**•企业信息化技术•doi：10. 3969/j. issn. 1000-7059. 2021. 01. 001**

**炼钢-轧钢流程合同排程多目标变邻域搜索算法**

徐 端1，孙 帅2，刘士新2

（1.上海宝信软件股份有限公司信息化事业本部，上海 201900；2.东北大学信息科学与工程学院，辽宁 沈阳 110819）

**摘要：**提高钢铁企业合同排程优化水平可以减少生产过程中品种及规格切换，稳定产品质量，降低能源消耗和生产成本。针对钢铁企业炼钢-轧钢流程合同排程优化问题，建立了多目标优化数学模型，设计了多目标变邻域搜索算法，针对问题特点设计了3种邻域结构的局域搜索过程。通过实际案例对模型和算法进行了验证，并把算法嵌入到实际应用系统中。计算实验和实际应用效果表明模型和算法有效，可以求得分布较好的Pareto解集，便于决策者决策。

**关键词：**炼钢-轧钢流程；合同排程；多目标；变邻域搜索算法；数学模型

**文献标志码：A 文章编号：1000-7059（2021）01-0000-00**

**Multi-objective variable neighborhood search algorithm for order scheduling of steelmaking-rolling process**

XU Duan1，SUN Shuai2，LIU Shixin2

(1. Informatization Business Department, Shanghai Baosight Software Co., Ltd., Shanghai 201900, China;2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Improving the optimization level of order scheduling in iron and steel enterprises can reduce variety and specification switches in the production processes, so as to stabilize product quality, reduce energy consumption and production cost. Aiming at the order scheduling optimization problem of steelmaking-rolling process in iron and steel enterprises, a multi-objective optimization mathematical model is established, and a multi-objective variable neighborhood search algorithm is designed. According to the characteristics of the problem, three kinds of local search procedures are designed based on different neighborhood structures. The model and algorithm are verified by a practical instance , and the algorithm is embedded into the practical application system. The computational experiments and practical application results show that the model and algorithm are effective and Pareto solution sets with good distribution can be obtained, which is convenient for decision makers.

**Keywords:** steelmaking-rolling process; order scheduling; multi-objective; variable neighborhood search algorithm; mathematical model

**0 引言**

钢铁生产流程具有大型化、高速化、连续化、大批量的特点。现代工业技术的发展使得下游制造业对钢铁材料的需求越来越趋于多样化和个性化。特别是随着“工业4.0”的推进，个性化定制的生产模式变得更加普遍，下游的汽车、造船等制造业已经开始要求钢铁企业实现准时化和准序化交货，钢铁企业大批量生产方式与客户个性化需求的矛盾更加突出。

提高钢铁企业生产计划及调度水平是解决大批量生产方式与客户个性化需求之间矛盾的重要途径。合理的生产计划及调度可以减少生产过程中品种及规格的切换，稳定产品质量，降低能源消耗和生产成本，敏捷地满足客户的个性化需求。理论上，钢铁生产计划与调度问题一般属于大规模整数规划问题，求解困难，一直吸引很多学者和业者的关注和研究。

钢铁企业生产计划与调度一般包含作业调度和合同计划两个层次的优化问题。作业调度以天为计划周期，对合同计划确定的每天生产任务进行作业排程，按工序区段划分可分为铁钢对应调度、炼钢-连铸调度[3]、轧钢调度[4]以及炼钢-连铸-热轧一体化调度[5]等。

与作业调度相比，钢铁企业合同计划功能更加丰富。在钢铁企业生产计划系统中，合同计划功能主要包括合同评审、制程优化、物料匹配和合同排程等功能。目前，针对钢铁企业合同计划问题的研究较少，文献综合考虑物料匹配和合同排程功能，以最小化提前/拖期成本、机会损失成本、库存匹配成本和生产成本为目标，建立了多目标优化模型，并设计了多目标粒子群优化算法进行求解，应用小规模问题对模型和算法进行了测试验证。文献针对合同排程问题，以最小化提前/拖期成本为目标，建立了合同排程数学优化模型，并设计了遗传算法进行求解，应用小规模问题对模型和算法进行了测试验证。文献针对合同排程问题，以最小化拖期成本、机组产能均衡利用和最小化库存成本为目标，建立了多目标优化模型，设计了多目标粒子群优化算法进行求解，应用小规模问题对模型和算法进行了测试验证。文献对物料匹配和合同排程问题进行了研究，对两类问题分别建立了数学模型，但没有给出算法。

近年来，将合同评审与合同排程进行集成优化引起了越来越多的业界和学术界的关注和研究。文献针对合同评审与排程集成优化问题，以最大化收益为目标建立了混合整数规划模型，设计了变维度粒子群优化算法进行求解。文献针对合同订货量不确定条件下产能受限的批量生产计划问题，建立了合同评审的鲁棒优化模型，通过对等变换将鲁棒优化模型转换为线性混合整数规划模型，并利用松弛及修正启发式算法进行求解。文献针对装设时间顺序依赖的合同评审与排程集成优化问题，以最大化收益为目标建立了混合整数规划数学模型，设计了拉格朗日松驰和列生成两种精确算法，以及一种求解大规模问题的启发式算法。

本文针对钢铁企业合同计划中的合同排程问题进行研究。综合分析现有研究成果发现，现有针对合同计划的研究方法主要是建立混合整数规划模型，再根据具体模型的特点设计分解算法进行求解，优化目标以合同准时交付为主，对机组产能和库存水平优化较少。此外，现有模型和算法以5天为一个时间段，只能解决300份合同以下规模的合同排程问题。实际应用中，合同排程以1天为一个时间段，每次排程的合同数量约3 000份。现有模型和算法距离实际需求还有较大差距。

钢铁企业合同排程以月为计划周期，根据合同的品种/数量/交货期、产线产能、组批规程、库存状态和能力约束等前提条件，确定合同的生产机组和生产日期。本文针对炼钢-轧钢流程合同排程优化问题，建立了以机组产能充分利用、最小化机组每日库存与目标库存差值的绝对值累加和为目标的多目标数学模型，设计了多目标变邻域搜索算法进行求解，通过实验验证了模型和算法的有效性。

**1 合同排程问题描述及数学模型**

炼钢-轧钢流程合同排程问题描述如下：生产流程包含炼钢-连铸、热轧、冷轧等主体工序，涉及炼钢-连铸，热轧轧制、平整，冷轧轧制、镀锌、连退等多个工序的多个机组。生产流程以工单为单位组织生产，每个工单的制程（工序路径和加工顺序）、在各机组上加工时占用的产能已知。问题是如何确定各工单在各机组上的开始加工时间，使得各机组产能充分利用并且所有机组库存在各阶段尽量接近于标准库存。为了便于描述问题和模型的对应关系，引入如下符号及参数。

表1 合同排程问题的符号及参数

Table 1 Symbols and parameters of order scheduling problems

|  |  |
| --- | --- |
| 符号 | 说明 |
|  | 工单集合， |
|  | 工单编号， |
|  | 产能限制标记，如果工单涉及产能限制，则，否则 |
|  | 机组集合，，如果机组在机组 的上游工序，则 |
|  | 产能限制机组集合，在的机组上，产能限制工单占产能低于20% |
|  | 工单通过的机组列表， |
|  | 机组编号，，是机组的紧后下游机组 |
|  | 计划周期包含的时间段集合， |
|  | 时间段编号， |
|  | 工单在机组上的生产质量 |
|  | 机组日产能 |
|  | 工单在机组上的最早开始时间， |
|  | 工单在机组上的最晚开始时间， |
|  | 机组的库存上限量 |
|  | 机组的期初库存量 |
|  | 机组的目标库存量 |
|  | 工单的热装标志，如果工单为热装板坯，则，否则 |

**1.1 合同排程的优化目标**

机组产能充分利用、用户合同按期交付率和库存合理等是钢铁企业运作管理的关键性能指标。其中，机组产能利用率和用户合同按期交货率两项指标间具有很强的相关性。因此，本文选择最大化产能利用和机组库存在各阶段尽量接近目标库存为合同排程的优化目标。基于表1中的符号定义，设置如下决策变量：

 (1)

式中：为机组在第天的库存量，。

则目标函数描述见式（2）和式（3）。其中，目标函数（1）为各机组在各时间段的产量之和，函数值越大越好；目标函数（3）表示各机组在各时间段库存与目标库存差的绝对值之和，函数值越小越好。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

式中：*Z*1为目标1函数值；*Z*2为目标2函数值。

**1.2 合同排程的约束条件**

在工单生产过程中，每个工单在各工序的机组上最多被加工一次。如果工单没有被编入排程计划，则该工单也不会在机组上加工。此项约束可以用式（4）描述。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

工单需要依据工序顺序进行加工，即前一道工序加工结束，下一道工序才能开始。考虑到允许工单在相邻工序上在同一时间段完成，例如，采用直接热装方式的炼钢-连铸-热轧工序在同一天完成。因此，此项约束可以用式（5）描述。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

合同排程计划必须满足产能约束，即在各阶段各机组的消耗产能不能超过其可用产能，即必须满足约束表达式（6）。此外，根据轧制规程要求，属于烫辊材的工单每个时间段占用的热轧产能不能超过热轧机组可用产能的20%，此项约束可以用式（7）描述。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

对于热装热送的工单，其在连铸阶段的生产时间必须与在热轧阶段的生产时间处于同一个时间阶段，见约束式（8）。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

关于库存水平的计算方式，各库在第阶段初的库存量等于第阶段初期库存，加上第阶段上游机组的生产量，减去第阶段当前机组的生产量，见约束式（9）。此外，要求各阶段各机组的库存量大于0且小于库存上限。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

此外，各工单在各机组上的开始时间在区间内，其中，为工单在机组上的最早开始时间，为工单在机组上的最晚开始时间，可以根据工单加工工序顺序采用前向和反向计算方法得到，见约束式（11）。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

在实际生产中，每次编制合同排程计划时，工单数量约20 000余份，计划展望期为30天，涉及约10台机组。因此，模型式属于大规模混合整数规划问题，求解困难。而且实际合同排程系统要求算法有快速的响应性能，因此，本文设计启发式算法进行求解。

**2 多目标变邻域搜索算法**

由于本文问题规模巨大，个体编码占用内存较多，因此选用变邻域搜索算法（variable neighborhood search，简称VNS）对模型进行求解。VNS是一类单点出发的元启发式算法，与基于种群进化的元启发式算法相比，节省内存空间。VNS本质上属于一类邻域搜索算法，与基本邻域搜索算法相比，不同点在于VNS采用多个不同的邻域进行系统搜索。VNS首先采用小邻域搜索，当无法改进解时，则切换到稍大邻域。如果能继续改进解，则退回到小邻域，否则继续切换到更大邻域。因此，VNS在搜索过程中通过变动邻域结构扩大搜索空间，通过交替改变邻域结构获得问题的全局近优解[13]。与其他元启发式算法相比，VNS算法参数相对较少，优化效果稳定，已经在组合优化、生产调度[15-16]、车辆路径[17]以及选址问题[18]中广泛应用。

**2.1 算法总体流程**

本文针对炼钢-轧钢生产流程的合同排程优化问题设计多目标VNS（multi-objective VNS，简称MOVNS）算法获取问题的Pareto解集。记为问题当前解，（）分别为在第种邻域结构下的相邻解集，为算法运行过程中维护的Pareto解集。MOVNS算法总体流程如下。

**[MOVNS算法流程]**

|  |  |
| --- | --- |
| **STEP 1：** | 生成初始解，，最大迭代次数； |
| **STEP 2：** | While（） |
|  |  | For To  |
|  |  |  |  | 在中随机选择解，随机选择目标函数进行优化； |
|  |  |  |  | 基于邻域结构进行局部搜索获得局部最优解； |
|  |  |  |  | If 为Pareto解 |
|  |  |  |  | Then ；从删除被支配的解；； |
|  |  |  |  | Else  |
| **STEP 3：** | 输出Pareto解集。 |

MOVNS算法的初始解及邻域结构分别在第2.2节、第2.3节描述。

**2.2 初始解生成过程**

在本文合同排程问题中，每个工单的制程已经确定，即加工过程经过的机组已知。合同排程在第1天开始，至第天结束，采用前向和反向计算方法可以计算出每个工单在各机组的最早开始时间和最晚开始时间。初始解的生成过程仅考虑优化目标（1），过程如下。

**[初始解产生流程]**

|  |  |
| --- | --- |
| **STEP 1：** | 对机组上待加工工单，按递增顺序排序得到工单列表； |
| **STEP 2：** | For To  |
|  |  | For To  |
|  |  |  |  | 依照中的工单排列顺序，考虑机组的产能约束，将工单安排在机组的第天生产，如果安排成功，则从 删除该工单； |
| **STEP 3：** | 输出初始解。 |

**2.3 邻域结构**

VNS算法在搜索过程中需要在不同结构的邻域中交替测试新解来改进当前解。本文MOVNS算法使用3种邻域结构，分别为邻域、邻域和邻域。

Insertion邻域搜索过程从当前解中删除一个工单，并把它重新插入到解中的其他时间段上加工获得新解。如果新解对应的某一目标函数值优于原来解目标函数值，则接受新解，否则恢复原来解。在实现过程中，由于工单数巨大，为了节省算法运行时间，随机选择400、500、600、700和800个工单进行Insertion邻域搜索，而不是对全部工单进行邻域搜索。

Swap邻域搜索过程依次选择两个制程相同的工单，交换它们在各机组上的加工时间段获得新解。如果新解对应的某一目标函数值优于原来解目标函数值，则接受新解，否则恢复原来解。

2Insertion邻域搜索过程与Insertion邻域搜索过程类似，不同点是选择两个相邻工单，按照它们删除顺序，将它们重新依次插入到当前解中最好的位置获得新解。如果新解对应的某一目标函数值优于原来解目标函数值，则接受新解，否则恢复原来解。

上述邻域搜索操作都是在满足实际问题约束的前提下进行，因此达到既可以尽可能搜索多的邻域，增加找到更优解的概率，又可以节约算法的执行时间。

**3 计算实验及合同排程系统**

为了验证模型和算法的有效性，采用国内某钢铁企业一个月的用户合同3 277份，共计377 265 t，加工过程涉及9台机组。用户合同经过预处理后形成21 696个工单。在实验中，算法终止准则取，对比嵌入不同邻域搜索过程的MOVNS算法优化性能。

由于问题规模巨大，本文仅给出部分计划结果。各机组在计划期内的8天里产能利用情况见表2。由于本文合同排程的优化目标之一是产能充分利用，因此，在满足工单加工工序顺序的前提下，工单会尽早安排生产。在待排产工单不足或者用户合同品种规格结构不好的情况下，会导致机组产能出现较大剩余，甚至出现产能占用率为0%的情况。这样的合同排程信息为企业销售人员在市场上获取销售合同提供了规格及品种方面的指导。

表2 机组产能占比

Table 2 Unit capacity ratio %

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 机组 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 |
| A1 | 97.30 | 97.14 | 98.21 | 97.79 | 97.45 | 97.23 | 97.32 | 97.40 |
| A2 | 99.91 | 99.92 | 99.88 | 99.89 | 99.83 | 99.94 | 98.48 | 99.58 |
| A9 | 99.89 | 99.98 | 99.78 | 96.04 | 98.62 | 99.32 | 17.93 | 0 |
| H1 | 99.99 | 99.94 | 99.96 | 99.99 | 99.95 | 99.93 | 99.97 | 92.78 |
| H2 | 36.95 | 16.22 | 99.16 | 99.47 | 99.90 | 99.41 | 99.78 | 25.86 |
| H3 | 59.31 | 66.82 | 38.58 | 51.76 | 54.59 | 92.99 | 36.05 | 48.60 |
| C1 | 97.79 | 91.65 | 99.69 | 90.69 | 43.29 | 18.41 | 10.48 | 35.00 |
| C2 | 80.78 | 83.45 | 91.80 | 83.87 | 90.12 | 85.65 | 85.65 | 85.65 |
| C3 | 99.96 | 99.17 | 99.31 | 99.95 | 99.72 | 99.86 | 99.99 | 99.56 |

图1所示为随机选择400、500、600、700和800个工单进行邻域搜索过程时，算法获得的Pareto解对应的目标函数值曲线。图1中横坐标为目标函数的值，计算公式为；纵坐标为目标函数的值，计算公式为。由图1可见，选择600个工单进行邻域搜索过程，与和一起嵌入MOVNS算法，算法性能最好。增加随机选择的工单到700以上，优化效果并无显著变化，但算法运行时间增加。图1结果也表明本文算法能给出较大范围的目标函数权衡区间，便于决策者进行决策。



图1 Pareto解的目标函数值

Fig. 1 Values of objective functions of Pareto solutions

通过与人工编制的合同排程计划进行对比，结果表明，本文算法生成的合同排程计划优于人工编制的合同排程计划。主要体现在两个方面：首先，人工编制的合同排程计划被本文算法编制的排程计划支配，即在Pareto解集中存在一个解在两个目标上同时优于人工计划结果；其次，人工编制计划方法每次只能得到一个解，而不能提供Pareto解集用于多目标决策。

本文算法已经嵌入到钢铁企业合同排程计划编制系统中，并进行了现场应用，现场用户反馈应用效果良好，满足了企业编制合同排程计划的实际需求。

**4 结论**

（1）针对钢铁企业炼钢-轧钢流程合同排程优化问题，建立了多目标优化模型并设计了多目标变邻域搜索算法。引用实际生产案例对模型和算法进行了验证，结果表明模型和算法有效，可以满足钢铁企业编制合同排程计划的实际需求。

（2）求解合同排程计划的多目标变邻域搜索算法还有很大的改进空间。炼钢-轧钢流程合同排程优化问题是一类大规模多目标组合优化问题，本文为了提高求解算法的运行效率，仅随机选择部分工单进行邻域搜索优化，这会影响算法的优化效果。

**参考文献：**

1. Sendler U.工业4.0[M]. 邓敏，李现民,译. 北京：机械工业出版社，2014. (Sendler U. Industry 4.0[M]. DENG Min, LI Xianmin, trans. Beijing: Machinery Industry Press, 2014.)
2. 赵业清. 基于时间影响网络的铁水运输系统时间Petri网建模[J]. 冶金自动化，2015，39(2): 35. (ZHAO Yeqing. Modeling of molten iron transportation system in the steel enterprise based on time influence net and time Petri net[J]. Metallurgical Industry Automation, 2015, 39(2): 35.)
3. TAN Yuanyuan, LIU Shixin. Models and optimization approaches for scheduling steelmaking-refining-continuous casting production under variable electricity price[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(4): 1032.
4. JIA Shujin, YI Jian, YANG Genke, et al. A multi-objective optimization algorithm for the hot rolling batch scheduling problem[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(3): 667.
5. 芦永明，徐安军，贺东风，等. 炼钢-连铸-热轧一体化生产计划与调度综述[J]. 冶金自动化，2011，35（增刊1）: 770. (LU Yongming, XU Anjun, HE Dongfeng, et al. Integrated planning and scheduling of steelmaking, continuous casting and hot rolling production: A review[J]. Metallurgical Industry Automation, 2011, 35(S1): 770.)
6. ZHANG Tao, ZHENG Qipeng, FANG Yi, et al. Multi-level inventory matching and order planning under the hybrid make-to-order/make-to-stock production environment for steel plants via particle swarm optimization[J]. Computers and Industrial Engineering, 2015, 87: 238.
7. ZHANG Tao, ZHANG Yuejie. A mixed integer programming model and improved genetic algorithm for order planning of iron-steel plants[J]. International Journal of Information and Management Science, 2008, 19(3): 413.
8. LIU Shixin, TANG Jiafu, SONG Jianhai. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 100(1): 30.
9. CAI Yang, LI Tieke. Integrated system for make-to-order production management in iron and steel enterprises[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(3): 302.
10. WANG Zheng, QI Yuanqing, CUI Hairong, et al. A hybrid algorithm for order acceptance and scheduling problem in make-to-stock/make-to-order industries[J]. Computers and Industrial Engineering, 2019, 127: 841.
11. Aouam T, Geryl K, Kumar K, et al. Production planning with order acceptance and demand uncertainty[J]. Computers and Operations Research, 2018, 91: 145.
12. Silva Y L, Subramanian A, Pessoa A. Exact and heuristic algorithms for order acceptance and scheduling with sequence-dependent setup times[J]. Computers and Operations Research, 2018, 90: 142.
13. Mladenović N, Hansen P. Variable neighborhood search[J]. Computers and Operations Research, 1997, 24(11): 1097.
14. Duarte A, Pantrigo J, Pardo E, et al. Multi-objective variable neighborhood search: an application to combinatorial optimization problems[J]. Journal of Global Optimization, 2015, 63(3): 515.
15. WEN Yun, XU Hua, YANG Jiadong. A heuristic-based hybrid genetic-variable neighborhood search algorithm for task scheduling in heterogeneous multiprocessor system[J]. Information Sciences, 2011, 181(3): 567.
16. Vanchipura R, Sridharan R, Babu A S. Improvement of constructive heuristics using variable neighbourhood descent for scheduling a flow shop with sequence dependent setup time[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2014, 33(1): 65.
17. Jarboui B, Derbel H, Hanafi S, et al. Variable neighborhood search for location routing[J]. Computers and Operations Research, 2013, 40(1): 47.
18. Lamb J D. Variable neighbourhood structures for cycle location problems[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 223(1): 15.