

炼钢-连铸-热轧一体化批量计划

编制方法研究



重庆大学硕士学位论文

(学术学位)

学生姓名：卢义

指导教师：郑忠教授

学科门类：工学

学科名称：冶金工程

研究方向：冶金信息与系统工程

答辩委员会主席：陈登福教授

授位时间：2019年6月

Research on the Integrated Batch Planning Method of Steelmaking-Continuous Casting and Hot Strip Rolling



A Thesis Submitted to Chongqing University
In Partial Fulfillment of the Requirement for the
Master's Degree of Engineering

By

Yi Lu
Supervised by Prof.Zhong Zheng

June , 2019

摘要

炼钢-连铸-热轧是钢铁生产中连接紧密的三大主要工序，与之对应的炼钢-连铸-热轧一体化计划需要通过综合考虑不同工序的生产目标和工艺约束，形成可批量化组织生产的炉次计划、浇次计划和热轧单元计划来进一步提高钢铁生产物流的衔接匹配水平和平稳运行效率。然而，由于其计划编制过程是一个多阶段、多目标、多约束的复杂组合优化问题，并且炼钢、连铸和热轧工序之间的生产目标和工艺约束存在相互促进和相互制约的关系，给编制炼钢-连铸-热轧一体化批量计划的带来很大的困难。因此，开展炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制方法研究具有重要意义和应用价值。

论文以热轧带钢为对象进行炼钢-连铸-热轧批量计划编制问题研究，通过分解-协调方式来研究考虑衔接协调的炼钢-连铸计划编制问题、热轧计划编制问题以及炼铸轧一体化的衔接协调问题并分别建立模型及优化求解算法。主要研究内容及结果如下：

针对炉次计划编制问题，建立了以最小化轧制宽度跳跃惩罚、最小化交货期偏差惩罚和最小化无委材量为目标的多目标优化模型；针对浇次计划编制问题，建立了以最小化交货期差异惩罚和最小化浇次数为目标的多目标优化模型。将炼钢-连铸生产计划编制问题整体归结为具有多目标特征的多旅行商问题，设计了改进的多目标蚁群算法进行求解，并通过变邻域搜索算法有效促进了炉次计划和浇次计划的衔接协同，不同规模的测试算例检验了模型及算法的有效性。

针对热轧计划编制问题，建立了以最小化热轧板坯厚度跳跃惩罚和硬度跳跃惩罚为目标的多目标优化模型。采用概率冲突消解策略，精英保留策略、邻域搜索等多种策略设计了基于 NSGA2 的改进多目标遗传算法进行求解，并提出单热轧单元优化和热轧单元间优化策略以进一步加快解的收敛和提高解的优化能力。实例测试结果表明模型和算法能有效降低热轧板坯规格跳跃、硬度跳跃惩罚。

建立了炼钢-连铸-热轧协调匹配模型，提出了“铸轧时间差”概念及计算参数，利用该参数可引导一体化计划的优化解朝着“提高热装率”的方向收敛，实现炼钢-连铸-热轧生产计划的衔接协调。不同规模案例的仿真实验结果表明模型和算法能有效降低板坯的“铸轧时间差”，达到了提高板坯热装率的目的。

关键词：一体化计划，热装比，多目标，衔接协调

Abstract

Steelmaking-continuous and casting-hot rolling is the three main processes of tight connection in iron and steel production. The corresponding integrated plan of steelmaking-continuous casting-hot rolling needs to further improve the matching level and smooth operation efficiency of iron and steel production logistics by taking into account the production objectives and process constraints of different processes, forming furnace scheduling, casting planning and hot rolling unit planning that can organize production in batches. However, because the planning process is a multi-stage, multi-objective and multi-constrained complex combinatorial optimization problem, and the production objectives and process constraints among steelmaking, continuous casting and hot rolling processes are mutually promoting and restricting, it is very difficult to compile the integrated batch plan of steelmaking, continuous casting and hot rolling. Therefore, it is of great significance and application value to carry out the research on the integrated batch planning method of steelmaking, continuous casting and hot rolling.

In this paper, the problem of batch planning of steelmaking-continuous casting-hot rolling is studied with hot strip as the object. The problem of planning of steelmaking-continuous casting, hot rolling planning and integration of steelmaking, casting and rolling are studied by decomposition-coordination method, and the models and optimization algorithms are established respectively. The main research contents and results are as follows:

Aiming at the problem of furnace scheduling, a multi-objective optimization model is established, which aims at minimizing the jump penalty of rolling width, the deviation penalty of delivery time and the quantity of non-committees, and a multi-objective optimization model aiming at minimizing the penalty of difference of delivery time and the number of pouring times is established. The steelmaking-continuous casting production planning problem is reduced to a multi-objective multi-traveling salesman problem. An improved multi-objective ant colony algorithm is designed to solve the problem. The effectiveness of the model and the algorithm is verified by test examples of different scales.

Aiming at the problem of hot rolling planning, a multi-objective optimization model was established to minimize the thickness jump penalty and hardness jump

penalty of hot rolling slab. An improved multi-objective genetic algorithm based on NSGA2 is designed by using probability conflict resolution strategy, elite retention strategy, neighborhood search and other strategies. The optimization strategies of single hot rolling unit and between hot rolling units are proposed to further accelerate the convergence of the solution and improve the optimization ability of the solution. The test results show that the model and algorithm can effectively reduce the penalty of size jump and hardness jump of hot rolled slab.

The coordinated matching model of steelmaking, continuous casting and hot rolling is established, and the concept of "time difference between casting and rolling" and the calculation parameters are put forward. By using this parameter, the optimization solution of the integrated plan can be guided to converge in the direction of "increasing hot charging rate", and the joint coordination of steelmaking, continuous casting and hot rolling production plans can be realized. The simulation results of different scale cases show that the hot charging rate of slab can be improved by effectively reducing the "casting-rolling time difference" of slab.

Keywords : Integration plan, hot charging ratio, multi-objective, cohesion and coordination

目 录

中文摘要	I
英文摘要	III
1 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 课题目的及意义	1
1.2 钢铁生产工艺流程	2
1.3 钢铁企业生产计划研究现状	4
1.3.1 钢铁生产计划编制主要研究方法	4
1.3.2 钢铁企业生产计划编制问题的研究现状	7
1.4 主要工作	10
2 炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题研究	11
2.1 一体化生产计划编制流程	11
2.2 不同阶段生产计划的约束	14
2.2.1 炉次计划约束	14
2.2.2 浇次计划约束	14
2.2.3 热轧计划约束	15
2.3 炼钢-连铸-热轧生产计划特点	16
2.4 一体化计划编制的难点	18
2.5 本章小结	19
3 炼钢-连铸生产计划模型与编制方法研究	21
3.1 问题的提出	21
3.2 炉次计划模型	21
3.3 浇次计划模型	22
3.4 炼钢-连铸计划模型求解	24
3.4.1 蚁群算法简介	24
3.4.2 基于 TSP 问题的蚁群算法流程	26
3.4.3 基于 TSP 问题的多目标蚁群算法流程	26
3.4.4 基于蚁群算法的炼钢-连铸计划求解算法	26
3.4.5 基于 VNS 算法的计划协同方法	32
3.5 炼钢—连铸计划仿真实验	33

3.6 本章小结	39
4 热轧批量计划模型与编制方法研究	41
4.1 热轧批量计划编制问题抽象	41
4.2 热轧计划数学模型	42
4.3 遗传算法的简介	44
4.4 基于多目标遗传算法的热轧批量计划编制方法	45
4.4.1 染色体编码	45
4.4.2 交叉算子	46
4.4.3 变异算子	49
4.4.4 热轧计划编制算法流程	50
4.4.5 优化调整策略	51
4.5 实验验证	53
4.6 本章小结	55
5 炼钢-连铸-热轧衔接协调模型及算法研究	57
5.1 炼钢-连铸-热轧一体化计划问题分析	57
5.2 一体化计划衔接协调模型	59
5.2.1 求解流程	61
5.2.2 调整策略	61
5.3 仿真实验	61
5.4 本章小结	62
6 结论与展望	63
6.1 主要结论	63
6.2 后续工作的研究展望	63
参考文献	65
附录	71
A 作者在攻读学位期间参与的科研项目	71
B 作者在攻读学位期间取得的科研成果目录	71
C 学位论文数据集:	71
致谢	73

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

钢铁工业作为我国的重要产业之一，在迎接机遇的同时也将面临着严峻的考验。一方面需要不断提升生产水平保证钢材质量满足人们的需求，另一方面需要考虑节能降耗，减少生产成本以适应国内外环境的变化。目前钢铁行业普遍存在生产效率低，资源、能源利用率低，智能化水平不足，环境污染严重等问题，迫切需要钢铁企业内部的优化改革升级。

钢铁企业生产流程具有离散和连续的性质^[1]，由于其生产过程工艺复杂、设备众多，对其生产过程的精细化运行控制具有一定的难度。随着钢铁产品的市场需求迅速朝着多品种、小批量、个性化、定制化的趋势发展，导致与钢铁企业的规模化制造模式之间的矛盾日渐凸显，并且对钢铁企业及时响应生产订单的能力有了更高的要求，目前仅依靠人工经验进行生产组织已无法顺应新时代钢铁企业的发展需求，因此需要探索面向钢铁企业复杂环境的智能一体化生产计划编制新方法。

炼钢-连铸-热轧作为钢铁企业的三大主要工序，工序以及工序之间存在着物流平衡和热能平衡，整个钢铁生产是一个非常复杂的多阶段、多产品、多设备的生产过程。当前钢铁产品的生产大都以市场为导向，坚持以销定产、以产定供的原则，钢铁企业根据客户订单以及对市场需求预测来确定生产计划，制定的生产计划需要满足不同客户的需求并能够及时交货，同时需要协调多品种、小批量订单与钢铁企业的规模化制造的问题。一体化生产计划编制是钢铁企业制造执行系统（MES）的核心内容，是保证生产稳定、有序进行，进而提升生产效率，降低生产成本的重要途径，但由于钢铁企业缺乏有效的工具支持，现行生产计划的编制效率低、性能难以保证，很难进一步提高生产效率、降低生产成本。企业的核心竞争力缺乏必要的先进技术手段作为保障，也不能顺应钢铁企业生产管理模式的智能化发展需求。因此统筹考虑各阶段的生产工艺约束，合理有效的配置生产资源，制定可行的一体化批量计划是钢铁企业持续发展必经之路。

1.1.2 课题目的及意义

炼钢-连铸-热轧一体化生产批量计划包括炉次计划、浇次计划和热轧计划，其计划编制问题的核心是如何在同时满足各工序生产约束的条件下，衔接协调各阶段生产计划以促进钢铁生产物流的连续、高效运行。本文通过研究炼钢-连铸-热轧生产物流的运行特征，深入了解各工序生产计划编制的工艺约束和生产目标的基

础上，旨在研究炼钢-连铸生产计划协调优化、热轧生产批量计划编制问题，并以提高“热装比”为优化目标探索了不同生产计划之间的衔接匹配关系。针对以上问题，分别建立相应的数学模型，并设计了有效的生产计划编制算法进行求解。

炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制问题作为多约束、多目标的组合优化问题，已被证明为 NP 难问题。探索一体化生产计划编制和计划间协同问题一直是国内外学者的研究热点，目前研究者多采用群智能优化算法，如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法和混合算法等进行求解。在前人工作的基础上，本文研究了不同工序生产计划间的相互联系，深入探索生产计划间的衔接协调技术，对推进炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制技术的发展做出了贡献。

为解决炼钢-连铸-热轧生产过程中存在一体化生产计划编制困难，效率低且生产计划间协调困难的问题，建立了满足生产工艺约束的一体化生产计划编制模型，并探索炼钢-连铸-热轧协调的生产计划编制新方法。实现各阶段生产计划的独立编制，同时提出铸轧协调优化算法来提高计划间的信息交流，促使各生产计划在不违背工艺约束的情况下达到总体优化，进一步为现代化钢铁企业在节能降耗、降低库存、提高成材率等方面提供了研究基础。

1.2 钢铁生产工艺流程

钢铁生产过程是一个离散与连续相混合的生产过程，工序间联系紧密。炼钢-连铸-热轧作为钢铁生产流程中主要的三大工序，在整个钢铁生产流程中起着重要的作用。当前典型的钢铁生产基本工艺流程如图 1.1 所示：

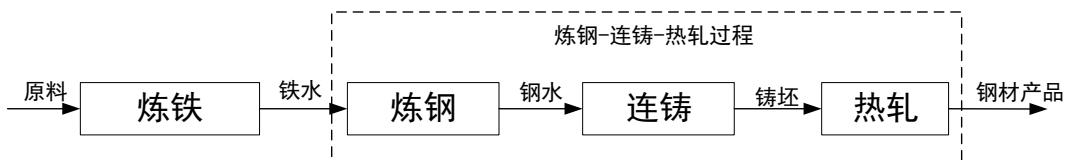


图 1.1 钢铁生产工艺流程图

Fig.1.1 Flow chart of iron and steel production process

钢铁生产以铁矿石为原料，将其加工为烧结矿或球团矿，在高炉中被还原为高温铁水，铁水经过预处理后进入转炉被冶炼为钢水，进而通过精炼工序被处理为钢水温度、成分等符合生产要求的钢水，并在连铸设备上完成液相到固相的转变形成一定规格的铸坯，最终经热轧工序轧制成符合客户需求的钢材产品。

连铸技术替代模铸技术和连铸坯热送热装技术的出现对钢铁行业的发展具有里程碑的意义。正是这两大技术的出现，使得研究钢铁生产一体化批量计划编制问题具有了可行性。在考虑热送热装生产模式的钢铁生产过程中，根据连铸工序

的板坯交送热轧机组的工艺路线和连铸板坯到达热轧机组的温度情况，连铸与热轧工序间可分为四种不同的衔接匹配模式^[2]，如下图所示。

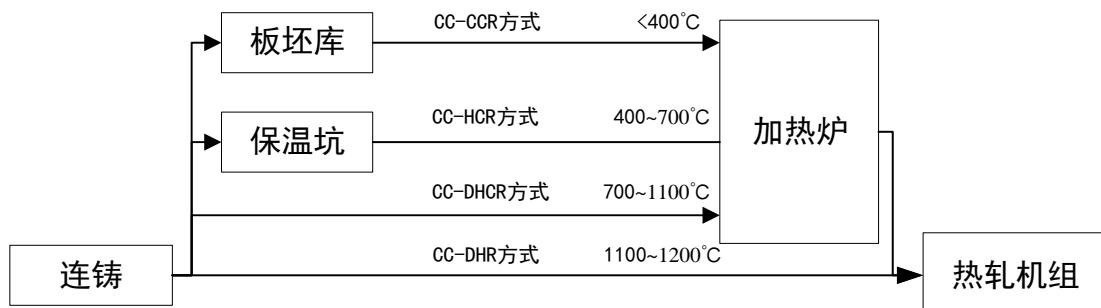


图 1.2 连铸-热轧工序间的四种衔接方式

Fig.1.2 Four Connection Modes between Continuous Casting and Hot Rolling Processes

① CC-CCR (Continuous Casting-Cold Charge Rolling)，简称冷装。由于钢铁产品的生产工艺要求或者因连铸与热轧的物流衔接不匹配等因素，造成高温铸坯无法直接进入加热炉或直接轧制，需要暂时堆放到板坯库中，并且铸坯的温度会降至 400°C 以下。存放在板坯库中的铸坯则会根据热轧计划的执行情况在规定时间内吊至辊道并进入加热炉加热，最后经轧机轧制成产品。

② CC-HCR (Continuous Casting-Hot Charge Rolling)，简称温装。当连铸计划和热轧计划之间无法衔接匹配时，使得铸坯无法直接进入加热炉而只能下线等待。为了减少热能的浪费，将铸坯暂时存放到保温坑中，待热轧计划需要时才将铸坯上线进行生产处理，并且要求装炉前铸坯的温度在 400~700°C。保温坑是连铸-热轧工序之间重要的缓冲设备，通过合理的确定铸坯的上线、下线时间可以有效弥补炼钢-连铸生产计划和热轧生产计划因时间差而造成生产物流无法平衡匹配的问题。

③ CC-DHCR (Continuous Casting-Direct Hot Charge Rolling)，简称热装。当铸坯能够保证入炉前的温度为 700~1100°C 并且同时满足热轧计划的需求时，则将铸坯直接装入加热炉，出炉后经由热轧机轧制为成品。这是较为理想的钢铁生产模式，能够有效减少能源的浪费，保证物流的连续稳定生产。目前钢铁企业也正在寻找技术方案来提升热装生产模式在整个钢铁生产中所占的比值。

④ CC-HDR (Continuous Casting-Hot Direct Rolling)，简称直接热轧。通过对铸坯采取必要的保温措施，如采用铸坯边、角部温度补偿等措施，使铸坯在不经过加热炉提升温度的情况下就可以达到轧制工艺对铸坯温度的要求，铸坯温度一般需达到 1100~1200°C。铸坯从连铸机直接进入轧机轧制的过程大大缩减了钢铁产品的生产时间，节约了大量能源，是最为高效、绿色的生产模式。但由于生产条

件较为苛刻，大多数钢铁企业还未掌握该项技术，因此本文在计划编制过程中不考虑此生产模式。

相对与冷装，温装、热装、直接热轧三种生产模式可统称为热装，连铸坯的热送热装具有以下优点：

- 1) 连铸坯装炉温度提高，节约了大量能源；
- 2) 减少了库存中板坯的储量，降低了库存管理成本；
- 3) 简化了生产工艺流程，降低了生产成本；
- 4) 缩短了生产周期，提高了钢铁企业对生产订单的快速响应能力；
- 5) 减少了铸坯的加热时间，降低了氧化铁皮的损耗，提高了金属的收得率。

通常，一体化生产计划编制主要以提高“热装比”为研究目标，即制定衔接协调的炼钢-连铸生产计划和热轧生产计划，核心是通过控制板坯的下线频率以及下线等待的时间来保证生产物流在整个生产过程中的连续稳定流动。

在炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制中涉及的常用名词解释：

炉次：炉次是炼钢的最小基本单位，一个炉次是指同时在一个电弧炉或转炉内冶炼，从开始冶炼到浇铸为止的整个过程称为一个炉次^[3]。

浇次：同一浇次是指同一连铸机上同一中间包寿命内完成连续浇铸的炉次集合，为了减少工具（如结晶器、中间包）消耗和辅助材料消耗，降低生产成本，在满足连铸工艺约束的条件下，应尽可能在中间包寿命内实现加工炉次的最大化。

热轧单元：轧制是待加工的轧件依靠两个或两个以上的工作辊施加压力产生塑性变形的过程。轧制过程中，随着轧辊的不断磨损，其轧制精度不断下降而需重新更换工作辊，热轧单元是同一工作辊轧制期间内生产的板坯对象集合。由于更换轧辊设备的费用昂贵且更换时间较长，应在保障产品轧制质量的条件下最大化同一热轧单元中轧辊的轧制距离。同一轧制单元包括热轧材部分和主体材部分，一般呈“乌龟壳形状”，以主体材为主。

批量计划：钢厂根据合同或者订单制定一段时间内的生产作业计划，包括炉次计划、浇次计划和热轧计划的制定。

1.3 钢铁企业生产计划研究现状

1.3.1 钢铁生产计划编制主要研究方法

迄今为止，关于炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制问题的研究，已有很多学者从不同角度对此问题进行了研究，极大的推动了钢铁生产计划研究理论的发展，对钢铁企业的信息化生产管理有较大的指导意义。炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制是一个多阶段、多目标和多约束的 NP (non-deterministic polynomial) 难问题^[4]。由于其问题的复杂性并且随着问题规模的增大求解难度呈指数增长，使得传统

的精确求解算法很难在合理的时间内保证结果的准确性和有效性，因此更多需要借助于智能优化求解算法以及混合智能算法求解。目前所采用的智能优化算法主要包括遗传算法^[5]、禁忌搜索算法^[6~8]、蚁群算法^[9~10]、粒子群算法^[11~12]、模拟退火算法^[13]、混合算法等^[14~16]，同时针对炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制问题不同的研究方法和研究思路不断提出。目前关于钢铁企业生产计划编制方法主要分为运筹学方法、仿真建模方法、智能优化方法以及混合优化方法，如图 1.3 所示。

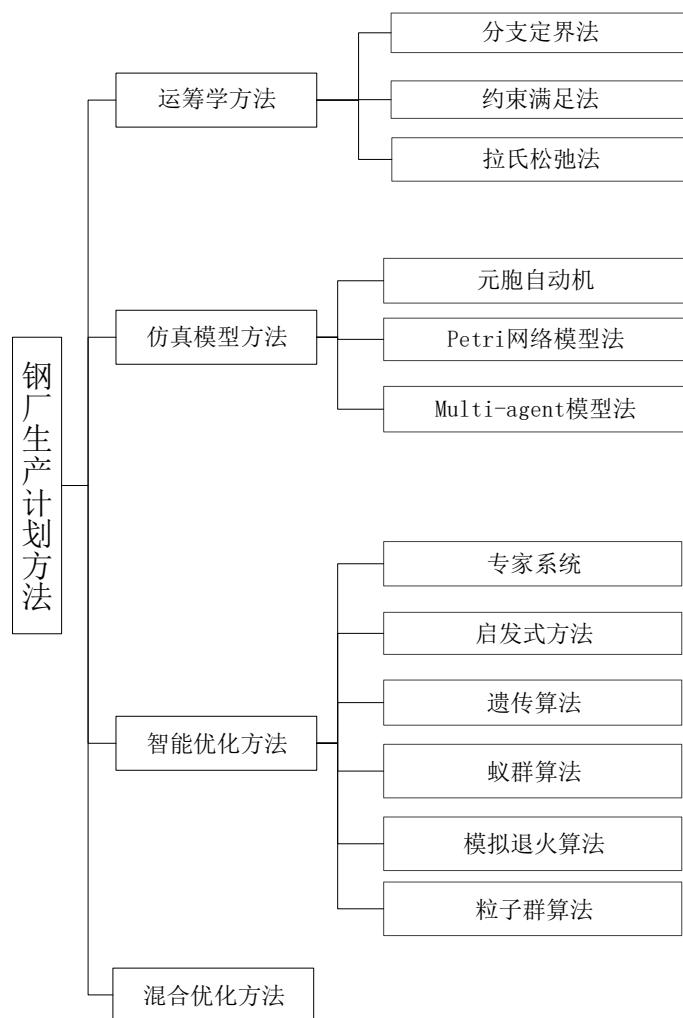


图 1.3 生产计划编制的算法分类

Fig1.3 The classification of algorithms for production planning

① 运筹学方法

1) 分支定界法

分枝定界法是对有约束条件的优化问题的可行解区域不断重复分割为更小的分支，并确定每个分支的上界或下界，通过不断的分支搜索的方式来找到最优解。

Tang 等^[17]运用分支定界法求解无缝钢管生产批量调度问题; Rami 等^[18]针对轧钢厂生产计划问题建立了线性规划模型并采用分支定界法进行求解。

2) 基于约束满足的方法

约束满足的求解方法主要有三种: 产生测试法(Generate and Test)、回溯法(Backtrack)、约束传播方法(Constraint Propagation)。文献^[19~21]采用约束满足的求解方法处理钢铁生产计划问题。

3) 拉氏松弛法

拉氏松弛法是通过松弛和分解的策略来降低问题的求解复杂程度, 在求解复杂生产调度问题的方法中, 已被证明在可行时间内求得较优解的有效性。Tang 等^[22]建立炼钢-连铸生产调度整数规划模型并采用拉格朗日松弛法进行求解, 取得良好效果。

② 仿真建模方法

1) 基于 Petri 网的建模方法

Petri 网是德国学者 Petri 提出的一种图形化建模方法, 可以直观、形象地描述复杂系统的不确定性和随机性。李霄峰等^[23]针对炼钢连铸物流系统, 采用分层有色 Petri 网进行建模并使用基于 COM 的 HCPN 仿真技术为物流仿真提供解决方案。

2) 元胞自动机建模方法

细胞自动机认为, 任何复杂结构和过程都是由大量简单相互作用的基本组织单元组成, 因此利用不同细胞自动机有可能模拟复杂事物的演化过程。何腊梅^[24~25]基于细胞自动机方法建立了炼钢生产物流仿真模型, 该方法为复杂系统建模提供了一种新的求解思路。基于细胞自动机的仿真方法虽然能够有效模拟复杂系统行为, 但演化规则的选取等问题需进一步研究。

3) Multi-Agent 模型方法

Multi-Agent 是将大而复杂的系统处理为独立的、互相协调和通信的小系统来简化处理问题。Petter 等^[26]建立了解决炼钢-连铸生产调度的 Multi-Agent 系统。赵珺等^[27]针对铸轧一体化生产计划调度问题建立了 Multi-agent 系统模型。

③ 智能优化方法

1) 遗传算法

遗传算法是由 Holland 提出的一类模拟生物在自然界的遗传和进化过程的随机搜索算法。遗传算法已广泛应用于并行机、Flow shop、Job shop、柔性制造系统以及钢铁生产作业计划编制系统。遗传算法作为较早应用的启发式算法, 理论基础比较成熟。在求解钢铁生产计划编制方面^[28~30], 一些学者将启发式规则、模拟退火、禁忌搜索、神经网络、机器学习、蚁群算法等融合到遗传算法的各个环节中, 有效提高了算法的寻优能力和算法的鲁棒性。陈波^[31]针对最优炉次计划编制

问题建立了 0-1 整数规模模型，并采用混合免疫算法和遗传算法进行求解。唐立新^[32]运用遗传算法求解热轧批量计划问题并开发了生产计划系统，通过与人工结果对比表明平均目标改进率在 20% 以上。

2) 蚁群算法

蚁群算法是由意大利米兰理工大学 Dorigo 通过模拟蚁群觅食行为而提出的一个优化智能方法。蚁群算法是具有自组织，并行性，正反馈的鲁棒性算法。已由最初的解决 TSP(Traveling Salesman Problem) 问题发展成解决 Flow shop、Job shop、柔性 Job shop，动态 Job shop 计划编制问题。由于蚁群算法具有计算效率高、适应性强等优点，在炼钢计划编制问题研究中得到广泛应用。Liu 等^[33]将热制批量计划编制问题归为带奖金收集的多目标车辆路径优化问题建立了数学模型，并设计分解协调蚁群算法进行求解。贾树晋等^[34]建立了带奖金收集的车辆路径求解模型，并设计了多目标蚁群算法求解，这种先寻优后决策的求解方式有效避免了模型受限于实践经验和个人偏好等知识，同时在算法设计中增加了三个算子：Insertion、2-opt 和 Swap，提高了算法的局部搜索能力。

3) 专家系统

专家系统是将从实际生产中总结出的专家经验和知识，借助于计算机来用于解决实际问题。孙福权等^[35]运用专家系统与运筹学模型相结合的方式处理炼钢-热轧生产计划编制问题，有效提高了转炉问题、减少了中间品的库存量以及降低了交货延迟率等。专家系统虽能快速生成问题的解决方案，但由于系统知识库难以建立以及知识库的有效程度依赖于专家的经验，对于较复杂的生产计划调度问题，单纯使用专家系统难以获得令人满意的调度效果。

④ 混合优化方法

单一方法在对应复杂的作业计划编制问题时总存在计算效率低、优化效果差等问题，近年来混合作业计划编制算法成为算法领域中的研究方向，如遗传算法与启发式方法结合、模拟退火法与贪婪算法相结合等，混合算法有利于充分发挥其中各个算法的优点，将更有利地解决问题。

1.3.2 钢铁企业生产计划编制问题的研究现状

一体化计划编制问题涉及炉次计划、浇次计划、轧制计划的编制以及计划间的衔接协同，其共同决定了一体化生产计划的整体优化性能，更决定了钢铁企业实际应用时的有效性，因此研究衔接协同的一体化生产计划编制问题对提升钢铁企业生产组织智能决策，降低生产成本、快速响应客户需求等方面具有重要的作用。钢铁企业生产计划编制常被抽象为连续和离散生产工艺相混合的流水车间作业组合排序问题^[36]。关于炼钢-连铸-热轧生产批量计划编制的研究主要分为四个部分：炉次计划，浇次计划，热轧批量计划的编制，以及考虑炼铸轧衔接协调的一

体化生产计划编制的研究。

① 炼钢-连铸生产计划

唐立新等^[37~38]分别针对炉次计划编制问题和浇次计划编制问题进行了研究，针对炉次计划以提高炉次内的合同钢级、规格、交货期差异以及由无委材和合同未被选中所造成的费用损失之和最小为优化目标研究了炉次数已知条件下的计划编制问题，建立了带约束条件的混合整数规划模型，并通过遗传算法进行求解，结果验证了模型和算法的有效性；针对浇次计划编制问题，通过充分考虑订单钢级、宽度和交货期等因素，对候选炉次进行最佳组合以浇铸附加费用最小为优化目标来建立数学模型，并采用遗传算法进行求解。Xue 等^[39]提出了具有未知炉次数的炉次计划编制问题，将其归为伪旅行商问题（TSP）建立数学模型并设计了改进粒子群优化算法求解。Jian 等^[40]建立了考虑板坯钢级、宽度、交货期的炼钢炉次计划模型，并设计了改进的 PSO 算法进行求解。彭频等^[41]将炉次计划问题看作带时间约束的优化问题，设计了改进的遗传算法对建立的基于准时制的炉次计划模型进行求解，模型中考虑了热装板坯的交货期惩罚以及板坯规格跳跃所造成的惩罚，仿真结果证明了算法的有效性。董红宇等^[42]根据炉次计划和一体化生产工艺约束，建立了多目标的一体化炉次计划模型，并提出基于规则的分组策略和概率匹配法的两阶段启发式方法进行求解，实现了炉次资源的最大利用率，减少了潜在的库存。薛云灿等^[11]针对浇次计划编制问题，建立了浇次数未知的最优浇次计划模型，并设计了序列倒置的改进离散粒子群优化算法进行，通过实验证明了所提算法能有效提高解的收敛速度和求解效率。杨凡等^[43]等针对浇次计划编制问题，通过充分考虑炉次宽度的柔性基于广义车辆路径问题建立了数学模型，并构造了改进的混合算法进行求解，结果表明所提出的模型和算法能有效提高中间包的利用率。Jian 等^[44]针对浇次计划编制问题，采用 Dantzig-Wolfe 分解策略将其分解为主问题（集合划分问题模型）和一系列子问题（定价问题模型），并提出基于列生成的优化算法进行求解，通过宝钢实际生产数据的实验结果对比分析，验证了模型和算法的可行的。宁树实等^[45]考虑了炉次计划和浇次计划衔接匹配关系，建立了炼钢-连铸生产计划模型，并采用多目标模拟退火算法和改进变邻域搜索算法处理多个候选炉次计划和浇次计划，最终获得优化问题的解。

② 热轧批量计划

Pan 等^[46]建立了处理大规模热轧批量计划问题的模型，将该问题归为多目标多路径问题，并分解为最小成本问题、背包问题和线性分配问题三个子问题，运用精确算法和启发式算法相混合的方式求解。Tang 等^[30]针对热轧计划编制问题基于并行策略建立调度模型，并采用遗传算法求解。黄可为等^[28]将热轧计划编制问题抽象为多旅行商问题，以最小化订单的宽度、厚度和硬度惩罚为优化目标进行建

模，并采用混合遗传算法进行求解。热轧批量计划编制过程中往往涉及到冷坯的加入，冷坯以堆垛的方式存放在板坯库，若板坯选择不合理则会造成大量板坯不必要的倒垛操作，董广静等^[47]针对这一问题，设计了三阶段求解算法来优化调整原生产计划，在保证满足轧制工艺约束的情况下降低了热轧计划中板坯的倒垛次数。Naiwei 等^[48]针对多目标、多约束的热轧批量计划编制问题，建立了带奖金收集的车辆路径模型，并设计了两阶段的优化算法来求解，第一阶段采用基于模拟退火和蚁群优化的混合算法求解，然后采用变邻域禁忌搜索算法来求解第二阶段问题。zhang 等^[49]研究了紧凑型带钢的热轧批量计划编制问题，通过基于特征的启发算法生成初始可行解，基于邻域搜索算法（HVNS）来改善解的优化目标，最后通过集成果蝇优化算法来提高搜索效率。

③ 一体化批量计划

目前关于一体化批量计划的编制问题，多采用数学规划方法构造数学模型，然后设计相应的智能算法进行求解。唐立新等^[50]针对炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制问题进行了因素分析，探究了炼钢连铸与热轧之间的连接关系并分析了各阶段计划编制需满足的工艺约束等，为一体化批量计划建模提供了基础。孙玲等^[19]研究了连铸单元与热轧单元连接比率 1:1 情况下的炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题，建立了多目标优化数学模型，并采用约束规划方法与启发式方法相结合的混合算法进行求解。针对数学模型具有复杂约束，其求解过程具有 NP 难的性质特点，北京科技大学李铁克教授课题组采用约束满足方法开展了一系列的工作。例如，张文学等^[20, 51]根据一体化批量计划的编制策略，建立了相应的约束满足模型，并设计了基于聚类分析的约束传播和邻域搜索的粒子群优化算法。

在钢铁企业动态生产环境下，如何编制炼钢-连铸-热轧阶段衔接协调的一体化计划逐渐成为研究一体化计划编制问题的重点。张彩霞等^[52]采用启发式搜索方法编制生产计划，并结合离散仿真方法对生产计划进行评价来选择较佳调度方案，有效解决了冶铸轧一体化生产调度问题。刘怡等^[52]将一体化批量计划问题看作多旅行商问题建立模型，并采用改进协同进化优化算法来求解，实现铸轧一体化生产批量计划的有效衔接。朱宝琳等^[54]在充分考虑连铸-热轧阶段生产工艺约束的情况下，以热轧计划中板坯的宽度、厚度、硬度跳跃惩罚最小为目标建立了炼钢-连铸-热轧一体化批量计划模型。

连铸坯热送热装技术的出现对促进生产运输过程中物流的高效传递和衔接匹配提供了新途径。P.Knoop 等^[55]针对连铸-热轧阶段热送热装生产计划编制问题，深入分析了连铸机和轧机的工艺约束条件和优化准则，并设计了一种采用先进算法生成热装生产计划的软件系统，在钢铁企业中获得了较高的热装比。吕志民等^[29]将遗传算法应用于热送热装生产计划的编制，仿真结果表明能有效提高生产计划

编制的成功率，结合人工调整策略可以得到更好的可行解。赵珺等^[27]针对铸轧一体化生产计划调度问题建立了 Multi-agent 系统模型，仿真实验表明提出的模型能有效提高生产调度的热装比。提高“热装比”作为生产作业计划的核心，对实现钢铁企业节能降耗，提质增效具有重要的意义，越来越受到钢铁企业和研究工作者的关注。

综上所述可知，炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题的研究取得了一定的进展，但目前的研究所设计的模型和算法在实际生产中应用的案例较少，主要原因在于一体化计划编制问题的复杂性以及现场环境的动态可变性。本文在上述研究成果的基础上，更注重炼钢-连铸-热轧各工序的协调优化，重视实际问题，采用启发式方法、智能优化算法进行求解。

1.4 主要工作

本论文围绕以“提高热装比”为优化目标的炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题展开研究。重点研究了一体化计划中涉及的炉次计划、浇次计划、热轧计划的独立计划编制问题以及生产计划间的衔接协同问题。该研究工作也是在国家自然科学基金面上项目“炼钢厂生产实时调度的动态网络建模及调度策略优化方法（No.51474044）”的支持下进行的研究，主要的研究内容如下：

① 研究分析炼钢-连铸-热轧生产运行的特征

研究炼钢-连铸-热轧阶段生产流程运行特征，深入分析各工序生产计划编制特点；分类归纳现代钢铁企业生产计划编制过程中涉及的生产目标和约束条件；了解生产计划在生产管理执行、物流衔接等方面的限制性条件；研究不同生产计划间相互匹配关系，通过合理优化配置资源来达到生产计划执行的一体化。

② 研究各阶段生产计划编制问题的求解方法

分别针对炉次计划、浇次计划、热轧计划的生产目标和约束条件建立数学模型。本文将炉次计划和浇次计划编制问题看作整体进行多目标优化求解。针对热轧计划编制问题研究了主体材的组合排序问题，并将其归为车辆路径优化问题，设计了基于 NSGA-II 的改进多目标遗传算法进行求解。

③ 研究连铸热轧协调优化智能求解算法

研究生产计划间的衔接协调模型和优化算法，通过统筹协调各阶段生产计划中最小单元的组合排序来达到生产计划的一体化。本文按照炼钢-连铸生产计划和热轧单元计划的顺序进行生产计划编制，前一阶段生产计划的输出结果作为下一阶段生产计划的输入，并以最小化“铸轧时间差”为目标将各生产计划有机衔接起来。

2 炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题研究

炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制问题是指在同时满足炼钢-连铸阶段、热轧阶段生产工艺约束的条件下，通过统筹考虑各阶段的生产目标求解得到互相衔接协调的炉次计划、浇次计划和热轧计划。一体化计划编制过程中涉及到能量平衡和时间平衡，需要保证钢铁生产中物流（板坯）和能量流（温度）在时间、空间上的稳定持续运行。其生产运行过程中最小的操作单元可看成“板坯”，并且在不同阶段板坯的表现形式、约束条件、生产目标等存在一定差异。

2.1 一体化生产计划编制流程

大部分钢铁企业以市场为导向，根据用户订单组织生产，在接收到用户订单后，对其进行质量设计和工艺设计并将订单组合或拆分成生产合同，以某钢厂热轧带卷的生产合同为例，生产合同中包含对产品钢种、产品种类、产品宽度、产品厚度、产品交货期、产品重量、产品质量等属性的要求。钢铁企业生产计划编制是在满足各阶段工艺约束下进行组炉、组浇、组热轧计划，最终生产得到满足生产合同要求的产品。目前大多钢铁企业采用人工计划编制方式，其主要的流程如图 2.1 所示。计划编制人员从 ERP 系统中提取编制生产计划所需要的合同数据、设备状态信息、库存信息等，通过兼顾考虑连铸生产节奏、热轧生产节奏、连铸-热轧阶段生产能力等因素，依据人工经验顺序进行组炉、组浇和热轧计划编制等操作。人工计划编制主要是借助 ERP 系统进行信息查询，通过 EXCEL 等工具对生产合同分类、拆分、组合和排序形成生产批量计划，人工编制的生产计划则通过 ERP 系统被下发到炼钢厂和热轧厂，其中炼钢厂根据浇次计划进行调度并安排生产，要求炼钢厂能够及时响应浇次计划的安排，即根据浇次计划的需求，满足要求的钢水在规定的期间内到达指定的连铸机进行浇铸。在热轧厂则安排多名生产计划工程师，主要工作是根据热轧计划需求并结合热轧厂实际生产运行情况实时安排和调整生产计划，控制着板坯的下线、上线、入炉、出炉等操作。现场调度的信息也会及时更新到 ERP 系统中，使整个钢铁生产过程中的信息传递形成闭环。但由于人工编制的生产计划过多依赖人工经验并且不具备全局优化能力，尤其当处理大量多品种、多规格、小批量的生产合同时，人工计划编制费时费力，无法快速响应生产订单的需求。因此需要借助一体化生产计划编制模型来解决这一问题。

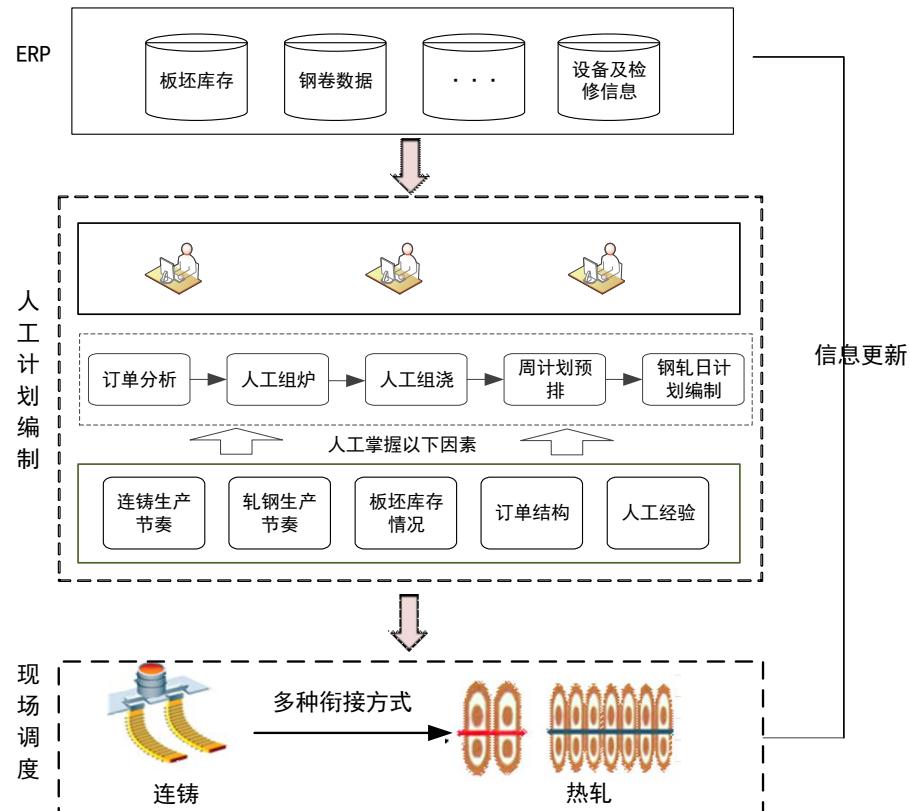


图 2.1 人工计划编制生产流程图

Fig.2.1 production flow chart of Manual planning

炼钢-连铸-热轧一体化计划包括炉次计划、浇次计划和热轧计划。一体化批量计划编制问题所研究的物流对象如图 2.2 所示。

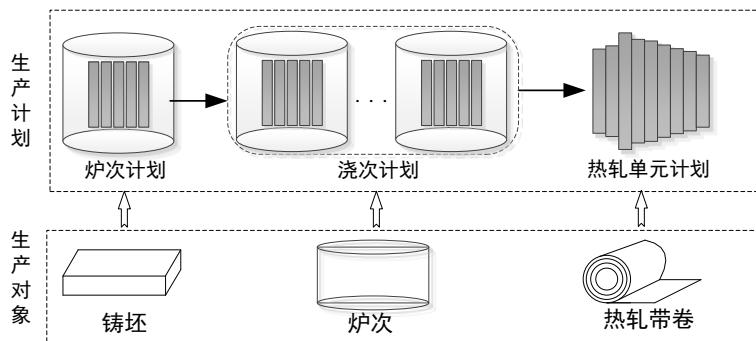


图 2.2 生产对象与生产计划关系图

Fig.2.2 Diagram of Production Objects and Production Planning

不同的生产计划编制阶段，生产对象的表现形式各不相同，但生产对象之间联系紧密，前一阶段的计划编制结果作为后一阶段计划编制的输入，各阶段的生产计划编制问题可看作对应生产对象的组合优化过程。本文以生产周期内订单池中

的生产合同为研究对象，按照炉次计划、浇次计划、热轧计划的顺序进行一体化计划的编制，并通过充分考虑各生产计划的目标、工艺约束以及计划间的影响因素，建立衔接协调模型作进一步的优化调整，旨在制定出全局优化的一体化计划方案。钢铁生产一体化计划编制的总流程如图 2.3 所示，本论文主要关注点是炼钢-连铸-热轧一体化计划编制（图 2.3 中红色虚线部分）部分。本文通过将炼钢-连铸生产计划和热轧计划独立编制，最后通过衔接协调模型将各计划紧密结合起来。

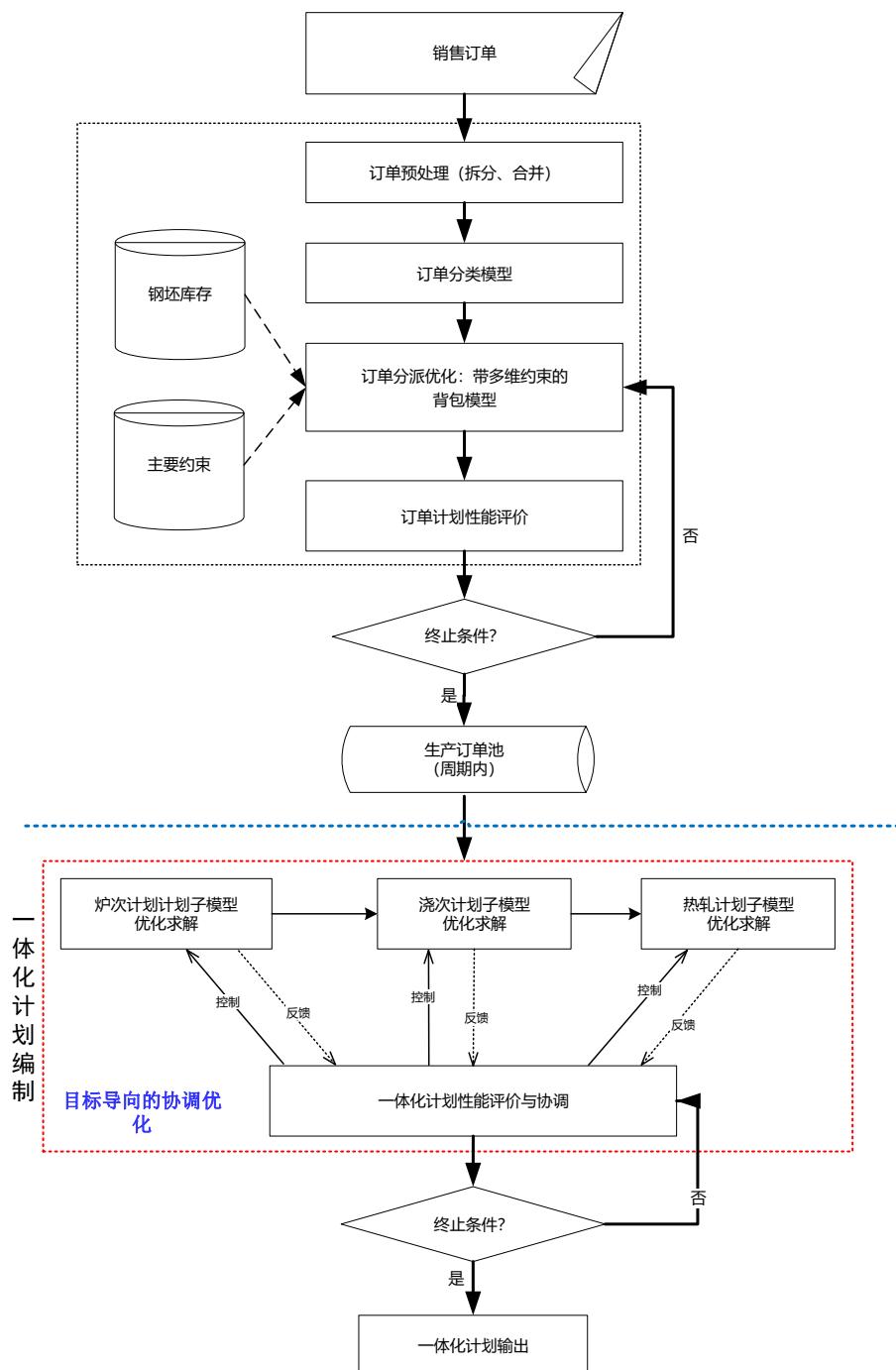


图 2.3 一体化生产计划编制流程图

Fig.2.3 Flow chart of integrated production planning

以提高“热装比”为目标的一体化计划编制对物流对象生产运行的连续性和稳定性具有较高的要求，如何保证在满足炼钢-连铸-热轧阶段的工艺约束下，提高板坯的“热装比”是炼钢-连铸-热轧一体计划编制问题的核心。

2.2 不同阶段生产计划的约束

不同阶段的生产计划约束条件存在差异，同时生产对象之间存在时间和空间上的衔接。因此了解不同阶段下生产计划的约束条件和不同生产计划之间的联系是研究炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题的重点前提。

2.2.1 炉次计划约束

炉次计划编制问题是根据生产合同订单的要求，将具有相同或相近属性的合同进行组合优化，形成不同的炉次计划。在保证满足炉容约束的条件下，提高生产订单的及时交货率，降低生产成本和减少无委材的量是炉次计划编制的重点。

炉次计划在编制时需要满足如下约束：

- ① 同一炉次中的板坯宽度相同；
- ② 同一炉次中的板坯轧制宽度应满足：轧制宽度 \leq 板坯宽度 \leq 轧制宽度+固定值（如：100mm）；
- ③ 同一炉次中的板坯厚度相同；
- ④ 同一炉次中的板坯交货期相同或相近；
- ⑤ 同一炉次中的板坯钢级相同；
- ⑥ 同一炉次中的板坯总量应满足：炉容下限 \leq 板坯总量 \leq 炉容上限；

由于生产订单的小批量、多品种、多规格等特点，可能会存在板坯无法组成一炉的情况，即可组炉的板坯总量无法达到炉容下限。需要采用如下措施^[38]进行处理。

- ① 放弃该炉次计划，未组炉的板坯等待下一炉次计划编制；
- ② 扩大合同预选池的容量，通过扩大炉次计划编制的输入合同池，使更多可组炉的板坯加入；
- ③ 形成无订单对应的板坯，即无委材。由于无委材无合同对应，则被加入到板坯库存中暂时保存，当出现与之对应的订单时，无委材才会被利用。由于无委材大大增加了板坯库存的压力，提高了库存管理的成本，因此应尽量避免无委材的产生。
- ④ 提高生产合同板坯的目标冶炼钢级，以“优”充“次”。

2.2.2 浇次计划约束

在编制浇次计划的过程中，通过综合考虑不同炉次在钢种、规格、交货期等方面差异，在满足中间包寿命约束的条件下，完成炉次在浇次计划中的组合和

排序。由于同一连铸机不同浇次间存在一定的时间间隔，并且设备的开关机需要消耗大量的能源，因此在满足约束的条件下同一浇次应尽可能浇铸更多的炉次。

浇次计划在编制时需要满足如下约束：

- ① 同一浇次内的炉次钢级相同或相近；
- ② 同一浇次内的炉次板坯厚度相同；
- ③ 同一浇次内的炉次数满足浇次中最小最大炉次数限制；
- ④ 同一浇次内的炉次宽度变化范围限制；
- ⑤ 同一浇次内允许的炉次调宽次数限制；
- ⑥ 同一浇次内炉次浇铸的板坯交货期相同或相近；

浇次计划在编制过程中，当未能满足最小炉次限制时，可采用如下措施进行处理：

- ① 放弃该浇次计划的编制；
- ② 形成无委材；
- ③ 提高生产炉次的目标冶炼钢级，使该炉次能够与较低钢级的炉次编制到同一浇次计划，以“优”充“次”；
- ④ 扩大可选的炉次集合容量；

2.2.3 热轧计划约束

完整的轧制单元一般呈现“乌龟壳”形状，包括烫辊材和主体材部分，烫辊材宽度为非减变化，主体材宽度为非增变化，如图 2.4。烫辊材在轧制单元中所占的比例较小且轧制要求较低，主要目的是预热轧辊。实际生产中，一般对烫辊材和主体材分别进行编制，再经组合优化后形成完整的轧制单元计划。同一个轧制单元中一般只有 6~8 块烫辊材，并且大部分来自于库存中暂存的铸坯，在编制烫辊材部分时较少考虑对整个生产过程的物流稳定性的影响，相对主体材其编制难度较低。因此本文不再考虑烫辊材部分。主体材是轧制单元的主要部分，一般轧制质量要求较高的难扎产品，随着轧辊的磨损，其轧制精度不断下降，当完全磨损后则更换新的轧辊开始下一轧制单元的轧制。通过合理的安排板坯进入轧辊的顺序，能够有效提高轧辊的可轧制公里数。

轧制单元计划中烫辊材需满足以下约束：

- ① 同一轧制单元中前后相邻轧制的烫辊材在宽度变化方面呈非减趋势，并且跳跃幅度尽可能小；
- ② 同一轧制单元中烫辊材的数量限制，一般为 6~8 块。
- ③ 烫辊材硬度限制，烫辊材的硬度不能超过限定值，且硬度由软到硬平缓变化；
- ④ 烫辊材厚度应平缓变化。

- 轧制单元计划中主体材需满足以下约束：
- ① 主体材最大轧制长度限制；
 - ② 主体材最大同宽轧制长度限制；
 - ③ 同一轧制单元中前后相邻轧制的板坯在宽度变化方面呈非增趋势，并且跳跃幅度尽可能小；
 - ④ 同一轧制单元中前后相邻轧制的板坯在厚度变化方面应平缓变化；
 - ⑤ 同一轧制单元中前后相邻轧制的板坯在硬度方面应平缓变化，呈非增或非减趋势，尽量避免反复跳跃；
 - ⑥ 当板坯宽度、厚度、硬度的变化发生冲突时，则改变的优先级顺序为：硬度、厚度和宽度。

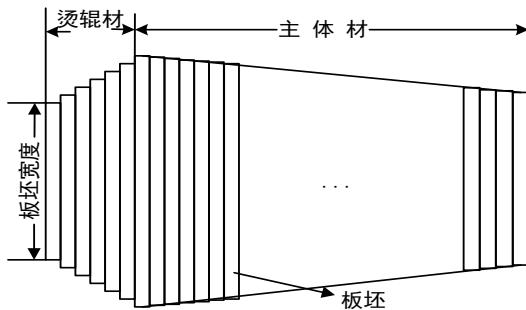


图 2.4 热轧单元计划

Fig.2.4 Hot rolling unit plan

2.3 炼钢-连铸-热轧生产计划特点

炼钢-连铸-热轧各阶段研究的物流对象不同，但相互之间存在紧密联系。炉次计划以铸坯为对象研究其组合过程，浇次计划研究炉次的组合排序，因此从本质上讲，炉次计划和浇次计划都是以铸坯为研究对象。热轧计划则研究热轧板坯（热轧带钢）的组合排序问题。钢水经连铸阶段凝固成型后形成连铸坯，进而经过热轧机减宽（为主）或展宽过程轧制成满足合同需求的热轧带钢，一般一种规格的连铸坯可轧制成多种规格的热轧带钢，表现为一对多的关系，但在编制生产计划时，连铸坯与生产合同的对应关系已经确定，因此表现为连铸坯与热轧带钢一一对应。理想的钢铁生产过程应是连铸坯经切割后直接进入加热炉，出炉后由热轧机进行轧制，因此为提高生产计划间的衔接协同，连铸坯的出坯序列应尽可能的与热轧带钢的轧制序列一致，以最大化提高生产物流在时间和空间上的连续性。

钢铁生产过程包含炼钢、连铸、热轧三个主要工序，研究一体化计划编制问题，需要深入分析不同铸轧衔接模式（如图 2.5）下的生产计划的特点。

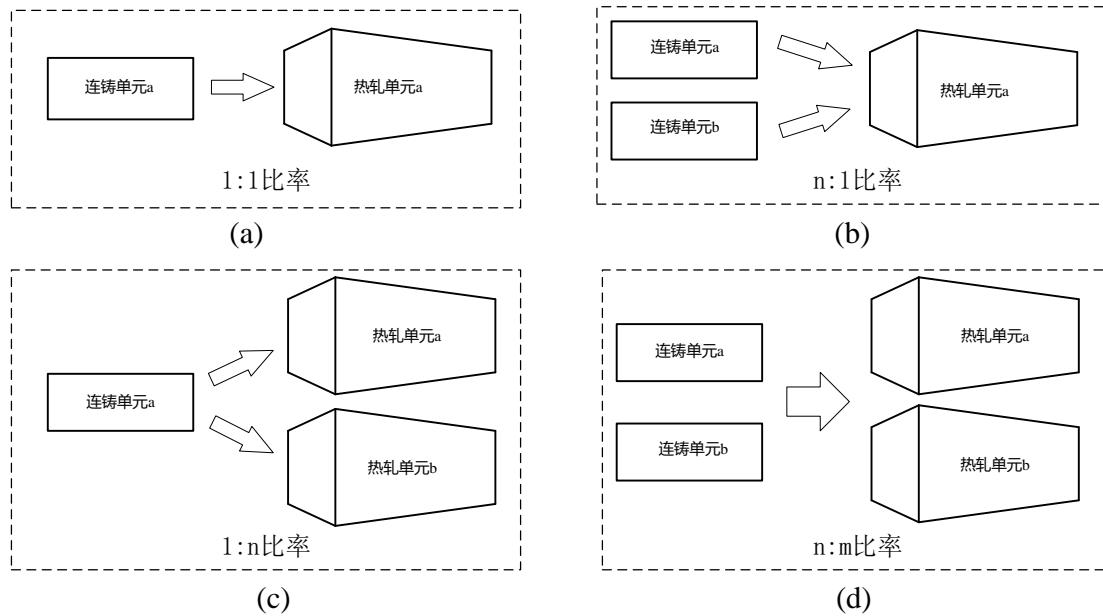


图 2.5 连铸与热轧阶段的匹配模式

Fig 2.5 Matching Mode of Continuous Casting and Hot Rolling Stage

根据连铸单元与热轧单元之间的物流对应关系,可将连铸与热轧分为 1:1、1:n、n:1 和 n:m 连接比率下的匹配关系。在连铸-热轧生产过程中,对不同工序间生产物流的衔接协调要求较高,如图 2.6 所示,连铸机组和热轧机组分别包含一台或者多台连铸机设备和热轧设备。铸轧衔接协调则要求连铸机组的总出坯序列(板坯序列 a)尽可能与热轧机组需要的板坯序列(板坯序列 b)一致,保证铸坯能够在不下线或少下线的情况下进行轧制来有效提高板坯的热装比,因此对炼钢-连铸-热轧生产计划的衔接协调提出了更高的要求。

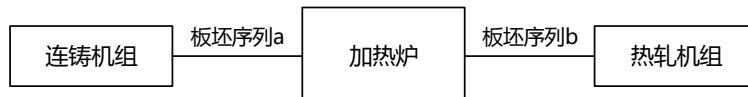


图 2.6 钢铁生产简化流程

Fig.2.6 Simplified process of iron and steel production

从生产计划的角度出发考虑不同连接比例模式下所产生的影响。针对连接比率为 1:1 的匹配模式,即一台连铸机对应一台热轧机,提高板坯“热装比”则要求浇次计划中“最小操作单元”铸坯的序列与热轧计划中热轧板坯的序列尽量保持一致,此种匹配模式相对简单,只需要考虑浇次计划与热轧计划本身的“板坯”序列对应关系。针对连接比率为 1:n 的匹配模式,即一台连铸机对应多台热轧机,由于此种模式受限于目前连铸机生产产能远低于热轧机产能的影响而很少在实际

中应用，所有不再分析此种匹配模式。针对连接比率为 $n:1$ 的匹配模式，即多台连铸机对应一台热轧机进行生产，此种模式在实际钢厂中应用较多，本文即是针对此种模式下进行的研究。如宁钢采用 $2:1$ 的匹配模式进行热轧带卷的生产。为描述简便，以 $2:1$ 的连接比率进行说明，从生产计划的视角来看，表现为同一期间内由两台连铸机上的浇次计划实时产生铸坯同时供应一个热轧计划进行轧制，为提高生产物流的平衡稳定，则要求两个浇次计划出坯后产生的新板坯序列尽可能与热轧计划的“板坯”序列一致，当然，不同的开浇时间同样也会影响连铸阶段合成后的板坯序列。假设两个浇次计划中的板坯序列分别是 $[1, 2, 3, 4, 5, \dots, n]$ 和 $[1', 2', 3', 4', 5', \dots, n']$ ，则总的出坯序列假定是 $[1, 2, 1', 3, 2', 4, 3', 5, \dots, n']$ 。由于要求热轧计划中“板坯”序列应与连铸阶段总的出坯序列尽量保持一致性，则说明连铸阶段总的出坯序列 $[1, 2, 1', 3, 2', 4, 3', 5, \dots, n']$ 在满足炼钢-连铸工艺约束的条件下，还应尽可能满足热轧阶段的工艺约束，并有利于各阶段生产目标的优化。另外某些特殊情况下还可能会存在连铸坯批量下线的问题，如同一期间内两台连铸机同时浇铸的铸坯规格相差较大，则需要某一台连铸机上的铸坯批量下线进入保温坑等待。针对连接比率为 $n:m$ 的匹配模式，即多台连铸机对应多台热轧机的复杂匹配方式。类似于连接比率 $n:1$ 的匹配模式，为了得到较高热装率的生产作业计划，要求连铸阶段总的铸坯序列与热轧阶段总的需求板坯序列尽量一致，不同点在于热轧阶段的总板坯序列由不同热轧机上的热轧计划共同决定。综上，在制定炼钢-连铸-热轧一体化计划时需要同时考虑炼钢-连铸阶段的工艺约束和热轧阶段的工艺约束，并针对连铸-热轧阶段不同的连接比率探索保证生产物流的时间平衡和物流平衡的方法。

2.4 一体化计划编制的难点

在编制炼钢-连铸-热轧一体计划时，存在以下难点：

① 多阶段、多设备：一体化计划编制涉及到炼钢、连铸、热轧阶段，而每阶段可能会存在多台设备，如多台连铸机对应一台轧机或者多台连铸机对应多台轧机等，大大增加了一体化计划编制的复杂性和编制难度。

② 多品种、小批量生产订单：订单种类的多样性造成了生产工艺的多样性，增加了一体化计划编制时考虑的目标和约束，并且一体化计划编制问题更注重规模化生产，如同一炉次要求同钢种、同宽度、交货期相近等因素，因此多品种、小批量生产订单的加入容易导致生产物流的不匹配。

③ 多目标、多约束：钢铁生产过程中，各生产阶段具有不同的生产目标和约束，紧密联系而又互相制约。一体化计划编制需要同时保证各阶段的工艺约束，并最大化实现生产物流的衔接匹配。

④ 建模复杂：一体化生产计划编制需要同时对生产过程中主要的生产环节（炼钢、连铸、热轧）进行建模，并且还要考虑各环节之间的协调，使得一体化建模较为复杂且求解困难。

2.5 本章小结

本章对钢铁生产流程运行特征进行了分析研究，深入分析了各工序生产计划编制的特点；描述了生产计划编制过程中涉及的生产目标和约束条件。通过对炼钢-连铸-热轧阶段物流衔接的关系分析，为了提高生产计划间的衔接协同，连铸坯的出坯序列应尽可能的与热轧带钢的轧制序列一致，以最大化提高生产物流在时间和空间上的连续性。

3 炼钢-连铸生产计划模型与编制方法研究

炼钢-连铸是将高温铁水冶炼为钢水并浇铸成具有一定规格的连铸坯的主要阶段，是钢铁生产过程的重要环节，对钢铁企业的正常生产运行起决定性的作用。由于炼钢-连铸工序具有高温连续的特点，在其生产运行组织方面结合更加紧密，在实际生产中往往将炼钢-连铸看成一个整体进行考虑。为了提高炼钢-连铸阶段生产计划的稳定运行，本章节研究了衔接协调的炼钢-连铸生产计划编制模型和求解方法。

3.1 问题的提出

炉次计划作为浇次计划的输入，其生产计划结果对浇次计划编制结果的优劣起着决定性作用，因此本文研究了考虑衔接协调的炼钢-连铸生产计划。由于炼钢-连铸计划编制问题是多目标、多约束的组合优化问题，传统求解方法将多目标问题转换成单目标问题进行求解，其计划结果过多受人为因素的影响，不利于钢铁生产的精益化管理决策。因此本文在综合考虑了炼钢阶段和连铸阶段的生产目标和工艺约束的情况下，将炼钢-连铸计划编制问题归结为多目标旅行商问题建立整数规划模型，并采用多目标蚁群算法进行求解。

3.2 炉次计划模型

为了便于描述，符号表示如下：

i ：板坯编号， $i=1,2,\dots,I$ ， I 是总板坯个数；

Ω ：板坯集合， $i \in \Omega$ ；

n ：炉次编号， $n=1,2,\dots,N$ ， N 是炉次计划个数

M ：炉容量；

M_{\min} ：最低炉容量，即保证正常生产运行时的炉容量下限。

m_i ：板坯 i 的重量；

Y_n ：炉次 n 无委材的重量， $n=1,2,\dots,N$ ；

$$Y_n = \begin{cases} M_{\min} - \sum_{i=1}^I u_{in} \cdot m_i, & \text{if } M_{\min} - \sum_{i=1}^I u_{in} \cdot m_i > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

G_i ：板坯 i 的钢级， $i \in \Omega$ ；

W_i ：板坯 i 的宽度， $i \in \Omega$ ；

rW_i ：板坯 i 的轧制宽度， $i \in \Omega$ ；

T_i ：板坯 i 的厚度， $i \in \Omega$ ；

d_i : 板坯 i 对应订单的交货期, $i \in \Omega$;

$wc_{ii'}$: 板坯 i 与板坯 i' 位于同一炉次中, 板坯之间的轧制宽度跳跃值;

$$wc_{ii'} = \begin{cases} |rW_{i'} - rW_i|, & \text{if } W_{i'} - W_i = 0 \\ \infty, & \text{else} \end{cases}$$

$dc_{ii'}$: 板坯 i 与板坯 i' 位于同一炉次中, 板坯之间的交货期差值;

$$dc_{ii'} = |d_i - d_{i'}|$$

决策变量:

μ_{in} : 0/1 变量, 当且仅当板坯 i 被分配到炉次计划 n 进行编制时为 1;

μ_{ijn} : 0/1 变量, 当且仅当板坯 i 和板坯 j 同时被分配到炉次计划 n 时为 1。

针对炉次计划编制问题建立多目标数学模型描述如下:

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \mu_{ijn} \cdot (wc_{ij} + dc_{ij}) \quad (3.1)$$

$$\min \sum_{n=1}^N (Y_n) \quad (3.2)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^I \mu_{in} \leq 1, \quad \forall n \in \{1, 2, 3, N\} \quad (3.3)$$

$$W_i \cdot \mu_{in} = W_j \cdot \mu_{jn}, \mu_{in} \cdot \mu_{jn} = 1, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, I\}, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.4)$$

$$G_i \cdot \mu_{in} = G_j \cdot \mu_{jn}, \mu_{in} \cdot \mu_{jn} = 1, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, I\}, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^I \mu_{in} \cdot m_i \leq M, \forall n \in \{1, 2, 3, N\} \quad (3.6)$$

$$\mu_{in} \in \{0, 1\} \quad (3.7)$$

$$\mu_{ijn} \in \{0, 1\} \quad (3.8)$$

目标(3.1)表示最小化同一炉次中板坯的轧制宽度跳跃和交货期跳跃惩罚; 目标(3.2)表示最小化所有炉次中无委材的量。约束(3.3)表示每块板坯至多被安排到一个炉次中生产; 约束(3.4)表示同一炉次中板坯的宽度相同; 约束(3.5)表示同一炉次中板坯的钢级相同; 约束(3.6)表示被安排到同一炉次的板坯总量不得超过炉容总量; 约束(3.7)~(3.8)分别表示 0, 1 变量约束。

3.3 浇次计划模型

以炉次计划模型中得到的炉次结果作为输入条件, 在满足连铸阶段工艺约束的条件下, 通过优化炉次在浇次中的组合和排序以最大化利用中间包的使用寿命。

为了便于描述, 符号表示如下

n : 炉次编号, $n = 1, 2, \dots, N$, N 是炉次计划总个数;

Φ : 炉次集合, $\Phi = \{1, 2, \dots, N\}$;

j : 浇次编号, $j = 1, 2, \dots, J$, J 是浇次计划总个数;

a_j : 浇次 j 的调宽次数, A 表示同一浇次中最大调宽次数;

Ψ_j : 组成浇次 j 的炉次集合, $j = 1, 2, \dots, J$;

L : 中间包寿命;

lw_n : 炉次 n 的浇铸宽度, $\forall n \in \Phi$;

lG_n : 炉次 n 的钢级, $\forall n \in \Phi$;

lT_n : 炉次 n 的浇铸厚度, $\forall n \in \Phi$;

ld_n : 炉次 n 的平均交货期, $\forall n \in \Phi$;

决策变量:

η_{nj} : 0/1 变量, 当且仅当炉次 n 被分配到浇次计划 j 进行编制时为 1;

$\lambda_{nn'j}$: 0/1 变量, 当且仅当炉次 n 与炉次 n' 都安排到浇次计划 j 中, 并且炉次 n 是炉次 n' 的紧前炉次时为 1;

浇次计划的数学模型可描述如下:

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \lambda_{nn'j} \cdot |ld_n - ld_{n'}| \quad (3.9)$$

$$\min J \quad (3.10)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^J \eta_{nj} = 1, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.11)$$

$$lT_n \cdot \eta_{nj} = lT_{n'} \cdot \eta_{n'j}, \eta_{nj} \cdot \eta_{n'j} = 1, \forall n, n' \in \{1, 2, \dots, N\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, J\} \quad (3.12)$$

$$|lw_n - lw_{n'}| \leq C, \forall n, n' \in \Psi_j, j \in \{1, 2, \dots, J\} \quad (3.13)$$

$$a_j \leq A, \forall j = \{1, 2, \dots, J\} \quad (3.14)$$

$$\sum_{n=1}^N \eta_{nj} \leq L, \forall j = \{1, 2, \dots, J\} \quad (3.15)$$

$$|lG_n - lG_{n'}| < gC \quad (3.16)$$

$$\eta_{nj} = \{0, 1\} \quad (3.17)$$

$$\lambda_{nn'j} = \{0, 1\} \quad (3.18)$$

目标(3.9)表示最小化同一浇次计划内的交货期差异; 目标(3.10)表示最小化浇次计划数; 约束(3.11)表示所有的炉次均被安排, 且每个炉次只能被安排到一个浇次计划内; 约束(3.12)表示同一浇次计划内炉次的浇铸厚度相同; 约束(3.13)表示同一浇次计划内的炉次浇铸宽度跳跃限制; 约束(3.14)表示同一浇次内炉次在线调宽次数限制; 约束(3.15)表示安排到同一浇次内的炉次总量不得超过中间包的使用寿命; 约束(3.16)表示同一浇次内炉次的钢级相容; 约束(3.17)~(3.18)分别表示为 0/1 决策变量。

3.4 炼钢-连铸计划模型求解

以上针对炉次计划和浇次计划建立的数学模型较充分的考虑了炼钢-连铸阶段的生产目标和工艺约束，但建立的模型之间仍是独立的，因此为了有效促进炉次计划和浇次计划之间的衔接协同，本文根据炉次计划和浇次计划编制均为多目标的特点设计了多目标蚁群算法进行求解。

考虑衔接协调的炼钢-连铸批量计划编制步骤如下：

①：以初始的板坯集合作为炉次计划的输入，根据炉次计划的多目标整数规划数学模型求解得到多个 pareto 最优解，每个 pareto 最优解均由一个或多个已编制的炉次组成，即每个 pareto 解代表一种炉次计划方案。

②：不同的炉次集合获得不同优化目标的浇次计划。分别以炉次计划模型求解得到的 pareto 最优解作为浇次计划的输入，根据浇次计划的多目标整数规划数学模型求解得到不同的浇次计划方案。

③：将不同 pareto 最优解下求得的所有浇次计划方案根据多目标(3.10)和目标(3.11)进行非支配排序获得浇次计划的 pareto 最优解集。

④：浇次计划的 pareto 最优解对应一种浇次计划方案，并且每个浇次计划方案均对应了唯一的炉次计划方案，因此当浇次计划方案确定后即可得到炼钢-连铸生产计划。

⑤：最终得到多个非支配的炼钢-连铸生产计划。

⑥：针对以上得到的炼钢-连铸生产计划，采用变邻域搜索算法并设计 6 种邻域结构来完成板坯位置的调整，最终得到多个协调优化的炼钢-连铸生产计划。

通过以上方案得到的炼钢-连铸生产批量计划，不但满足各阶段生产工艺的约束，而且炉次计划和浇次计划之间互相衔接协调，达到了生产目标的总体最优。另外本文设计的炼钢-连铸生产计划求解方法具备一定的灵活性，一是可以直接获得多个炼钢-连铸批量生产计划，结合人工经验选择较优的生产计划方案，另外也可以选用不同的目标权重系数对目标(3.10)和目标(3.11)采用线性加权方法方法转换为单目标评价指标进行评价以获得对应目标权重系数下优化的炼钢-连铸批量计划。

3.4.1 蚁群算法简介

蚁群算法是受自然界中蚂蚁觅食的启发而发展起来的智能优化算法，由意大利学者 M.Dorigo 等^[56]于 1991 首次提出。研究发现蚂蚁在觅食过程中总能找到蚁穴到食物源的最短路径，并且蚂蚁还能根据周围环境变化实时调整爬行路径来获得更优的选择。例如：蚂蚁在爬行过程中遇到障碍物，经过一段时间的探索后将重新找到最优路径。

蚁群系统能够找到最优路径的原因在于：蚂蚁在运动的过程中，不断在所经

过的路径上释放信息素，同时路径上信息素随着时间不断挥发。蚂蚁能够感知路径上信息素浓度并倾向于选择浓度较高的路径。由于较短的路径同一时间段经过更多的蚂蚁，因而积累了更多的信息素。对于信息度浓度较少的路径，蚂蚁选择此路径的概率较小导致路径上信息素的积累缓慢。蚂蚁的集体行为表现出正反馈，在正反馈的作用下使的越来越多的蚂蚁选择最优路径。蚂蚁个体之间正是通过这种信息素的交流来寻找最短路径。

为了充分利用蚁群寻找最短路径的核心思想，有关研究学者提出人工蚁群算法的基本模型。人工蚁群与真实蚁群相比具备一些特殊的优良特性，人工蚁群系统充分利用了计算机的存储功能以及快速计算的能力，使得人工蚁群被赋予了记忆功能，能够记住已搜索的路径。并且人工蚂蚁路径的选择并非完全盲目的，而是按照一定的概率选择算法确定下一个选择路径，通过蚂蚁路径搜索来实现现实问题的求解。下面以一个简单地例子说明蚁群算法的原理：

如图 3.1 所示：假设蚁穴与食物源之间有两条可达路径（ABC 和 ADC），其中路径 ABC 的长度是路径 ADC 长度的两倍，每只蚂蚁具有相同的爬行速度，每隔一段时间，将分别有 12 只蚂蚁从食物源和蚁穴离开（如图 3.1(a)）。

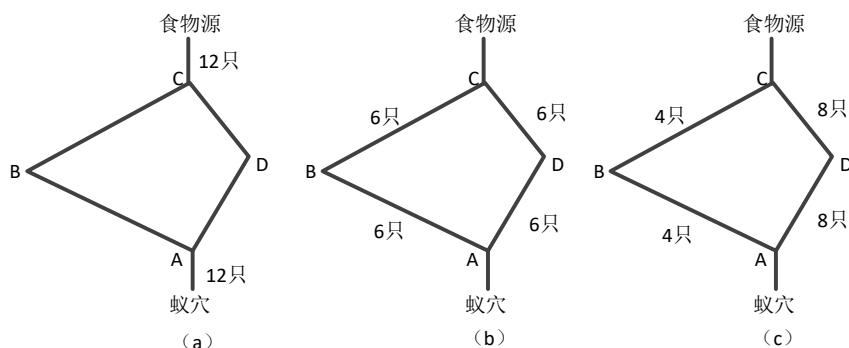


图 3.1 蚂蚁觅食行为路径图^[57]

Fig.3.1 Graphics of Ant Foraging Behavior

假设在 $T=0$ 时，12 只蚂蚁分别离开食物源和蚁穴，由于两条路径无信息素积累，所以蚂蚁选择两条路径的概率相同（如图 3.1(b)）。在 $T=1$ 时，选择路径 ADC 的蚂蚁到达食物源或蚁穴，此时，路径 ABC 上的蚂蚁到达 B。同时又有 12 只蚂蚁分别离开蚁穴和食物源。由于路径 ADC 上的信息素浓度是路径 ABC 上的两倍，则蚂蚁选择 ADC 的概率是选择另一条路径的两倍，所以最终有 8 只蚂蚁选择路径 ADC，4 只蚂蚁选择另外一条路径（如图 3.1(c)）。不断重复以上过程，较短的路径则积累了更多的信息素，最终使得越来越多的蚂蚁选择较短的路径。

由于蚁群算法具有正反馈、并行性、自适应性、鲁棒性的特点，越来越受到

人们的关注。目前蚁群算法已经广泛应用到求解组合优化问题方面，在 TSP 问题^[58~60]、车间调度问题^[61~63]、车辆路径问题^[64, 65]等方面都有着优良的求解性能。炼钢-连铸计划编制问题作为组合优化问题，蚁群算法在求解此类问题时同样具有其适用性。

3.4.2 基于 TSP 问题的蚁群算法流程

针对 TSP 问题，简要说明蚁群算法的求解流程。

step1：初始化参数，当前代数 $t=0$ ，总迭代代数 T ， n 只蚂蚁随机放置到 m 个城市，初始化城市节点间的信息素浓度为常量。

step2：循环求解， $t \leftarrow t + 1$ ；

step3：初始化蚂蚁编号 $k \leftarrow 0$ ；

step4： $k \leftarrow k + 1$ ；

step5：根据状态转移概率随机选择下一个城市 j ($j \notin tabu_k$)，并将访问的城市节点 j 加入到禁忌表 $tabu_k$ 中，若所有的城市均被访问，则跳转到 step6，否则继续执行 step5；

step6：若 $k \geq n$ ，则跳转到 step7；否则跳转到 step4；

step7：按照一定的策略更新信息素矩阵；

step8：若 $t > T$ ，跳转到 step9，否则，清空禁忌表并跳转到 step2；

step9：输出访问城市节点的最优路径。

3.4.3 基于 TSP 问题的多目标蚁群算法流程

针对多目标 TSP 问题，多目标蚁群算法求解步骤如下：

step1：初始化蚁群算法参数，构造每个优化目标的信息素矩阵，将 n 只蚂蚁随机放置到 m 个城市。

step2：根据状态转移策略构造每只蚂蚁的可行路径，即完成可行解的构造。

step3：对外部档案中的非支配解与当前所有可行解进行非支配排序获得 pareto 最优集解，并更新到外部档案中。

step4：按照一定的策略更新每个优化目标下的信息素矩阵。

step5：若算法达到终止条件，则输出外部档案中所有的非支配解，否则跳转到 step2。

3.4.4 基于蚁群算法的炼钢-连铸计划求解算法

炼钢-连铸批量计划编制是一个多目标、多约束的复杂组合优化问题。传统的求解算法随着问题的复杂度以及规模的增加，其求解难度呈指数增加。智能优化算法的迅速发展对解决此类问题提供了有力的支持，如遗传算法，模拟退火算法，蚁群算法等。蚁群算法作为一个自组织、正反馈、自适应的优化智能算法，能够有效求解炼钢-连铸批量计划编制这类组合优化问题。所以本文在统筹考虑炉次计

划和浇次计划衔接协调的基础上，提出了基于多目标蚁群算法的炼钢-连铸批量计划编制方法。

炼钢-连铸计划编制问题需要满足各阶段工艺约束，在目标函数的导引下得到高质量的生产计划。通过对蚁群算法的深入研究分析，将基本蚁群算法和面向炼钢-连铸生产计划的蚁群算法的基本要素一一对应，以便于将蚁群算法应用到炼钢-连铸计划编制模型上。对应关系如表 3.1 所示：

表 3.1 蚁群算法与炼钢-连铸计划编制算法的对应关系

Table3.1 Corresponding relationship between ant colony algorithm and steelmaking-continuous casting planning algorithm

要素	蚁群算法	面向炼钢-连铸计划的蚁群算法
基 本 要 素	蚂蚁	代表板坯（炉次）的蚂蚁
	蚁穴	计划编制开始前虚拟节点
	食物源	计划编制结束后虚拟节点
	搜索路径	板坯（炉次）节点构成的路径
	启发式信息	启发式信息
	节点之间的信息素	节点之间的信息素
策 略	信息素更新策略	局部更新和全局更新策略
	路径选择策略	节点选择策略
目标	最短路径	炉次计划（浇次计划）优化目标

炼钢-连铸批量计划编制问题可归结为多旅行商问题 (MTSP)：假设有 N 块板坯（炉次）编制 M 个炉次（浇次），板坯（炉次）代表城市节点，为了便于归结为 TSP 问题，增加 M 个虚拟城市节点，则共有 $N+M$ 个城市节点， $N+1, N+2\dots, N+M$ 编号表示虚拟节点。每只蚂蚁从虚拟节点出发并访问所有的城市节点后再次返回到虚拟节点，这样便构成了一个城市访问路径。相邻虚拟节点之间的城市节点集合构成了一个炉次（浇次），每只蚂蚁的访问路径构成了一个炉次计划方案（浇次计划方案）。

① 蚁群算法关键问题

1) 状态转移策略

蚂蚁种群在搜索路径的过程中涉及到板坯（炉次）节点的选择，本算法为了提高解的质量以及加快解的收敛速度，采用确定性选择和随机性选择相结合的策略确定城市节点。首先按照公式(3.19)进行确定性选择当前最佳节点。

$$s = \begin{cases} \arg \max_{s \in J_k(i)} \{\tau_{is}^{\lambda\alpha} \cdot \tau_{is}^{(1-\lambda)\alpha} \cdot \eta_{is}^{\lambda\beta}\}, & \text{if } r \leq P_o \\ \text{根据概率 } p_{(i,j)}^k \text{ 选择下一个节点, else} \end{cases} \quad (3.19)$$

其中 $P_o \in (0,1)$, r 是 $(0, 1)$ 区间均匀分布的随机数, τ_{is} 、 τ_{is}' 分别表示路径 (i, s) 上与第一个优化目标和第二个优化目标相关的信息素浓度; η_{is} 表示路径 (i, s) 上与第一个优化目标相关的启发式信息; α 和 β 分别表示信息素和启发式信息的偏重系数; $J_k(i)$ 表示第 k 只蚂蚁在节点 i 时允许选择的节点集合。当随机生成的 r 不大于给定的 P_o 时, 则在可选节点集合 $J_k(i)$ 中选择使 $\tau_{is}^{\lambda\alpha} \cdot \tau_{is}^{(1-\lambda)\alpha} \cdot \eta_{is}^{\lambda\beta}$ 最大的节点 s 作为下一个被选中的节点。当 $r > P_o$ 时, 则采用随机性概率选择方式, 其选择概率按照公式(3.20):

$$p_{(i,s)}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{is}^{\lambda\alpha} \cdot \tau_{is}^{(1-\lambda)\alpha} \cdot \eta_{is}^{\lambda\beta}}{\sum_{j \in J_k(i)} \tau_{ij}^{\lambda\alpha} \cdot \tau_{ij}^{(1-\lambda)\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\lambda\beta}}, & \text{if } s \in J_k(i) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3.20)$$

其中 $p_{(i,s)}^k$ 表示第 k 中蚂蚁在节点 i 处选择节点 s 的概率。 λ 的取值与蚂蚁编号相关, 目的是通过控制两种不同的优化标准权重促使每只蚂蚁搜索不同的 Pareto 前沿区域^[66]。则第 k 中蚂蚁对应的 λ 表示为:

$$\lambda_k = \frac{k-1}{m-1}, k \in \{1, 2, \dots, m\}$$

其中 m 表示蚂蚁总数。当 $k=1$ 时, $\lambda=0$ 表示只考虑第二个优化目标, 当 $k=m$ 时, $\lambda=1$ 表示只考虑第一个优化目标。

η_{is} 启发式信息表示为

$$\eta_{is} = \frac{1}{d_{is} + C}$$

编制炉次计划建立的整数规划模型中的 d_{is} 表示板坯 i 与板坯 s 被分配到同一个炉次中轧制宽度跳跃和交货期跳跃的惩罚值。编制浇次计划建立的模型中的 d_{is} 表示炉次 i 与炉次 s 被分配到同一个浇次中且炉次 i 是炉次 s 的紧前炉次时交货期跳跃惩罚值。为了避免当 d_{is} 趋近于 0 而使启发式信息而趋于无穷大, 因此在分母上增加常量 C 。

在编制炉次计划时, 若板坯 i 与板坯 j 不满足约束(3.4)和约束(3.5), 则 $d_{ij} = \infty$; 若板坯 i 与板坯 j 中仅且只有一个虚拟板坯 (对应于虚拟城市) 则 $d_{ij} = 0$; 若板坯 i 与板坯 j 都是虚拟板坯, 则 $d_{ij} = \infty$ 。同样, 在编制浇次计划时, 若炉次 i 与炉次 j 不满足约束(3.12)~(3.16), 则 $d_{ij} = \infty$; 若炉次 i 与炉次 j 中仅且只有一个虚拟炉次 (对应于虚拟城市) 则 $d_{ij} = 0$; 若炉次 i 与炉次 j 都是虚拟炉次, 则 $d_{ij} = \infty$ 。

2) 信息素更新策略

该蚁群算法采用局部更新和全局更新相结合的方式进行信息素的更新, 加快

了收敛速度，提高了运行效率。

局部信息素更新策略：

针对所有的蚂蚁，局部信息素更新策略如下：

$$\tau_{is}(t) = (1 - \rho)\tau_{is}(t) + \rho\Delta\tau_{is}(t) \quad (3.21)$$

其中

$$\Delta\tau_{is} = \begin{cases} \frac{Q}{d_{i,s} + C1}, & \text{if 节点 } i \text{ 与节点 } s \text{ 相邻且在搜索路径上} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

ρ 为信息素挥发系数， Q 为信息素常数， $C1$ 是常量。

全局信息素更新策略

针对多目标蚁群算法在第 t 次迭代中求得的非支配解按照公式(3.22)和公式(3.24)进行信息素全局更新。

$$\tau_{is}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{is}(t) + \rho\Delta\tau_{is}(t) \quad (3.22)$$

$$\tau_{is}'(t+1) = (1 - \rho)\tau_{is}'(t) + \rho\Delta\tau_{is}'(t) \quad (3.23)$$

其中

$$\Delta\tau_{is} = \begin{cases} \frac{Q}{F_{best}}, & \text{if 节点 } i \text{ 与节点 } s \text{ 相邻且在最优路径上} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$\Delta\tau_{is}' = \begin{cases} \frac{Q}{F_{best}'}, & \text{if 节点 } i \text{ 与节点 } s \text{ 相邻且在最优路径上} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

F_{best} 、 F_{best}' 分别对应非支配解中第一和第二个目标值， Q 为信息素常量。

为了防止蚂蚁搜索路径上的信息度过多的积累或挥发而影响到算法的全局收敛性，本文对信息素的浓度范围进行了限制，其取值范围为 $[\gamma_{min}, \gamma_{max}]$ 。

3) 局部收敛的处理策略

当多次迭代后得到的最优目标值变化不大或者不变，则表示陷入局部最优。由于信息素聚集到局部最优路线上，导致蚂蚁偏向于选择该路线，通过适当降低局部最优路线上信息素浓度来提高蚂蚁的搜索空间。当判断发生局部收敛时采取公式(3.24)进行更新。

$$\tau_{is} = \begin{cases} \lambda\tau_{is}, & \text{if } \lambda\tau_{is} > \lambda_{min}, \text{ 且路径 } is \text{ 在全局最优路径上} \\ \lambda_{min}, & \text{if } \lambda\tau_{is} \leq \lambda_{min} \\ \tau_{is}, & \text{else} \end{cases} \quad (3.24)$$

其中 $\gamma \in (0,1)$ 。

② 算法实现

基于多目标蚁群算法的炼钢-连铸计划编制问题求解步骤如下：

Begin:

炉次计划求解

step1：初始化

1) 确定信息素浓度区间 $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$ ，初始化两个信息素矩阵 M 和 M' ，确定信息素和启发式信息的偏重系数、迭代次数 T 等。

2) 读取板坯集合，并初始化板坯间的距离矩阵。

step2：构造每只蚂蚁的可行路径：蚂蚁按照状态转移概率公式(3.19)、(3.20)选择下一块板坯节点，并将该板坯节点加入到禁忌表中。若板坯加入后致使板坯总量超过最大炉容限制，则取消该板坯的加入，并选择一块虚拟板坯节点，开始下一炉次的构造。重复以上操作，直到每只蚂蚁完成所有板坯节点的路径构造，则每只蚂蚁构造的路径代表炉次计划的解。

step3：更新当前所有的非支配解集到外部档案中：将当前得到的解集合 P 与外部档案中的非支配解集 I 合并得到解集 Ω 。对解集 Ω 进行非支配排序得到 Pareto 解集并更新到外部档案中，如图 3.2 所示。

更新外部档案集合
<pre> UpdateNondominatedSet(){ H=∅ /*Pareto 解集*/ For p in Ω n_p=0 /*支配 p 的解的个数*/ For q in Ω If (q < p) then /*q 支配 p*/ n_p ← n_p + 1 end If End For If n_p=0 then H=H ∪ {p} End For I ← H /*非支配解集更新到外部档案*/ } </pre>

图 3.2 更新非支配解集合

Fig 3.2 Updating the Set of Non-dominated Solutions

step4：信息素更新：根据公式(3.21)~(3.24)对两个信息素矩阵进行信息素更新。

step5：若满足终止条件，则保存外部档案中的非支配解到集合 Ψ 中，跳转到

step6, 否则跳转到 step2。

step6: 浇次计划的编制。分别以集合 Ψ 中的非支配解作为浇次计划编制的输入数据, 通过不断构造蚂蚁的可行解、更新信息素矩阵等操作, 最终得到多个浇次计划方案。流程如图 3.3 所示。

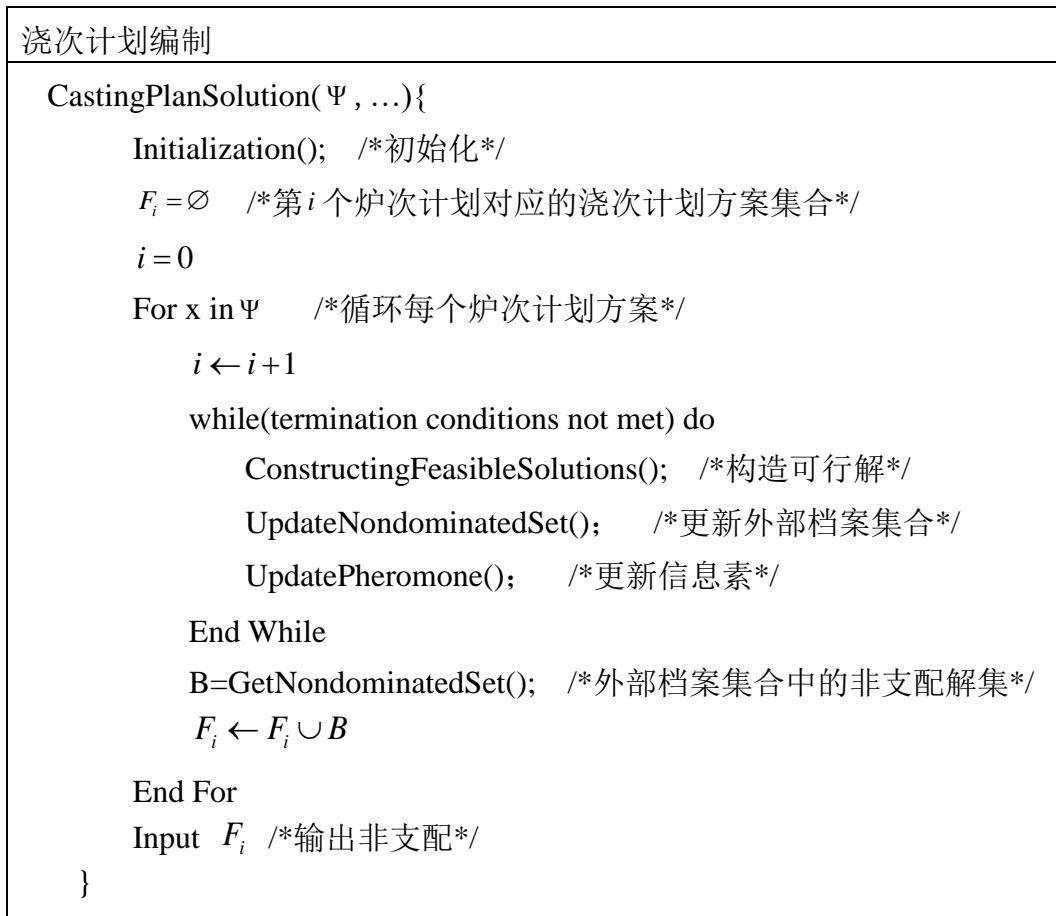


图 3.3 浇次计划编制方法流程图

Fig 3.3 Flow chart for Casting plan method

step7: 炼钢-连铸计划。集合 F_i 记录了第 i 个炉次计划对应的浇次计划集合, 通过 F_i 可得到多个炼钢-连铸计划, 其对应关系如图 3.4 所示。

step8: 由于不同炉次计划得到的浇次计划集合之间并非是完全非支配关系, 因此对集合 F_i 中所有的浇次计划根据目标(3.9)和目标(3.10)进行非支配排序得到互相非支配的浇次计划, 进而得到多个最优炼钢-连铸生产计划。

End

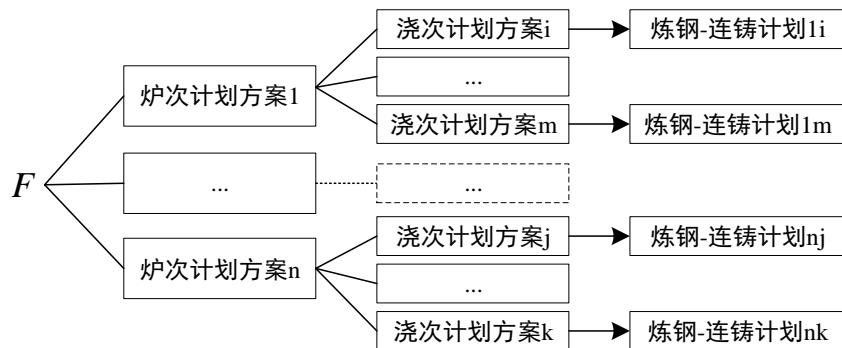


图 3.4 炼钢-连铸计划的对应关系

Fig3.4 Corresponding Relations between Steelmaking plan and Continuous Casting Plan

3.4.5 基于 VNS 算法的计划协同方法

VNS (Variable Neighborhood Search) 是由 Mladenovic 和 Hansen 提出，是一种改进型的局部搜索算法，已广泛应用于组合优化问题方面。VNS 的基本思想是通过不同的邻域结构交替进行局部搜索来探索更多的优化解。

为了进一步提高炉次计划和浇次计划之间的协同，根据以上得到的炼钢-连铸生产计划设计了 6 种邻域结构，如图 3.5 所示。在邻域结构中实现了炉次的再组合和再排序过程以及板坯的再组合过程，加强了炉次计划和浇次计划之间的信息交流，有利于实现计划间的衔接协同。

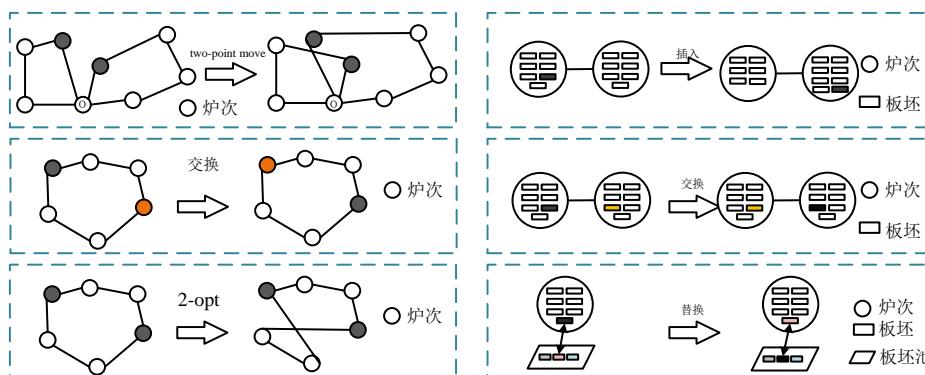


图 3.5 VNS 邻域结构

Fig3.5 The neighborhood structures for VNS

针对每个由炼钢-连铸生产计划模型得到的生产计划，根据 VNS 算法来提高计划间的衔接协调。VNS 算法流程图如图 3.6 所示。

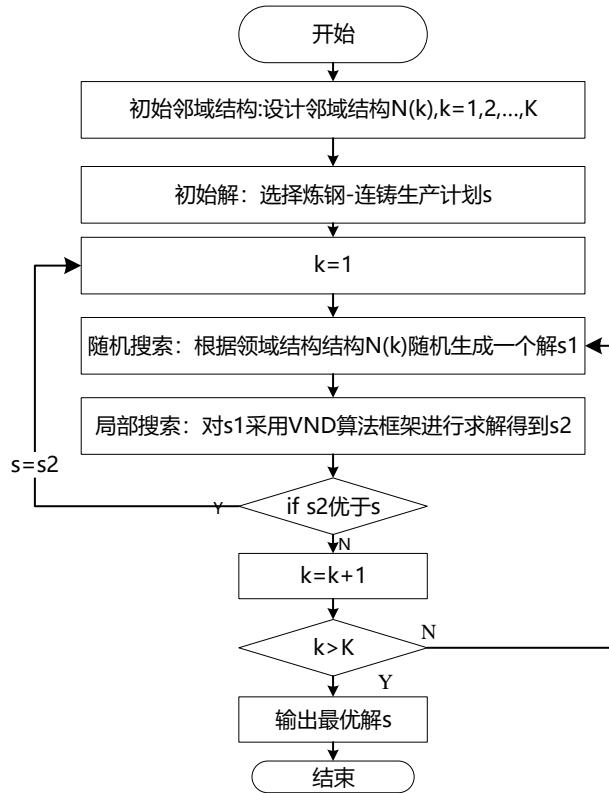


图 3.6 基于 VNS 求解炼钢-连铸生产计划算法流程图

Fig3.6 Flow chart for solving steelmaking-continuous casting production planning algorithm based on VNS

3.5 炼钢—连铸计划仿真实验

为了验证炼钢-连铸计划编制模型和求解算法的有效性，分别选取了三种规模的实验算例进行实验：307 块板坯、498 块板坯和 600 块板坯的算例数据。炉次计划和浇次计划编制的参数如表 3.2 所示。

表 3.2 炼钢-连铸计划编制算法参数表

Table3.2 Arithmetic parameter table for steelmaking-continuous casting planning

参数	炉次计划参数取值	浇次计划参数取值
信息素权重	1.3	1.5
启发式信息权重	5	4.5
信息素挥发系数	0.8	0.8
信息素浓度常量	100	100
蚂蚁种群数	100	100
最大迭代次数	100	50

图 3.7~图 3.9 是三个不同算例下得到的炉次计划的近似 pareto 前沿，均表现出较好的分布性。针对不同炉次计划的输入来编制浇次计划得到了不同算例下的浇次计划结果，具体见表(3.3)、表(3.5)和表(3.7)。通过对不同的算例下的浇次计划进行非支配排序后得到最终的炼钢-连铸计划，具体见表(3.4)、表(3.6)和表(3.8)。

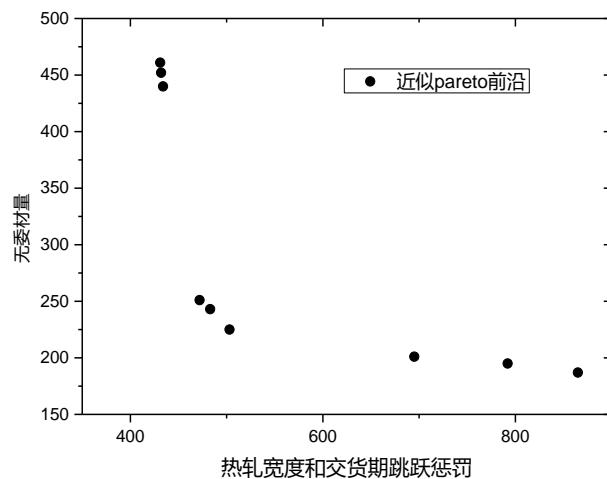


图 3.7 算例 1 炉次计划的近似 pareto 前沿

Fig3.7 Approximate Pareto front of charge plan of example 1

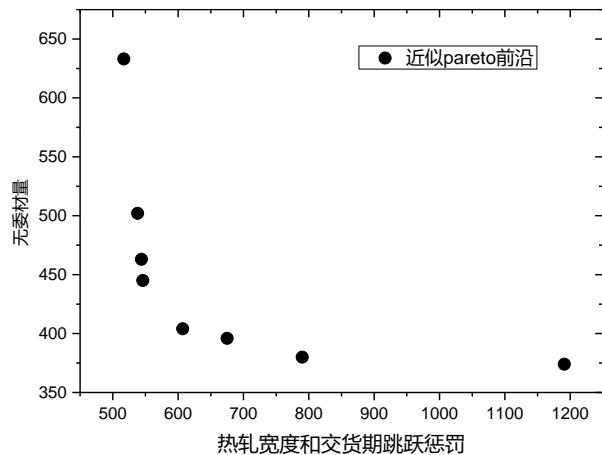


图 3.8 算例 2 炉次计划的近似 pareto 前沿

Fig3.8 Approximate Pareto front of charge plan of example 2

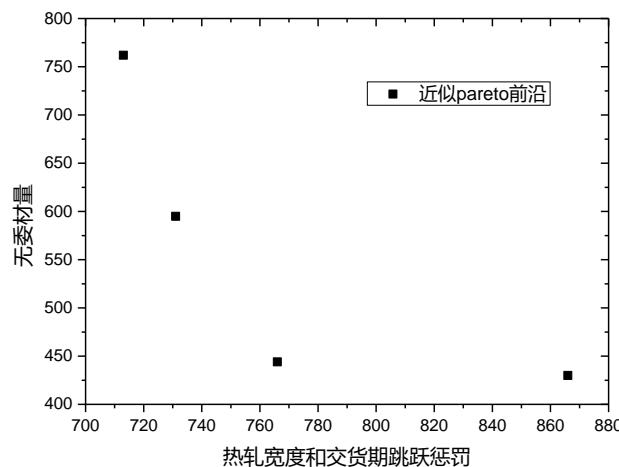


图 3.9 算例 3 炉次计划的近似 pareto 前沿

Fig3.9 Approximate Pareto front of charge plan of example 3

表 3.3 算例 1 中浇次计划结果

Table3.3 Results of Casting Plan in Example 1

炉次计划编号	浇次计划编号	第一目标值	第二目标值
1	1	17	5
	2	28	4
2	3	26	5
	4	20	4
3	5	21	5
	6	26	4
4	7	23	6
	8	27	5
	9	32	4
5	10	24	5
	11	27	4
6	12	24	5
	13	29	4
7	14	23	5
	15	27	4
8	16	27	5
	17	29	4
9	18	21	5
	19	29	4

表 3.4 算例 1 中最优炼钢连铸计划

Table3.4 Optimal Steelmaking and Continuous Casting Plan in Example 1

炉次计划编号	浇次计划编号	第一目标值	第二目标值
1	1	17	5
2	4	20	4

表 3.5 算例 2 中浇次计划结果

Table3.5 Results of Casting Plan in Example 2

炉次计划编号	浇次计划编号	第一目标值	第二目标值
1	1	26	7
	2	61	6
	3	31	9
	4	33	8
	5	35	7
	6	53	6
2	7	36	8
	8	41	7
	9	42	6
3	10	29	9
	11	35	8
	12	40	7
	13	62	6
4	14	30	9
	15	35	8
	16	39	7
	17	55	6
5	18	33	7
	19	54	6
6	20	27	8
	21	39	7
	22	46	6
7	23	30	9
	24	36	8
	25	42	7
	26	58	6

表 3.6 算例 2 中最优炼钢连铸计划

Table3.6 Optimal Steelmaking and Continuous Casting Plan in Example 2

炉次计划编号	浇次计划编号	第一目标值	第二目标值
1	1	26	7
3	9	42	6

表 3.7 算例 3 中浇次计划结果

Table3.7 Results of Casting Plan in Example 3

炉次计划编号	浇次计划编号	第一目标值	第二目标值
1	1	51	10
	2	67	9
	3	73	8
	4	107	7
2	5	51	9
	6	66	8
3	7	46	9
	8	65	8
4	9	50	9
	10	73	8
	10	73	8

表 3.8 算例 3 中最优炼钢连铸计划

Table3.8 Optimal Steelmaking and Continuous Casting Plan in Example 3

炉次计划编号	浇次计划编号	第一目标值	第二目标值
1	4	107	7
3	8	65	8
3	7	46	9

通过设计的炼钢-连铸生产计划编制算法可以产生多个 pareto 最优解，给决策者提供了一定的决策空间，有效避免了人工经验的干扰，属于先寻优后决策的方式。

对比人工编制方法、基于遗传算法的计划编制方法和本文设计的基于多目标蚁群算法的炼钢-连铸计划编制方法，其中炉次计划对比结果如表 3.9 所示，浇次计

划对比结果如表 3.10 所示。

表 3.9 炉次计划结果对比表

Table3.9 Contrast Table of Result of Charge plan

炉次 计划	算例 1		算例 2		算例 3	
	热轧宽度和 交货期差异	无委材 量	热轧宽度和 交货期差异	无委材 量	热轧宽度和 交货期差异	无委材 量
方法 1	526	512	836	436	835	624
方法 2	446	476	725	416	879	510
方法 3	434	440	1191	374	866	430
	431	461	607	404	766	444

表 3.10 浇次计划结果对比表

Table3.10 Contrast Table of Casting Plan Result

浇次 计划	算例 1		算例 2		算例 3	
	交货期差 异	浇次计划 个数	交货期差 异	浇次计划 个数	交货期差 异	浇次计划 个数
方法 1	31	4	67	6	164	7
方法 2	26	4	36	7	128	7
方法 3	17	5	26	7	107	7
	20	4	42	6	65	8
-	-	-	-	-	46	9

其中方法 1 代表人工计划编制方法，方法 2 表示基于遗传算法(GA)的计划编制方法，方法 3 表示炼钢-连铸一体化计划编制方法。

通过炉次计划和浇次计划结果的数据对比可以看出，本文设计的考虑炼钢连铸衔接协调的炉次计划的结果在板坯热轧宽度差异、交货期差异以及无委材量方面均有所降低，均优于人工计划和对比算法的结果。对比不同方法生成的浇次计划结果，人工计划结果中浇次计划个数均能保持较低水平，说明人工编制浇次计划更注重浇次数的降低；在算例 1 和算例 3 中，GA 算法均优于人工编制方法，但在算例 2 中需经人工经验来判断其优劣。相对于人工编制方法和 GA 算法，本文提出的算法均存在更优的生产计划结果，证明了算法的可行性。

3.6 本章小结

本章综合考虑了炼钢阶段和连铸阶段的生产目标和工艺约束，将炼钢-连铸计划编制问题归结为多目标旅行商问题建立整数规划模型，并采用多目标蚁群算法进行求解。通过不同规模算例的仿真实验证明了模型和算法的可行性和有效性。

4 热轧批量计划模型与编制方法研究

针对具有多目标、多约束的热轧批量计划问题，通过综合考虑热轧阶段的生产工艺约束和生产目标，建立已知热轧单元个数条件下的车辆路径问题优化模型，并设计了改进的多目标遗传算法进行求解。为同时编制多个热轧单元计划，设计了二维矩阵编码的染色体结构。为进一步提高解的质量，提出了解的优化调整策略：单个热轧单元计划调整和不同热轧单元计划间调整。通过实验对比分析证明了模型和算法的优化性和有效性。

4.1 热轧批量计划编制问题抽象

热轧批量计划编制问题是将对应生产合同的“虚拟板坯”在满足生产工艺约束的条件下确定板坯所在的热轧单元计划以及在热轧单元计划中的位置，属于典型的组合排序优化问题。车辆路径问题最早由 Dantzig 等人^[67]于 1959 年提出的，指具有不同数量货物需求的客户分布在不同的位置，配送中心安排 N 辆货车对客户进行送货，每辆货车需要在满足车辆最大载货量、客户的交货时间、车辆行驶距离/时间、客户货物需求量等约束下，尽量使用较少的车辆行驶较短的路程及时准确的满足每个客户的货物需求，其表现形式图 4.1 所示。

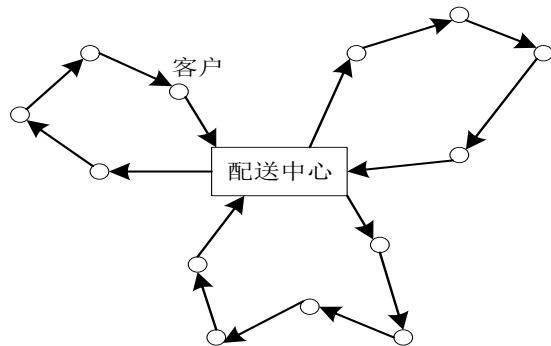


图 4.1 车辆路径规划路线图

Fig.4.1 Road Map of Vehicle Route Planning

车辆路径规划问题与热轧批量计划编制问题同属于组合优化问题，通过对热轧计划编制问题进行抽象处理，可以将热轧批量计划编制问题抽象为车辆路径优化问题（VRP），对应关系如表 4.1 所示：

表 4.1 车辆路径问题与热轧批量计划问题对应关系

Table 4.1 Corresponding Relation between Vehicle Routing Problem and Hot Rolling Batch Planning

Problem		
要素	车辆路径问题	热轧批量计划编制问题
基	配送中心	无合同对应的虚拟板坯
本	运输车辆	热轧单元计划构造器
要	车辆最大承载量	热轧单元计划中板坯最大轧制长度/重量
素	车辆路径	热轧单元计划的构造过程
	客户	板坯
	客户需求量	板坯的重量/长度
目	客户之间的距离	热轧单元计划中相邻板坯轧制时的惩罚
标	最小车辆数	最小热轧单元计划数
	最小化运输费用	最小化热轧计划的惩罚值

根据以上对应关系分析，将热轧批量计划编制问题归为车辆路径优化问题：

热轧计划编制过程可看作从配货中心安排车辆向客户送货的过程。每块板坯均会被指派到一个热轧单元计划中，并在热轧单元内具有唯一的位置，对应于每位客户的需求均由其中一辆货车满足，并存在需求满足的先后顺序。车辆从配送中心出发到再次回到配送中心的每个分支可以看成单独的热轧单元计划编制过程，并且每个分支也完成了板坯的组合和排序。合理的规划车辆路径使货车行驶的路径最短是解决该问题的重点。

4.2 热轧计划数学模型

为了便于描述，符号表示如下

i ：板坯编号， $i=1, 2, 3 \dots N$, N 是板坯总数；

k ：热轧单元编号， $k=1, 2, 3 \dots M$, M 是热轧单元总数；

L_k^{\max} ：热轧单元 k 的最大轧制长度；

L_{SW}^{\max} ：热轧板坯最大同宽轧制长度；

$W_{ZT}^{\max}(jp)$ ：相邻热轧板坯最大宽度跳跃值；

$T_{ZT}^{\max}(jp)$ ：相邻热轧板坯最大厚度跳跃值。

$H_{ZT}^{\max}(jp)$ ：相邻热轧板坯最大硬度跳跃值；

w_i^c ：铸坯 i 的宽度；

t_i^c ：铸坯 i 的厚度；

l_i^c : 铸坯 i 的长度;

w_i^r : 热轧板坯 i 的宽度。对于热轧带钢的生产，在实际生产中一般与铸坯一一对应，即一块铸坯生产一块热轧带钢，需要进一步切割的情况较少。铸坯 i 的宽度 w_i^c 经过轧制后得到 w_i^r ，其 w_i^r 代表交付的成品宽度;

t_i^r : 热轧板坯 i 的厚度;

l_i^r : 板坯 i 的轧制长度，根据质量守恒以及考虑到热轧损失，可作如下计算：

$$l_i^c \times w_i^c \times t_i^c \times \rho_i^c \times (1 - \eta_i) = l_i^r \times w_i^r \times t_i^r \times \rho_i^r$$

其中 η_i 表示板坯 i 的热轧损失率， ρ_i^c 和 ρ_i^r 分别表示铸坯的密度和热轧板坯的密度。

决策变量：

x_{ijk} : 0/1 变量，当且仅当板坯 i 和板坯 j 都在热轧单元 k 内，且板坯 j 被安排到板坯 i 后轧制时为 1；

γ_{ik} : 0/1 变量，当且仅当板坯 i 在轧制单元 k 内轧制时为 1；

ξ_{ij} : 0/1 变量，当且仅当板坯 i 和板坯 j 的热轧宽度相同时为 1；

V_{ij}^w 、 V_{ij}^t 、 V_{ij}^h : 分别表示先后轧制的板坯 i ， j 在宽度、厚度和硬度方面跳跃值。

其中

$$V_{ij}^w = |w_i^r - w_j^r|$$

$$V_{ij}^t = |t_i^r - t_j^r|$$

$$V_{ij}^h = |h_i^r - h_j^r|$$

目标：

$$\min \sum_{k=1}^M (\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j,k} \cdot V_{ij}^t) \quad (4.1)$$

$$\min \sum_{k=1}^M (\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j,k} \cdot V_{ij}^h) \quad (4.2)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N \gamma_{ik} \cdot l_i^r \leq L_k^{\max} \quad \text{其中 } k = 1, 2, \dots, M \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j,k} \cdot \xi_{i,j} \cdot l_i^r \leq L_{SW}^{\max} \quad \text{其中 } k = 1, 2, \dots, M \quad (4.4)$$

$$x_{ijk} \cdot V_{ij}^w \leq W_{ZT}^{\max}(jp) \quad \text{其中 } i, j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, M \quad (4.5)$$

$$x_{ijk} \cdot V_{ij}^t \leq T_{ZT}^{\max}(jp) \quad \text{其中 } i, j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, M \quad (4.6)$$

$$x_{ijk} \cdot V_{ij}^h \leq H_{ZT}^{\max}(jp) \quad \text{其中 } i, j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, M \quad (4.7)$$

$$x_{ijk} \cdot (w_j^r - w_i^r) \leq 0 \quad \text{其中 } i, j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, M \quad (4.8)$$

$$\sum_{k=1}^M \gamma_{ik} \leq 1 \quad \text{其中 } i = 1, 2, \dots, N \quad (4.9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (4.10)$$

$$\gamma_{ik} \in \{0,1\} \quad (4.11)$$

$$\xi_{ij} \in \{0,1\} \quad (4.12)$$

目标函数(4.1)表示最小化先后轧制板坯在厚度方面的跳跃惩罚。目标函数(4.2)表示最小化先后轧制板坯在硬度方面的跳跃惩罚。约束(4.3)表示同一轧制单元计划中轧制长度约束限制。约束(4.4)表示相同宽度板坯连续轧制最大长度限制。约束(4.5)表示相邻轧制的主体材板坯在宽度方向上的最大跳跃限制。约束(4.6)表示相邻轧制的主体材板坯在厚度方向上的最大跳跃限制。约束(4.7)表示相邻轧制的主体材板坯在硬度方向上的最大跳跃限制。约束(4.8)表示同一轧制单元中前后相邻轧制的板坯在宽度方向上非增变化。约束(4.9)表示每块板坯至多被分配到一个轧制单元计划中轧制。约束(4.10)~(4.12)表示0, 1变量约束。

热轧计划编制问题是一个多目标、多约束的复杂NP难问题。传统处理方法一般将多目标优化问题通过数学变换转换为单目标，并且转换过程中需要人工经验的支撑，致使获得的解过多受人为因素的干扰。同时多目标转换为单目标后，每次模型求解只能得到一个近优解，从而屏蔽了其他情况下获得近优解的可能性，不利于决策者的决策。因此本文采用多目标遗传算法来求解热轧批量计划编制问题，有效避免了转换为单目标后所存在的问题。

4.3 遗传算法的简介

遗传算法是由美国的J.Holland教授^[68]在1979年提出的一类模拟生物在自然界遗传和进化过程的随机搜索算法。该算法的提出引起了国内外学者的广泛关注，并随着遗传算法的不断研究探索，现已广泛应用于路径规划^[69~70]、生产调度^[71~72]、人工智能^[73]、图像识别^[74~75]等方面。

遗传算法是一类模拟生物在自然界遗传和自然选择过程中的随机搜索算法，其主要概念是适者生存，不适者淘汰。遗传算法以种群中所有的个体为对象，对每个个体进行染色体编码，通过交叉、变异、选择操作不断使个体进化并筛选出更优的个体。

遗传算法的基本步骤如下：

- step1：随机产生具有一定个体数量的初始种群；
- step2：计算种群中个体的适应度，用于评价个体的优劣程度；
- step3：通过将交叉、变异遗传操作作用于种群得到下一代种群；
- step4：当迭代到最大进化次数时，输出具有最大适应度的最优个体。

目前所研究的问题大多是多目标优化问题，因此需要采用多目标遗传算法来求解多目标优化问题，比较有代表性的算法包括：HLGA、NPGA、NSGA、NSGA-II^[76]等，由于NSGA-II采用了基于精英策略的快速非支配排序机制，使算法更快收敛

于真实 Pareto 前沿面，并采用拥挤度和拥挤度比较算子，有效保证了种群的多样性。因此本文采用基于 NSGA-II 改进的多目标遗传算法来求解热轧批量计划编制问题。

4.4 基于多目标遗传算法的热轧批量计划编制方法

针对多目标热轧批量计划编制问题，本文采用基于 NSGA-II 的多目标遗传算法进行优化求解，设计了可同时处理多个轧制单元计划的二维矩阵编码染色体结构，基于该结构，重新设计了交叉算子和变异算子，并通过引入精英保留策略有效防止较优解的丢失。为促进优化解进一步逼近 Pareto 最优前沿面，提出了解的优化调整策略：单个热轧单元计划调整和不同热轧单元计划间调整。通过与多目标蚁群算法和人工算法的对比，验证了改进的多目标遗传算法的有效性。

4.4.1 染色体编码

每个染色体代表一个解，即决定了每块板坯在热轧单元计划中的分配情况和所在热轧单元中的位置。为了便于表示这种关系，首先按照自然数顺序对每块板坯和热轧单元编制序号，并采用二维矩阵编码的形式进行染色体的构造，如图 4.2 所示：

板坯编号						
1	2	3	4	5	6	7
1	0	2	0	0	0	1
2	1	0	3	0	2	0
3	0	0	0	2	0	0

图 4.2 染色体编码

Fig.4.2 Chromosome coding

染色体编码矩阵中横轴表示板坯编号，纵轴表示热轧单元计划编号，以上染色体编码表示 7 块板坯在 3 个热轧计划中的分配和排序信息。令 (i, ϕ, z) 表示编号为 i 的板坯在第 ϕ 个热轧计划中的数值大小为 z ，分配的数值的大小表示其在热轧单元计划中的先后顺序，数值越大表明所在的位置越靠后。每块板坯仅且只能分配到一个热轧单元计划中，若板坯未分配到该热轧单元，则分配数字 0。图 4.2 中表示编制了 6-2、1-5-3 和 7-4 共三个热轧单元计划。根据以上分析可知，矩阵中每列只有一个大于 0 的数，其余均为 0。每一行的数值（除 0 外）均可进行大小比较，并且不存在相同的数值。

4.4.2 交叉算子

通过交叉算法实现两条染色体的信息交换以促进个体的进化。本文采用两点交叉的方式，在父代染色体长度方向上随机生成两个交叉点 P1 和 P2，如图 4.3(1)；父代之间互相交换交叉点之间的基因段，如图 4.3(2)。

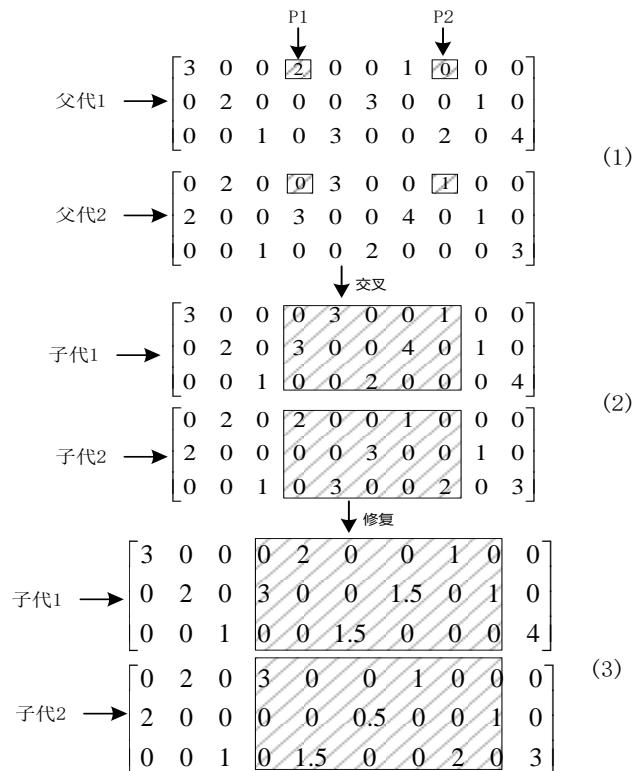


图 4.3 交叉算子

Fig.4.3 Crossover operator

为防止产生不可行解和提高解的收敛速度，交叉后的基因点（如图 4.3(2)中灰色部分）对应的数值（决定板坯的排序）需要按照一定的规则来确定。其规则如下：首先扫描染色体每一行的非交叉基因的非零基因位，并按照从小到大的板坯号顺序对板坯进行排序。如图 4.3(2)中子代 1 第 2 个热轧单元中的(2, 2, 2)、(9, 2, 1)，经排序后，板坯的排序为 9-2，剩下的(4, 2, 3)、(7, 2, 4)中板坯 4 和板坯 7 作为待插入的板坯按照一定的概率插入到排序后的板坯序列 9-2 中，其插入过程如图 4.4 所示。

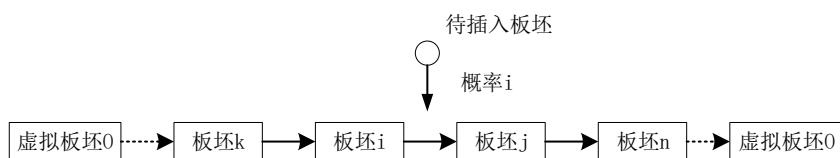


图 4.4 板坯插入

Fig.4.4 Slab insertion

在板坯序列的首位和末尾分别添加虚拟板坯 O ，目的是便于待插入板坯可插入到板坯序列前和板坯序列后，其中虚拟板坯具有与相近板坯相同的属性。在满足工艺约束的情况下，其每个插入点的概率由插入该点带来的惩罚点数的变化所决定。若插入点不满足工艺约束，则此点不作为板坯插入点。文献^[30]将成品板坯的宽度、厚度、硬度跳跃值转换为惩罚点数以实现不同属性跳跃值的求和。采用此方法，其中宽度跳跃惩罚点数见表 4.2、厚度跳跃惩罚点数见表 4.3 和硬度跳跃惩罚点数见表 4.4。因此总惩罚点数表达式如下：

$$P_{ij} = \partial(V_{ij}^w) + \partial(V_{ij}^t) + \partial(V_{ij}^h)$$

P_{ij} 表示相邻板坯 i 与板坯 j 之间惩罚点数， $\partial: A \rightarrow B$ 表示跳跃值 A 与惩罚点数 B 的映射关系。

将板坯宽度、厚度、硬度跳跃值转换为惩罚点数 P_{ij} 能够在一定程度上表征相邻板坯之间的优劣性，以作为启发信息来提高解的收敛。

基于以上分析，则图 4.5 中板坯的插入所带来惩罚点数的变化为：

$$\Delta p_{ij}^m = P_{ij} - (P_{im} + P_{mj})$$

若 $\Delta p_{ij}^m > 0$ ，表示板坯 m 的插入可减少总体跳跃惩罚；若 $\Delta p_{ij}^m < 0$ ，表示板坯 m 的插入带来了总体跳跃惩罚的增加。为了便于统一概率的计算，对每个惩罚点数差值进行修正：首先扫描每个插入节点并统计出获得最小的惩罚点数的差值 Δp_{\min} ，则更新全部的惩罚差值为：

$$\Delta p_{ij}^m = \Delta p_{ij}^m + |\Delta p_{\min}| + B$$

其中 B 为大于零的常量，防止求解概率时，惩罚差值为零的情况。若板坯 m 插入到板坯 i 和板坯 j 中不满足工艺约束，则 $\Delta p_{ij}^m = 0$ 。

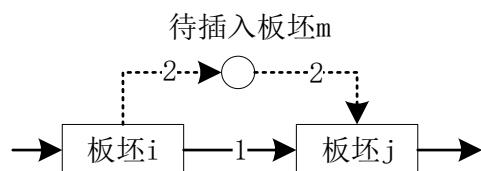


图 4.5 板坯插入

Fig.4.5 Slab insertion

则板坯 m 插入到板坯 i 与板坯 j 之间的概率为：

$$\theta_{ij}^m = \frac{\Delta p_{ij}^m}{\sum \Delta p_{ab}^m}$$

其中 $\sum \Delta p_{ab}^m$ 表示板坯 m 插入到所有待插入点的惩罚点数总和。为了提高解的质量和收敛速度，采用确定性选择和随机性选择相结合的选择策略。此算法按照公式(4.13)确定板坯 m 的插入点。

$$(i, j) = \begin{cases} \arg \max \theta_{ij}^m, & \text{if } r < p_o \\ \text{根据概率 } \theta_{ij}^m \text{ 选择插入点,} & \text{else} \end{cases} \quad (4.13)$$

其中 $p_o \in (0, 1)$, r 是 $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数。当随机生成的 r 不大于给定的 p_o 时, 则选择使 θ_{ij}^m 最大的 (i, j) 作为板坯 m 的插入位置。当 $r \geq p_o$ 时, 则采用轮盘赌的方式随机选择插入位置。当插入点 (i, j) 被确定后, 则待插入板坯 m 在热轧计划 ϕ 中的位置可以表示为 $(m, \phi, (z_i + z_j)/2)$, 若 i 或 j 为虚拟节点, 则分别对应的位置表示为 $(m, \phi, z_j - 0.5)$ 或 $(m, \phi, z_i + 1)$ 。其中 z_i 、 z_j 分别是板坯 i 和板坯 j 在矩阵中对应的数值。当板坯 m 插入后, 更新板坯序列 (按照矩阵中的数值的大小从小到大排序)。按照以上的插入操作依次确定剩余待插入的板坯在染色体二维矩阵中对应的数值。最终获得优化且可行的子代染色体, 如图 4.3 (3)。

表 4.2 宽度跳跃惩罚点数表

Table 4.2 Width Jump Penalty Point

跳跃值	惩罚点数
0-3	1
3-6	2
6-9	3
9-12	5
12-15	10
15-18	20
18-21	30
21-24	50
24-27	70
27-30	90
30-33	120
33-36	150
36-54	200
54-90	500
90-150	1000

表 4.3 硬度跳跃惩罚点数表

Table4.3 Hardness Jump Penalty Point

跳跃值	惩罚点数
1	5
2	15
3	35
4	60
5	75

表 4.4 厚度跳跃惩罚点数表

Table4.4 Gauge Jump penalty Point

跳跃值	惩罚点数
0.0003-0.03	3
0.03-0.06	7
0.06-0.09	12
0.09-0.12	18
0.12-0.15	25
0.15-0.18	33
0.18-0.21	42
0.21-0.24	52
0.24-0.30	66
0.30-0.45	99
0.45-3.0	199

4.4.3 变异算子

通过变异算法使染色体发生基因变异，是促进种群进化的重要手段，同时可以使染色体具有跳出局部最优的“能力”，防止算法出现早熟现象。采用两点交叉的方法，在染色体长度方向上和宽度方向上随机生成两个变异点 p_1 和 p_2 ，如图 4.6(1)，表示 p_1 处所指向的板坯经过变异操作后被分配到 p_2 所对应的热轧单元中。经过变异操作后，板坯的位置发生变化，如图 4.6(2)所示。此时 p_1 所对应的板坯在矩阵的数值需要根据交叉算法的步骤以一定的概率选择插入点，即编号为 7 的待插入板坯按照交叉算法中介绍的策略插入到(9, 2, 1)、(2, 2, 2)、(6, 2, 3)中，最终获得可行的插入点 (i, j) ，如图 4.6(3)所示。

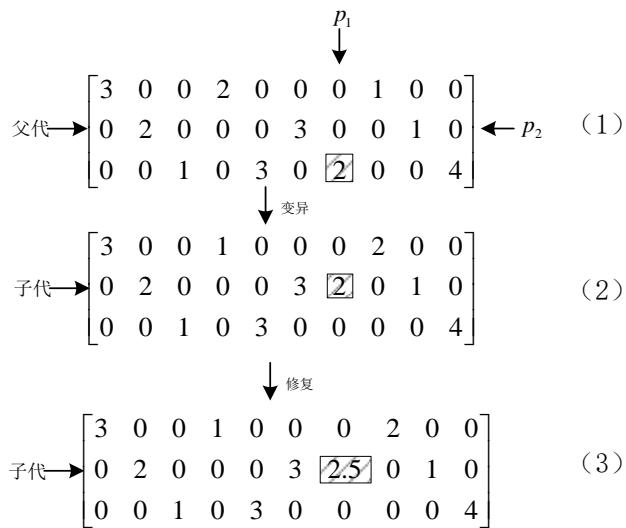


图 4.6 变异过程

Fig.4.6 Variation process

随机初始 $p_o \in (0,1)$ ，若 $p_o < l_o$ ，则发生上述变异，否则不发生，其中 l_o 为变异概率。

4.4.4 热轧计划编制算法流程

在多目标遗传算法中，令 T 表示算法最大迭代次数， R 表示热轧单元数， N 表示编制热轧计划的板坯池中的板坯数， Ω 表示板坯集合， PN 表示种群中个体的数量。

step1：令 $t=1$ ，随机初始化父代种群 P_t 。为提高初始解的质量，板坯在染色体矩阵中的位置按照热轧板坯宽度变化约束随机进行排序，算法见图 4.7 中种群初始化流程。

step2：分别将交叉算子、变异算子作用于种群 P_t 生成大小为 PN 的子代种群 Q_t 。

step3：采用精英保留策略以保证种群中的精英能够进入下一代，令 $P_t = P_t \cup Q_t$ ，此时种群 P_t 的大小为 $2PN$ ，并且种群中的精英个体一定包含在 P_t 中，根据种群个体非支配情况进行等级排序和拥挤度排序以获得种群 P_t 中每个个体的排序，并将排序结果作为自身的适应度。确保将前 $\xi * PN$ (ξ 为精英保留系数) 的个体加入到新种群 P_{t+1} 中，种群 P_t 中剩余的个体根据自身的适应度采用二进制锦标赛的方式进行选择操作，最终获得种群大小为 PN 的种群 P_{t+1} 。

step4：若 $t > T$ ，算法结束，输出热轧批量计划的多个非支配解；否则， $t = t + 1$ ，转 step2。

Population Initialization
PopulationInitialization(){ /*种群初始化*/ }

```

 $P_i = \emptyset$ 
while  $|P_i| < PN$  /* $|P_i|$  为第 1 代种群当前的子代数*/
     $p = \emptyset$  /*染色体个体*/
    For each  $e \in \Omega$ 
         $r = rand(R)$  /*随机生成一个整数, 其中  $1 \leq r \leq R$  */
         $e = (e_n, r, 1)$  /* $e_n$  表示对应的板坯号*/
    End For
    For  $i = 1$  to  $R$ 
         $\Pi = sort(i)$  /*将第  $i$  个热轧单元中的板坯按照宽度从大到小排序*/
        For each  $e \in \Pi$ ,  $k = 1$  to  $|\Pi|$ 
             $e = (e_n, r, k)$ 
             $p = p \cup \{e\}$ 
        End For
    End For
    If  $isok(p)$  /*初始化的染色体  $p$  是否满足约束*/
         $P_t = P_t \cup p$ 
    End If
End While
}

```

图 4.7 种群初始化流程

Fig.4.7 Population Initialization

4.4.5 优化调整策略

为进一步提高热轧批量计划解的质量, 在多目标遗传算法中增加启发式调整策略: 单个热轧单元计划调整和热轧单元计划间调整策略。单个热轧单元调整是通过调整板坯在热轧单元计划中的位置来优化解; 热轧单元计划间的调整是通过改变板坯在不同热轧单元计划之间的分配来优化解。能否进行调整的关键在于板坯调整后能够促进目标解的优化, 如图 4.8 所示, 其中 i, j, m, n, k 均代表板坯, ΔV_{ij}^k 、 Δp_{mn}^k 分别表示板坯 k 从板坯 i 与板坯 j 之间移走和插入到板坯 m 与板坯 n 之间带来的收益。在满足热轧计划约束的条件下, 若 $\Delta V_{ij}^k + \Delta p_{mn}^k > 0$, 则表明板坯 k 的移动可以提高解的优化性。另外由于二维染色体编码结构的优异设计, 板坯的移动只需要考虑改变解矩阵中对应的数值大小即可。

为了不影响随机进化算法跳出局部最优解的能力, 在每一代均采用一定的概率对解实施解调整策略, 并且在解优化调整过程中随时检测是否满足热轧计划模

型的约束。

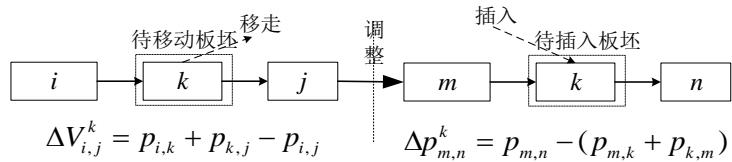


图 4.8 调整机制

Fig.4.8 Adjustment mechanism

① 单个热轧单元调整

根据热轧计划的生产目标和约束信息，轧制阶段主要考虑板坯的宽度、厚度、硬度等信息。因此，若同一热轧单元计划中相邻板坯存在相同的热轧宽度、热轧厚度和硬度，则可以将其捆绑在一起进行整体移动，并且可以捆绑的个数不限，捆绑在一起的板坯集合统称为板坯元组。其算法流程如下：

step1：设置每个热轧单元中板坯元组移动的最大次数 T ，热轧单元数 R ，禁忌表 ϕ （防止不断循环具有较大惩罚却无法找到较优插入点的板坯元组），此时令 $r=1$, $t=1$ 。

step2：统计第 r 个热轧单元计划中最大惩罚的板坯元组 k （元组内的板坯不在禁忌表中），即 ΔV_{ij}^k 的最大值。

step3：寻找最优插入点，即 Δp_{mn}^k 的最大值。若 $\Delta V_{ij}^k + \Delta p_{mn}^k > 0$ ，并且移动后满足热轧单元计划的工艺约束，则移动板坯元组 k 。否则不移动，并加入到禁忌表 ϕ 中。

step4：若 $r>R$ ，则终止算法。若 $t>T$ ，则 $r=r+1$, $t=1$ ，转 step2，否则 $t=t+1$ 转 step2。

② 热轧单元间调整

为了将热轧单元计划中个别具有较大惩罚的板坯通过移动到其他热轧单元计划中而减少整体惩罚，同时为了防止过多的板坯大批量移动到其他热轧单元计划中，对板坯元组的内部数量进行了限制，当超过此限制，则对板坯元组不予移动。算法流程如下：

step1：设置板坯元组移动的最大次数 T ，禁忌表 ϕ （防止不断循环具有较大惩罚但无法找到较优插入点的板坯组），此时令 $t=1$ 。

step2：统计全部热轧单元计划中具有最大惩罚的板坯元组 k （元组内的板坯不在禁忌表中），即 ΔV_{ij}^k 的最大值。

step3：在其余热轧单元中寻找最优插入点，即 Δp_{mn}^k 的最大值。若 $\Delta V_{ij}^k + \Delta p_{mn}^k > 0$ ，并且移动后满足热轧单元计划的工艺约束，则移动板坯元组 k 。

否则不移动，并加入到禁忌表 ϕ 中。

step4：若 $t > T$ ，则终止算法，否则 $t=t+1$ 。转 step2。

4.5 实验验证

为了验证模型和算法的有效性，采用某钢厂的实际生产数据进行实验验证，以某批次实际生产合同共 260 块板坯作为模型的输入条件，具体信息见表 4.5。

表 4.5 板坯信息

Table 4.5 Slab information

钢种	板坯数	宽度/mm	厚度/mm	硬度等级
A	64	1190~1370	2.2~4.5	1
B	71	1110~1440	2.6~4	2
C	69	1080~1430	2~3.4	3
D	56	1090~1400	2.4~3.3	4

在 CPU2.40GHz，内存为 4G 的计算机上进行实验验证。遗传算法参数设置：交叉概率为 0.9，变异概率为 0.1，种群数目为 100，最大迭代次数为 100，轧制计划中包含轧制单元数为 3。根据上述参数进行多次实验，算法均可在 5min 内得到热轧计划。

本文对比了使用基于改进的多目标遗传算法、多目标蚁群算法以及人工排程的结果，如图 4.9 所示，图中分别表示了改进的遗传算法和蚁群算法的非支配前沿以及人工排程结果对应的目标点。

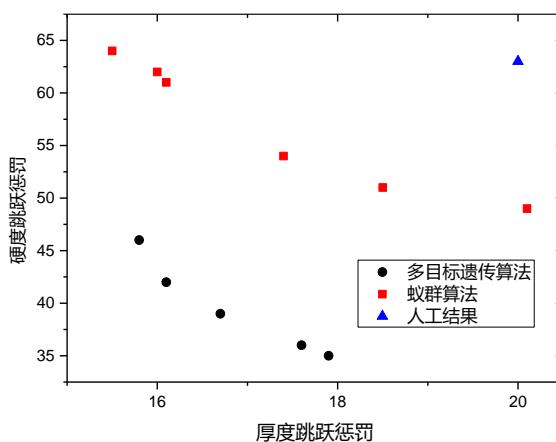


图 4.9 热轧计划结果对比图

Fig.4.9 Contrast Chart of Rolling Plan Result

从结果中可以看出，改进的多目标遗传算法所得到的前沿面更靠近左下端，表明两个目标值更优，其次是多目标蚁群算法，最后是人工编制结果。计划单元优化调整策略和精英策略的引入使得遗传算法的优化性能大幅度提升，同时算法求解过程中增加了随机选择和最优选择的求解机制，促使在保证种群多样性的情况下加快了算法的求解效率。通过对比，验证了设计的多目标遗传算法的优化性和有效性。

为了证明本文设计的热轧计划求解算法在不同算例下的优化性能，选择 212 块热轧板坯进行仿真实验，其热轧板坯具体信息见表 4.6 所示。模型中的运行参数仍采用上述算例中设置的条件。

表 4.6 热轧板坯信息

Table 4.6 Information of slabs

编号	钢种	板坯宽度/mm	板坯厚度/mm	板坯硬度等级	板坯件数/个
1	C	1170	3.2	2	8
2	C	1180	3.5	2	13
3	D	1200	2.3	1	12
4	B	1200	4	3	16
5	B	1210	4.2	3	7
6	D	1220	2	1	7
7	A	1220	4.4	4	9
8	C	1240	1.7	2	13
9	A	1240	4.6	4	11
10	C	1250	2.4	2	12
11	C	1260	2.6	2	9
12	C	1260	1.5	2	9
13	B	1270	1.3	3	8
14	C	1280	2.7	2	8
15	B	1290	2.8	3	14
16	B	1300	1.1	3	15
17	B	1310	3	3	9
18	A	1320	3.2	4	11
19	A	1350	3.2	4	10

图 4.10 表示了某一轧制单元中板坯宽度、厚度以及硬度的变化趋势，从图中

可以看出热轧板坯宽度的变化符合热轧单元计划对主体材的要求，板坯厚度和板坯硬度的变化均为平缓变化，证明了算法的可行性。

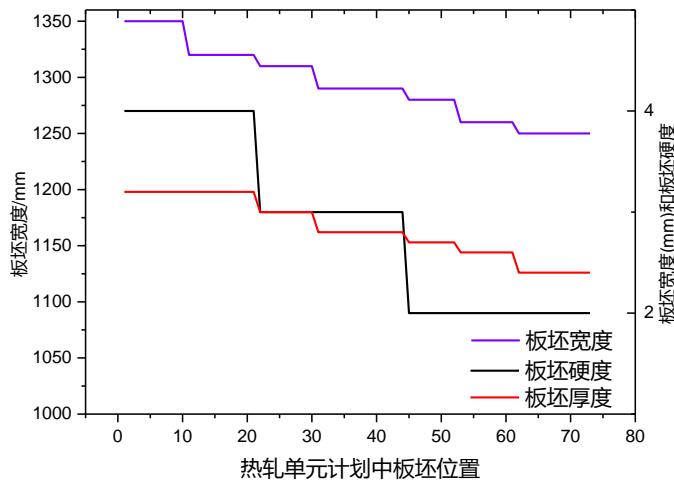


图 4.10 某一轧制单元宽度、厚度和硬度变化

Fig 4.10 Width, thickness and hardness variation of one rolling unit

4.6 本章小结

针对热轧批量计划编制的多目标优化问题，建立了 VRP 模型并设计了多目标遗传算法进行求解，这种“先求解后决策”的方式给决策者提供更多的决策空间，可根据不同的实际情况选择不同的决策方案。设计的二维矩阵编码的染色体结构能通过修改染色体矩阵中数值大小来改变板坯在热轧单元中的分配和在热轧单元中的位置。在进行交叉操作和变异操作时，增加概率冲突消解策略，有效提高了算法的全局搜索能力和收敛能力。为了进一步优化解，提出解优化调整策略。通过实验结果对比分析，证明设计的模型和算法在求解多目标热轧批量计划编制方面的有效性。

5 炼钢-连铸-热轧衔接协调模型及算法研究

传统的钢铁生产中，炼钢、连铸、热轧工序相互独立，生产计划分别制定并实施，各工序过多考虑自身的生产目标，而忽视了与其他生产工序的有机协调，使得制定的计划具有一定的局限性。连铸坯热送热装技术的出现对促进生产运输过程中物流的高效传递和衔接匹配提供了新途径。因此本章以提高热装比为主要目标建立了考虑衔接协调的炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制模型并设计了优化算法进行求解。

5.1 炼钢-连铸-热轧一体化计划问题分析

炼钢-连铸-热轧一体化批量计划是多阶段集成的多约束、多目标的典型组合优化问题。一体化计划的主要难点在于如何合理衔接炉次计划、浇次计划和热轧计划，通过平衡各阶段的生产计划目标要求，编制出高效可行的一体化批量生产计划，在保证各单元满足自身约束的基础上合理的控制各计划中板坯的组合和排序达到生产计划的一体化。

根据钢铁生产特点和生产工艺流程，一体化计划衔接协调问题的核心在于浇次计划与热轧计划在时间和生产物流方面的匹配。为了更好的研究一体化计划编制问题，对连铸和热轧过程中物流运输过程作简要描述，如图 5.1 所示。

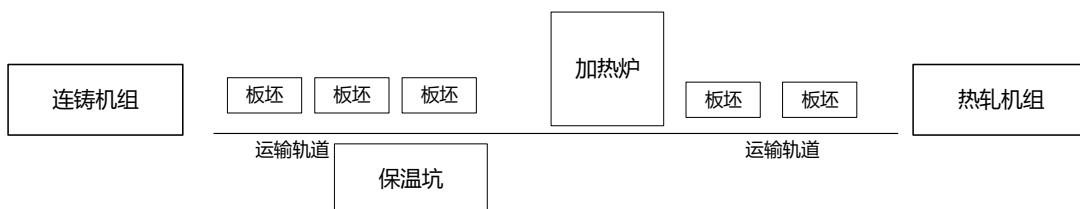


图 5.1 连铸-热轧物流运输过程

Fig.5.1 Logistics Transportation Process of Continuous Casting and Hot Rolling

钢液经连铸机凝固成型后形成连铸坯，铸坯则根据热轧计划的需求，有选择的下线进入保温坑保温或者直接经轨道运输至加热炉，出炉后在热轧机上轧制成符合客户需求的成品。在整个生产过程中会涉及到多台加热炉的调度问题，由于本论文重点关注炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题，因此对加热炉调度问题进行简化。参考某钢厂实际生产情况，该钢厂使用三台步进式加热炉，从整体上可以近似认为板坯进入加热炉的顺序与进行轧制的顺序一致，基于此，本文将总体加热炉调度简化为先进先出的原则。根据以上分析，连铸-热轧阶段生产物流运输过

程可抽象成如图 5.2 所示的生产流程。

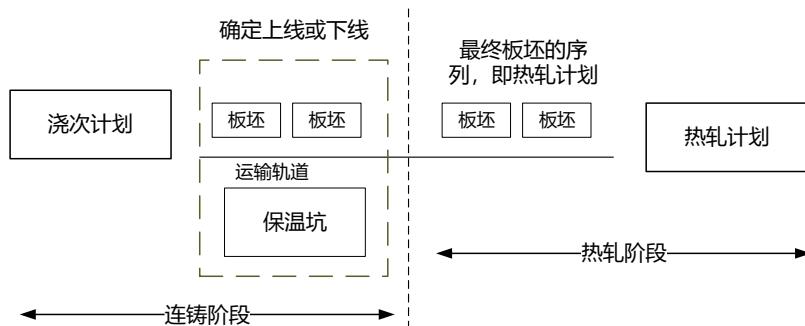


图 5.2 简化后的物流运输过程

Fig.5.2 Simplified Logistics Transportation Process

在实际钢铁生产中，组成热轧单元计划的板坯序列最终由进入热轧机轧制的板坯序列决定。经过对问题进行简化并抽象后，可以近似认为运输轨道上板坯的序列即为热轧单元计划中板坯的组成序列，其中板坯的来源由三部分组成：未下线的连铸坯，来自保温坑的连铸坯和库存中的冷坯。从连铸的角度来看，浇次计划决定了对应连铸机上板坯的出坯顺序，每块从连铸机出来的铸坯面临两种选择，一种是直接进入加热炉，出炉后进行轧制，另一种是暂时进入保温坑保温，待热轧计划需要时上线轧制。因此本质上来说，不同来源的铸坯上线或者下线等操作决定了热轧计划的序列。提高钢铁生产过程中板坯的“热装率”，即要求连铸坯尽量不下线或下线的时间较短。

基于以上分析，在建立炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题模型时，若直接对每块板坯通过决策变量来控制其上线或下线的状态，会存在大量的弊端，使得建立模型复杂并且难以综合考虑炼钢、热轧阶段的目标和约束。因此对上述流程进一步抽象成如图 5.3 所示的流程。

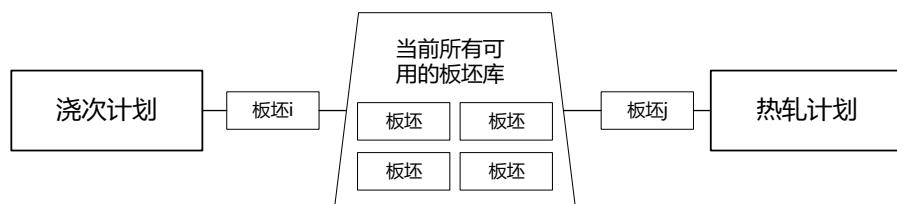


图 5.3 抽象后的生产物流运输过程

Fig.5.3 Abstract production logistics transportation process

以上流程去掉了加热炉和运输轨道（并不影响板坯的先后序列），直接通过当前可用的板坯集合作为浇次计划和热轧计划的衔接桥梁，每块板坯除固有的属性

外，增加出坯时间和热轧时间等属性。由于各生产计划之间具有不同的目标和约束，本文将一体化计划编制问题拆分为炉次计划、浇次计划和热轧计划，最后通过衔接协调模型得到衔接匹配的一体化生产计划。为了更方便的衔接匹配各生产计划，本文提出了评价热装比大小的指标：铸轧时间差，即考虑板坯的热轧时间和出坯时间之差的绝对值。铸轧时间差越小，说明出坯后的铸坯未下线直接进行轧制或经过短时间的保温坑保温后便被使用的情况越多，同时也说明板坯的温降越小，减少了热能的浪费，提高了生产物流的衔接匹配。

在第三章节和第四章中，分别建立了炼钢-连铸生产计划编制模型和热轧生产计划编制模型，本章节通过建立的衔接协调模型有效实现了各计划间的衔接匹配。

5.2 一体化计划衔接协调模型

为了便于描述，符号定义如下：

- i ：板坯编号， $i=1,2,\dots,I$ ， I 是总板坯个数；
- k ：热轧单元编号， $k=1,2,\dots,K$ ， K 是热轧单元总数；
- s ：浇次单元编号， $s=1,2,\dots,S$ ， S 是浇次单元总数；
- CCV_s ：浇次计划 s 中铸坯的平均出坯速度；
- CCT_s^B ：浇次计划 s 的开始出坯时间；
- RV_k ：热轧计划 k 的平均热轧速度；
- RT_k^B ：热轧计划 k 的开始轧制时间；
- lo_i^c ：板坯 i 在浇次计划中位置；
- lo_i^r ：板坯 i 在热轧计划中位置；
- T_i^c ：板坯 i 的出坯时间；
- T_i^r ：板坯 i 的热轧时间；

关系

对于同一浇次计划，每块板坯的出坯时间为。

$$T_i^c \approx CCT_s^B + Lo_i^c \cdot CCV_s$$

对于同一热轧计划，每块板坯理想开始轧制的时间为。

$$T_i^r \approx RT_k^B + Lo_i^r \cdot RV_k$$

同一板坯 i ，从出坯到开始轧制的时间间隔为。

$$\Delta T_i = T_i^r - T_i^c = RT_k^B + Lo_i^r \cdot RV_k - (CCT_s^B + Lo_i^c \cdot CCV_s)$$

若 $\Delta T_i \approx 0$ 表示板坯未下线，若 $\Delta T_i > 0$ 表示板坯出坯时间过早，未到板坯轧制的时间，需下线等待，即板坯需在 T_i^c 时刻下线，在 T_i^r 时刻上线进行轧制。 $\Delta T_i < 0$ 表示板坯在需要轧制的时候还未出坯，若 ΔT_i 较小，则表示热轧机只需短时间的等待即可直接轧制；若 ΔT_i 较大，则热轧机需进行大量的等待才可以进行轧制，此情况

一般可采用板坯替换的方式来减少板坯等待时间。

炼钢-连铸-热轧一体化计划中所有板坯的 $|\Delta T_i|$ 一定程度上反应了物流对象之间的衔接匹配程度，同样反应了板坯热装比率的高低。因此将 $|\Delta T_i|$ 作为优化目标来提高板坯热装比是可行的策略。

在针对炼钢-连铸计划编制问题建立的数学模型中考虑了与热轧板坯的宽度跳跃、交货期差异以及浇次数相关的优化目标，其中最小化热轧板坯宽度跳跃能有效防止轧制阶段短周期内存在大幅度跳跃规格的板坯，有利于热轧单元计划的编制；针对热轧计划编制问题建立的模型中考虑了最小化热轧板坯规格和硬度跳跃的优化目标；在衔接协调阶段，则主要通过调整不同生产计划中板坯的位置来提高生产物流的衔接匹配，由于板坯位置的调整主要影响到热轧计划阶段的优化目标，因此本文设计的一体化衔接协调模型综合考虑了最小化铸轧时间差和最小化热轧阶段的目标的变化差值。

根据本文建立的编制热轧计划的多目标模型，将目标(4.1)和目标(4.2)的优化目标分别表示为 E_1 和 E_2 ，其优化前后的差值分别表示为 ΔE_1 和 ΔE_2 。

针对以上分析，建立数学模型如下：

$$\min \sum_{i=1}^I |\Delta T_i| \quad (5.1)$$

$$\min \Delta E_1 \quad (5.2)$$

$$\min \Delta E_2 \quad (5.3)$$

s.t.

$$\text{炉次计划约束限制: 约束(3.4)~(3.6)} \quad (5.4)$$

$$\text{浇次计划约束限制: 约束(3.12)~(3.15)} \quad (5.5)$$

$$\text{热轧计划约束限制: 约束(4.3)~(4.8)} \quad (5.6)$$

$$\mu_m = \{0,1\} \quad (5.7)$$

$$\mu_{jn} = \{0,1\} \quad (5.8)$$

$$\lambda_{nn'j} = \{0,1\} \quad (5.9)$$

$$\eta_{nj} = \{0,1\} \quad (5.10)$$

$$x_{ijk} = \{0,1\} \quad (5.11)$$

$$\gamma_{ik} = \{0,1\} \quad (5.12)$$

$$\xi_{ij} = \{0,1\} \quad (5.13)$$

其中目标(5.1)表示最小化所有板坯的“铸轧时间差”；目标(5.2)和目标(5.3)分别表示最小化目标(4.1)和目标(4.2)的变化的差值；约束(5.4)~(5.6)分别表示各生产计划阶段约束限制；约束(5.7)~(5.13)表示0/1变量约束。

5.2.1 求解流程

炼钢-连铸-热轧一体化计划编制按照炉次计划、浇次计划、热轧计划的顺序进行编制。

step1：由 3.1 提出的方法获得可行的炼钢-连铸计划，根据每台连铸机的开浇时间，计算浇次计划中每块铸坯的开始出坯时间，并将其作为属性加入到板坯中。

step2：由 3.2 提出的方法可以获得可行的热轧计划，根据热轧机的开始轧制时间确定每块板坯开始轧制的时间，并将其作为属性加入到板坯中。

step3：通过目标(5.1)来综合评价一体化计划的热装比。检测当前一体化计划中使 $|\Delta T_i|$ 最大的板坯，在满足各阶段约束的条件下进行位置调整，若调整后， $|\Delta T_i|$ 大幅度降低，且目标(5.2)和目标(5.3)在可接受的范围内，则进行板坯位置的调整。若未达到终止条件，则继续执行 step3。

step4：输出满足各阶段约束的炼钢-连铸-热轧一体化计划。

5.2.2 调整策略

通过 3.1, 3.2 提出的方法分别获得了炼钢-连铸计划和热轧计划，为了进一步提高计划间板坯的热装比，本文设计的一体化生产计划的调整策略如下。

计算每块板坯的 ΔT_i 的大小，确定具有最大 $|\Delta T_i|$ 的板坯为调整对象。调整的方式包括调整板坯在浇次计划中的位置和板坯在热轧计划中的位置。首先随机确定该板坯在浇次计划中的位置，并检测该板坯是否满足该阶段的生产约束条件，否则重新随机确定浇次计划中的位置。然后以同样的方式确定板坯在热轧计划中的位置。若调整后所有的板坯的 $|\Delta T_i|$ 之和有所降低，则调整板坯在浇次计划和热轧计划中的位置。

5.3 仿真实验

为了验证模型和算法的有效性，本文设计了三种规模的实验算例，261 块板坯、552 块板坯和 650 块板坯的算例数据，见表 5.1。本算法设置迭代次数为 1000，炼钢-连铸-热轧一体化协调优化算例运算结果如表 5.2 所示，算例结果中表示了生产计划优化前和生产计划优化后的目标值的变化情况，从图中看出优化后目标宽度跳跃和硬度跳跃优化目标出现少量的变差，但其带来的“铸轧时间差”的收益是巨大的。因此通过本文设计的一体化衔接协调算法，可以使目标宽度跳跃和硬度跳跃值变差可接受的范围内大幅度降低“铸轧时间差”证明了算法的优化性。同时也表明，独立编制炉次计划、浇次计划和热轧计划虽然能够获得较优的目标值，但由于计划间没有信息交流导致连铸阶段和热轧阶段的生产物流无法稳定持续运行，因此研究连铸-热轧阶段的衔接匹配具有重要的意义。

表 5.1 板坯信息

Table 5.1 Slab information

算例	钢种	板坯数/个	宽度/mm	厚度/mm	硬度等级	交货期/天
算例 1	A	175	1100~1170	2.27~5.21	1	4~10
	B	87	1103~1171	2.71~3.69	2	4~10
算例 2	B	178	1312~1366	1.1~3.9	2	1~8
	C	374	1310~1364	1.1~3.9	3	1~8
算例 3	A	224	1204~1280	2.3~5.2	1	10~15
	B	426	1210~1294	1.29~3.94	2	10~15

表 5.2 一体化计划协调优化算例

Table 5.2 An example of coordinated optimization for integrated planning

算例	$\Delta E_1 / E_1$	$\Delta E_2 / E_2$	$(\Delta T_{未协调} - \Delta T_{协调}) / \Delta T_{未协调}$
算例 1 (260)	4.9%	8.9%	92.04%
算例 2 (552)	3.1%	2.5%	85.89%
算例 3 (650)	4.3%	9.5%	90.5%

5.4 本章小结

炼钢-连铸-热轧一体化计划编制是钢铁企业中重要的问题，本章在综合考虑各阶段工艺约束、生产目标以及工序间物流衔接关系建立了考虑铸轧衔接协调的一体化生产计划模型并设计邻域搜索算法进行求解。仿真实验结果表明本章提出的算法能有效提高板坯的热装比。

6 结论与展望

6.1 主要结论

炼钢-连铸-热轧作为钢铁企业的主要工序，生产过程中涉及生产物流的供需平衡和时间的衔接匹配，是离散与连续作业方式相混合的复杂过程。由于一体化生产计划编制问题是一个多目标、多约束的 NP 难问题，使得传统的作业计划编制算法显得力不从心。本文所做的研究工作以及取得结论如下：

① 将炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题分解为炼钢-连铸计划编制、热轧计划编制以及计划间的衔接协同子问题，即充分考虑了各阶段计划的工艺约束和生产目标，同时又兼顾了连铸-热轧阶段生产物流的衔接匹配。通过计划间的分解和协调有效降低了一体化计划编制问题的复杂性和求解难度，有利于提高一体化计划编制的灵活性和优化性。

② 根据炼钢阶段和连铸阶段的生产计划编制之间的紧密关系，将炉次计划和浇次计划编制问题归为多旅行商问题并建立数学模型，设计了多目标蚁群算法求解得到了多个非支配的炼钢-连铸生产计划。通过不同规模的算例证明了模型和算法的有效性

③ 针对热轧计划编制问题，建立了考虑热轧板坯厚度、硬度跳跃惩罚的多目标车辆路径优化模型，设计了基于 NSGA-II 的改进的多目标遗传算法进行求解。采用二维矩阵编码的染色体结构，在交叉、变异算子中加入冲突消解机制有效促进可行解的产生，并在选择算子中引入精英策略提高解的收敛速率。在求解热轧批量计划编制问题时，提出了解的优化调整策略：单热轧单元计划调整和不同热轧单元计划间调整来进一步提高解的质量。仿真实验证了模型和算法的有效性。

④ 为了将炼钢-连铸-热轧各阶段制定的生产计划有机的衔接起来，建立了以提高热装比为目标的铸轧衔接协调模型，在分析连铸、热轧阶段多种衔接方式物流供需平衡的基础上，提出了“铸轧时间差”参数的概念，该参数的引入降低了建立铸轧衔接协调模型的复杂性和求解难度。

6.2 后续工作的研究展望

本文以钢铁实际生产为背景，研究炼钢-连铸-热轧一体化计划编制问题。并结合某钢厂的生产数据进行了验证性实验，虽表现出较好的优化性能，但仍有存在不足的地方，有待于进一步的研究和完善。

① 研究求解算法中各个参数的设置问题。各个参数互相关联、互相影响，参

数设置的不合理会影响到问题的求解和优化。本文采用试参数的方式所确定的参数具有一定的随机性，无法确定得到的参数组合与最优参数组合之间的差距大小。

② 为了更方便的研究一体化生产计划编制问题，对加热炉调度进行了一定程度的简化，无法真实还原钢铁生产实际运行状况，接下来将对加热炉调度进行研究，并加入到一体化计划编制中。

参考文献

- [1] 何腊梅, 郑忠, 高小强. 基于时间倒推和流程仿真炼钢生产计划的制定[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(9): 60-63.
- [2] 於春月. 钢铁一体化生产计划与调度优化问题研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [3] 唐立新, 杨自厚. 炼钢—连铸生产的计划与调度结构[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1996, 17(6): 664-667.
- [4] Webster S T. The Complexity of Scheduling Job Families about a Common Due Date[J]. Operations Research Letters, 1997, 20(2): 65-74.
- [5] Volna E. Genetic Algorithms for the Vehicle Routing Problem[C]. International Conference of Numerical Analysis & Applied Mathematics, 2016.
- [6] Laguna M, Barnes J W, Glover F. Intelligent Scheduling with Tabu Search: an Application to Jobs With Linear Delay Penalties and Sequence-Dependent Setup Costs and Times[J]. Applied Intelligence, 1993, 3(2): 159-172.
- [7] Laguna M, Barnes J W, Glover F W. Tabu Search Methods for a Single Machine Scheduling Problem[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1991, 2(2): 63-73.
- [8] Lopez L, Carter M W, Gendreau M. The Hot Strip Mill Production Scheduling Problem: a Tabu Search Approach[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 106(2-3): 317-335.
- [9] 贾树晋. Pareto最大最小蚂蚁算法及其在热轧批量计划优化中的应用[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 4-11.
- [10] 郭倩倩. 蚁群算法的改进及其在车辆路径问题中的应用[D]. 四川: 西南交通大学, 2007.
- [11] 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[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 273-277.
- [12] 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.
- [13] 陈雄, 徐心和. 基于模拟退火轧制批量计划问题的两阶段算法[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(2): 209-212.
- [14] 张涛, 王梦光, 杨建夏. 不确定计划数的轧制批量计划的模型和算法[J]. 系统工程学报, 2000, 15(1): 54-60.
- [15] 高知新, 李铁克, 李俊芳. 热轧批量计划的模型与算法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29(1): 139-142.
- [16] 彭志刚, 吴广宇, 杨艳丽, 等. 一机两流的连铸生产计划模型与算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2000, 21(3): 244-246.

- [17] Tang L, Huang L. Optimal and Near-Optimal Algorithms to Rolling Batch Scheduling for Seamless Steel Tube Production[J]. International Journal of Production Economics, 2007, 105(2): 357-371.
- [18] As'Ad R, Demirli K. A Bilinear Programming Model and a Modified Branch-and-Bound Algorithm for Production Planning in Steel Rolling Mills with Substitutable Demand[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(12): 3731-3749.
- [19] 孙玲, 李铁克. 炼钢-连铸-热轧批量计划的约束满足算法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(5): 940-944.
- [20] 张文学, 李铁克. 基于粒子群和约束满足的钢轧一体化批量计划优化[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 840-846.
- [21] 张文学, 李铁克. 基于动态约束满足的连铸热轧一体化滚动计划[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2177-2184.
- [22] Tang L, Luh P B, Liu J, et al. Steel-Making Process Scheduling Using Lagrangian Relaxation[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(1): 55-70.
- [23] 李霄峰, 徐立云, 邵惠鹤, 等. 基于Petri网/COM的物流系统建模仿真技术[J]. 信息与控制, 2001(03): 284-288.
- [24] 郑忠, 何腊梅, 高小强. 炼钢生产物流系统仿真的细胞自动机模型[J]. 钢铁, 2004(11): 75-78.
- [25] 郑忠, 何腊梅, 高小强. 基于细胞自动机的流程仿真方法在炼钢生产中的应用[C]. 北京: 2005中国钢铁年会, 2005: 718-723.
- [26] Cowling P I, Ouelhadj D, Petrovic S. A Multi-Agent Architecture for Dynamic Scheduling Of Steel Hot Rolling[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2003, 14(5): 457-470.
- [27] 赵珺, 战洪仁, 王晓琳, 等. 基于多智能体的连铸-热轧一体化生产调度模型[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(7): 1540-1543.
- [28] 黄可为, 汪定伟. 热轧计划中的多旅行商问题及其计算方法[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(7): 43-45.
- [29] 吕志民, 刘文仲, 徐金梧, 等. 热送热装生产计划优化方法研究[J]. 钢铁, 2001, 36(9): 71-74.
- [30] Tang L, Liu J, Rong A, et al. A Multiple Traveling Salesman Problem Model for Hot Rolling Scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex[J]. 2000, 124(2): 267-282.
- [31] 陈波. 基于免疫遗传算法的炼钢最优炉次计划研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(09): 30-37.
- [32] 唐立新. 热轧带钢轧制批量计划的实例应用[J]. 东北大学学报, 1999(03): 45-48.
- [33] Liu S. Model and Algorithm for Hot Rolling Batch Planning in Steel Plants[J]. International

- Journal of Information & Management Sciences, 2010, 21(3): 247-263.
- [34] 贾树晋, 李维刚, 斌杜. 热轧轧制计划的多目标优化模型及算法[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(1): 16-22.
- [35] 孙福权, 郑秉霖, 崔建江, 等. 炼钢-热轧一体化管理的生产计划编制问题研究[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 409-413.
- [36] 彭杰. 基于改进遗传算法炼钢—连铸生产作业计划编制的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [37] 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(5): 554-558.
- [38] 唐立新, 杨自厚. 炼钢—连铸最优炉次计划模型与算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1996(4): 440-445.
- [39] Xue Y, Yang Q, Zhao H. Optimum Steelmaking Charge Plan with Unknown Charge Number Based on The Pseudo TSP Model[C]. San Diego: IEEE Conference On Decision & Control, 2006: 1978-1983
- [40] Wei J, Xue Y, Jiao H. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimum Charge Plan for Steelmaking-Continuous Casting Production Scheduling[C]. Hammamet: IEEE International Conference on Industrial Technology, 2005: 1173-1176
- [41] 彭频, 李铁克. 基于准时制的炼钢连铸组炉问题模型和算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(31): 222-224.
- [42] 董红宇, 黄敏, 王兴伟, 等. 一体化炼钢炉次计划模型与算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4801-4805.
- [43] 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(02): 348-352.
- [44] Yi J, Jia S, Du B, et al. Multi-Objective Model and Optimization Algorithm Based on Column Generation for Continuous Casting Production Planning[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(3): 242-250.
- [45] 宁树实, 王伟, 潘学军. 一种炼钢-连铸生产计划一体化编制方法[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 374-379.
- [46] Pan C, Yang G K. A Method of Solving a Large-Scale Rolling Batch Scheduling Problem in Steel Production Using a Variant of Column Generation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 165-178.
- [47] 董广静, 李铁克, 王柏琳. 考虑实时库存的轧制计划调整模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(5): 1246-1255.
- [48] Tu N, Luo X, Chai T. Two-stage Method for Solving Large-scale Hot Rolling Planning Problem in Steel Production[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 12120-12125.

- [49] Zhang B, Pan Q, Gao L, et al. A Hybrid Variable Neighborhood Search Algorithm for the Hot Rolling Batch Scheduling Problem in Compact Strip Production[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 116: 22-36.
- [50] 唐立新, 杨自厚, 沈宏宇, 等. 炼钢-连铸-热轧集成批量计划因素分析[J]. 钢铁, 2000, 35(5): 74-76.
- [51] 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(6): 1296-1303.
- [52] 张彩霞, 石亦平, 贺城红, 等. 冶铸轧一体化生产调度方法的探讨[J]. 钢铁, 2000, 35(2): 74-77.
- [53] 刘怡, 郑忠, 陈开, 等. 炼钢连铸热轧一体化批量计划编制模型及实现[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(3): 60-66.
- [54] 朱宝琳, 于海斌, 黄小原, 等. 炼钢-热轧一体化计划问题研究[J]. 信息与控制, 2006, 35(4): 537-540.
- [55] Knoop P., DeFeyter M., Nerom L. V. 热装热送计划问题的解决方案[J]. 钢铁, 2006, 41(1): 58-61.
- [56] Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies:in: F.J. Varela and P. Bourgine (Eds.), Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life, 1991[C].
- [57] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 447
- [58] Yang J, Shi X, Marchese M, et al. An Ant Colony Optimization Method for Generalized TSP Problem[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(11): 1417-1422.
- [59] Zhan W D, Yong J Y, Yong X S, et al. An Improved Ant Colony Optimization Algorithm for Solving the TSP Problem[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 26-28: 5.
- [60] Wei L, Dong L, Feng X. An Improved Ant Colony Optimization and Its Application on TSP Problem[C]. Chengdu: IEEE International Conference on Internet of Things, 2016: 136-141.
- [61] Chen C D, Chen H P, Zhu Q, et al. Ant Colony Optimization Algorithm for Batch Scheduling Problem of Two-stage Flow Shop[J]. Computer Engineering, 2012, 38(19): 137-141
- [62] Yagmahan B, Yenisey M M. Ant Colony Optimization for Multi-Objective Flow Shop Scheduling Problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(3): 411-420.
- [63] 黄亚平, 熊婧. 基于改进蚁群算法作业车间调度问题仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(8): 278-282.
- [64] Yu S P, Li Y P. An Improved Ant Colony Optimization for VRP with Time Windows[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 263-266: 1609-1613.
- [65] Hu M J, Wang J P, Li X M. Solutions to VRP in Home Delivery Based on Ant Colony

- Optimization Algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2011, 159(159): 100-104.
- [66] Iredi S, Merkle D, Middendorf M. Bi-Criterion Optimization with Multi Colony Ant Algorithms[C]. Springer, Berlin, Heidelberg: International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization, 2001: 359-372.
- [67] Dantzig G B, Ramser J H. The Truck Dispatching Problem[J]. Management Science, 1959, 6(1): 80-91.
- [68] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial System[M]. 1992: 218.
- [69] Mohammed M A, Gani M K A, Hamed R I, et al. Solving Vehicle Routing Problem by Using Improved Genetic Algorithm for Optimal Solution[J]. Journal of Computational Science, 2017, 21: 255-262.
- [70] 周屹, 李海龙, 王锐. 遗传算法求解物流配送中带时间窗的VRP问题[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2008, 46(2): 300-303.
- [71] 陆文, 郭延涛, 李文杰. 基于改进遗传算法的车间调度问题求解[J]. 现代制造工程, 2010(10): 35-37.
- [72] 吴云高. 基于遗传算法的车间调度方法及其应用[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2002.
- [73] 王辉. 遗传算法在人工智能领域中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2008, 3(27): 182-184.
- [74] 林磊, 王晓龙, 刘家锋. 基于遗传算法的手写体汉字识别系统优化方法的研究[J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(6): 658-661.
- [75] 巨永峰, 蔺广逢, 蔡占华. 基于遗传算法的图像识别方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 98-101.
- [76] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. EEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 2(6): 182-197.

附录

A. 作者在攻读学位期间参与的科研项目：

- [1] 国家自然科学基金面上项目 (No. 51474044): 炼钢厂生产实时调度的动态网络建模及调度策略优化方法。
- [2] 校企合作项目 (No.H20190256): “自动组板算法模型”。

B. 作者在攻读学位期间取得的科研成果目录

- [1] 蒋胜龙,卢义,王永周,郑忠. 一种基于图模型的不确定炼钢-连铸柔性优化调度方法及系统 [P]. 重庆: CN108376315A,2018-08-07. (已授权)
- [2] 蒋胜龙,王永周,卢义,郑忠,黄世鹏. 一种炼钢连铸过程的多目标柔性调度方法[P].重庆: CN108303958A,2018-07-20. (已授权)

C. 学位论文数据集

关键词		密级	中图分类号
一体化计划; 热装比; 多目标; 衔接协调		公开	TF
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类别	学位级别
重庆大学	10611	学术学位	硕士
论文题名	并列题名	论文语种	
炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制方法研究		中文	
作者姓名	卢义	学号	20160902041t
培养单位名称		培养单位代码	
重庆大学		10611	
学科专业	研究方向	学制	学位授予年
工程	冶金信息与系统工程	3	2019
论文提交日期	2019-06	论文总页数	84
导师姓名	郑忠	职称	教授
答辩委员会主席		陈登福 教授	
电子版论文提交格式			
文本 <input checked="" type="checkbox"/> 图像 <input type="checkbox"/> 视频 <input type="checkbox"/> 音频 <input type="checkbox"/> 多媒体 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			

致 谢

时间飞逝，转眼间已在重庆大学度过了七年光阴，回想起这几年的研究工作和学习经历，虽然非常艰辛，但也收获颇丰。有太多的事值得回忆，有太多的人需要感谢。

首先，衷心感谢郑忠教授在我研究生期间给予的关心和指导。郑老师严谨治学、认真负责的态度以及渊博的学识让我由衷的钦佩。无论学习上还是生活上，郑老师都给与无微不至的帮助，不仅教会我们做科研的方法和知识，还时常教育我们做人的道理，使我受益匪浅。郑老师谢谢您的指导和教诲。最后衷心的祝福我的恩师身体健康、幸福快乐。

感谢课题组的蒋胜龙老师，在论文写作以及科研方法上给我提供了很大的帮助，使我受益匪浅。

同时还要感谢给予我帮助和建议的龙建宇、陈红生、呼万哲、黄世鹏、徐兆俊、张开、冯玲、连小圆、孙苏皖、李盼、游潇、姜怀、田茂洪、范计鹏、李杰、何徐、黄宏继、王永周、贺坤、林宏宇、舒永朋、李东方、沈薪月、王蕾、郝卫平、莫燕婷。感谢你们在我学习和生活上的指点和帮助，让我更快的进步和成长。

感谢我的家人和亲朋好友在我求学过程中给予的支持和理解，是你们的爱让我有动力克服成长道路上的一切困难，谢谢你们。感谢我的父母这些年来对我的养育之恩，祝二老身体健康，每天都能开开心心的。感谢我的老婆刘艳歌，谢谢你的支持和鼓励。

感谢国家自然科学基金面上项目“炼钢厂生产实时调度的动态网络建模及调度策略优化方法（No.51474044）”的支持。

最后衷心地感谢在百忙之中参加评阅和答辩的各位专家、教授！

卢义

二〇一九年四月 于重庆