实验数据进行 30 个合同板坯的炉次批量计划编制, 部分板坯信息如表 5 所示, 每个板坯在钢级、宽度、交货期上的信息各有不同, 其中除了 29 号与 30 号板坯有较大的撤销惩罚外, 其他板坯的撤销惩罚都较小。两种模型得出的批量计划结果如表 6 所示。

表 5 部分板坯信息

板坯号	撤销惩罚	钢级量化指标	板宽 (毫米)	交货期 (天)	重量 (吨)
		ST	W	T	g
3	100	11	1050	6	25
7	100	12	1100	7	28
14	100	11	1200	5	26
21	100	14	1150	5	23
22	100	23	1150	6	23
29	1000	32	1250	7	10
30	1000	32	1250	5	10

表 6 实验结果

CVRP 问题下的炉次计划模型			伪商旅问题下的炉次计划模型 ^[12]		
炉次	板坯组合	重量 (吨)	炉次	板坯组合	重量 (吨)
1	1, 9, 18, 19	99	1	1, 7, 9, 10, 11	98
2	2, 3, 4, 5	100	2	29, 30	20
3	6, 7, 8, 10, 11	100	3	2, 3, 4, 5	100
4	12, 14, 20, 21	98	4	23, 24, 25, 26	96
5	13, 15, 16, 17	95	5	21, 22, 27, 28	86
6	23, 24, 25, 26	96	6	9, 13, 16, 17	100
7	29, 30	20	7	15, 18, 19, 20	92
未编入板坯	22, 27, 28	63	未编入板坯	2, 6, 14	79
钢级/宽度/交货期	196/3500/760		钢级/宽度/交货期	212/4500/960	
差异惩罚			差异惩罚		

对于相同的 30 个板坯合同, 两种模型得出的都是 7 个炉次计划, 均有 3 个合同板坯未编入计划, 但本文模型未编入计划的板坯重量 63 吨低于文献[10]的 79 吨, 而且本文编制的炉次的重量更接近于满炉 100 吨; 文献[10]中第 5 个炉次的 21 号与 22 号板坯钢级差异过大, 本文模型制定出的炉次计划钢级则更为接近; 在差异惩罚上, 本文模型得出的钢级、宽度和交货期的惩罚值均低于文献[10]的伪商旅模型。

4.3 炼钢-连铸一体化批量计划实验

为验证大批量生产中本文一体化编制的有效性，采用某钢铁企业的 200 份合同作为生产数据进行实验。将改进的遗传算法（GA-LNS）与传统遗传算法^[20]（GA）、遗传模拟退火算法^[21]（GA-SA）所得最优结果进行比较，各算法参数如表 7 所示。

表 7 算法参数

算法参数	GA-LNS	GA	GA-SA
炉次种群数量	100	2500	100
炉次计划迭代次数	2500	2500	2500
浇次种群数量	100	500	20
浇次计划迭代次数	200	200	200
交叉概率	0.1~0.6	0.6	0.6
变异概率	0.1~0.7	0.1	0.1
Metropolis 链长	10	—	10
初始温度	0.025	—	0.025
温降系数	0.9	—	0.9
精英搜索次数	20	—	—

注：“—”表示该算法无此类算法参数。

炉次计划模型参数为： $G=300$ 、 $ST=2$ 、 $W=50$ $\alpha_1=20$ 、 $\alpha_2=1$ 、 $\alpha_3=20$ 、 $\alpha_4=1$ ；浇次计划模型参数为： $LA_{\min}=5$ 、 $LA=10$ 、 $ST=1$ 、 $W=100$ 、 $\alpha_1=20$ 、 $\alpha_2=1$ 、 $\alpha_3=5$ 、 $\alpha_4=100$ 。

表 8 为 200 份合同的部分板坯参数信息，图 7 表示 200 份合同板坯其钢级、宽度、交货期信息分布情况。图中圆圈代表合同板坯，具体信息分别对应 XYZ 坐标轴的数值。

表 8 部分板坯信息

板坯号	撤销惩罚	钢级量化指标	板宽（毫米）	交货期（天）	重量（吨）
		ST	W	T	g
3	100	12	1471	30	66
38	100	11	1270	30	74
77	100	10	1269	15	65
105	100	22	1241	15	74
135	100	22	1505	30	77
171	100	23	1569	15	81

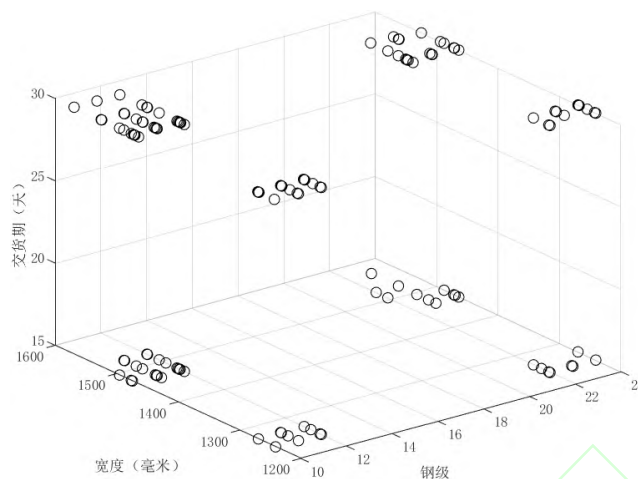


图 7 合同板坯信息(钢级、宽度、交货期)

表 9 为计划结果。对比三种算法的编制结果，GA-LNS 算法不仅可实现未编入计划的合同数量最少、余材量最低，还可实现炉次计划惩罚值小且收敛时间短的结果。在浇次数量上，3 种算法的所求结果差距不大，GA 算法和 GA-LNS 算法均为 7 个浇次，但 GA-LNS 算法所求浇次惩罚值更小、收敛时间更短。

图 8 与图 9 分别为 3 种算法求解炉次和浇次计划的迭代曲线对比图，可以看出 3 种算法均随着迭代次数的增加，目标函数逐渐减小，但 GA-LNS 算法的收敛速度更快、所需达到稳定的迭代次数更少，求解速度上更优。

表 9 计划结果

算法	炉次计划 惩罚值	收敛时间 (秒)	炉次数量	浇次数量	余材量 (吨)	浇次计划 惩罚值	收敛时间 (秒)	未编入合同数 量
GA-LNS	3124	774	53	7	1550	2021	0.94	12
GA ^[21]	6841	3846	43	7	1793	3143	8.19	55
GA-SA ^[22]	4084	1397	52	8	1721	2685	3.52	19

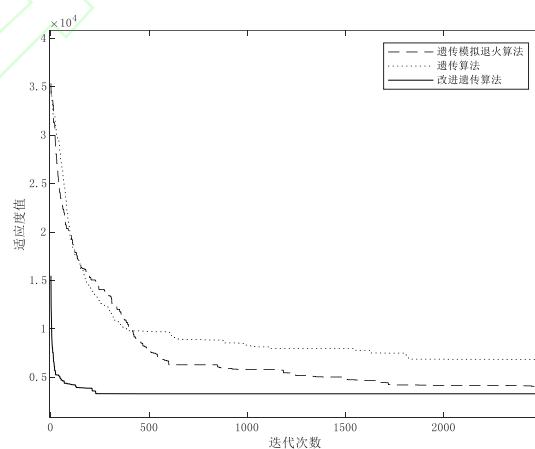


图 8 炉次计划迭代曲线

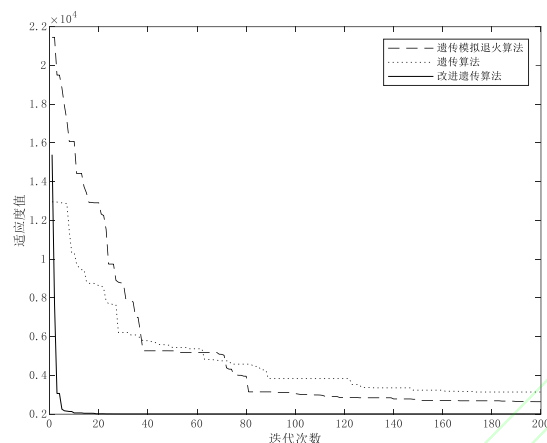


图 9 浇次计划迭代曲线

综上所述，本文提出的一体化批量计划模型是正确有效的，求解速度快且惩罚值低，满足企业大批量计划编制的需要。

5 结束语

本文统筹考虑炼钢-连铸的生产工艺约束，提出了 CVRP 问题下的炼钢-连铸一体化批量计划模型，实现了炼钢-连铸生产过程批量计划的全局优化。采用改进的遗传算法（GA-LNS）算法进行求解，并通过实验验证了模型与算法的正确有效性。本文为一体化批量计划问题提供了新思路，为现代化钢铁企业在节能降耗、降低库存、提高成材率等方面的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] WANG Xuliang, CHAI Xudong, ZANG Cheng, et al. Collaborative production planning algorithm for cross-enterprises in cloud manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(02): 412-420. [王旭亮, 柴旭东, 张程, 等. 云制造环境下跨企业协同生产调度算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(02): 412-420.]
- [2] GUO Yuhan, FENG Yue, LIU Wanjun, et al. Collaborative decision of production batch and dual-mode maintenance with limited production and inventory capacity [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(9): 2894-2908. [郭羽含, 冯玥, 刘万军, 等. 有限产能和库存的生产批量与双模式维护联合优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(9): 2894-2908.]
- [3] WANG Yuexiao, SHI Cantao, SHI Zhongxuan, et al. Research and application of an optimization method for charge batch planning considering multiple available size billet[J] Metallurgical Industry Automation, 2023, 47(02): 48-56. [王悦晓, 施灿涛, 史忠轩, 等. 一种考虑多种可选坯型的炉次批量计划优化方法研究与应用[J]. 冶金自动化, 2023, 47(02): 48-56.]
- [4] JIA Shujin, YI Jian, DU Bin. A charge optimization algorithm based on column generation and linear programming[J] Metallurgical Industry Automation, 2020, 44(03): 30-35. [贾树晋, 易剑, 杜斌. 基于列生成与线性规划的炼钢组炉优化算法 [J]. 冶金自动化, 2020, 44(03): 30-35.]
- [5] YE Hu, JI Xiaoyuan, ZHOU Jianxin, et al. Casting heat treatment charge plan based on genetic algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(03): 575-83. [叶虎, 计效园, 周建新, 等. 基于遗传算法的铸造热处理炉次计划 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(03): 575-83.]
- [6] YI J, JIA S-J, DU B. Hybrid optimization for charge planning problem in twin strands continuous casting production [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, (prepublish).
- [7] GONGSHU W, QINGXIN G, WENJIE X, et al. A graph partitioning based cooperative coevolution for the batching problem

- in steelmaking production [J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(19).
- [8] ZHAO J, LIU Q-L, WANG W. Models and Algorithms of Production Scheduling in Tandem Cold Rolling [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(5).
- [9] YANG Fan, LI Qiqiang, LIU Shan, et al. Hybrid heuristic-cross entropy algorithm for cast planning problem [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(09): 2241-2247. [杨凡, 李歧强, 刘珊, 等. 浇次计划编制的混合启发式一交叉熵算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(09): 2241-2247.]
- [10] 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. [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(07): 1509-1517]
- [11] XUE Yuncan, ZHENG Dongliang, YANG Qiwen. Optimum steel making cast plan with unknown cast number based on the modified discrete particle swarm optimization [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(2): 273-277. [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浇次计划(英文) [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(02): 273-277.]
- [12] ZHANG Wenxue, LI Tieke. Batch plan optimization of steel integrated production with multiple processes [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(06): 1296-1303. [张文学, 李铁克. 面向多种生产工艺的冶铸轧一体化批量计划优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(06): 1296-1303.]
- [13] YONG-ZHOU W, ZHONG Z, MING-MEI Z, 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.
- [14] WU Shuangping. Study on optimization of integrated production scheduling in steelmaking-continuous casting section [D]. University of Science and Technology Beijing, 2021. [吴双平. 炼钢-连铸区段一体化生产调度的优化研究 [D]. 北京科技大学, 2021.]
- [15] LU Yi. Research on the Integrated batch planning method of steelmaking-continuous casting and hot strip rolling [D]. Chongqing University, 2019. [卢义. 炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制方法研究 [D]. 重庆大学, 2019.]
- [16] ZHENG Zhong, LONG Jianyu, GAO Xiaoqiang, et al. Present situation and prospect of production control focusing on planning and scheduling in iron and steel enterprise [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(11): 2660-2674. [郑忠, 龙建宇, 高小强, 等. 钢铁企业以计划调度为核心的生产运行控制技术现状与展望 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(11): 2660-2674.]
- [17] SUN Liangliang, SHA Shuya, QU Qiuxia, et al. A survey of integrated optimization method of batch planning and production scheduling for steelmaking-continuous casting process under uncertainties based on Lagrangian relaxation framework [J]. Control and Decision, 2021, 36(08): 1793-1803. [孙亮亮, 沙淑雅, 屈秋霞, 等. 拉氏框架下不确定环境炼钢-连铸批量计划调度一体化方法综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(08): 1793-1803.]
- [18] PANG Yan, LUO Huali, XING Lining, et al. A survey of vehicle routing optimization problems and solution methods [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(10): 1573-1584. [庞燕, 罗华丽, 邢立宁, 等. 车辆路径优化问题及求解方法研究综述 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(10): 1573-1584.]
- [19] ZHOU Guo, JI Bin, FANG Xiaoping. Research on green vehicle routing problem and algorithm of multi-to-many cross-docking [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(08): 2202-2210. [周果, 季彬, 方晓平. 多对多越库配送绿色车辆路径问题及算法研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(08): 2202-2210.]
- [20] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to algorithms [M]. MIT press, 2022.
- [21] 葛显龙, 王伟鑫, 李顺勇. 智能算法及应用 [M]. 西南交通大学出版社, 2017.
- [22] XUE Guiqin, WANG Zheng. Dynamic vehicle routing problem with inventory synergetic [J]. Operations research and Management Science, 2021, 30(11): 19. [薛桂琴, 王征. 带客户协同分仓的动态车辆路径问题研究 [J]. 运筹与管理, 2021, 30(11): 19.]

作者简介:

周亚罗(1982—),女,河北衡水人,副教授,硕士,研究方向:复杂系统的建模与控制,E-mail: 550589525@qq.com;

+孙鑫(1998—),男,河北唐山人,硕士生,研究方向:控制技术及应用,E-mail: 1099255135@qq.com ;

刘文广(1978—),男,河北石家庄人, 硕士, 研究方向:轧钢新技术与工艺优化,E-mail: 464710757@qq.com;

张瑞成(1975—),男,河北唐山人, 教授,博士, 研究方向:控制理论及应用,E-mail: rchzhang@126.com。

