

面向热轧的一体化生产计划方法研究



重庆大学硕士学位论文

学生姓名：许文林

指导教师：郑忠教授

专业：材料科学与工程

学科门类：工学

重庆大学材料科学与工程学院
二〇〇九年四月

Study on Planning Methods of Integrated Production Based on Hot-rolling



A Thesis Submitted to Chongqing University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering
By
Xu Wenlin

Supervised by Prof. Zheng Zhong
Major: Material Science and Engineering

College of Material Science and Engineering of Chongqing
University , Chongqing, China
April 2009

摘要

热轧是钢铁企业三大关键工序炼钢、连铸、热轧之一。随着过程工艺生产规模的大型化、激烈的市场竞争及市场需求的多样化，目前企业面临多品种、小批量、高质量的大量订货形势，钢铁企业普遍采用以销定产的生产组织模式，生产计划的编制也相应的基于准时制的思想，按照热轧→连铸→炼钢的顺序来进行编制。在上述生产计划编制模式下，热轧作为钢铁流程生产面向市场的最后一道关键工序，其生产计划编制的好坏不仅关系到热轧厂生产的顺利实施还影响到整个钢铁生产运行的功效。热轧带钢是最重要的钢铁产品，其产量占整个钢铁产品的一半以上，它是衡量一个国家钢铁业发展水平的一个重要因素。因此，文中对热轧带钢生产计划的编制展开研究。

热轧带钢生产计划问题是一个多目标，多约束的复杂组合优化问题。已有的研究大多以生产合同为对象，采用单个模型来进行热轧带钢生产计划的编制。模型需考虑的约束众多，复杂度高。为了降低问题的复杂性，文中将热轧带钢生产计划编制问题拆分为热轧带钢生产日计划编制和热轧带钢轧制批量计划编制两个问题来解决。首先，以生产合同为对象，建立基于准时制的以提前/拖期交货的惩罚值最小为目标，机组产能等为约束的数学规划模型，采用该模型及求解模型的遗传蚁群算法来确定各个合同的投产日期，进而确定热轧生产日计划。遗传蚁群算法中利用蚁群算法的自组织进化功能改进了遗传算法对演化过程信息利用不足的弱点；然后，以热轧生产日计划为对象，由轧制批量计划模型配合一种改进蚁群算法编制出热轧带钢轧制批量计划。该模型以满足机组产能，轧制规程等为约束，以减少由于违反轧制规程而产生的惩罚及提高轧辊的利用率为目。用于模型求解的改进蚁群算法从路径选择策略和信息素更新等方面对基本蚁群算法进行改进。

在上述研究的基础上采用 Microsoft Visual C# 2005 编程语言和 SQL Server 2000 数据库管理软件开发了基于模型的热轧带钢生产计划优化系统，通过对国内某钢铁集团热轧板厂一个月的生产数据的仿真实验表明，该优化系统可以提高热轧带钢生产的效率，降低生产成本，验证了模型和算法的正确性和有效性。

关键词：热轧带钢；生产计划；遗传算法；蚁群算法；优化系统

ABSTRACT

Steel-making, Continuous Casting, Hot Rolling are the three important working procedures in Steel Manufacturing Enterprise. With the large-scale of production technology, fierce market competition and diverse of market demand, enterprises faces large order situations of multi-species, low-volume and high-quality currently, and iron and steel enterprises follows the organization pattern of produce according to sales, production plan is also made in the order of hot rolling-continuous casting-steelmaking based on Just In Time. Hot rolling is regarded as the last key process of iron and steel production, the quantity of production plan not only relates to smooth process of hot rolling but also affects the running results of iron and steel production processes, Under this mode of production planning. Hot rolled strip is the most important products of iron and steel enterprises, its yield is more than half of all steel products, and it is an important factor for measure a country's level of development of the iron and steel industry. So the production planning of hot rolled strip is researched.

The production planning of hot rolled strip is a complex combinatorial optimization problem of multi-objective and multi-constraint. The informed research focus on production contract and use a single model to make hot rolled strip production plan. Lots of constraints should be considered so that the model is too complex. In order to reduce the complexity of the model, hot rolled strip production planning will be broken down into two sub-problems---hot rolled strip daily production planning and hot rolled strip production lot planning. Firstly, determine delivery time of production contracts using the model and a hybrid optimization algorithm of genetic algorithm and ant colony optimization algorithm for daily production planning, and then draw up daily production plan. this model's target is minimizing the punishment value of earliness/tardiness delivery and is restrained by unit capacities etc, at the same time, the hybrid optimization algorithm of genetic algorithm and ant colony optimization algorithms is used to solve this model, the self-organizing evolutionary function of ant colony optimization algorithm is used to improve the weaknesses that GA under-utilized the information on the evolution process. Secondly, work out hot rolled strip lot production plan using the model and an improved ant colony algorithm for lot production planning. This model is restrained by unit capacity and rolling regulars etc, and target is minimizing the penalties of broken rolling rules and improve the utilization

of rollers.

On the basis of above-mentioned studies, a model-based production planning optimization system for hot strip rolling have been developed using Microsoft Visual C # 2005 programming language and SQL Server 2000 database management software. The simulation result, which is based on real production data of hot strip plant in one large domestic iron and steel enterprise within a month, shows this system can improve production efficiency and reduce production costs for iron and steel enterprise, and the correctness and validity are proved.

Key Words: hot-rolled strip; production planning; genetic algorithm; ant colony algorithm; optimization system

目 录

摘要	I
ABSTRACT.....	II
1 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 课题目的及意义	2
1.2 一体化生产工艺及生产计划编制	3
1.2.1 钢铁产品一体化生产工艺流程	3
1.2.2 炼钢—连铸—热轧一体化计划编制流程	4
1.3 热轧带钢生产工艺及生产计划研究现状	5
1.3.1 热轧带钢生产工艺	5
1.3.2 热轧和连铸工序间的衔接方式	7
1.3.3 热轧带钢生产计划研究现状	8
1.4 本文的主要内容及组织	13
2 热轧带钢生产计划编制	15
2.1 热轧带钢生产计划编制问题分析	15
2.2 热轧带钢生产计划编制问题拆分	18
2.3 热轧带钢生产计划编制流程	18
3 热轧带钢生产日计划优化模型及算法	20
3.1 热轧带钢生产日计划模型建立	20
3.1.1 准时生产制简介	20
3.1.2 问题描述	20
3.1.3 热轧带钢生产日计划模型	20
3.2 遗传算法	22
3.2.1 遗传算法简介	22
3.2.2 遗传算法的发展	23
3.2.3 遗传算法的优缺点	23
3.3 求解模型的遗传蚁群混合优化算法	24
3.3.1 算法结合原理	25
3.3.2 算法流程	25
3.4 计算实例及结果	29
4 热轧带钢轧制批量计划模型及算法	32
4.1 热轧带钢生产计划问题分析	32
4.1.1 热轧计划的编制依据	32
4.1.2 轧制单元计划的工艺约束	33
4.2 热轧带钢轧制批量计划模型	34

4.2.1 符号约定	34
4.2.2 优化目标函数	35
4.2.3 约束条件	35
4.3 蚁群算法	36
4.3.1 基本蚁群算法模型	36
4.3.2 基本蚁群算法的实现	38
4.3.3 蚁群算法的优缺点	39
4.4 求解热轧带钢轧制计划模型的改进蚁群优化算法	40
4.4.1 算法改进策略	40
4.4.2 算法流程	42
4.5 计算实例及结果	43
5 热轧带钢生产计划优化系统设计与实现	47
5.1 系统概况	47
5.1.1 系统支持环境	47
5.1.2 系统开发技术	48
5.1.3 系统结构	48
5.2 软件系统功能设计	49
5.2.1 软件功能结构	49
5.2.2 软件功能描述	50
5.3 数据库设计	51
5.3.1 数据库选择	51
5.3.2 数据库设计	51
5.4 系统运行界面	52
5.5 系统运行效果	56
6 结论与展望	57
6.1 主要结论	57
6.2 后续研究工作的展望	57
致 谢	59
参考文献	60
附 录	64
A 攻读硕士学位期间发表学术论文情况	64

1 绪论

钢铁工业长期以来一直是各个工业化国家的主要产业。它对交通运输、采矿、建筑、汽车、船舶、金属制品等行业都有巨大的影响。虽然现在以传统原材料为基础的状况已经发生了改变，但是钢铁仍然是我国基本建设的结构材料和产量最大的功能材料。钢铁工业依然是工业化国家最重要的产业部门之一。

钢铁生产流程包括了炼钢、连铸、热轧三大主要工序，其过程是多阶段、半连续的，这三个工序间呈现顺序加工关系，其前后工序紧密衔接，存在物质和能量的转换和传递。因此，钢铁企业必须强调生产过程的整体性，以整体流程的全局优化为目标，达到整个生产过程的集成，实现整体优化。

进入 21 世纪，钢铁市场的竞争更加激烈。随着国内许多产业如汽车、石油、造船、航天等部门的迅速发展，各部門对钢材质量提出了更高的要求，有些品种我国还不能生产，只能依靠进口。同时我国出口钢材数量逐年增加，产品质量、价格都面临国内国际两个市场的激烈竞争。因此，采用先进的管理理念，利用信息化、自动化技术改造传统的钢铁企业，是使得企业在当今日益激烈的竞争中立于不败之地的发展方向。现代化钢铁企业的发展趋势是设备的大型化，生产过程的连续化、高速化和自动化，面对当前市场需求的多品种、小批量、高质量和面向用户，钢铁企业面临日益严峻的考验。为了节能降耗，从 80 年代起，国内外大型钢铁企业就致力于开发炼钢—连铸—热轧一体化生产，炼钢—连铸—热轧生产计划和调度也成为了钢铁企业迫切需要解决的问题。

1.1 课题研究背景

1.1.1 研究背景

钢铁产品的生产要经过炼钢—连铸—热轧这三大关键工序，不仅存在物流平衡和资源平衡问题，同时在高温作用环境下，也存在能量平衡和时间平衡问题。整个生产是一个相当复杂的过程，在钢铁产品的生产过程中，钢铁企业的利润直接与生产产品的效率有关。现代钢铁企业的生产大都是以销定产，企业首先要根据用户的订货合同和对市场需求的预测确定要生产的产品，并根据这些结果编制生产计划，在生产实施过程中，根据企业内外部的反馈信息需要不断的调整生产计划，并指导生产。计划—生产—反馈—调整的过程贯穿于企业生产活动的始终。因此，编制计划是企业生产管理的一项重要工作，计划编制的好坏直接影响到企业的资源是否得到合理的配置，产品是否适应市场需求，企业能否获得最大利润。高质量的计划是管理现代化的需要，更是企业持续发展的前提。在当前钢铁企业

面临多品种、小批量、高质量及交货周期短的订货形势下，钢铁企业要提高企业的生产效益，增强企业的竞争力，就必须具有现代化的生产管理系统，必须做出高质量的生产计划与调度。

在上述背景下，以“面向热轧的一体化生产计划方法研究”为题开展相关研究。该研究工作是“863”计划项目“面向钢铁生产物流动态网络的并行仿真与优化技术研究（No.2007AA04Z161）”以及重庆大学与攀钢的厂校合作项目“炼钢生产计算机辅助计划调度系统开发与应用研究”的主要研究内容之一。

1.1.2 课题目的及意义

本课题在对钢铁企业热轧生产工艺及计划编制方法深入研究的基础上将热轧带钢生产计划编制拆分为热轧带钢生产日计划编制和轧制批量计划编制两个部分，分别建立相应的计划模型，并设计了模型求解算法，从而寻求一种有效的解决热轧计划编制的方法。使得钢铁企业生产物流连续、高效运作，有效发挥热送热装和直轧工艺的作用，最终达到降低成本，提高产品质量，缩短产品交货周期的目的。

生产计划是企业为实现一个生产目标所进行的一系列的预测和决策活动，主要任务是在一定的时间内，进行可用资源分配和安排加工任务顺序，以满足某个或某些特定的生产指标。实际生产中，在进行资源分配和任务工序安排时，往往存在着各种约束限制，从而给生产计划的制定带来了一定的难度^[1]，该问题是钢铁生产管理的核心。

热轧生产计划问题是国际钢铁及学术界关注的问题，也是最困难的约束组合优化问题和典型的 NP 难题，其特点是没有一个有效的算法能在多项式时间内求出其最优解^[2]。探索实用和有效的算法，仍是国际上众所关注的热点研究课题。由于许多批量计划的求解问题都能表示成离散最优化问题。这些问题尤其是其中的 NP 完备问题本身所固有的计算复杂性，求其精确解的计算量往往随着问题规模呈指数增长，因此精确算法只能求解小规模的问题，专用启发式算法只能求解特定的生产批量问题^[3]。近年来，研究生产计划问题的方法主要有最优化方法^[4]、神经网络^[5]、遗传算法^[6]、智能搜索算法^[7-9]等。在该领域人工智能方法及其混合算法表现出蓬勃的生命力。综上所述，在热轧生产计划领域研究新的、更全面的、接近实际的建模方法以及加强模型求解算法的研究对于提升该领域的学术水平具有重要的意义。

钢铁产品的生产是一个相当复杂的过程，在整个生产过程中，钢铁企业的利润直接与生产产品的效率有关^[10]。而钢铁生产中批量计划问题在实际生产中也是产生重大经济效益的问题之一。合理的、符合企业实际生产状况的热轧计划可以使钢铁企业做到以下几点：

- ① 按合同组织生产，避免不必要的涨库，追求企业营销和生产的最大能力；
- ② 提高企业按期交货的能力，增加用户满意度；
- ③ 提高实际生产效率、提高成材率、提高产品质量、降低成本、增加企业效益和市场竞争力；
- ④ 企业的资源得到合理配置，产品适应市场需求，企业获得最大利润。

综上所述，编制生产计划是企业管理的一项重要工作，计划编制的好坏直接影响企业的资源能否得到合理配置，产品是否适应市场需求，企业能否获得最大利润。一个高效的热轧计划不但可以解决热轧生产中遇到的种种难题，为后续加工提供及时的、优质的原材料，而且可以对连铸、炼钢计划的编制起到有效的指导作用，使得一体化生产的实施成为可能。因此，对钢铁企业热轧生产计划编制问题进行更加深入的研究有着重要的现实意义。

1.2 一体化生产工艺及生产计划编制

1.2.1 钢铁产品一体化生产工艺流程

钢铁企业冶金过程是一个离散和连续混合的生产过程，产线长、工序多、物流复杂，典型的钢铁企业一般包括原料处理、炼铁、炼钢、连铸、热轧、冷轧等生产工序，其流程如图 1.1 所示。

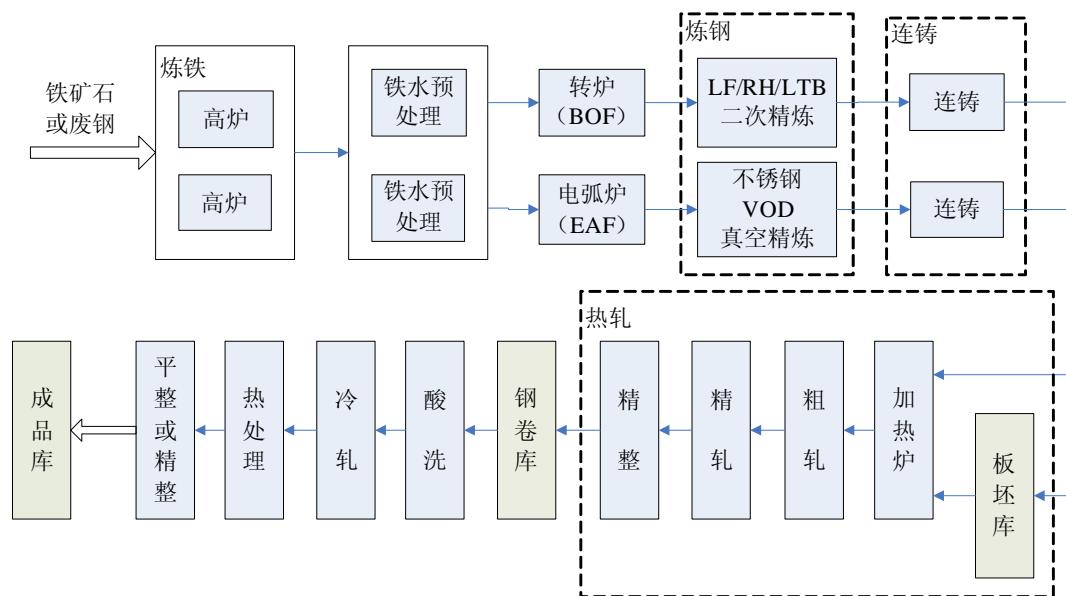


图 1.1 炼钢—连铸—热轧一体化生产流程图

Fig. 1.1 The flow chart of Steelmaking-Continuous Casting-Hot Rolling integrated production

钢铁生产是以铁矿石或废钢铁为原料的，先通过高炉冶炼成高温铁水，进而由转炉或电炉冶炼成高温液态钢水，经过精炼后运送到连铸机。钢水经过连铸后形

成固态板坯，送入热轧厂生产，根据不同的工艺要求和生产计划的安排，直接进行加热、轧制，或存入板坯库在需要时出库加热后轧制，轧制完成后进行精整形形成钢卷。钢卷一般来说还不能直接作为产品进行应用，还需要经过冷轧厂的生产，根据不同的订货合同进行酸洗、冷轧、退火等工序生产出各种产品作为钢铁生产的成品向市场销售。

在钢铁生产流程中，炼钢、连铸、热轧是不可缺少的三大工序，对整个钢铁生产流程起着至关重要的作用，炼钢—连铸—热轧一体化生产管理也是整个钢铁企业生产管理的重要内容。采用一体化生产管理，有利于提高板坯装炉温度，降低能耗和成本，有利于产品质量的稳定与提高，可以显著增强企业的应变能力和竞争能力，缩短生产周期，给企业带来可观的经济效益。

1.2.2 炼钢—连铸—热轧一体化计划编制流程

炼钢—连铸—热轧一体化生产计划编制的模型体系是一个分层分块多个模型共存的一个复杂系统，通过多个模块、多个模型互相协作来完成一体化生产计划的编制，各模块之间通过数据接口互相约束。在编制生产计划时，首先通过预计划编制形成初步生产计划，根据这个结果考虑三大工序的实际情况综合平衡之后，对初步生产计划进行调整作为最终的生产作业计划，按其组织现场生产。其编制流程如下：

① 钢铁企业按月生产按月接受用户合同，在接收到用户的订货合同后，进行质量设计和工艺设计，并按照交货期等对进行用户合同归并形成生产合同，因此，一体化生产计划系统的初始数据就是月生产合同。

② 在接收到月生产合同数据后，一体化生产计划系统采用倒推方法，由炼钢、连铸、热轧三个工序的准时制生产日计划模型依次从热轧→连铸→炼钢倒推，初步确定各个生产合同的投产日期。

③ 生产日计划编制模块根据各个生产合同的投产日期，结合整个一体化生产的情况和在线生产情况，分别编制出炼钢生产日计划、连铸生产日计划和热轧生产日计划，此日计划分别为大于各工序生产能力一定范围的炼钢生产日计划、连铸生产日计划和热轧生产日计划，这样以方便各工序计划系统做优化调整。

④ 在生产日计划编制模块下发各工序的生产日计划后，由现场计划人员结合热轧生产线的实际情况，通过人机交互界面对热轧生产日计划进行调整，根据此热轧生产日计划由轧制批量计划优化模型编制出相应的轧制批量计划，同时传送到炼钢计划和连铸计划部分为炉次计划和浇次计划的制定提供指导。

⑤ 连铸计划模块根据连铸工序的初步的生产日计划，同时考虑炼钢约束和热轧计划，确定实际的连铸生产日计划并由浇次计划优化模型制定出相应的浇次计划。

⑥ 炼钢计划模块根据炼钢工序初步的生产日计划结合热轧计划、浇次计划的信息和炼钢设备的生产情况，最终确定炼钢生产日计划并制定出相应的炉次计划。

⑦ 板坯库计划模块对连铸的出坯计划进行处理，将其中的板坯分别进行处理，可以直接热装生产的板坯编入热装计划，不能热装的板坯由板坯入库优化模型编制板坯入库计划。同时，板坯库计划部分针对热轧的板坯需求，由板坯出库优化模型和板坯最优倒垛模型联合制定板坯的出库计划来供应热轧生产。

⑧ 一体化生产计划系统根据编制出的炉次计划、浇次计划、轧制计划和板坯库的入库计划、出库计划，分别确定相应的炉次作业计划、浇次作业计划和轧制作业计划。

⑨ 返回③进行日计划滚动，作为编制下一日的一体化生产计划的依据。

1.3 热轧带钢生产工艺及生产计划研究现状

热轧带钢是成卷的钢板，它的厚度在 0.8~25mm 之间，宽度在 2500~900mm 之间。主要用于建筑行业、交通运输行业、机械与电器制造业、轻工业及食品加工业等部门，也为目前各种口径焊接钢管的原料，是一种用途较为广泛的通用钢材。因此，在现代工业较为发达的几个主要产钢国，热轧带钢在轧制钢材中所占的比重都在逐年增加，目前已达到 50~60% 以上，它是衡量一个国家钢铁业发达水平的一个重要因素。

1.3.1 热轧带钢生产工艺

热轧带钢生产工艺过程主要包括：原料准备、加热、粗轧、精轧、冷却及卷取等工序，具体工艺流程如图 1.2 所示。

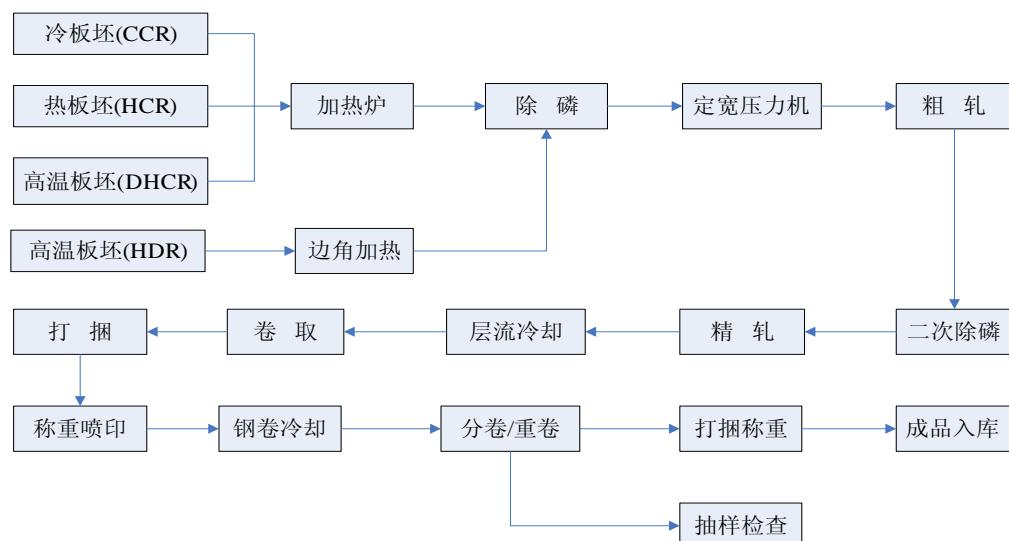


图 1.2 热轧带钢生产工艺流程图

Fig. 1.2 The flow chart of Hot-strip Rolling production

① 原料准备

热轧钢带所用的原料是初轧板坯或连铸板坯。坯料厚度通常为 120~300mm，最厚达 300~350mm。板坯宽度一般与轧成的带钢宽度相同或大于带钢宽度 50~100mm，采用大立辊轧制以生产不同宽度的带钢。板坯在加热前必须清除表面缺陷，以保证成品钢带的表面质量。在一些板坯初轧机上，常设有火焰清理机用于全面清理板坯的上、下表面，也为热态装炉创造了条件，但这仅是对于一般各种而言。对于质量要求较高的板坯，尚需进行局部修磨清理，以消除较深的缺陷。

② 板坯加热

由于对成品质量和尺寸偏差要求日趋严格，因此板坯的加热质量也就越来越得到重视。连轧机的板坯加热设备大多由 3~5 座连续式加热炉组成。由于步进式连续加热炉具有明显的优越性，所以用得越来越多。板坯的加热温度一般为 1250~1280℃。近年来，加热炉采用计算机自动控制每块板坯的加热过程，使加热质量、燃料消耗、加热能力等更趋于理想。

③ 粗轧

板坯在轧制前必须彻底清除加热时产生的氧化铁皮，以免压入表面产生缺陷。粗轧前，一般采用大立辊轧机进行轧边，以破碎板坯在加热炉内生成的氧化铁皮，同时对板坯宽度进行矫正。大立辊轧机的进口处设有侧导板，大立辊轧机前或后设有高压水除鳞装置，用 11.77~14.71 MPa 的高压水冲除板坯表面的氧化铁皮。板坯除磷以后，接着进入二辊轧机轧制。此时板坯厚度大、温度高、塑性好、抗力小，故选用二辊轧机即可满足工艺要求。随着板坯厚度的减薄和温度的下降，变形抗力增大，而板形及厚度精度要求也逐渐提高，故需采用强大的四辊轧机进行压下，才能保证足够的压下量和较好的板形。为了使钢板的侧边平整和宽度控制精确，在以后的每架四辊粗轧机前面一般都设有小立辊进行轧边。

④ 精轧

由粗轧机组轧出的钢带坯，经中间辊道输送到精轧机组进行精轧。带坯在进入精轧机之前，首先要进行测温、测厚并使用飞剪切去头部和尾部，以避免温度过低的头部损伤辊面，并使操作顺利进行。

带钢坯切除头尾后，需用高压水除鳞，然后便进入精轧机轧制。精轧机组一般由 6~7 架组成连轧，有的还留出第八架第九架的位置。增加精轧机架数可使精轧来料加厚，提高产量和轧制速度，并可轧制更薄的产品。现代热轧带钢的轧速很快，为了使成品尺寸和形状准确、表面质量和机械性能良好，必须通过一系列仪表和计算机对轧制速度、压力、出口温度、轧件厚度及辊型等进行自动测量与控制。

⑤ 冷却、卷取和精整

精轧机高速轧出的带钢经过输出辊道时，要在数秒钟之内急速冷却到600℃左右，然后进入卷取机卷成带钢卷，再将带钢卷送去精整加工。

为了加速轧制后钢带的冷却，保证卷取温度，在精轧机输出辊道的下边设有喷水冷却装置，上面设有低压层流冷却装置。冷却后的带钢由输出辊道送至卷取机卷成带钢卷。卷取机一般有三台，交替进行卷取。

卷取后的带钢卷经卸卷小车、翻卷机和运输链运往仓库，根据用作冷轧原料或作为热轧成品的不同，分别运往冷轧原料库或继续进行精整加工。精整加工线有纵切机组、横切机组、平整机组、热处理炉等设备。

1.3.2 热轧和连铸工序间的衔接方式

连铸和热轧工序间的物流衔接，按照连铸板坯送交热轧机的路线和连铸板坯到达加热炉或轧机的温度区间，可分为不同的方式，具体有冷装轧制(CC-CCR)、温装轧制(CC-HCR)、热装轧制(CC-DHCR)、和直装热轧(CC-HDR)等四种基本方式，如图1.3所示。

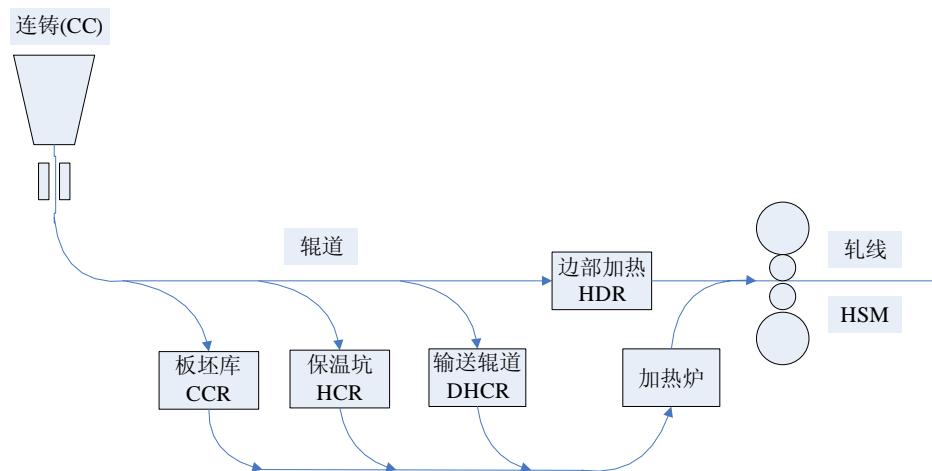


图 1.3 连铸与热轧工序间的连接方式

Fig. 1.3 Connection modes between Continuous-Casting and Hot-Rolling

① CC-CCR(Continuous Caster-Cold Charge Rolling)，连铸—冷坯装炉轧制，简称冷装。连铸坯因种种原因无法在高温情况下送入热轧加热炉，只好送到板坯库堆放，根据轧制计划的需要，一定时间后再由库中吊至炉前辊道，装炉加热。装炉温度低于400℃的板坯均属此种方式。有些产品根据工艺要求只能放冷后再装炉也属于此种方式。

② CC-HCR(Continuous Caster-Hot Charge Rolling)，连铸—热坯装炉轧制，装炉温度一般400℃~700℃，可以称为温装。当连铸生产计划与热轧轧制计划的衔接上存在一段时间差时，高温连铸坯也无法直接装入加热炉。为了减少热能损失，

可以将热坯放到保温坑中存放一段时间，需要时再吊出装炉，这样既使热能得到保存，又在时间上得以缓冲。目前这种方式占有很大的比重。

③ CC-DHCR(Continuous Caster-Direct Hot Charge Rolling)，连铸—直接热坯装炉轧制，简称热装。由于是通过输送辊道将连铸过来的高温坯直接送入加热炉，装炉温度都在700℃以上。这无疑是目前连铸与热轧间的最佳衔接方式。

④ CC-HDR(Continuous Caster-Hot Direct Rolling)，连铸—直接热轧。当连铸机可以实现高温铸造，在板坯运输过程中采取必要的保温措施，针对板坯边角部温降大等问题采取边部加热等措施，就可以将达到轧制温度的(1150~1200℃)连铸坯不经加热炉而直接送上轧线。显然这是最为理想的工艺路线，但它对各个生产环节的要求都十分严格，包括板带自由轧制工艺的实现。因此这一方式的实现尚需相当长的一段时间。

由于热装(DHCR)轧制工艺将通过输送辊道从连铸过来的高温坯直接送入加热炉，节省大量的能源，提高金属的收得率。而热坯直轧(HDR)工艺直接将从连铸机拉出的高温铸坯，经边部加热后，就可以达到轧制温度(1150~1200℃)的要求，这样，铸坯就可以不经过加热炉再加热而直接送上轧线轧制成材。显然热装(DHCR)和热坯直轧(HDR)是最为理想的工艺路线，它简化了连铸和热轧间的连接工艺，减少或去除了加热炉的再加热过程，是钢铁工业发展的必然方向。

实际生产中，由于各钢铁厂的连铸设备和热轧机的装备不同，以及它们之间的连接方式的设计也不尽相同，构成的轧制方式也有可能是上述四种基本方式的混合，其中最普遍采用的是混合轧制方式(Mixed-rolling mode)，也就是冷装坯与直装坯或热装坯混合形成同一轧制单元。

1.3.3 热轧带钢生产计划研究现状

① 生产计划编制策略

目前，热轧带钢生产计划编制采用的建模和求解策略一般可分为两类^[11,12]：串行策略和并行策略。串行策略是从N块板坯中依次制定M个轧制单元计划；并行策略是指对N块板坯同时制定出M个轧制单元计划。串行策略简单易行，对动态环境的适应性强，但由于是依次考虑每个单元计划，具有贪婪算法的特征，会影响解的全局最优性。并行策略的优点是从全局出发，在相对静态的生产环境下可以获得比串行策略更好的优化效果，但有计算复杂和在动态生产环境下降低全局优化效果的不足。因此，在设计算法时应根据生产环境的特点和要求选择串行策略或并行策略。

② 生产计划编制模型

目前用于热轧带钢生产计划的模型可以分为类：旅行商问题(TSP)模型，车辆路径问题(VRP)模型和其他方法模型。

1) TSP 模型

旅行商问题就是指给定 n 个城市及其中任意两个城市之间的距离, 要求确定一条经过各个城市当且仅当一次的最短路线。TSP 问题分为对称型和非对称型, 在对称型 TSP 中从城市 a 到城市 b 与从城市 b 到城市 a 的距离相等; 在非对称 TSP 中则至少有两个城市, 这两个城市之间双向的距离不相等。热轧带钢生产计划问题属于非对称性的 TSP。

1991 年, 美国普渡大学的 Eric 就将热轧生产计划问题归结为旅行商问题 (Traveling Sales Problem, TSP), 用轧件宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值来表示代表轧坯的两节点之间的距离。

Balram^[13]将热轧带钢生产计划问题归结为带有奖励制度的旅行商问题 (PCTSP), 但这只是理论的研究, 没有对计算结果和应用进行阐述。

2000 年 Tang 等^[14]提出了热轧生产计划并行处理策略, 从一个全局最优化的角度同时编制多个单元计划, 在此基础上将问题归结为多旅行商问题(Multiple Traveling Sales Problem, MTSP)来解决。

2) VRP 模型

寻找一个最优热轧生产计划使得总惩罚值最小的过程相当于寻找一条最优路线使得车辆在服务多个顾客时所走的总路程最短的问题, 即车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)。其中轧制单元计划的容量相当于车辆的载重量, 板坯的重量相当于顾客的需求量, 板坯间的跳跃惩罚值相当于两顾客所在地之间的距离, 轧制单元计划数相当于服务所有顾客所需的车辆数。

陈爱玲等^[15]将热轧生产计划问题归结为车辆路径问题来建立模型, 构造了一块虚拟板坯作为 VRP 的源点, 模型的目标是最小化运输的总费用, 该费用用板坯的宽度、厚度、硬度及轧制温度的跳变产生的总惩罚。

Peter^[16]等建立了热轧生产计划编制的带有奖金制度的车辆路径问题(Prize Collecting Vehicle Routing Problem, PCVRP)模型, 采用禁忌搜索算法对模型进行求解, 禁忌搜索算法的初始解用局部搜索算法获得。

李耀华等^[17]在分析热轧轧制批量问题的基础上, 建立了不确定轧制单元计划数的 VRP 模型, 并构造出一种基于单亲遗传算子的免疫算法用于求解此模型。

Cheng^[18]等将热轧生产计划编制问题归结为带有时间窗口的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW), 模型应用遗传算法求得最小化目标函数值, 并采用局部搜索进一步提高解的质量。

3) 其他

Petersond^[19]等提出了一种多目标数学规划模型来解决热轧生产计划问题, 并提出了一种构造式的启发式算法用于板坯排序。Arizono^[20]等通过专家系统来解决

板坯轧制的生产计划与调度问题，并开发了相应的软件系统，用于调整和改进传统方法编制的生产计划。

③ 生产计划问题研究方法

在热轧生产计划编制问题的研究方法上，最初是集中在整数规划、仿真和简单的规则上，这些方法不是产生的结果不理想就是难以解决复杂的问题。近年来，随着各种新的相关学科与优化技术的建立与发展，在生产计划与调度方面也出现了许多新的优化方法，如基于人工智能、计算智能和实时智能的各种方法。生产计划与调度问题的研究正在向着多元化的方向发展。目前采用的研究方法可以分为一下四类：

1) 经典优化算法

经典优化算法属于精确算法，它总能保证寻求到问题的最优解。由于组合优化问题是 NP-Hard 问题，而这类问题是没有时间复杂度为线性复杂度的精确算法。经典算法在遇到大规模或超大规模的组合优化问题就会出现解空间膨胀问题，一般无法在可接受的时间范围内获得问题的解。可见，在求解大规模的组合优化问题时，经典算法的计算量偏大，故经典算法一般只能用于解决小规模的组合优化问题。另外，经典算法必须遵从一定的模型形式，而现实问题则往往存在这样那样的限制，有时很难将问题抽象成经典算法适用的模型形式，这从另一方面限制了经典算法的应用。常见的经典算法有：

线性规划法(Linear Programming)，线性规划的数学含义是在满足一组线性约束条件下，求出多变量线性函数的最优值。求解线性规划问题的主要方法有单纯形法和内点法等。

整数规划法(Integer Programming)，整数规划是一类要求变量取整数值的数学规划。若在线性规划中要求变量取整数值，则为线性整数规划(Linear Integer Programming)。而对于仅要求部分变量为整数的数学规划问题，则称为混合整数规划。

分支定界法(Branch and Bound)，分支定界法是本世纪六十年代由 LandDoig 和 Dakin 等人提出的一类求解整数规划或混合整数规划问题的方法，该方法灵活且便于计算机求解，所以应用非常广泛。

动态规划法(Dynamic programming)，动态规划是运筹学的一个分支，是解决决策过程(decision Process)最优化的数学方法。由美国数学家 Bellmen 等人在 1951 年提出的著名的“最优化原理”表明，在求解的每一个阶段中，最后的最优策略只取决于当前的状态，这样就创建了最优化问题求解的动态规划方法。动态规划的实际应用非常广泛，在经济管理、生产调度、工程技术和最优控制方面都得到了广泛的应用。

2) 启发式算法

启发式算法是解决 NP-Hard 问题的常用方法，它是建立在经验和规则判断基础上的一种快速、近似的方法，算法应用必须以对问题的深入研究为前提，只有在深入了解问题需求和结构，才能提出合理有效的实现方法。启发式方法的优点是利用面向特定问题的知识和经验，因而可以产生好的解决方案，求解时间也可以接受；其缺点是用来评估解决方案优劣的手段还较少，如何提高搜索效率并减少内存使用以解决规模较大的问题，还需要进一步探索。启发式方法的种类繁多，常见的方法有：

基于规则的算法(Rule Programming)，所谓基于规则的算法即是根据问题的具体特征，按照经验设计解的创建策略，由此给出设计者认为合适的解。该解的效果与设计者的经验能力直接相关。

启发式搜索算法，启发式搜索算法的核心问题是构造启发函数，用启发函数的思想去解决传统的运筹学问题，可以提高求解的效率。启发搜索方法是解决运输和指派问题较为有效方法之一。

拉格朗日松弛算法 (Lagrangian Relaxation)，在大多数情况下，减少原问题的部分约束往往使问题变得更容易求解。而拉格朗日松弛方法的基本原理正是将问题较难解决的约束转换到目标函数中，同时保留问题的原有性质，经转换的问题将变得易求解。

专家系统方法^[21]，专家系统同样体现了一种规则思想。系统设计者们在研究大量的专家知识和经验后，将实际中各种模糊的逻辑规则转化为一条条计算机可识别的应用规则，形成计算机专家系统所需的知识库。专家系统然后根据现场情况从知识库中产生调度方案，并能对意外情况采取相应的对策。专家系统和其他启发式方法一样，难以评估所得到的解的性能，另外其稳定性较差，即使问题规模发生细微的变化，也可能造成问题最终解的较大变动，而这时往往需要对知识库进行更新，以适应问题变化后的`要求。

3) 系统仿真方法

基于仿真的方法不单纯追求系统的数学模型，它侧重于对系统中运行的逻辑关系的描述，其优点在于通过对所有分配、排序和时间选择决策的结果进行局部的分析可以对生产计划方案进行比较评价，并选择效果最优的生产调度方法和系统动态参数。但是应用仿真方法制定生产计划的费用很高，不仅在于产生计划的计算时间上，而且在于设计、建立和运行仿真模型上^[22]；仿真的准确性受人员的判断和技巧的限制，甚至很高精度的仿真模型也无法保证通过实验总能找到最优或次优的计划，因此系统仿真方法经常与其他方法结合使用。

4) 智能方法

在实际生产问题的形式越来越复杂，问题规模越来越庞大的情况下，使用经典优化算法已经逐渐无法满足问题求解的要求，而启发式算法无法保证解的优良解，且严重依赖于问题形式和设计者对问题的了解程度。在这种背景下，研究者们从 20 世纪 80 年代初开始提出各种智能计算方法。这些算法的实质依然是启发式规则，它们以求组合优化问题的全局最优解为目标，但并不保证最终所得解与问题最优解的偏离程度。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)，遗传算法(GA)是在 20 世纪 70 年代初期由美国密歇根(Michigan)大学的 Holland 教授发展起来的。1975 年，Holland 教授由于受生物进化论的启发提出的基于“适者生存”思想的一类高度并行、随机、自适应搜索算法，即遗传算法。与其它启发式方法顺序搜索空间不同，遗传算法以解的种群作为工作单元，模仿生物进化的适者生存原则指导搜索改进目标。

模拟退火算法(Simulate Annealing Algorithm, SA)，模拟退火算法思想最早由 Metropolis^[23]在 1953 年提出，并由 Kirk Patrick^[24]在 1953 年成功应用在组合优化问题中，实践证明，模拟退火算法适合于求解大规模组合优化问题，是一种求解 NP-Hard 问题的有效算法。SA 算法的出发点是基于物理退火过程和组合优化问题之间的相似性，它是一种基于 Monte Carlo 迭代求解策略的随机寻优算法。

禁忌搜索算法(Tabu Search Algorithm, TS)，禁忌搜索算法是局部邻域搜索算法的推广，是人工智能在组合优化算法中的一个成功应用。1986 年，Glover^[25]首先提出了禁忌搜索的概念，进而形成了一套完整的算法。禁忌搜索算法为避免搜索结果掉入局部最优，在搜索过程中引入搜索的历史信息，通过一个禁忌表来记录曾经历的局部最优点，以此来指导算法在以后的搜索中不再或很少经过之前的局部最优点，从而达到跳出局部最优解的目标。

人工神经网络算法 (Neural-Network Algorithm, NN)，1943 年，美国生理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 建立了一个用来解决简单分类问题的模型，认知模型。认知模型被认为是最早的神经网络模型。由于认知模型无法解决异或问题，人工神经网络的研究一度陷于低潮。直到 20 世纪 80 年代，Hopfield^[26,27]。将人工神经网络成功地应用于组合优化问题中，McClelland 和 Rumelhart^[28]构造的多层反馈学习算法成功地解决了单隐含层认知网络的“异或”问题及其他识别问题，才使神经网络重新成为研究的热点。

蚁群算法(Ant Colony Optimization Algorithm, ACO)，蚁群算法^[29-31]是模仿真实的蚁群行为而提出的一种模拟进化算法。蚂蚁在行走过程中会在其经过的路径上释放一种信息素，后来的蚂蚁就可以根据这种信息素来指引自己的行动方向。这是一种正反馈现象，当一条路径上经过的蚂蚁越多，其上的信息素浓度则越浓，而这条路径就最有可能被后来的蚂蚁所选择。利用蚁群算法求解 TSP 问题是蚁群

算法一个极为形象的应用。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO), 1995年, Kennedy和Eberhart等^[32,33]通过模拟一个简单的社会模型, 开发了一种演化计算技术, 即粒子群算法。算法可用来求解复杂的优化问题。

以上每一种方法都有自己的优点和缺点, 由于实际遇到的问题往往存在这样那样的差异, 因此应该具体问题具体分析, 选择其中一种算法根据实际问题做一些改进, 或者结合多种算法, 取长补短, 方可得到令人满意的结果。

1.4 本文的主要内容及组织

炼钢—连铸—热轧一体化生产计划系统是一个包含有多工序、多种工艺约束的复杂系统, 热轧作为炼钢—连铸—热轧三大顺序生产中的最后一道工序, 其生产计划的编制结果直接影响到炼钢、连铸生产计划的编制, 是一体化生产计划体系的重要组成部分。热轧带钢是最重要的钢铁产品, 其生产量目前已占整个钢铁产品的一半以上, 其既可以作为高质量冷轧板材的原料又可以当成品来出售。因此, 本课题所研究的热轧生产计划是以热轧带钢为对象, 即课题的主要内容是在炼钢—连铸—热轧一体化生产计划体系下研究热轧带钢生产计划的编制和优化问题。

主要内容及章节安排如下:

第一章是全文的基础。首先阐述了论文开展的背景和意义, 然后介绍了钢铁企业炼钢—连铸—热轧一体化生产工艺及生产计划编制流程, 并从模型, 方法等方面总结了热轧带钢生产计划的研究现状。

第二章在对热轧带钢生产计划编制问题从模型目标、约束条件及计划编制方法等方面进行了深入分析的基础上将该复杂问题拆分为两个相对简单的子问题, 并对拆分后热轧带钢生产计划的编制流程进行了阐述。

第三章从问题描述、模型的建立及优化求解算法的设计方面对热轧带钢生产日计划的编制进行了详细的阐述, 最后以某钢铁集团热轧板厂一个月的生产数据为对象进行仿真实验, 并将实验结果与热轧板厂现行系统编制的计划及经过调度后实际执行的生产计划进行了对比分析。

第四章先对基本蚁群算法做了介绍, 然后从问题分析、建模及优化算法设计方面对热轧带钢轧制批量计划的编制进行了详细的阐述, 并利用某钢铁集团热轧板厂某一天需要轧制的连铸板坯数据进行仿真实验, 验证了模型和算法的正确性和有效性。

第五章从开发技术、功能结构设计、数据库设计及实例运行效果等方面对开发的热轧带钢生产计划优化系统进行了介绍, 该系统是在第三章和第四章对热轧

带钢生产计划编制模型及优化算法研究的基础上开发的。

第六章对本文的主要研究内容做了总结并对今后的研究工作进行了展望。

2 热轧带钢生产计划编制

热轧是炼钢—连铸—热轧三大钢铁生产工序的最后一道工序，该工序的生产结束后用户对产品的要求需得到充分的体现，如产品的规格、质量及交货期等要求都需要得到满足。现场的计划编制人员需在满足这些要求的前提下编制出合理的热轧生产计划，即根据原料供应、现场的设备及生产状况对连铸板坯进行合理组坯和排序，使得设备的磨损及能源的消耗等尽可能的少，从而降低热轧生产的成本。因此，热轧生产计划制定的合理与否会直接影响到热轧工序的生产成本。不仅如此，在炼钢—连铸—热轧一体化计划编制体系中，热轧生产计划还对连铸计划和炼钢计划的制定具有指导意义，所以，热轧生产计划编制的好坏会直接影响到钢铁产品生产的整个流程的成本和整个钢铁集团的经济效益。

由于热轧带钢在所有钢铁产品中占的比例相当大，已达到整个钢铁企业生产量的 60% 左右，是热轧生产的主要产品。故文中对热轧生产计划编制的研究以热轧带钢为对象展开。接下来对热轧带钢生产计划编制的目标、需要考虑的约束及普遍采用的方法进行总结和分析，并在此基础上阐述文中热轧带钢生产计划编制采用的方法及计划编制流程。

2.1 热轧带钢生产计划编制问题分析

由于热轧带钢生产计划的编制是一个多目标，多约束的复杂组合优化问题，是热轧带钢生产管理的热点问题之一，也是国际钢铁生产及学术界关注的问题。目前，国内外学者已对该问题开展了大量的研究并取得了一定的成果。下面从热轧带钢生产计划编制的目标和编制时需要考虑的约束条件两个方面对该问题进行分析。

- ① 热轧带钢生产计划编制的目标
 - 1) 保证合同按期交货；
 - 2) 减少轧制过程中违反轧制规程的次数；
 - 3) 尽量增加轧制单元内带钢的轧制长度；
 - 4) 尽量减少出炉温度、终轧温度及卷取温度的跳跃。
- ② 热轧带钢生产计划编制需要考虑到约束
 - 1) 合同交货期窗口约束；
 - 2) 原料供应约束；
 - 3) 设备产能约束；
 - 4) 板坯库的库存约束；

- 5) 轧制单元计划容量约束;
 - 6) 烫辊材和主体材的轧制规程约束;
 - 7) 烫辊材和主体材轧制长度约束;
 - 8) 连续轧制同宽带钢的长度约束;
 - 9) 连续轧制同表面等级的带钢的长度约束;
 - 10) 相邻带钢出炉温度、终轧温度及卷取温度的跳跃约束;
 - 11) 排定计划时合同及其对应带钢的不可重复约束。

表 2.1 列举了目前国内在进行热轧带钢生产计划编制问题研究时考虑约束的情况。

表 2.1 热轧带钢生产计划编制的约束分析

Fig 2.1 The analysis of constraints of hot rolled strip production planning

是否参考文献	景气因素	提前/拖期交货	合同订货量	交货期窗口	板坯库的库存约束	机组产能约束	主体材料轧制规程约束	烫辊材轧制规程约束	主体材料轧制长度约束	烫辊材轧制长度约束	加工温度跳跃惩罚	同宽长度约束	同表面等级长度约束	单元计划容量约束	路径的子回路约束	
热轧生产计划与板坯库优化管理模型及算法研究 ^[34]	√	√			√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
宝钢热轧生产计划编制方法研究与应用 ^[35]	√			√		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
热轧生产轧制计划模型与算法研究 ^[17]	√					√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
热轧日生产计划优化模型及算法仿真 ^[36]	√					√	√									√
一种并行粒子群算法及其在热轧生产中的应用 ^[37]	√					√	√		√		√	√	√	√	√	√
热轧批量计划编制模型及其算法 ^[38]	√					√	√		√		√	√	√	√	√	√
热轧带钢轧制批量计划的实例应用 ^[39]	√					√	√	√	√	√					√	√

续表 2.1:

基于约束满足的热轧 批量模型与算法 ^[40]	√	√	√	√	√	√	√	√
基于启发式和演化计 算的热轧计划编制方 法 ^[41]	√		√	√	√	√	√	√
基于模拟退火轧制批 量计划问题的两阶段 算法 ^[42]	√		√	√	√	√	√	√
轧钢厂的精轧工序轧 制批量调度的优化模 型 ^[43]	√		√	√	√	√	√	√
热轧调度并行处理策 略的多旅行商模型 ^[44]	√		√	√	√		√	√
热轧带钢调度问题的 混合并行策略 ^[45]	√		√	√	√		√	√
热轧带钢轧制批量计 划软件系统的开发与 研究 ^[46]	√		√	√	√	√	√	√
热轧生产计划优化系 统研究与应用 ^[1]	√		√	√	√	√	√	√
CIMS 下的热轧生产 批量计划的数学模型 及解法 ^[47]	√	√	√	√	√	√	√	√
基于 VRP 模型的热轧 生产批量计划及禁忌 搜索算法 ^[48]	√		√	√	√		√	√
热轧带钢轧制批量计 划优化模型及算法 ^[49]	√		√	√	√		√	√

从表 2.1 可以看出建立热轧带钢生产计划编制模型时模型的目标及约束条件较多，基于此建立的模型较为复杂。因此，目前已有的研究并没有对所有的约束条件同时进行考虑，很大一部分的研究只考虑了主体材部分的计划编制，虽然在单个轧制单元计划中烫辊材的数量较少，但是当制定批量计划时，烫辊材的数量

随着轧制单元数的增加而变得较多，烫辊材部分的计划由人工来制定的工作量也显得比较大。因此，目前普遍采用的由单模型进行计划编制的方法并不是解决热轧带钢的生产计划编制问题的最佳方法。

2.2 热轧带钢生产计划编制问题拆分

为了降低建模的复杂性和模型求解的难度，本文的研究借鉴大连理工大学的李耀华在其博士论文中提出的将热轧生产计划的编制分为热轧生产日计划制定和热轧轧制计划制定两个步骤来进行的思想，将热轧带钢生产计划编制问题拆分为热轧带钢生产日计划编制和热轧带钢轧制批量计划编制两个问题分别进行研究，可将 2.1 节中所列的热轧带钢生产计划编制时需考虑的约束分为两组分别在热轧带钢生产日计划模型和热轧带钢轧制批量计划模型中考虑，在对约束进行分组时将设备产能约束拆分为设备的日产能和小时产能两个约束分别在两个模型中考虑。

① 热轧带钢生产日计划模型的目标为保证合同按期交货，需考虑的约束条件有：

- 1) 合同交货期窗口约束；
- 2) 原料供应约束设备；
- 3) 设备日生产能力约束；
- 4) 板坯库库存约束；
- 5) 同一生产合同不可有不同投产日期约束。

② 热轧带钢轧制批量计划模型的目标减少轧辊磨损，提高轧辊利用率。需考虑的约束条件包括：

- 1) 设备小时产能约束；
- 2) 轧制单元计划容量约束；
- 3) 烫辊材和主体材的轧制规程约束；
- 4) 单元计划内烫辊材和主体材的轧制长度约束；
- 5) 连续轧制同宽带钢的长度约束；
- 6) 相邻带钢出炉温度、终轧温度及卷取温度的跳跃约束；
- 7) 连铸板坯不可重复排入计划的约束。

将热轧带钢生产计划编制这样一个复杂的组合优化问题拆分为两个相对简单的问题进行研究的方法可以有效的降低原问题的复杂度。

2.3 热轧带钢生产计划编制流程

基于以上的考虑和问题拆分，文中分别建立了热轧带钢生产日计划编制模型

和热轧带钢轧制批量计划编制模型用于热轧带钢生产计划的编制。热轧带钢生产计划编制计划流程如图 2.1 所示，具体计划编制步骤如下：

- ① 计划编制人员接收经过质量设计和工艺设计用户订货合同。
- ② 将接收到的合同按照其交货期、质量及规格要求进行合同归并形成生产合同，并为其赋以相应的生产合同号。
- ③ 以生产合同为对象，采用热轧带钢生产日计划模型及用于求解模型的由遗传算法和蚁群算法结合的混合智能优化算法编制出热轧带钢生产日计划，具体模型的建立及求解算法设计见第 3 章。
- ④ 以热轧带钢生产日计划数据为对象，利用建立的热轧带钢轧制批量计划模型和一种改进的蚁群算法编制出具体的热轧带钢轧制批量计划，具体模型的建立及求解算法设计见第 4 章。
- ⑤ 将制定的热轧带钢轧制批量计划下发到生产现场，由现场调度人员按照下发出的计划组织热轧带钢生产。

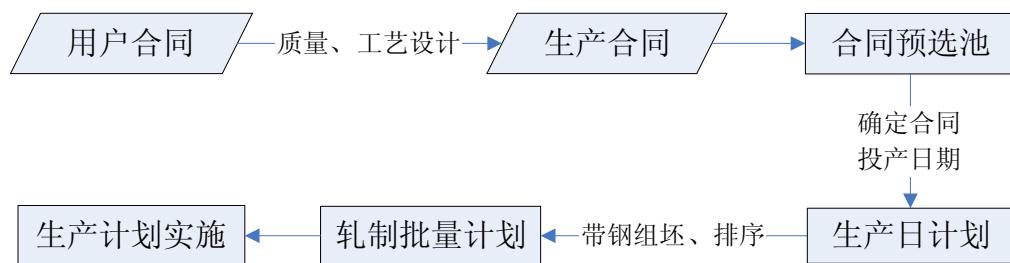


图 2.1 热轧带钢生产计划编制流程

Fig 2.1 The flow Chart of Hot-strip Production Planning

3 热轧带钢生产日计划优化模型及算法

3.1 热轧带钢生产日计划模型建立

3.1.1 准时生产制简介

准时制(Just In Time, JIT)意为及时或准时，又称作无库存生产方式(stockless production)，所表达的含义为在需要的时间，按需要的量，生产所需的产品^[50]。JIT方法最早由美国人提出，其后在日本丰田公司的成功应用而成为举世闻名的先进管理体系。JIT 的基本思想与传统生产系统相反，它是以顾客(市场)为中心，根据市场需求来组织生产。JIT 是一种倒推式管理，即逆着生产工序，由顾客需求开始，订单→成品→组件→配件→零件和原材料，最后到供应商。整个生产是动态的，逐个向前逼进的。上道工序提供的正好是下道工序所需要的，且时间上不早不晚。JIT 系统要求企业的供、产、销各环节紧密配合，大大降低了库存和成本，提高了生产效率和效益。

JIT 库存管理对传统存货理念的冲击主要在两方面：一方面是对定货成本和储存成本之和最小化的冲击；另一方面是对防范生产过程中的不确定性的冲击。JIT 系统解决对顾客需求做出反应的方法不是储备一定的存货，而是大幅度减少生产时间，从而保证企业能够在较短的时间内按要求的日期交货以及对市场需求做出快速的反应。

3.1.2 问题描述

热轧带钢的订货合同大多是多品种、小批量且不带有任何加工工艺参数的合同数据，所以在生产计划制定之前要对用户合同进行质量和工艺设计及用户合同归并，从而形成生产合同，在成品包装时再将按照生产合同组织生产的产品根据用户合同订货量进行拆解，然后发货。

生产日计划编制的最终目标是保证合同按期交货，对象就是由用户合同转化而来的生产合同，有了生产合同信息后，在综合考虑现场原料供应、机组的日生产能力等约束的前提下确定各个生产合同的投产日期，热轧带钢的生产日计划也随之确定。生产日计划既是上层合同计划部分产生的结果，又是下层编制轧制批量计划的数据来源，作为合同计划部分和轧制批量计划编制之间的联接纽带，有着举足轻重的作用^[36]。

3.1.3 热轧带钢生产日计划模型

JIT 管理的核心是追求一种无库存或库存最小化的生产组织方式。建立热轧带钢生产日计划模型的目的就是使得由于合同提前交货产生的库存费用和拖后交货产生的惩罚费用之和最小。该问题的实质和 JIT 管理较为相似，因此对于有 N 个

生产合同的热轧带钢生产日计划编制问题,按 JIT 的生产组织原则建立数学模型来确定生产合同的投产日期。

模型中要用到的符号及其在热轧带钢生产计划问题中的意义约定如下:

i : 合同序号, 生产合同总数为 N ;

j : 工序编号, 生产工序总数为 M ;

x_i : 合同 i 的投产日期;

T_i : 合同 i 的生产总时间, $T_i = \sum_{j=1}^M (t_{ij} + t_{cj})$ (min);

t_{ij} : 合同 i 在 j 工序上的生产时间(min);

t_{cj} : 合同从上一工序到达 j 工序的运输时间(min);

c_{ij} : j 工序的设备对于 i 合同规格下的小时产量(t);

q_i : 合同 i 的订货量(t);

$[a_i, b_i]$: 合同 i 的交货期窗口;

α : 合同提前完成的惩罚因子(/万吨·天);

β : 合同超期完成的惩罚因子(/万吨·天);

y_{j,x_i} : 第 x_i 天 j 工序设备的产量(t);

$O(x_i)$: 第 x_i 天的产量(t);

$R(x_i)$: 第 x_i 天的原料供应量(t);

S_{x_i} : 第 x_i 天板坯库的库存量(t);

S_{\min} : 板坯库的安全库存下限(t);

S_{\max} : 板坯库的安全库存上限(t)。

建立的模型及约束条件如下:

$$F = \min \sum_{i=1}^N q_i \times \{ \max\{0, a_i - (x_i + T_i)\} \times \alpha + \max\{0, (x_i + T_i) - b_i\} \times \beta \} \quad (3.1)$$

$$s.t \quad y_{j,x_i} \leq \sum_{i=1}^N c_{ij} t_{ij} \quad (3.2)$$

$$O(x_i) \leq R(x_i) \quad (3.3)$$

$$x_i \in I \quad I \text{ 为整数集} \quad (3.4)$$

$$S_{\min} \leq S_{x_i} \leq S_{\max} \quad (3.5)$$

目标函数(3.1)为基于 JIT 的惩罚函数, 目的是确定各个合同的最佳投产日期, 由于完成生产的日期提前或拖后均要受到惩罚, 该式对计划周期中所有的生产合同计算投产日期为 x_i ($i=1,2,\dots, N$)时的总惩罚值, 使得 F 值最小的 N 个合同的投产日期 x_i ($i=1,2,\dots,N$)的组合即为所要求的最优解。惩罚因子 α , β 需要根据生产实际来确定, 一般地 α 要小于 β , 根据仿真研究 α 取值 $0.1 \sim 0.5$, β 取值 $0.5 \sim 1.0$ 效果良好; 约束条件(3.2)保证设备每天的生产量小于设备产能; 约束条件(3.3)为原

料约束，保证每天的生产量必须小于该天的原料供应量，原料供应包括板坯库中的冷装/温装坯和当日生产的热装坯两部分；约束条件(3.4)表示变量 x_i 应为整数，因为投产日期为计划期内的某一天；约束条件(3.5)是板坯库的安全库存约束，即板坯库中每天存有的连铸板坯总量必须能保证当日生产顺利进行且小于板坯库的库存能力。

3.2 遗传算法

3.2.1 遗传算法简介

遗传算法（Genetic Algorithm, GA）^[51]是建立在自然选择和群体遗传学机理基础上的随机、迭代、进化，具有广泛适用性的搜索方法，它是由美国的 J.H.Holland 教授于 1975 年在他的著作《Adaptation in Natural and Artificial Systems》中提出的，其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换，前者消除了解中不适应因素，后者利用了原有解已有的知识，从而有力地加快了搜索过程，它尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂非线性问题。

遗传算法和传统的搜索算法不同^[52]，它从一组随机产生的初始解，称为“种群（Population）”开始搜索过程。种群中的每个个体是问题的一个解，称为“染色体（Chromosome）”。在遗传算法中最重要的概念是染色体，染色体通常是一串数据（或数组），用来作为优化问题的解的代码，其本身不一定是解。这些染色体在后续迭代中不断进化，称为遗传。在每一代中用“适应度（Fitness）”来测量染色体的好坏。生成的下一代染色体称为后代（Offspring）。后代是由前一代染色体通过交叉（Crossover）或者变异（Mutation）运算形成的。新一代形成中，根据适应度的大小选择部分后代，淘汰部分后代，从而保持种群大小是常数。适应度高的染色体被选中的概率较高。据此，经过若干代之后，算法收敛于最好的染色体，它很可能就是问题的最优解或次优解。

由于遗传算法是由进化论和遗传学机理而产生的直接搜索优化方法，故而在这个算法中要用到各种进化和遗传学的概念。这些概念如下^[53]：

码串（String）：它是个体（Individual）的形式，在算法中为字符串，对应于遗传学中的染色体。

种群大小（Population Size）：在种群中个体的数量称为种群的大小。

基因（Gene）：基因是码串中的元素，基因用于表示个体的特征。例如有一个串 S=1011，则其中的 1, 0, 1, 1 这 4 个元素分别称为基因。

适应度：某一个体对于环境的适应程度，或者在环境压力下的生存能力，取决于遗传特性。

复制、选择（Reproduction or Selection）：在有限资源空间上的排它性竞争。

交叉、交换、重组：一组码串或者染色体上对应基因段的交换。

变异：码串或染色体水平上的基因变化，可以遗传给子代个体。

3.2.2 遗传算法的发展

遗传算法经历了以下三个发展过程：

① 萌芽时期（60年代初~70年代中期）

1962年美国J. H. Holland教授在研究适应系统时，提出系统本身与外部环境的相互作用与协调，涉及到进化算法的思想。1968年他又提出模式理论，它是遗传算法的主要理论基础。第一次正式使用遗传算法这个术语，是出现在1967年美国J. D. Bagay关于博弈论的论文中。1975年，J. H. Holland教授的专著《Adaptation in Natural and Artificial System》问世，比较全面地介绍了遗传算法，人们常把这一事件作为遗传算法得到正式承认的标志，J. H. Holland也被视作为遗传算法的创始人^[54]。

② 成长期（70年代中期~80年代末期）

70年代末80年代初，许多研究工作者从事遗传算法的研究。特别是80年代中期，遗传算法成为美国人工智能研究的一个热点，J. H. Holland教授及其学生们在这方面作了大量的工作。1987年，美国的D. Lawrence总结了人们长期从事遗传算法的经验，公开出版《Genetic Algorithm and Simulated Annealing》一书，以论文集形式用大量实例介绍了遗传算法的使用技术^[55]。1989年，作为J. H. Holland教授的学生，D. E. Goldberg博士出版了专著《Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning》^[56]，全面介绍了遗传算法，该书被人们视作为遗传算法的教科书。至此，遗传算法已广泛应用于工程技术、计算机科学、图像处理、模式识别等领域。

③ 发展期（90年代）

90年代以后，遗传算法不断向广度和深度发展，1991年，D. Lawrence公开发行《Handbook of Genetic Algorithm》^[57]一书，标志遗传算法得到更进一步的发展。近几年来，遗传算法主要在复杂优化问题求解和工业工程领域应用，取得了一些令人信服的结果。

3.2.3 遗传算法的优缺点

遗传算法是一种利用自然选择和进化思想在高维空间中寻优的方法。它不一定能求得最优解，但一定可以找到近优解，这样符合实际应用中人的思维标准。遗传算法有着与传统的其他搜索算法，如分枝定界法、爬山法、禁忌搜索算法等不同的工作机理，常规的搜索算法是对待优化的参数直接进行操作，侧重于优化解答局部搜索，而且，依赖于大量的领域相关知识来支撑。所以速度慢，效率低。在遇到较大规模的问题时，存在“组合爆炸”的问题，无法继续进行。而遗传算

法由于自身具有独特的工作机理，遗传算法具有一些数学方法所不具有的优点，所以得到了广泛的应用。

遗传算法的主要优点如下^[58,59]:

- ① 遗传算法是对参数编码进行操作，而不是直接对参数本身进行操作；
- ② 遗传算法是从多点出发并行操作，不是对单点进行操作，因而可以有效防止搜索过程收敛到局部最优解；
- ③ 遗传算法通过目标函数计算适应度值，不需要其他的推导和辅助信息，从而对问题的依赖性较小；
- ④ 遗传算法使用概率转移规则，不是确定性规则；
- ⑤ 遗传算法在解空间内部不是盲目穷举或完全随机搜索，而是一种启发式搜索，搜索效率相对较高；
- ⑥ 遗传算法对于问题的函数基本无限制，不要函数连续或可微，既可以是数学解析表达式等显函数，也可以是映射矩阵或神经网络等隐函数，使用范围较广；
- ⑦ 具有并行计算的特点，可以通过大规模并行计算提高速度；
- ⑧ 遗传算法的实现相对比较简单，效果良好，适合大规模复杂问题的优化。

当然，遗传算法也有其自身有待改进的方面：

- ① 遗传算法是对种群进行概率性操作，所以，在全局最优的搜索上效果良好，而在局部最优的搜索上存在不足。在算法进行的前期，搜索效果良好，而在算法进行的后期，搜索速度缓慢。即使在逼近全局最优时，要获得全局最优解仍需要花费很大的搜索代价，这一点不同于一般算法；
- ② 遗传算法虽然实现简单，但实现的效果很大程度上取决于问题的表示，种群的规模，最大遗传代数，遗传算子的选择，交叉，变异概率等多种参数，如果这些参数设置不好，则使得遗传算法类似于随机搜索算法。而这些参数都是一些经验参数，往往无规律可循，要通过大量的实验结果来获取，而且参数的选取不具有通用性，当问题本身发生改变时，往往要重新指定新的参数，这些都要花费很大代价。

3.3 求解模型的遗传蚁群混合优化算法

遗传算法是一种具有鲁棒性、自适应、开放性的随机优化算法，特别适用于处理传统搜索算法难以解决的复杂组合优化问题。然而，单纯遗传算法缺乏搜索过程中的信息反馈和及时利用机制，对初始种群的选择有依赖性，往往出现搜索时间长或早熟收敛、收敛性能差等缺点，需结合其它的智能算法来改进。蚁群优化算法是一种结合了分布式计算、正反馈机制和贪婪式搜索的算法，具有很强的搜索较优解的能力(蚁群算法具体介绍见 4.3 节)。同时，蚁群算法对初始解的依赖

性较强，并容易出现停滞现象等不足，但蚁群算法可用于弥补遗传算法的不足。文中设计了遗传蚁群混合优化算法，采用自然数编码的遗传算法作为基本求解算法，并在循环过程中引入蚁群算法的信息素计算方式来不断积累和改进遗传算法的优化目标，并且引入精英蚂蚁策略来影响种群的更新和进化，提高求解算法的效率和改进解的质量。

3.3.1 算法结合原理

建立的遗传蚁群组合优化算法的原理如图 3.1 所示。组合优化算法以遗传算法为基础，在遗传算法的优化过程中，作为优化目标的个体适应度函数计算和进行种群更新时结合了蚁群算法进行算法改进。计算个体适应度时，采用蚁周系统的信息素计算方式^[59]来计算个体的信息素值，以体现系统整体信息的反馈和利用。在种群更新时，加入了精英蚂蚁策略^[60]，即为当前种群中最优的个体赋以额外的信息素值 $\Delta\tau^*$ ($\Delta\tau^* = \tau_{\max} \times 5\%$, τ_{\max} 为最优个体的信息素值)，并将其直接复制到下一代种群中，加入该策略的目的是为了保留每一代中的最优个体，保证算法的收敛性并提高算法的收敛速度。

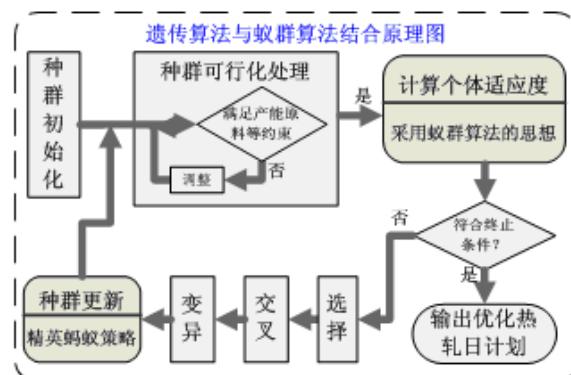


图 3.1 遗传算法和蚁群算法结合原理

Fig. 3.1 The Combination of Genetic algorithm and Ant colony algorithm

3.3.2 算法流程

① 符号约定

在构建的遗传蚁群组合优化算法中，种群中的每个个体(染色体)代表一个日计划，即计划周期内所有合同投产日期的组合，染色体中的基因值代表对应编号生产合同的投产日期。 $MaxRun$ 表示优化算法循环应用的次数； $MaxGen$ 表示最大进化代数； $PopSize$ 表示种群中个体的数目； $oldPop[z]$ 和 $newPop[z]$ 分别表示当前种群和新种群中的第 z 个体； $oldPop[z][i]$ 和 $newPop[z][i]$ 分别表示当前种群和新种群中第 z 个个体第 i 位的基因值； P_c 为交叉概率，控制着对父代个体实施交叉操作的概率， P_m 为变异概率，控制着对个体实施变异操作的概率。

② 算法流程及关键技术

为进一步提高遗传蚁群组合优化算法最优解的质量,在基于遗传算法的组合优化算法流程中又增加了一层外循环(循环次数设为 $MaxRun$),每次外循环可以得到一个满足 $MaxGen$ 条件的最优解,经过 $MaxRun$ 次外循环产生 $MaxRun$ 个单次最优解,算法最终输出的结果是从 $MaxRun$ 个单次最优解中选择出的最优解。算法流程如图 3.2 所示。

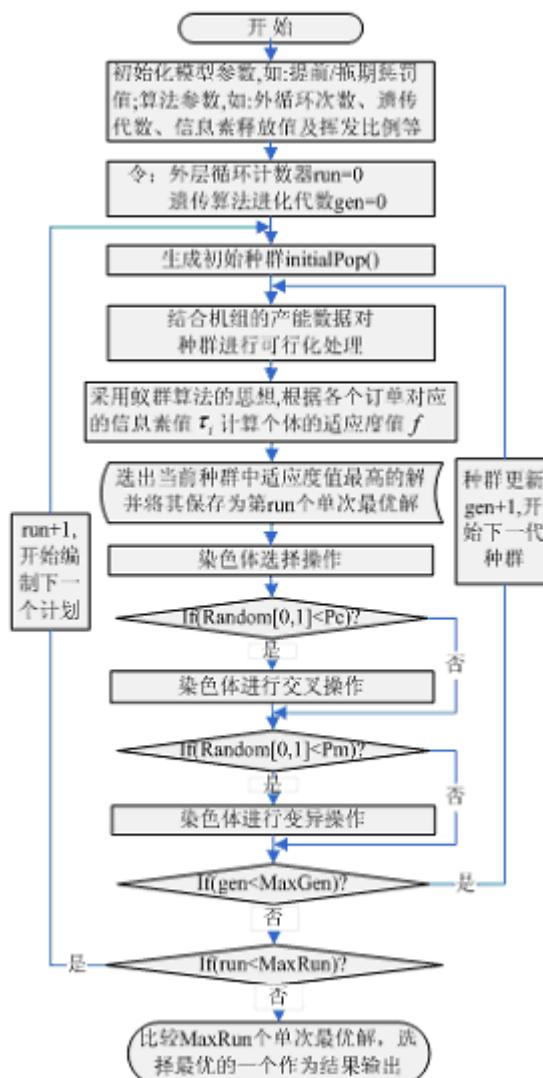


图 3.2 遗传蚁群算法流程图

Fig. 3.2 The flow chart of Genetic algorithm

1) 染色体编码: 普通遗传算法的染色体多采用二进制的编码方式,为了方便描述热轧带钢生产日计划编制问题,染色体采用自然数的编码方式。在染色体编码时,将计划周期内的所有生产合同按照自然数的顺序进行编号,该编号对应于

染色体基因数组的索引，染色体基因编码数组中每个基因位的值就代表对应编号的生产合同的投产日期，如图 3.3 所示。

生产合同编号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
合同投产日期:	6	11	18	30	5	9	12	25	17

图 3.3 染色体编码示意图

Fig. 3.3 The schematic of chromosome coding

2) 初始种群的产生：初始种群中包括 $PopSize$ 条染色体，每条染色体 $newPop[z](z=1,2,\dots,PopSize)$ 代表一个热轧带钢生产日计划，染色体上基因位 $newPop[z][i]$ 的值表示编号为 i 的合同的投产日期，该日期由一个能生成 1 到 $cycle$ ($cycle$ 为计划周期) 之间服从均匀分布的随机数发生器产生。染色体的长度由计划周期内的生产合同总数 N 确定。种群大小 $PopSize$ 视具体问题及计划系统的运行情况来定。从已有的研究看，变量较少时，种群规模为 $20\sim 50$ ，变量较多时，种群规模为 $100\sim 200$ 。

3) 可行化处理：由于随机产生的初始解不一定能够满足机组和工序的产能等约束。对初始解的可行化处理就是将随机产生的初始解调整为能够满足模型约束的、实际可行的解。首先，判断按照初始解排定的投产日期组织生产能否满足机组产能、工序日生产能力及原料供应等约束，如果能，则该解已是一个可行解，可行化处理结束；否则，需要继续对该初始解进行调整直到同时满足所有约束。

4) 计算个体适应度值：个体对“环境”的适应程度即个体的适应度值用个体的信息素值来表征。根据各个合同的生产完成日期与交货期窗口 $[a_i, b_i]$ 的偏离程度，给每个合同赋以一定的信息素值 τ_i ，所有合同的信息素值 τ_i 之和就是该个体的适应度值。 τ_i 由式(3.6)计算得到。

$$\tau_i = q_i \times \{\tau_p \times \{\max\{0, a_i - (x_i + T_i)\} + \max\{0, (x_i + T_i) - b_i\}\} \times \tau_d\} \quad (3.6)$$

其中， τ_p 为单位质量(万吨)提前单位时间(天)的信息素值， τ_d 为单位质量(万吨)拖后单位时间(天)的信息素值。

5) 遗传操作：是指由上一代的种群通过选择、交叉及变异演化出下一代种群的过程，是遗传算法的核心。

选择：从当前种群中选择出 $PopSize$ 个个体构成新种群。首先从当前种群中找出信息素值最高个体，为其赋以额外的信息素值 $\Delta\tau^*$ ，并将该个体直接复制到下一代种群中，其余个体则采用轮盘赌的方式从当前种群中选择得到，种群中个体的信息素值越高被选择的概率则越大，反之，则越小。

当前种群中的第 z 个个体被选择的概率为 P_z 由式(3.7)得到:

$$P_z = \frac{f_z}{\sum_{z=1}^{PopSize} f_z} \quad (3.7)$$

其中, f_z 为第 z 个个体的适应度值。

交叉: 交叉过程是指种群成员之间交换信息, 可以产生新的个体, 从而检测搜索空间中的新信息, 交叉概率 P_c 决定了一个个体是否要和别的个体进行配对交叉。算法采用两点交叉方式, 即随机地在基因的长度范围内产生两个交叉点 P_1 , P_2 , 并将当前种群中相配对的两个个体中位于交叉点 P_1 , P_2 之间的基因段互换, 从而得到两个新个体, 如图 3.4 所示。

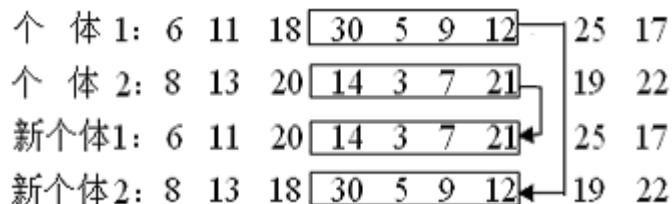


图 3.4 两点交叉操作示意图

Fig. 3.3 The schematic of two-point crossover

交叉是否发生的依据是交叉概率, 即交叉发生的可能性由 P_c 确定。若 P_c 过高, 相对选择能够产生的改进而言, 高性能个体被破坏得要更快, 如果交叉率过低, 搜索可能会停滞不前, 根据有关研究^[61], 原则上采用高交叉概率, 通常可取 $P_c = 0.6 \sim 0.8$ 。

变异: 变异本身是一种局部随机搜索, 与选择、交叉算子结合在一起, 保证了遗传算法的有效性, 使遗传算法具有局部的随机搜索能力, 同时使得遗传算法保持种群的多样性, 以防止出现早熟收敛。算法采用两点变异方式, 即随机地在基因的长度范围内产生两个变异点 P_3 , P_4 , 并将要发生变异的个体中位于 P_3 , P_4 之间的基因段倒序排列, 如图 3.5 所示。

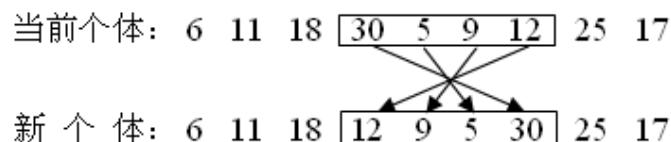


图 3.5 两点变异操作示意图

Fig. 3.5 The schematic of two-point mutation

变异概率 p_m 决定了对于种群中的某个个体变异操作是否进行。变异概率的值

越大，种群的多样性高，但是搜索的随机性增大； p_m 的值小，可能使某些过早丢失的信息无法恢复，造成种群的多样性低，可能会使搜索限于局部最小。一个低水平的变异概率足以防止整个群体中任一给定位保持永远收敛到单一的值。通常取 $p_m = 0.01 \sim 0.02$ 。

算法终止条件设计：为适时终止算法进程，需设置近似收敛准则^[62]，文中采用最常用的终止条件，即规定迭代的最大代数，通常可取为50~200。

3.4 计算实例及结果

以某钢铁集团热轧板厂1450热轧机组一个月的生产合同(425个生产合同)数据为对象进行模型和算法测试，以便对模型和算法的有效性进行验证。该热轧厂是按月订货按月交货的，一般都是在本月下旬开始做下月的生产计划，并按制定的计划安排生产，所以在测试中计划周期取31天。

1450热轧机组的产能数据如表1所示，由于机组产能随产品规格的不同而不同，故产能信息较多，在此只列出其中一部分， $P_{j,x_i}, c_{ij}, t_{ij}$ 的数据可由机组的产能数据及合同数据计算得到。

表 3.1 1450 热轧机组产能表

Table 3.1 Capacity of hot-rolling set of 1450

机组 名称	硬度 等级	厚度最小值 (mm)	厚度最大值 (mm)	宽度最小值 (mm)	宽度最大值 (mm)	小时产量 (t/hour)
1450 热轧 机组	11	1.5	12.1	720	1310	430
	12	1.5	12.1	720	1310	430
	21	2.0	12.3	720	1310	440
	22	1.5	12.1	720	1310	450
	41	2.0	12.1	720	1310	440
	42	2.0	12.1	720	1310	440
	43	2	12.1	720	1310	440
	44	1.5	13	720	1310	450
	51	2.5	12.1	720	1310	380
	52	2.5	12.1	720	1310	380

热轧日计划模型及算法参数：通过多组实验比较发现如下的参数值较为合理：初始种群数目取30，优化算法应用的循环次数为5，最大遗传代数取50，交叉概率 $P_c=0.8$ ，变异概率 $P_m=0.02$ ，单位重量提前单位时间交货的信息素释放值 τ_p 为0.8，单位重量拖期单位时间交货的信息素释放值 τ_d 为0.1，信息素的挥发比例为40%。仿真实验在CPU为赛扬1.7G，内存为256M的台式机上进行，混合优化算法能在进化50代内(60秒内)收敛到优化解，即得到优化的热轧生产日计划。编制的热轧生产日计划如表2所示(由于篇幅原因在此只列出其中20个合同的信息)。以第一

个合同为例，此合同为 2008 年 7 月份的合同，其备妥期为 7 号，交货期为 10 号，即该合同的交货期窗口为 [7, 10]，在该交货期窗口内交货均不会产生额外的费用（模型中表现为相应的惩罚值），现场计划投产日期为 1 号，实际生产日期为 1 号，模型投产日期为 7 号，即按照模型制定的计划该合同应在 7 号生产。

由于合同提前/拖期完成都会产生惩罚，在惩罚因子相同的前提下(在此，单位重量的订单提前/拖期完成的惩罚值分别取 $\alpha=0.1$, $\beta=0.5$)，以模型的目标函数值为比较标准，分别将现行系统制定的生产计划、生产实绩与模型编制的优化生产计划进行比较。现行系统制定的生产计划对应的模型目标函数值为 22.07，生产实绩对应的模型目标函数值为 21.66，由优化模型编制的热轧生产日计划对应的模型目标函数值为 16 左右，比现行系统制定的计划惩罚值减少了 27.5%，比生产实绩惩罚值减少了 20.9%。由此可见，由模型编制的热轧生产日计划明显优于热轧厂制定的热轧生产计划和经过调整后实际执行的生产计划。

表 3.2 合同投产日期确定结果表

Table 3.2 Production day of orders

序号	合同号	合同量(t)	宽度 (mm)	厚度 (mm)	硬度 等级	备妥 期	交货 期	计划投 产日期	实际生 产日期	模型投 产日期
1	807026	1404.5	1050	1.95	11	7-7	7-10	7-1	7-1	7-7
2	807028	1352.7	1050	2	21	7-23	7-31	7-1	7-2	7-3
3	807045	239.79	950	1.78	11	7-23	7-31	7-2	7-3	7-11
4	807050	661.26	1250	7.8	41	7-23	7-31	7-3	7-3	7-24
5	807055	734.62	1000	2.4	21	7-23	7-31	7-4	7-4	7-15
6	807061	1292.82	1000	0.4	11	7-23	7-31	7-4	7-5	7-12
7	807094	705.41	1080	3.5	12	7-23	7-31	7-6	7-6	7-26
8	807113	118.44	840	0.7	12	7-23	7-31	7-7	7-8	7-12
9	807142	699.53	1239	3	11	7-23	7-31	7-10	7-11	7-19
10	807158	566.39	950	0.7	11	7-3	7-5	7-11	7-12	7-7
11	807162	542.16	914	0.47	11	7-23	7-31	7-12	7-12	7-24
12	807187	361.33	1000	0.6	11	7-23	7-31	7-13	7-14	7-13
13	807196	237.04	818	0.5	11	7-5	7-10	7-14	7-14	7-5
14	807233	502.06	1000	1	11	7-23	7-31	7-16	7-16	7-16
15	807252	444.57	818	0.5	11	7-5	7-10	7-16	7-17	7-5
16	807269	35.73	1025	7.85	51	7-23	7-31	7-17	7-18	7-23
17	807280	121.78	1060	0.6	11	7-23	7-31	7-18	7-18	7-29
18	807316	385.33	1050	1.2	11	7-23	7-31	7-20	7-21	7-24
19	807366	866.98	1250	7.6	41	7-23	7-31	7-25	7-25	7-11
20	807383	569.61	1120	1.5	11	7-23	7-31	7-26	7-27	7-28

由表 3.2 可以看出，合同大部分都可以在交货期窗口中完成，其中有少数不能在交货窗口内投产并交货的合同，是因为受到机组产能及均衡生产任务等约束的限制。因此，如果按照模型制定的计划组织生产既可以保证用户合同的按时交货

又可以减少不必要的、由订单提前完成产生的库存及拖后完成产生的惩罚。实例结果表明，模型和算法是有效的。

4 热轧带钢轧制批量计划模型及算法

4.1 热轧带钢生产计划问题分析

热轧生产过程中，更换前后两个工作辊之间的轧制对象称为轧制单元，对应一个轧制单元计划，一个轧制单元内轧制带钢的总长度称为一个单元的轧制能力。两个支撑辊之间的轧制对象是由多个轧制单元组成，称为轧制单元组或轧制批量，对应多个轧制单元。通常一个完整的轧制单元计划由烫辊材和主体材两部分组成，两部分的约束不尽相同。

热轧带钢轧制批量计划是根据轧制工艺规程和合同交货期要求，对轧件进行组批和排序的过程，轧件组批是把所有轧件组成多个轧制单元，排序则是安排一个轧制单元内各轧件的轧制顺序。

热轧带钢生产计划的制定类似于考虑车辆利用率的车辆路径问题，基于此，我们建立了考虑车辆利用率的 VRP 模型来解决将 N_1 块板坯编制成 m_1 个轧制单元计划的热轧带钢生产计划编制问题。在实际问题中，把每块连铸板坯作为一个顾客，其重量看成是顾客的需求量；一个轧制单元表示由一辆车服务的顾客集合，其最大容量看作是车辆的额定载荷；两个板坯间由于规格上的跳跃而产生的惩罚值作为两个顾客所在地之间的路径长度。需要的车辆数最少就需要使得每辆车的载重量接近车辆的额定载荷，对应热轧带钢轧制批量计划问题中就是要使得每个轧制单元内的带钢轧制长度尽量接近轧制单元的容量，这样就会减少轧辊的更换次数，相应的减少更换轧辊的费用。因此，我们加入对轧辊利用率的考虑，在此由车辆的满载率来表示轧辊的利用率。

4.1.1 热轧计划的编制依据

热轧带钢的产品质量主要由精轧过程的精度来保证，精轧机组一般由 6~7 个机架组成，每个机架由一套工作辊和一套支撑辊组成。工作辊直接与轧件接触，支撑辊协助工作辊产生均匀的压力。由于高温带钢坯在精轧机组内高速轧制，造成工作辊的磨损很大，工作辊需要经常更换，以保证带钢的板形，同时减少支撑辊的磨损，延长工作辊的寿命。现场工作人员和领域内的专家一致认为，造成工作辊磨损的主要因素有如下几个^[63]：

① 轧件的硬度因素

被轧制的钢材的硬度等级越高，轧件对轧辊产生的反作用力就越大，从而轧辊的磨损就越快；同时，相邻带钢的硬度等级变化越大，对轧辊的磨损就越高；

② 带钢的厚度因素

所轧带钢的厚度要求越薄，轧辊对轧件产生的压力就需要越大，从而轧辊的

磨损就越大，而且，如果相邻带钢的厚度相差太大，对轧辊的磨损也就越大；

③ 带钢宽度的变化

如果连续轧制具有相同宽度的带钢超过一定的长度，就可能在工作辊边缘处形成凹痕；如果接下来轧制的带钢宽度比它前面轧制的带钢宽，凹痕就会在带钢表面上留下划痕，影响带钢的质量；更为严重的是，凹痕有可能划伤支撑辊，造成支撑辊的不合理更换。

轧辊更换一次的成本很高，所以为了降低更换成本，轧制单元的轧制长度需在其最大轧制长度约束下要尽可能的大。基于以上造成工作辊磨损因素的分析，可以得知，要想充分提高工作辊的寿命(轧制能力)，提高带钢产品质量，保证轧机顺利、平稳的运作，组成的轧制计划需满足一定的约束。

4.1.2 轧制单元计划的工艺约束

每个轧制单元由两部分组成：烫辊材和主体材。在轧制单元初始阶段为了使轧辊达到热平衡和稳定，需安排轧制烫辊材。烫辊材在轧制单元中所占比例较小，一般安排硬度较低的带钢，然后再轧制主体材。烫辊材的宽度应当递增变化，主体材的宽度应当递减变化。所以一个完整的轧制单元的带钢宽度具有“双梯形结构”，正梯形是烫辊材部分，反梯形是主体材部分，如图 4.1 所示。

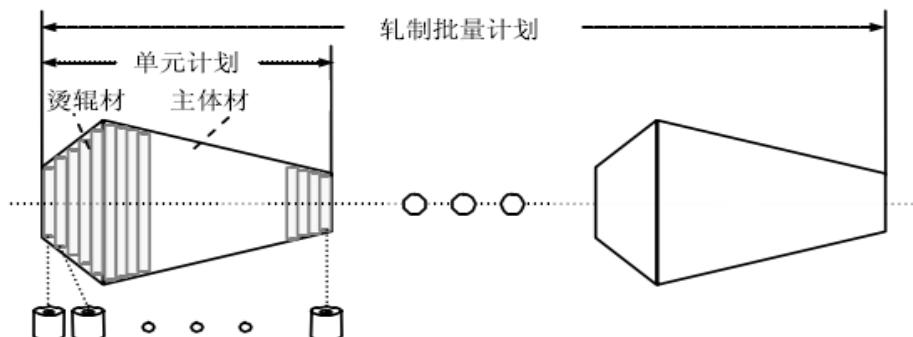


图 4.1 热轧轧制批量计划组成示意图

Fig 4.1 .The Campaign Composition and Round Profile of Hot Rolling Scheduling

综上，在编制热轧带钢轧制批量计划时在保证产品交货期的前提下，必须遵守如下的工艺约束^[64]：

烫辊材部分：

- ① 烫辊材长度（或重量）有一定限制；
- ② 开始轧制时的板坯硬度不能太大。每个计划的烫辊材的质量一般要求不高，一般编排冷轧用料或要求比较低的热轧用户定单，硬度一般是 1。
- ③ 硬度变化幅度尽可能平滑；烫辊材的硬度最大值为 2 级硬度，从软到硬，总长不超过 6km。

- ④ 厚度变化幅度要小，变化方向最好是减的。
- ⑤ 宽度递增变化，变化范围有限制；相邻两块带钢的宽度差一般不大于200mm。

主体材部分：

- ① 主体材长度（或重量）有一定限制；
- ② 宽度、厚度、硬度不允许同是跳变；当三者发生冲突时，优先级为硬度、厚度、宽度。
- ③ 硬度变化要平稳，渐进递增或渐进递减均可，只是不能反复跳跃；
- ④ 厚度变化要平稳，不能反复跳跃，同时最好是减方向变化；
- ⑤ 主体材宽度非增方向变化，跳跃幅度要小；在考虑厚度跳跃差的前提下，最大跳跃幅度为250mm。
- ⑥ 为确保热轧产品质量及操作稳定，应将相同或相近厚度、硬度、表面要求的带钢编排在一起。

4.2 热轧带钢轧制批量计划模型

4.2.1 符号约定

N_1 需要排入计划的板坯总数；

m_1 轧制单元计划个数；

c_{ijz} 主体材中板坯 i 到板坯 j 的惩罚值；

$$c_{ijz} = P_{ijz}^w + P_{ijz}^t + P_{ijz}^h$$

其中 $P_{ijz}^w, P_{ijz}^t, P_{ijz}^h$ 分别是主体材板坯间的宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值。

c_{ijt} 烫辊材中板坯 i 到板坯 j 的惩罚值；

$$c_{ijt} = P_{ijt}^w + P_{ijt}^t + P_{ijt}^h$$

其中 $P_{ijt}^w, P_{ijt}^t, P_{ijt}^h$ 分别是烫辊材板坯间的宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值。

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{轧制计划 } k \text{ 包括板坯 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{轧制计划 } k \text{ 内板坯 } i \text{ 生产后直接生产板坯 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$T_{izk} = \begin{cases} 1 & \text{轧制计划 } k \text{ 内板坯 } i \text{ 为主体材} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$T_{itk} = \begin{cases} 1 & \text{轧制计划 } k \text{ 内板坯 } i \text{ 为烫辊材} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$w_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{板坯 } j \text{ 与 } i \text{ 同属于轧制计划 } k, \text{ 且与板坯 } i \text{ 宽度连续轧制} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

n_k 第 k 个轧制单元计划的板坯总数, $n_k = n_{ik} + n_{zk}$; 其中 n_{ik} 表示主体材的板坯数, n_{zk} 表示烫辊材的板坯数。

q_i 表示板坯 i 的重量(或长度)。

Q_{unit} 表示轧制单元计划的容量限制, $Q_{unit} = Q_z + Q_t$; 其中 Q_z 表示主体材的轧制长度(或重量)限制, Q_t 表示烫辊材的轧制长度(或重量)限制。

R 同宽度板坯连续轧制的长度约束。

4.2.2 优化目标函数

模型的目标函数 f 如式(4.1)所示:

$$f = \min(a \times S + b \times \frac{1}{R_v}) \quad (4.1)$$

其中, S 表示轧制批量计划中相邻带钢由于违反轧制规程而产生的惩罚值的总和, 如式(4.2)所示; \bar{R}_v 表示轧制批量计划中多个轧辊的平均利用率, 单个轧辊的利用率 R_v 如式(4.3)所示; a, b 分别为相邻带钢的惩罚值之和和轧辊平均利用率倒数的权重系数。

总路径长度 S , 在该问题中以违反轧制规程产生的惩罚来表示路径长度, 减小总路径长度即就是减少轧制过程中的违规次数及惩罚值。总路径长度 S 的数学表示如下:

$$S = \sum_{k=1}^{m_1} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} (c_{ijz} x_{ijk} T_{izk} + c_{ijt} x_{ijk} T_{itk}) \quad (4.2)$$

轧辊利用率 R_v 。通过提高轧辊的利用率可以减少换辊次数, 降低生产成本, 它是热轧生产中的一个重要优化指标。在该问题中轧辊利用率 R_v 以车辆的满载率来表示, 其数学表达式如下:

$$R_v = \max \sum_{i=1}^{n_k} q_i / Q_{unit} \quad (4.3)$$

其中, q_i 表示板坯 i 的重量(或长度); Q_{unit} 表示轧制单元计划的容量限制。

4.2.3 约束条件

① 每块板坯都要被排入计划且只能被排入一个轧制单元计划

$$\sum_{k=1}^{m_1} y_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_1$$

② 主体材和烫辊材的容量限制

$$\sum_{i=1}^{N_1} q_i y_{ik} T_{izk} \leq Q_z \quad k = 1, 2, 3, \dots, m_1$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} q_i y_{ik} T_{ik} \leq Q_t \quad k = 1, 2, 3, \dots, m_1$$

③ 主体材和烫辊材连续轧制同宽度带钢的长度限制

$$\sum_{j=1}^{n_{jk}} z_{ijk} q_i T_{jk} y_{jk} \leq R \quad k = 1, 2, 3, \dots, m_1; i = 1, 2, 3, \dots, n_{zk}$$

$$\sum_{j=1}^{n_{ik}} z_{ijk} q_i T_{ik} y_{ik} \leq R \quad k = 1, 2, 3, \dots, m_1; i = 1, 2, 3, \dots, n_{ik}$$

④ 只有在同一个轧制单元计划中才考虑同宽度连续轧制的长度限制

$$w_{ijk} \leq y_{ik} \text{ 且 } w_{ijk} \leq y_{jk} \quad k = 1, 2, \dots, m_1; i, j = 1, 2, \dots, N_1$$

⑤ 避免出现子回路

$$\sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} x_{ijk} \leq n_k - 1 \quad k = 1, 2, \dots, m_1$$

4.3 蚁群算法

蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)是由于受到自然界中真实蚁群集体行为的启发，由意大利学者 M.Dorigo 于 1991 年在他的博士论文中首次系统地提出的一种新型的优化算法。蚁群优化算法是最新发展的一种模拟昆虫王国中蚂蚁群体智能行为的仿生优化算法，它具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法相结合等优点。自从问世以来，逐渐引起人们的注意并得到了广泛的应用。

蚁群算法的提出借鉴和吸收了现实世界中蚂蚁种群的行为特征^[30,31,65]：蚂蚁在觅食过程中能分泌一种称之为信息素(Pheromone)的物质，并能利用信息素的轨迹作为媒介与其它的蚂蚁进行信息沟通。一条路径上留下的信息素轨迹的多少与这条路径上通过的蚂蚁数成正比，当通过的蚂蚁越多，则留下的信息素轨迹就越多，从而导致后来蚂蚁选择该条路径概率提高。这样，没有视觉能力的蚂蚁在上述过程中展现出了一种协作的自催化行为能力，蚂蚁正是基于此建立最短的移动路径。值得一提的是，蚂蚁的这种觅食现象只是一种自然现象，并不涉及任何的人工智能因素，这也体现了 ACO 算法的奇妙之处。蚂蚁的这种协作搜索行为为一些实际优化问题提供了一种新的计算方法，特别适用于求解那些规模巨大的或状态随时间变化的组合优化问题，如著名的旅行商问题、二次分配问题、作业安排调度问题等。ACO 在 TSP 上的应用已经得到较好的效果。但是，ACO 算法并不适用于那些能使用经典算法(如贪婪法或动态规划等)求解的多项式问题。

4.3.1 基本蚁群算法模型

蚁群算法的主要过程如下：算法的初始化中，所有的边都被赋予一定的信息

素。在每次搜索开始时，选定数量（依具体问题而定）的蚂蚁被置于随机选择的城市中（蚂蚁数小于城市数）。蚂蚁各自开始自己的搜索过程。在遍历城市的过程中，蚂蚁倾向于沿着距离短且信息素水平较高的路径访问下一个城市。当所有蚂蚁完成了搜索后，进行全局信息素更新：所有连接边的信息素都有一部分随着搜索的进行而挥发掉，然后每只蚂蚁根据它已完成周游的旅行费用更新它走过的边的信息素水平。蚂蚁的旅行费用越低，相应边的信息素水平增加就越显著。因此，那些有许多蚂蚁访问且周游路线费用较低的边，其信息素水平就明显增加。相反，对于那些没有蚂蚁走过或访问蚂蚁数比较少的边，由于信息素的挥发，其信息素水平将逐渐降低。信息素的更新完成后，将检查所有蚂蚁的搜索结果，假设存在一只蚂蚁的搜索费用较以前的搜索更低，就更新最优访问路线和旅行费用。然后，所有蚂蚁重新选择出发的城市，重新开始搜索。重复这种搜索过程直到满足一定的退出条件。

蚂蚁 $k(k=1, 2, \dots, m)$ 在运动过程中，根据各条路径上的信息量决定其转移方向。这里用禁忌表 $tabu_k$ 来记录蚂蚁 k 当前走过的城市， $tabu_k$ 随蚁群的进化过程作动态调整。在搜索过程中，蚂蚁根据各条路径上的信息素量及路径的启发式信息来计算状态转移概率。 $P_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 处在城市 i 选择城市 j 的转移概率，如式(4.4)所示：

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta(t)}{\sum\limits_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha(t)\eta_{is}^\beta(t)} & j \in allowed_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4.4)$$

其中， $allowed_k$ 表示蚂蚁下一步允许选择的城市；由上式可见，转移概率 $P_{ij}^k(t)$ 与 $\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta$ 成正比。 α 为信息启发式因子，表示轨迹上信息素量的相对重要性，反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息在蚂蚁选择路径时所起的作用，其值越大，则该蚂蚁越倾向于选择有较多蚂蚁经过的路径，蚂蚁间的协作性越强； β 为期望启发式因子，表示能见度的重要性，反映了蚂蚁在运动过程中启发式信息在蚂蚁选择路径是受重视的程度，其值越大，则该状态转移规则越接近于贪心规则； η_{ij} 为边 (i, j) 的启发式信息值，反映了由城市 i 转移到城市 j 的启发信息，这个量在蚂蚁系统的运行中保持不变。在 TSP 中取 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ，由于 d_{ij} 表示相邻两个城市之间的距离，所以对于蚂蚁而言 d_{ij} 越小，则 η_{ij} 越大， $P_{ij}^k(t)$ 也就越大。

为了避免残留信息素过多而淹没启发信息，在每只蚂蚁走完一步或者完成对所有城市的遍历（也即结束一次循环）后，要对残留信息进行更新。这种更新策略模仿了人类大脑记忆的特点，在新信息不断存入大脑的同时，存储在大脑中的旧信息随着时间的推移逐渐淡化，甚至忘记。由此， $t+n$ 时刻在路径 (i, j) 上的信

息素量可按式(4.5)和(4.6)所示的方式进行调整:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (4.5)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (4.6)$$

其中, ρ 表示信息素挥发系数, 则 $(1-\rho)$ 表示信息素残留因子, 为了防止信息的无限积累, ρ 的取值范围为 $[0,1]$; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示本次循环中路线上的信息素的增量, $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径上的信息量。

根据更新策略的不同, M.Dorigo 提出了三种不同的基本蚁群算法模型, 分别称之为蚁周 (Ant-Cycle) 模型、蚁量 (Ant-Quantity) 模型和蚁密 (Ant-Density) 模型, 其差别就在于 $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 的计算方式不同^[30,31]。

在 Ant-Cycle 模型中

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L_k & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过路径 } (i', j') \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

其中, Q 表示更新时释放的信息素量, 它在一定程度上影响算法的收敛速度; L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走过的路径的总长度。

在 Ant-Quantity 模型中

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/d_{ij} & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在 } t \text{ 和 } t+1 \text{ 之间经过路径 } (i', j') \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

在 Ant-Density 模型中

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在 } t \text{ 和 } t+1 \text{ 之间经过路径 } (i', j') \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

这三种不同模型的区别在于: Ant-Quantity 模型和 Ant-Density 模型中利用的是局部信息, 即蚂蚁每完成一步后就更新路径上的信息素; 而 Ant-Cycle 模型中则利用的是整体信息, 即蚂蚁完成一次循环后才更新所有路径上的信息素。在一系列标准测试问题上运行的实验表明, Ant-Cycle 模型的性能优于其它两种模型。

4.3.2 基本蚁群算法的实现

① 算法实现步骤

以 TSP 为例, 基本蚁群算法的具体步骤如下:

步骤 1: 参数初始化。令时间 $t = 0$, 循环次数 $N_c = 0$, 设置最大循环次数 N_{cmax} , 将 m 只蚂蚁随机的置于 N_1 个元素 (城市) 上, 另每条边 (i', j') 上的初始信息素值 $\tau_{ij}(0) = 1/(n * L_{mn})$, 且初始时刻 $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$;

步骤 2: 循环次数 $N_c \leftarrow N_c + 1$;

步骤 3: 蚂蚁的禁忌表索引值 $index = 1$;

步骤 4: 蚂蚁数目 $k \leftarrow k + 1$;

步骤 5: 蚂蚁个体根据状态转移概率公式(4.4)计算概率选择元素 (城市) j ($j \in allowed_k$), 并前进;

步骤 6: 修改禁忌表指针, 即选择好之后将蚂蚁移动到新的元素 (城市), 并把该元素 (城市) 加入到该蚂蚁的禁忌表中;

步骤 7: 若未遍历完所有节点(城市), 即 $k < m$, 则跳转到步骤 4, 否则执行步骤 8;

步骤 8: 根据式(4.5)和(4.6)更新每条路径上的信息素量;

步骤 9: 若满足结束条件, 即如果循环次数 $N_c \geq N_{c\max}$, 则循环结束并输出程序的计算结果, 否则清空禁忌表并跳转到步骤 2。

② 算法程序流程

基本蚁群算法的程序结构流程如图 4.2 所示:

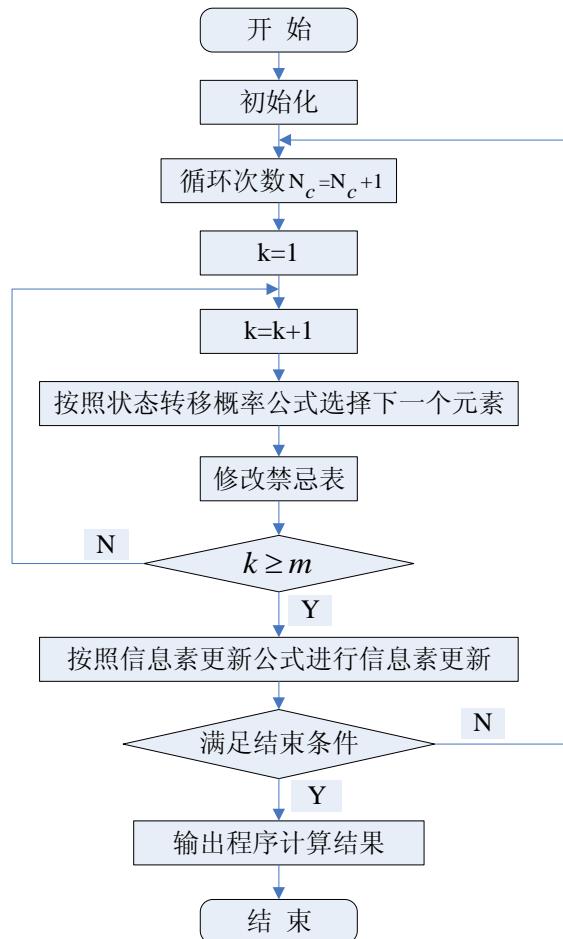


图 4.2 基本蚁群算法流程图

Fig. 4.2 The flow chart of standard Ant colony algorithm

4.3.3 蚁群算法的优缺点

基本蚁群算法具有很强的发现新解的能力, 这是因为该算法不仅利用了正反

馈原理，在一定程度上可以加快进化过程，而且是一种本质上并行的算法，不同个体之间不断进行信息交流和传递，从而能够相互协作，有利于发现较优解。蚁群算法具有如下的优点^[30,31,66]：

- ① 分布式本质并行算法，它是一种基于种群的进化算法，本质上具有并行性，易于并行实现；
- ② 具有较强的鲁棒性，对其模型稍加修改，便可以应用于其他问题；
- ③ 易于与其他方法结合，基本蚁群算法很容易与多种启发式算法结合，以改善算法的性能^[67]；
- ④ 其优化过程不依赖于优化问题本身的严格数学性质，如连续性，可导性及目标函数和约束函数的精确数学描述；
- ⑤ 是一类概率型的全局搜索方法，这种非确定性使算法能够有更多的机会求得全局最优解；

基本蚁群算法是一种有效的随机搜索算法，但也存在一些缺陷：

- ① 与其他方法相比，该算法一般需要较长的时间；
- ② 该算法易出现停滞现象，即搜索进行到一定程度后，所有个体所发现的解完全一致，不能对解空间进一步搜索，不利于发现更好的解。

4.4 求解热轧带钢轧制计划模型的改进蚁群优化算法

蚁群算法虽然具有正反馈、并行分布式计算、易于和其它方法结合等众多优点，但是也和其它的优化算法一样容易陷入局部最优，发生搜索停滞等缺点。为了提高算法的搜索效率，保证解的质量，使之适合于热轧带钢轧制批量计划模型的求解，对基本蚁群算法从路径选择策略、信息素挥发系数、蚂蚁的禁忌表等方面做了改进。

4.4.1 算法改进策略

文中从以下几个方面对基本蚁群算法进行了改进：

- ① 精英蚂蚁策略。在每次循环结束后，求出最优解，并将其保留，避免在迭代过程中将得到的较优解丢失，保证算法是收敛性；
- ② 对选择策略的改进，基本蚁群算法中，在蚂蚁搜索过程的起始阶段，有的路径上有蚂蚁走过，有的路径还未来得及被走过，而蚂蚁择路的策略是一旦有路径上的信息素，即信息量多于其他路径，它就以较大的概率选择该路径，这使得蚂蚁从搜索的一开始就以较大的概率集中在几条当前局部长度较短的路径上。为了避免算法一开始就失去解的多样性，在路径上信息素的积累量未达到蚂蚁的感觉阈限时，让蚂蚁忽视该刺激物的存在，只有当信息量的刺激趋于阈限时，蚂蚁才在信息量的刺激下趋于信息量较大的路径。这样蚂蚁在初始阶段就可以选择较

多的不同路径，以获得多样性的解。

第 k 只蚂蚁在节点 i 时按照式(4.7)选择节点 j

$$j^* = \begin{cases} \max \left\{ \tau_{is}^\alpha \cdot \eta_{is}^\beta \right\}, s \in allowed_k & \text{若 } r \leq p^0 \\ \text{依照概率 } P_{ij}^k \text{ 选择 } j^* & \text{否则} \end{cases} \quad (4.7)$$

$p^0 \in (0,1)$, r 是 $(0,1)$ 之间均匀分布的随机数, 由此增加了所得解的多样性, 一定程度上削弱了蚁群陷入局部最优的趋势。

③ 自适应的改变 ρ 值^[30], 当问题规模较大时, 由于信息量的挥发系数 ρ 的存在, 使那些从未被搜索到的信息量会减小到接近于 0, 降低了算法的全局搜索能力, 而且 ρ 过大时, 当解的信息素量增大时, 以前搜索过的解被选择的可能性过大, 也会影响到算法的全局搜索能力。通过减小 ρ 虽然可以提高算法的全局搜索能力, 但又会使算法的收敛速度降低; 因此, 可以自适应的改变 ρ 的值。 ρ 的初始值 $\rho(t_0)=0.6$; 当算法求得的最优解在多次循环内没有明显改进时, ρ 根据式(4.8)进行自适应的改变。

$$\rho(t) = \begin{cases} 0.95\rho(t-1) & \text{若 } 0.95\rho(t-1) \geq \rho_{\min} \\ \rho_{\min} & \text{否则} \end{cases} \quad (4.8)$$

其中 ρ_{\min} 为 ρ 的最小值, 可以防止 ρ 过小降低算法的收敛速度。

④ 对禁忌表(tabu)的改进

在基本蚁群算法中, 集合 $tabu_k$ 中记录了蚂蚁 k 目前已经访问过的节点, 蚂蚁在选择下一步要访问的节点时, 就从集合 $allowed_k = \{0, 1, \dots, N_1\} - tabu_k$ 中进行选择。在考虑车辆利用率的 VRP 中, 要考虑轧制单元计划容量的约束, 故对 $tabu_k$ 按照式(4.9)进行改进:

$$tabu = \{q_j + \sum_{i=1}^{n_{ck}} q_i \leq Q_{unit}, j \in allowed_k\} \quad (4.9)$$

其中, n_{ck} 表示已经排入第 k 个轧制单元中的板坯数; $\sum_{i=1}^{n_{ck}} q_i$ 表示已排入第 k 个轧制单元中板坯的轧制总长度。

⑤ 对信息素增量的改进

在基本蚁群算法中, 以蚂蚁 k 在一次循环中所走路径的总长度 L_k 为标准来衡量解的优劣程度。文中优化目标不仅考虑了路径的长度, 还充分考虑了车辆的利用率成本。模型的目标函数 $f = \min(a \times S + b \times \frac{1}{R_v})$ 。因此在信息素更新时, 信息素的变化量 $\Delta\tau$ 应该为 Q/f , 其中 Q 为常量。

⑥ 针对车辆额定载荷限制的改进

在基本蚁群算法中, 要求每只蚂蚁在一次循环过程中, 遍历所有节点, 形成一条完整的路径, 并将其作为结束一次循环的条件。由于文中考虑了车辆额定载

荷的限制，一辆车不可能一次为所有的顾客服务。当蚂蚁由于受车辆的额定载荷的限制不能遍历所有顾客节点时，就先让蚂蚁返回配送中心，选择另外一辆车来为剩下的顾客服务，在增加了运输车辆后，一只蚂蚁就可以遍历所有的顾客节点，形成一条满足约束的完整运输路径。

4.4.2 算法流程

改进的蚁群算法的流程如图 4.3 所示，主要步骤如下：

① 初始化相邻板坯间的惩罚值矩阵、启发式信息矩阵及信息素矩阵，为每只蚂蚁建立禁忌表(已经访问过的阶段列表)和可达表(下一步可以访问的节点列表)。惩罚值矩阵可以根据表 1~3 中宽度、厚度及硬度惩罚结构的数据计算得到；各条路径上的信息素初始值 $\tau_{ij}(0)$ 相等取 $1/(n \cdot L_{mn})$ ^[68]；各个路径上的启发式信息值 η_{ij} 取 $1/d_{ij}$ ；令迭代次数 $N_c = 0$ ，已访问的节点数 $count=0$ 。

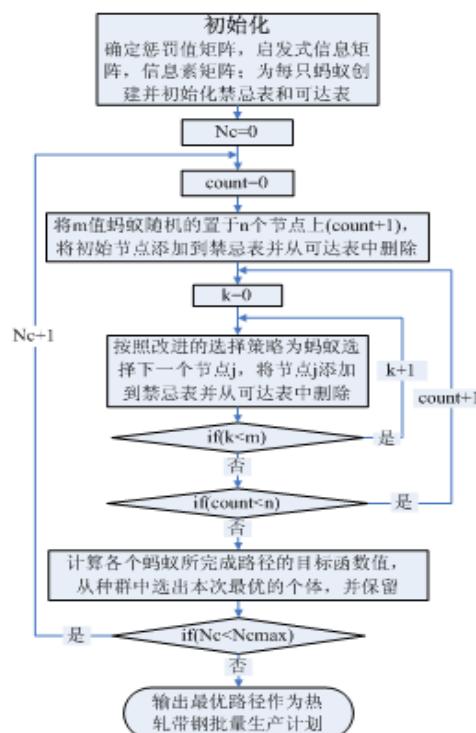


图 4.3 算法流程图

Fig 4.3The flow chart of algorithm

- ② 将 m 只蚂蚁置于从 N_1 个节点中随机选择的 m 个节点上；
- ③ 为每只蚂蚁按照改进的概率选择策略选择下一个要访问的节点，直到遍历所有的节点，形成一条完整的路径
- ④ 计算种群中各个蚂蚁完成的路径代表的热轧带钢轧制批量计划的目标函数值，比较选出本次迭代的最有路径，并保留；

- ⑤ 转到步骤②开始新的一次迭代，直到达到规定的最大迭代次数 $N_{C_{\max}}$ ；
- ⑥ 输出最后一次迭代的最优路径作为最优的热轧带钢轧制批量计划。

4.5 计算实例及结果

为了验证热轧板材生产计划模型及算法，以某钢铁集团热轧板厂的某一天投产的生产合同对应的 311 块板坯来编制热轧带钢生产批量计划，模型中的宽度正反跳、硬度和厚度跳跃的惩罚值如表 1~3 所示，根据该热轧板厂的实际情况，烫辊材的长度约束为 6km，主体材的长度约束为 54km，轧制单元计划的轧制容量为 60km，轧制能力波动为±1km；轧制同宽板材的长度约束为 5km。表 4.1-4.4 分别为带钢的宽度、厚度及硬度跳跃产生的惩罚值。

在模型的求解中，采用的参数如下：迭代次数取 50，种群规模 m 取 200，挥发系数的初始值 ρ_0 取 0.6，一条完整路径要释放的信息素量 Q 取 100，反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息在蚂蚁选择路径中的相对重要性的参数 α' 取 1^[69,70]，反映了路径上的启发信息在蚂蚁选择路径中的相对重要性的参数 β' 取 4；经过多次实验得知，模型目标函数中，路径总长度 S 的权重系数 a 取 0.6，轧制平均利用率倒数的权重系数 b 取 0.4 是取得的效果较好。仿真实验在 CPU 为赛扬 1.7G，内存为 256M 的台式机上进行，混合优化算法能在进化 50 代内(50 秒左右)收敛到优化解，即得到优化的热轧带钢轧制批量计划。仿真得到的结果如图 4.4 和表 4.5 所示。

表 4.1 板坯宽度正跳惩罚系数表

Table 4.1 Penalty coefficients of width obverse bounce between slabs

宽度跳跃(正跳)(厘米)	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 4.2 板坯宽度反跳惩罚系数表

Table 4.2 Penalty coefficients of width inverse bounce between slabs

宽度跳跃(反跳)(厘米)	惩罚点数
0~3	10
3~6	20
6~9	40
9~12	80
12~15	160
15 以上	∞

表 4.3 板坯厚度跳跃惩罚表

Table 4.2 Thickness penalty coefficients between slabs

厚度跳跃(厘米)	惩罚点数	
	上跳	下跳
0.0003 0.03	3	6
0.0303 0.06	7	14
0.0601 0.09	12	24
0.0901 0.12	18	36
0.1201 0.15	25	50
0.1501 0.18	33	66
0.1801 0.21	42	84
0.2101 0.24	52	104
0.2401 0.30	66	132
0.3001 0.45	99	198
0.4501 3.0	199	398

表 4.4 板坯硬度跳跃惩罚系数表

Table 4.4 Hardness penalty coefficients between slabs

硬度交换	惩罚点数
1	5
2	15
3	35
4	60
5	75

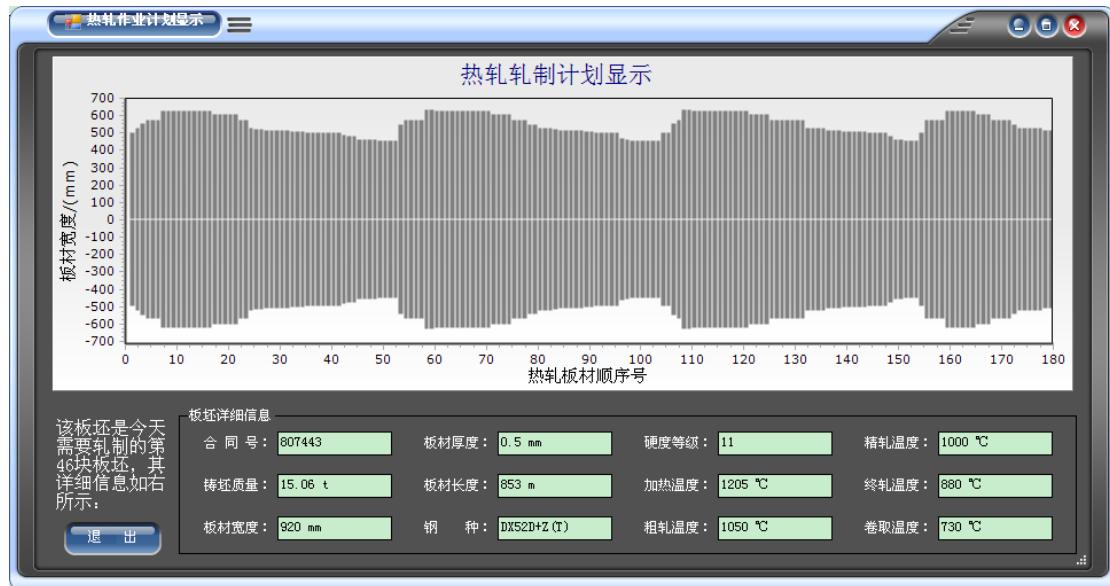


图 4.4 热轧轧制批量计划结果

Fig 4.4 The result of hot-rolling batch plan

图 4.1 为热轧带钢轧制批量计划结果显示图，窗口上部直观的显示轧制批量计划中带钢的宽度变化情况，当鼠标点击其中任意一块带钢在窗口下部会显示的该带钢的详细信息及轧制前连铸板坯的详细信息，如铸坯质量、带钢宽度、带钢厚度等。

表 4.5 热轧板材批量计划结果表

Table 4.5 The result of rolling planning with the algorithm

轧制单元计划编 号	板坯数	轧制公里数(km)	烫辊材		主体材		轧辊利 用率	轧辊平均 利用率
			板坯数	轧制公里数(km)	板坯数	轧制公里数(km)		
1	51	59.6346	6	5.9546	45	53.68	99.391	
2	52	57.4422	6	5.8886	46	51.5536	95.737	
3	51	58.2162	5	5.9126	46	52.3036	97.027	97.7235
4	51	57.894	5	5.7606	46	52.1334	96.49	
5	54	59.5422	5	5.898	47	53.6442	99.237	
6	53	59.0754	6	5.8554	48	53.22	98.459	

表 4.5 显示了由模型制定的热轧带钢轧制批量计划的详细信息，计划结果表明在满足带钢宽度、厚度、硬度等轧制工艺规程要求的前提下，计划中轧制单元计划的生产量很接近单元计划的轧制容量，单个轧辊的利用率均在 95% 以上，轧制批量计划中轧辊平均利用率达到 97.7235%，现场的生产实绩数据表明轧辊的轧制公里数为 55km 左右，则轧辊平均利用率为 91.667%。由此可见由系统编制的热轧生产计划优于现有生产计划系统编制的生产计划，采用优化系统后轧辊利用率可望提高 6% 左右。通过减少换辊次数，从而降低了轧辊更换成本。

综上，由热轧带钢生产计划优化系统编制的针对某钢铁集团热轧板厂实际生产数据的热轧带钢轧制批量计划的结果表明：在满足热轧轧制规程的和其他约束条件的前提下，轧制单元的带钢长度都接近轧制单元计划的最大轧制长度，这意味着按照该计划组织热轧生产能够充分发挥热轧的生产能力，减少换辊次数及成本，为企业创造更多的经济效益。

5 热轧带钢生产计划优化系统设计与实现

5.1 系统概况

热轧作为炼钢—连铸—热轧三大关键工序的最后一道工序，其生产计划的制定不仅关乎到热轧生产的合理、低成本实施，还会对炼钢、连铸计划的制定产生影响。随着用户对产品质量和交货期的更高要求，传统的依靠人工编制生产计划的方法越来越难以适应目前多品种、小批量、高要求的订货形势。因此，如何制定一个好的热轧生产计划是热轧生产管理甚至钢铁企业一体化生产管理的重要问题。

通过对国内某钢铁企业的调研得知，现有的信息化系统只是提供了计算机辅助操作支撑，现场计划人员利用计算机进行数据的录入、查询、统计等，其计划编制方法实质上还是手工操作，在现有系统上，计划人员每次编制的计划量较小(甚至不足一个轧制单元计划)，计划的优化功能很欠缺，极度耗费人力、物力。要想获得较好的计划，对计划人员的能力、经验的要求都比较高，并且工作量较大。

建立基于模型的热轧带钢生产计划编制与优化系统，是彻底解决热轧带钢生产计划编制问题的有效途径。计划员只需确定需要排定计划的生产合同数据，然后进行少量的参数设定，便可由系统自动生成优化的热轧生产计划，且可以生成多个生产计划供计划人员按照实际需要选择。此外，由于模型运行快，可快速的为现场计划人员的各种想法提供决策支持。

在对热轧带钢生产工艺及计划编制进行了一系列的探索研究后，开发了以热轧带钢生产计划编制为核心的热轧带钢生产计划优化系统，系统可以实现合同信息接收与管理，设备信息管理，生产计划快速编制、查询等功能。

5.1.1 系统支持环境

① 硬件环境：

CPU：Pentium4-2.0G 及更高微处理器

内存：256MB RAM

硬盘：40G 及更大容量

显示器：17 吋及更大，分辨率 1024×768，刷新频率 85Hz 以上

网卡：100M 以太网卡

② 软件环境：

操作系统：Windows 2000 或 Windows XP

软件平台：Microsoft Visual Studio 2005

数据库管理软件：SQLserver2000

图表绘制软件: TeeChart

③ 开发工具:

开发语言: Microsoft Visual C# 2005

数据库语言: 结构化查询语言(Structured Query Language, SQL)

5.1.2 系统开发技术

系统开发的前台工具为 Microsoft Visual Studio 2005 集成开发环境下的 C#语言。C#是 Microsoft 为.NET 平台量身定做的语言，是基于.NET 平台的最佳语言。它不仅能轻松的完成其他语言的程序设计任务，对高级程序设计任务的支持也吸引了大批的程序员，如网络编程、数据库连接、多线程、安全和保护特性等。C#是典型的面向对象的程序设计语言，系统开发中采用面向对象的编程方式，充分利用对象如窗体、按钮、图表等的属性，使得系统界面漂亮实用，同时编码模块化，通过类的封装、继承及多态三大特性简化程序设计，提高代码的可重用性和易维护性。

系统开发的后台数据管理采用 Microsoft SQL Server 2000 数据库管理系统。SQL Server 2000 作为一款优秀的数据库管理系统，提供了对数据库管理的强大支持，其图形化界面使数据库的管理更加简洁、灵活，同时又具有丰富的编程接口，为用户从事程序开发提供了更多的方便。数据的访问采用 ADO.NET 数据访问技术，适应于 C#20005 的.NET 平台，提高了程序的响应速度，保证了算法的运行效果。

5.1.3 系统结构

系统以热轧带钢生产日计划模型和热轧带钢轧制批量计划模型为中心，经过质量、工艺设计的用户合同信息、轧制规程参数、模型及优化算法的控制参数为输入，轧制批量计划为输出，并提供相应的查询、分析功能。系统的基本结构图如图 5.1 所示。

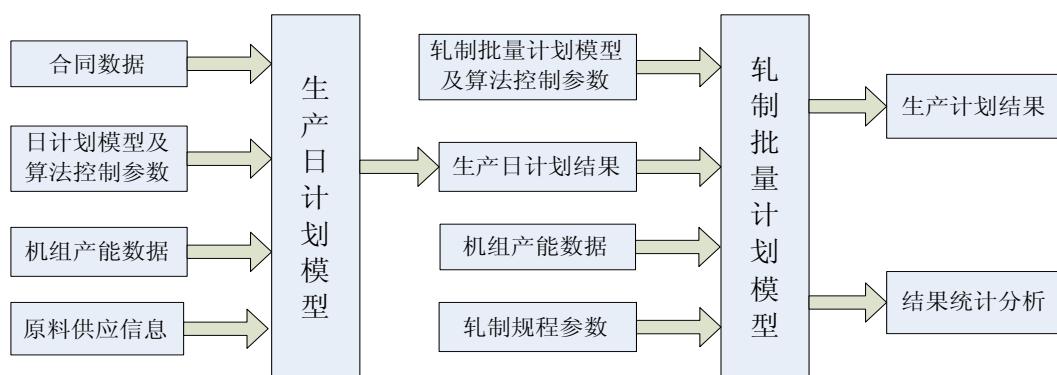


图 5.1 热轧带钢生产计划优化系统模型结构图

Fig5.1 The Model Structure of the Optimization System for Hot-strip Rolling Production Planning

图中的合同数据是指已经过质量、工艺设计的用户合同数据，机组产能数据在日计划和轧制批量计划模型中分别是指机组的日生产能力和平小时生产能力。

5.2 软件系统功能设计

5.2.1 软件功能结构

热轧带钢生产计划优化系统针对热轧板材厂生产计划制定的具体情况，代替人脑完成现场生产计划的编制，提高了计划编制效率及计划的合理性。系统主要功能划分图 5.2 所示。



图 5.2 热轧带钢生产计划优化系统功能结构

Fig 5.1 The Functional Structure of the Optimization System for Hot-strip Production Planning

5.2.2 软件功能描述

热轧带钢生产计划优化系统的主要功能模块如图 5.2 所示, 现对各个模块的功能进行介绍:

① 用户管理

用户管理模块主要实现对使用本系统的所有用户进行管理, 包括添加新用户, 修改用户信息及删除用户等功能。用户登录到系统时, 可以不同的用户名和密码登录, 不同的用户拥有不同的权限, 管理员具有最高权限, 可以添加新用户, 同时为其赋以相应的权限, 也可对用户的权限进行修改及删除已有的用户。

② 合同信息管理

合同信息管理模块主要实现接收用户合同数据, 并对接收到的用户合同进行修改、删除等操作。包括接收合同、添加合同、修改合同、删除合同及显示合同信息等功能。

接收合同: 接收经过质量、工艺设计的用户合同, 也可以将所有的合同信息显示给计划员。

添加合同: 添加临时需要生产的紧急用户合同。

修改合同: 修改由于现场生产状况及用户要求变更而需要改变的合同信息。

删除合同: 删除不能及时安排生产或其它原因需要取消生产的合同信息。

③ 设备信息管理

设备管理模块主要实现对现场生产设备的各种信息进行管理。包括设备产能信息、设备数量信息和设备状态信息管理等功能。

④ 生产计划编制

该模块是系统的核心模块, 主要实现热轧带钢生产计划的编制和优化, 包括热轧带钢生产日计划编制和热轧带钢轧制批量计划编制两个主要部分。系统以经过质量、工艺设计的用户合同为对象, 原料供应、机组产能、轧制规程等为约束, 先后经过热轧带钢生产日计划的编制及热轧带钢轧制批量计划的编制得到最终的热轧生产计划。

⑤ 计划结果显示

结果显示模块主要实现对已制定的计划信息进行显示及查询。包括热轧带钢生产日计划结果和热轧带钢轧制批量计划结果的显示和查询等功能。

⑥ 计划结果分析

计划结果分析模块的主要功能包括将制定的生产计划与企业现行的计划系统编制的计划及经过现场调度后实施的计划进行比较, 包括热轧日计划及轧制批量计划的结果比较。

5.3 数据库设计

5.3.1 数据库选择

数据库是模型建立、运行、结果统计分析过程中相关数据信息进行传递、存储等操作的重要场所，是模型运行和实现的基础^[71]。热轧带钢生产计划编制需要的数据信息众多，如何将这些数据以最优的方式组织起来，以满足系统的需要，也是系统开发过程中非常关键的部分。

根据数据库所使用的数据模型，数据可以分为层次性数据库、网络型数据库和关系型数据库。目前还出现了不少新的数据库系统，如面向对象数据库系统、分布式数据库系统及多媒体数据库系统等。由于关系型数据库有严格的数学理论基础，简单灵活，数据独立性高等特点，与其他数据库相比有突出的优点。数据库技术发展至今，绝大多数数据库仍为关系型数据库。目前比较流行的关系型数据库有：甲骨文公司的 Oracle^[72]、微软公司的 SQL Server^[73]以及 IBM 公司的 DB2^[74]等，我们采用典型的关系型数据库管理软件 SQL Server 2000 对系统开发过程中的数据进行管理。

SQL Server 2000 的特性

SQL Server 2000 作为一款优秀的数据库管理系统，具有如下特性：

- ① 易用性，安装、开发和使用都非常简单
- ② 极佳的适合分布式组织的可伸缩性
- ③ 用于决策支持的数据仓库功能
- ④ 与许多其他服务器软件紧密关联的集成性
- ⑤ 与 Internet 高度集成

结构化查询语言

每一种数据库管理系统都会提供一种程序语言，以便让程序员能编写程序来实现数据的访问和维护，而 SQL Server 2000 采用的程序语言正是结构化查询语言 (Structured Query Language)，简称 SQL。SQL 是一种用来访问关系型数据库的语言，具有简洁优雅的性质。它独特的提供了一种交互式的查询方法。一个用来定义表结构和控制数据访问的数据定义语言 (Data Definition Language, DDL)，及一个包含查询能力的数据处理语言 (Data Manipulation Language, DML)。

5.3.2 数据库设计

热轧带钢生产计划制定及结果分析所需的数据较多，将系统的数据库根据其功能的不同可分为：输入数据库、知识数据库、结果数据库及生产实绩数据库。如图 5.3 所示。

输入数据库：包括热轧生产计划编制的对象——生产合同数据，设备生产能力数据，设备状况信息等。

知识数据库：存储模型控制参数，如由于合同提前/拖期完成产生的惩罚值；算法参数，如遗传算法的交叉、变异概率等；轧制规程参数，如轧制单元计划的容量限制、连续轧制同宽度带钢的长度限制及带钢宽度、厚度、硬度跳跃产生的惩罚值等。

结果数据库：存储热轧生产日计划结果即每天需要投产的生产合同数据；轧制批量计划结果，如每块轧坯属于哪个轧制单元及在其在轧制单元内的轧制顺序等信息。

实绩数据库：存放现行计划编制系统制定的生产计划信息及经现场调度后执行的计划信息，用于与文中开发的热轧带钢生产计划优化系统编制的生产计划进行比较分析。

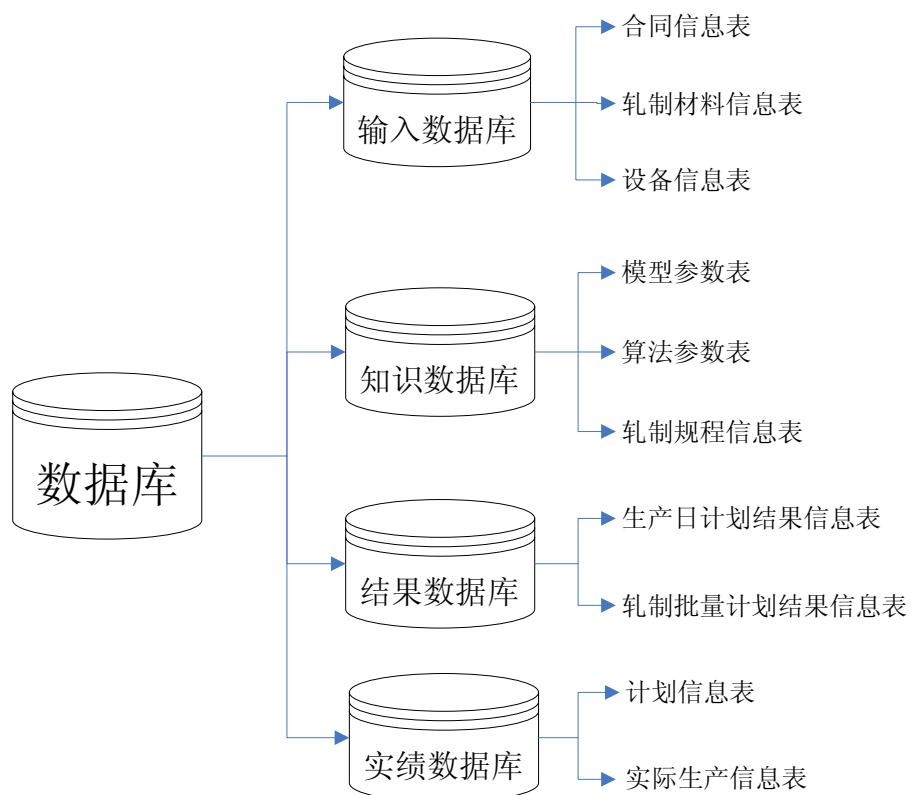


图 5.3 热轧带钢生产计划优化系统数据库设计

Fig 5.3 The database of the optimization system of hot-strip production planning

5.4 系统运行界面

文中的热轧带钢生产计划优化系统采用 Microsoft Visual C# 2005 开发，C#采用面向对象的编制方式，可以使用窗体、按钮、表格等的固有属性设计出漂亮、实用的是系统界面。下面对系统运行时的主要界面进行简单介绍。

系统的主界面如图 5.4 所示，主界面的菜单栏包括系统菜单、用户管理、合同

信息管理、生产计划编制等菜单项。在界面的下部状态栏显示了当前登录用户的用户名及权限。



图 5.4 热轧带钢生产计划优化系统主界面

Fig 5.4 The main interface of optimization system for hot-strip production planning

合同信息显示界面如图 5.5 所示，生产计划编制的对象为生产合同数据，生产合同数据是由经过质量、工艺设计的用户合同按照交货期、带钢尺寸规格及质量要求归并得到的。通过该界面计划员可以看到所有合同的详细信息。

ID	生产合同号	合同订货量	宽度	厚度	长度
1	807021	346.27	1000	1.2	11871
2	807022	1404.5601	1000	2	23238
3	807023	35.8	1050	2.5	1575
4	807024	366.72	1025	7.85	5666
5	807025	271.97	1025	7.85	4202
6	807026	1404.55	1050	1.95	42868
7	807027	54.3	1025	7.85	838
8	807028	1352.7	1050	2	59309
9	807029	1315.34	1050	2	56275
10	807030	307.77	1000	2.4	6727
11	807031	341.59	1250	3.2	10842

图 5.5 合同信息显示界面

Fig 5.5 The display interface of contracts information



图 5.6 热轧带钢生产日计划编制参数设置界面

Fig 5.6 The interface of parameters setting of hot-strip daily production planning

热轧带钢生产日计划编制界面如图 5.6 所示，该界面分为三个部分：计划周期设定、模型参数设定和算法参数设定。其中，热轧计划周期设定部分由计划员设定计划编制周期的起止日期，系统会自动从合同预选池中选出该计划周期内需要投产的生产合同数据，并将选中的生产合同的总数显示在该界面上，这些生产合同数据就是生产日计划编制模型的输入数据；模型和算法参数设定部分都给出了各个参数的默认值，这些默认值都是经过多次仿真实验得出的能使得生产计划较

ID	合同号	合同量	宽度	厚度	长度	钢种
1	807021	346.27	1000	1.2	11871	St12
2	807022	1404.5601	1000	2	23238	St13
3	807023	35.8	1050	2.5	1575	Q235
4	807024	366.72	1025	7.85	5666	B
5	807025	271.97	1025	7.85	4202	B
6	807026	1404.55	1050	1.95	42868	St12

ID	合同号	合同量	宽度	厚度	长度	钢种
244	807264	209.87	1160	3	7343	HP29
247	807267	118.3	1160	3	4228	HP29
262	807282	524.09	1000	1.2	22418	St12
307	807327	454.17	1000	1.4	15144	DX51

统计信息：第6天共有10个订单生产，总质量为：5116.46t，该天的产能为：7200t

图 5.7 热轧带钢生产日计划结果显示界面

Fig 5.7 The result display interface of daily production plan of hot-strip rolling

优的参数值。因此，一般情况下不需要修改。也就是说计划员只需确定需要排入计划的生产合同数据，即可由系统快速的编制优化的热轧带钢生产日计划。

热轧生产日计划结果显示界面如图 5.7 所示。该界面的上部显示热轧带钢生产日计划的详细信息，包括合同号，合同订货量，钢种，交货期及投产日期等。下部为查询窗口，在此输入要查询的日期，即可显示所有该日要投产的生产合同个数、总重量、该日的设备产能及合同的详细信息。



图 5.8 热轧带钢轧制批量计划编制模型参数设置界面

Fig 5.8 The interface of parameters setting of production lot planning for hot-strip rolling

图 5.8 为热轧带钢轧制批量计划编制的参数设置界面，选择需要编制轧制批量计划的日期及模型和算法的参数值，便可编制出该日的轧制批量计划，轧制批量计划信息主要包括该日需生产的带钢组成轧制单元的情况及其在轧制单元内的轧制顺序。

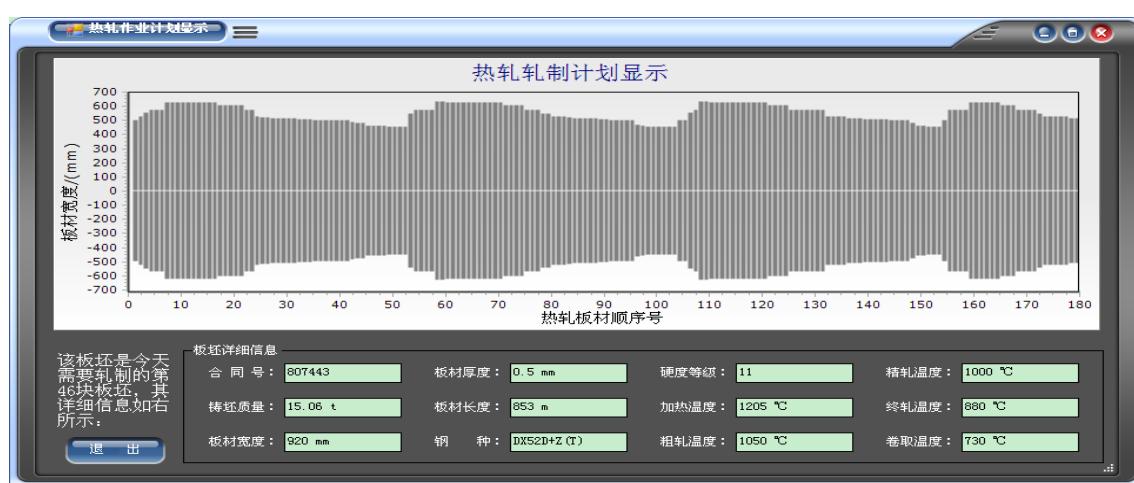


图 5.9 热轧带钢轧制批量计划结果显示界面

Fig 5.9 The result display interface of hot-strip lot planning

图 5.9 为热轧带钢轧制批量计划的结果显示界面，图的上部显示了批量计划中带钢的宽度变化情况，一个轧制批量计划中包含多个轧制单元计划。用鼠标选中其中的任意一块带钢即可在窗口的下部显示该带钢的尺寸规格、轧制时的温度值及轧制之前连铸板坯的详细信息。

5.5 系统运行效果

通过对现场一个月的生产数据的仿真实验研究，系统仅需计划员选定计划周期，进行简单的模型和算法参数设置即可快速的编制出热轧带钢生产日计划和轧制批量计划，并将计划编制的结果信息直观的显示给计划员。另外，可以通过系统的查询和统计功能对编制的计划信息进行查询和分析统计。利用系统的计划结果分析比较功能将由系统编制的生产计划与现行计划编制系统编制的生产计划从交货期及轧辊利用率等方面进行比较。比较结果表明由系统制定的热轧带钢生产计划在计划编制时间及计划优化效果方面都要优于现行生产计划编制系统。从而表明了系统的有效性，使用本系统可以为现场计划人员编制计划提供指导。

6 结论与展望

6.1 主要结论

热轧生产计划是一个多目标，多约束的复杂组合优化问题，是国内外钢铁界研究的热点。热轧作为炼钢、连铸、热轧三大关键工序的最后一道生产工序，其生产计划编制的好坏不仅关系到热轧生产的顺利运行，并且对炼钢和连铸生产的合理有序实施产生很大的影响。主要研究内容为炼钢—连铸—热轧一体化生产计划体系下的热轧带钢生产计划优化问题，主要结论如下：

① 将热轧带钢生产计划编制问题分解为热轧带钢生产日计划编制和热轧带钢轧制批量计划编制两个子问题，相对于直接由合同计划制定热轧带钢生产计划的单模型方法，可降低问题的复杂性和求解难度，并提高了计划编制的灵活性。

② 基于准时制的思想，建立以减少因订单提前/拖期完成而产生的额外费用为优化目标，满足原料供应及机组产能等为约束条件的热轧日计划优化模型；构建了遗传蚁群混合优化算法用于模型求解，该算法以遗传算法为主体在作为优化目标的适应度函数计算方式及种群优化时引入了蚁群算法进行改进，提高了算法的求解效率及解的质量。

③ 将热轧带钢生产计划编制问题归结为考虑车辆利用率的车辆路径问题，建立了热轧带钢轧制批量计划模型；采用一种改进的蚁群算法对模型进行求解，算法从路径选择策略，信息素更新方式等方面对标准蚁群算法进行改进。通过对建立的热轧带钢轧制批量计划模型的求解表明，改进的算法在搜索效率等方面明显优于标准蚁群算法。

④ 在对热轧带钢生产计划模型及算法研究的基础上开发了相应的生产计划优化系统。系统包括用户管理、合同信息管理、热轧生产计划编制及计划结果显示等模块，并具有合同、计划查询及结果分析的功能。

⑤ 以某钢铁集团热轧厂一个月的生产实绩数据为对象，采用系统依次进行热轧带钢生产日计划和轧制批量计划的制定，系统可以在 2 分钟左右编制出优化的热轧带钢生产计划。与现行系统制定的计划比较表明：按照该系统制定的计划组织生产可使由于提前/拖期交货产生的惩罚值减少 27.5%，轧辊利用率可望提高 5% 以上。即由本系统编制的计划在计划编制时间及计划优化方面都要优于现行的计划系统制定的计划，表明了系统的有效性。

6.2 后续研究工作的展望

虽然文中基于模型开发的热轧带钢生产计划优化系统在计划编制时间及计划

优化方面都优于现行的计划系统编制的模型，但是它仍然存在一些不足，今后对该问题应从以下两个方面继续进行研究：

① 该系统是一个离线系统，没有实际应用到现场，所以不能完全保证由系统制定的生产计划在现场能够顺利实施，因此需要增加系统的调度功能使得编制的计划能够适应现场的复杂生产环境。

② 文中没有考虑板坯库中连铸板坯的入库和出库管理，对板坯库的研究可以为热轧生产选择更加适合的连铸板坯且减少板坯库吊车的重复调运任务，降低生产成本。因此，有待对现场进行更加深入的调研，从而进一步改进本系统。

致 谢

时光飞逝，日月如梭，三年的硕士学习时光马上就要结束了，在本文即将完成之际，难忘的硕士生活也即将结束，回想这两年多的研究工作和学习历程，几多奋斗的艰辛，几多丰收的喜悦。再此，我谨向所有教育、关心、支持和帮助我的人们致以最诚挚的感谢。

首先，感谢我的导师郑忠教授，感谢郑老师在学习、生活等各方面都给予我悉心的指导和无微不至的关怀。特别是在科学方面，郑老师的指导极大的开阔了我的视野，在我困惑的时候帮我拨开了眼前的迷雾，给予我很大的启发和帮助。郑老师广博的学识，严谨求实的治学作风都使我受益匪浅，对我今后的学习和工作都会产生很大的影响。

感谢攀钢集团信息工程有限公司为研究工作提供数据支持，感谢攀钢集团公司生产计划部门及热轧板厂有关领导和同志对调研工作给予的大力支持和协助，在此对他们表示深深的谢意！

感谢325实验室的所有成员这三年对我学习和生活上的帮助和照顾！

最后，感谢我的家人多年来对我的支持和关心，你们的爱是我激励我不断前进的动力，祝你们健康、幸福！还要感谢我的女朋友李艳，谢谢你在这三年的时间里对我精神上的支持和生活上的精心照顾！

衷心地感谢在百忙之中评阅和参加答辩的各位专家、教授！

许文林

二〇〇九年四月 于重庆

参考文献

- [1] 朱俊. 热轧生产计划优化系统研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学硕士论文, 2007.
- [2] 孙福权. 炼钢—热轧一体化生产管理模型体系及算法研究. 沈阳: 东北大学博士论文, 1999.11.
- [3] 唐立新. CIMS 下生产批量计划理论及其应用. 科学出版社. 1999.
- [4] 钱晓龙, 唐立新, 刘文新. 动态调度的研究方法综述. 控制与决策, 2003, 16(2):141-145.
- [5] Liu H J, Dong Jian. Dispatching rule selection using artificial neural net works for dynamic planning and scheduling [J]. J of Intel Manuf, 1996, 7(2):243-250.
- [6] Jian A K, Elmaraghy H A. Production scheduling/rescheduling in flexible manufacturing [J]. Int J of Prod Res, 1997, 35(1):281-309.
- [7] Laguna M, Barnes J W, Glover F. Tabu search methods for a single machine scheduling problem [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1991, 2:63-74.
- [8] 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]. Journal of Applied Intelligence, 1993, 3:159-172.
- [9] 翁妙凤. Job-shop 调度问题的混合模拟退火进化规划[J]. 信息与控制, 1999, 28 (2): 81-84.
- [10] 张涛. 基于 MTO 管理体系的钢厂合同计划和热轧生产调度的方法研究[D]. 沈阳: 东北大学博士论文, 2000.
- [11] 李艳丽. 热轧带钢轧制计划编制算法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2007.
- [12] 朱奕. 热轧批量计划问题的分枝定界算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [13] Balram,S., Study of simulated annealing based algorithms for multiobjective optimization of a constrained problem, Computers and Chemical Engineering, 2004, 28:1849- 1871.
- [14] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron&Steel Complex. European Journal of operational Research, 2000, 124, 267-282.
- [15] 陈爱玲, 杨根科, 吴智铭. 轧制计划的优化模型及其算法的应用研究, 系统与仿真学报, 2006, 18(9), 2484-2487.
- [16] Peter Cowling, Optimization in Steel Rolling, In, Optimization in Industry, New York, John Wiley&Sons, 1995:55-66.
- [17] 李耀华, 王伟, 徐乐江等. 热轧生产轧制计划模型与算法研究 [J]. 控制与决策, 2005, 20(3):275-279.
- [18] Cheng X, Wan W, Xu X, Modeling rolling batch planning as a vehicle routing problem with

time windows, Computer Operations Research,1998,25(12): 1127-1136.

- [19] Lassila O,Mattia P,Syrjanen M et al.Applying knowledge-based techniques to the scheduling of steel rolling, In, Proceedings of IFAC Workshop in Expert Systems in Mineral and Metal Processing, Espoo, Finland, 1992, 103-108.
- [20] Arizono N,Saeki T,Kusumoto S,Expert system for scheduling rolling sequence in plate mill, Kobelco Technology Review, 1991, 10, 47-49.
- [21] 龙兆康,李伯虎. 用专家系统方法建立线性规划模型[J]. 系统工程与电子技术,1959,11:53-60.
- [22] 徐俊刚, 戴国忠, 王宏安. 生产调度理论和方法研究综述[J]. 计算机研究与发展. 2004, 41(02): 257-267.
- [23] Metropolis N,Rosenbluth A,Rosenbluth M et al. Equation of state calculations by fast computing machines, Journal of Chemical Physics, 1953, 21: 1087-1092.
- [24] Kirk Patrick S, Gelatt Jr C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing, Science, 1983, 220, 671-680.
- [25] Glover F, Future Paths for integer Programming and links to artificial intelligence, Computers and Operations Research, 1986, 13, 533-549.
- [26] Hopfield J, Tank D, 'Neural' computation of decision in optimization Problem. Biological Cybernetics, 1985, 52: 141-152.
- [27] Hopfield J, Tank D, Computing with neural circuits: a model. Science, 1986, 233, 625-633.
- [28] McClelland J, Rumelhart D, Explorations in Parallel Distributed Processing, Cambridge, MA: MIT Press, 1988.
- [29] 宋雪梅, 李兵. 蚁群算法及其应用[J]. 河北理工大学学报. 2006, 28(1), 42-45.
- [30] 李士勇等. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [31] 段海滨. 蚁群算法原理及应用[M]. 科学出版社, 2005.
- [32] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm optimization[A] Proc IEEE Int Conf on Neural Network[C], Perth, 1995, 1942-1948.
- [33] Ebehart R, Kennedy J. A new Optimizer using Particles wamtheory [A], Proc 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science[C], Nagoya, 1995, 39-41.
- [34] 李耀华. 热轧生产计划与板坯库优化管理模型及算法研究. 大连理工大学博士学位论文.
- [35] 张志勇. 宝钢热轧生产计划编制方法的研究与应用. 大连理工大学硕士学位论文.
- [36] 宋连成, 陈红林. 热轧日生产计划优化模型和算法仿真[J]. 计算机仿真, 2008, 25(7): 166-169.
- [37] 赵馨, 王伟, 潘学军. 一种并行粒子群算法及其在热轧计划中的应用. 计算机集成制造系统. 2007, 13(4): 698-703, 710.
- [38] 宁树实, 王伟. 热轧批量计划编制模型及其算法. 系统仿真学报. 2007, 19(3): 691-694.

- [39] 唐立新. 热轧带钢轧制批量计划的实例应用. 东北大学学报. 1999,20(3):267-270.
- [40] 李铁克, 郭冬芬. 基于约束满足的热轧批量模型与算法. 控制与决策. 2007,22(4):389-393,398.
- [41] 赵珺, 刘全利, 王伟, 牛长胜. 基于启发式和演化计算的热轧计划编制方法. 控制与决策. 2007,20(2).
- [42] 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. 控制理论与应用. 1999,16(2):209-212,216.
- [43] 唐立新. 轧钢厂的精轧工序轧制批量调度的优化模型. 东北大学学报. 1998,19(6):624-626.
- [44] 唐立新. 热轧调度并行处理策略的多旅行商模型. 东北大学学报. 1999,20(2):148-150.
- [45] 高慧敏, 曾建潮, 孙国基. 热轧带钢调度问题的混合并行策略. 西安交通大学学报. 2002,36(12):1291-1294.
- [46] 鞠文波. 热轧带钢轧制批量计划软件系统开发与研究. 大连理工大学硕士学位论文.
- [47] 王莉. CIMS 下的热轧生产批量计划的数学模型及解法. 鞍山师范学院学报. 1999,1(3):17-22.
- [48] 钱贤伟, 王梦光. 基于 VRP 模型的热轧生产批量计划及禁忌搜索算法. 1998 年中国控制与决策学术年会论文集: 737-741.
- [49] 刘士新, 宋健海, 周长山. 热轧带钢轧制批量计划优化模型及算法. 控制理论与应用. 2007,24(2):243-248.
- [50] 杜战其. 基于 JIT 的生产计划与控制方法研究[J]. 科技情报开发与经济. 2005, 15(19):134-136.
- [51] 金志勇. 基于遗传算法的车间调度系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2006.
- [52] 徐乐. 基于元胞自动机的钢厂车间天车调度仿真方法研究[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2007.
- [53] 陶泽. 基于 Petri 网和混合遗传算法的 JSP 优化调度[D]. 沈阳: 东北大学博士学位论文, 2006.
- [54] 徐宗本. 遗传算法基础理论研究的新近发展. 数学进展, 2000, 17(2): 78-82.
- [55] 翁妙凤. Job-shop 调度问题的混合模拟退火进化规划[J]. 信息与控制, 1999, 28 (2): 81-84.
- [56] D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, New York: Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1989.
- [57] D. Lawrence. Handbook of Genetic Algorithm. New York: Van Nostrand Reihold, 1991.
- [58] 王亚利. 解几类优化问题的遗传算法[D]. 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2008.
- [59] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Positive feedback as a search strategy[R]. Technical Report

n.91-016.

- [60] Bullnheimer B, Hartl R F , Strauss C. A new rank-based version of the ant system: A Computational Study[R]. Technical Report POM-03/97, Institute of Management Science, University of Vienna, 1997.Accepted for Publication in Central European Journal for Operations Research and Economics.
- [61] 曹承志,王楠.智能技术[M].北京:清华大学出版社,2004:167-189.
- [62] 李茂军.单亲遗传算法理论及应用[D].长沙: 湖南大学博士学位论文,2002.
- [63] 胡琨元.钢铁企业三层结构 CIMS 中的生产计划方法研究[D].沈阳: 东北大学博士学位论文,2003,8.
- [64] 郭庆新. 热轧生产计划模型、算法与系统. 沈阳: 东北大学硕士学位论文, 2006.
- [65] 付宇. 蚁群优化算法的改进及应用[D]. 上海: 上海海事大学硕士学位论文, 2006.
- [66] 刘市委. 基于改进蚁群算法的有时间窗约束的车辆路径问题研究[D]. 长春: 长春理工大学硕士学位论文, 2007.
- [67] 郭倩倩. 蚁群算法的改进及其在车辆路径问题中的应用[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2007.
- [68] 王颖, 谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究. 系统仿真学报. 2002,14(1):31~33.
- [69] 徐红梅, 陈义保, 刘加光等. 蚁群算法中参数设置的研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版). 2008(01): 7-11.
- [70] Ye Z W,Zheng Z B.Research on the configuration of parameter α 、 β 、 ρ in ant algorithm exemplified by TSP[J].Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2003,4:2106- 2111.
- [71] 何腊梅. 基于元胞自动机的炼钢生产物流与调度优化方法研究[D]. 重庆: 重庆大学博士学位论文, 2006.
- [72] Oracle 软件概述. http://www.oracle.com/lang/cn/database/product_editions.html. 2008-7-5.
- [73] SQL Server 2008 产品信息.<http://www.microsoft.com/china/sql/2008/overview.aspx>.
2008-12-1.
- [74] IBM DB2 Software. <http://www-01.ibm.com/software/data/db2/>.2008-4-5.

附录

A 攻读硕士学位期间发表学术论文情况

- [1] 郑忠, 许文林, 刘洪明等. 热轧带钢生产计划优化系统[C]. 中国钢铁年会.已录用