

大连理工大学

硕士学位论文

禁忌模拟退火算法在中厚板批量计划优化中的应用

姓名：郝源春

申请学位级别：硕士

专业：控制理论与控制工程

指导教师：王伟

20081201

摘 要

钢铁生产过程中的生产计划和调度问题是伴随制造企业整个生产管理过程的最重要的问题之一，是衡量企业竞争力的重要指标。此类问题大多可以归结为组合优化问题，有些已被证明是 NP-Hard 问题。

中厚板热轧计划编制是钢铁企业中厚板生产的一个重要环节，不仅关系到热轧生产，还关系到炼钢、连铸生产的进行。中厚板热轧批量计划的编制效果也直接影响到加热炉能耗、企业效益等诸多方面的因素。因此，以提高整个批量计划热装比为目的的优化操作是降低加热炉能耗、提高轧辊利用率、提高企业整体经济效益的一个重要手段。

论文研究了首钢中厚板热轧计划编制及优化的实际问题，分析了首钢中厚板热轧计划的相关规程约束，建立了批量计划优化模型，并在此基础上给出了求解该问题的有效的智能优化算法——禁忌模拟退火算法，该算法集合了禁忌搜索算法的快速性和模拟退火算法的寻优能力，为中厚板热轧批量计划优化问题在有限的时间内快速寻求全局最优解提供了一个很好的解决方法。论文简单介绍了中厚板热轧排产优化软件系统，具体描述了论文所研究的中厚板热轧批量计划优化子系统，该系统将热轧批量计划优化问题分为以轧制计划单元为单位的计划优化和以整个批量计划中的所有板坯为单位的板坯优化两部分，与经典的模拟退火算法求解该问题相比，不仅提高了整个批量计划的热装比，而且极大的缩短了优化时间，提高了优化效率。在针对大量中厚板实际数据的测试中取得了较好的效果，在一定程度上实现了企业节能降耗的目的。

关键词：中厚板；热轧；组合优化；热装比；禁忌表；模拟退火

Application of Simulated Annealing Algorithm Based on Tabu List in the Optimization of Heavy Plate Lot Plan

Abstract

Production planning and scheduling, which evaluates the competence of the steel company, is one of the most important problems in manufacturing enterprise. The problem is a combinational optimization problem with NP-Hard characteristics.

Heavy plate hot rolling planning is an important part of heavy plate production in steel enterprises, which affects hot rolling production and the process of steel making and continuous casting. The effect of hot rolling planning also has a direct influence on the energy consumption of reheat furnace and the profit of the whole enterprise. Therefore, the optimization aiming to improve the hot charging ratio of the whole lot plan is an important operation to reduce the energy consumption, make the best use of the rollers and improve the whole profit of the enterprise.

In this paper, we study on the practical problems in heavy plate hot rolling lot planning and optimization in Shougang Factory, analyze the related constraints of the heavy plate hot rolling plan, establish the mathematics model for the optimization of the lot plans, and propose an effective method-Tabu-SA to solve such a problem. The algorithm combines the rapidity of Tabu Search Algorithm and the optimization capability of Simulated Annealing Algorithm to provide an effective method to rapidly solve the optimization problem of heavy plate hot rolling lot plan within limited time. The paper briefly introduces the heavy plate hot rolling planning and scheduling system, which divides the optimization process of the hot rolling lot plan into two parts-one is the rolling plan optimization unit and another is the slab optimization unit. The system has obtained a higher hot charging ratio within less time than the single Simulated Annealing Algorithm. After the experiment on lots of practical data of heavy plates, the proposed method and the system prove to be effective and fulfill the purpose to reduce energy consumption of the steel enterprise.

Key Words: Heavy Plate; Hot Rolling; Combinational Optimization; Hot Charging Ratio; Tabu List; Simulated Annealing

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：遗传模拟退火算法在中厚板批量计划优化中的应用

作者签名：郝源春

日期：2008年12月22日

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目: 禁忌模拟退火算法在中厚板批量计划优化中的应用
作者签名: 解源春 日期: 2008 年 12 月 22 日
导师签名: 王伟 日期: 2008 年 12 月 22 日

1 绪论

随着全球性能源紧张和市场竞争日益激烈,钢铁工业正面临一系列严峻的挑战,由于产品的生命周期进一步缩短,交货期越来越短,生产工艺的革新速度越来越快,如何在满足市场对钢材的品种、规格要求多样化的同时,最大限度地降低生产成本,已成为钢铁行业重点考虑的问题。实践证明,要想节能降耗,提高产品质量,进一步缩短产品生产周期,这就要求企业具备灵活的生产计划和调度手段。

现代钢铁企业的发展趋势是从原来的劳动密集型向知识密集型转变,因此生产制造集成化和信息化已成为企业变革的焦点。钢铁企业为了提升综合竞争力和持续发展的原动力,纷纷采用先进的管理理念,利用现代信息技术、自动化技术,在较为完善的基础自动化基础上,陆续建成了不同程度的 CIMS,在整个行业技术改造和管理创新中起到良好效果,并造就了一批具有较强综合竞争力的企业^[1~3]。目前现代钢铁企业已经基本完成信息的集成化,主要表现在建立了 ERP/MES/PCS(企业资源计划、制造执行系统、过程控制系统)三层体系结构的,其功能涵盖了从订单接收到产品交货的所有生产销售环节。

生产计划是钢铁企业MES的核心内容。为了节能降耗,从上个世纪80年代起,国外大型钢铁企业致力于热轧节能技术的开发,国外大型钢铁企业致力于开发炼钢—连铸—热轧一体化生产,炼钢—连铸—热轧一体化生产计划和调度也成为了钢铁企业需要迫切解决的问题^[4]。近年来,国内一些大型钢铁企业在连铸热轧工艺上不断进行改进,取得了很好的节能效果,如攀钢引入连铸坯热装热送工艺,节能增产效果显著^[5]。为了最大程度的节能降耗,高效地安排热轧生产计划,以提高热装热送比和缩短板坯占库时间为主要目标的生产计划编制技术成为了研究的热点。

本文针对炼钢—连铸—热轧一体化生产模式下的中厚板热轧计划编制进行系统研究,以中厚板热轧计划编制为基础,进行以提高热装热比和缩短板坯占库时间为主要目标的中厚板热轧批量计划优化,给出中厚板热轧批量计划优化模型和求解算法。在本文的研究中,建立了一个分模块分阶段的多模型体系来完成中厚板热轧批量计划优化。由于中厚板热轧批量计划优化模型属于大规模、多约束的组合优化问题,难以用精确算法求解,本文采用改进的智能算法求解中厚板热轧批量计划优化模型,并通过实际生产数据验证了方法的有效性。

1.1 课题背景

本文的研究工作的课题来源于大连理工大学与北京西门子（中国）研究院共同研究和开发的基于首钢中厚板热轧生产线的“中厚板热轧生产计划与调度系统”。

现代钢铁企业的生产大都是以市场为导向，企业首先要根据接收到订货合同的性质和大小归并为生产合同，然后根据生产合同编制生产计划。在生产实施过程中，根据企业内外部的反馈信息不断地调整生产计划，并指导生产。计划编制—生产—反馈—调整计划的过程一直贯穿于企业生产活动的全部过程中。计划编制是企业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。在当前的市场经济环境下，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和调度^[6]。

从上个世纪六十年代开始，国外大型钢铁企业建立了集成化的计算机生产管理系统，实现了从原料进厂到成品出厂整个流程的计算机控制和生产管理的合理化、在线化、集成化，对生产过程中的物流和信息流进行综合管理，使物流与信息流尽可能同步，前后工序紧密衔接，保证物流的一贯性，可以充分提高钢铁生产效率，减少工序等待时间，降低物料和能源消耗^[7]。

我国钢铁工业经过四十多年的迅速发展，取得显著进步，中国已经成为名副其实的产钢大国，近年来钢铁产量一直位于世界第一，2006年又成为世界第一钢材出口大国^[8]。同时钢铁工业也逐步从资源密集、劳动力密集和追求大规模转向了知识技术密集、结构优化为特征的钢铁工业。目前，我国钢铁企业的生产计划管理系统还处于研究起步阶段，与世界发达国家还有比较大的差距，大多数中国钢铁企业开始意识到信息化的真正意义，并且逐步发现钢铁行业“产销一体化系统”巨大的实用价值。

由于我国大部分钢铁企业采用的传统的人机交互方式指导生产，这种计划方式已经无法很好的满足错综复杂的调度要求，更难达到提高热装热送比和缩短板坯占库时间的效果。随着计算机技术在钢铁企业中的普及应用，研究炼钢—连铸—热轧一体化生产计划编制及热轧计划的优化具有很强的迫切性。

钢铁企业生产计划由炼钢计划、连铸计划和热轧计划三部分组成。目前炼钢计划、连铸计划和热轧计划各自采用独立的编制已经达到了满意的效果。国际上都在积极研究将炼钢、连铸和热轧计划有机的结合起来形成炼钢—连铸—热轧一体化生产计划编制。国际上处于领先地位的冶金企业，如日本的新日铁、韩国的浦项、以及欧洲的阿塞洛都十分重视对炼钢、连铸、热轧的一体化计划编制技术的研究和开发。新日铁和浦项依靠

建立专门的仿真系统和管制中心进行炼钢、连铸、热轧的一体化计划编制。欧洲的阿塞洛则引进阿尔法计划生成器（Alpha Planner）和贝他计划生成器（Beta Planner）分别对炼钢、连铸的生产计划和热轧轧制计划进行优化^[9~11]。我国目前还处于炼钢、连铸、热轧一体化研发及初步应用阶段。国内的钢铁企业中，宝钢在的研究和推广方面取得了较大成功，在很长的一段时间内，一直在进行炼钢、连铸、热轧一体化计划方面的探索。本课题就是在这种国际国内形势下展开研究的。

1.2 中厚板热轧生产调度概述

随着钢铁行业MES的快速发展，钢铁企业生产管理的合理化、在线化、集成化，对于生产过程中的物流、信息流和能量流进行综合管理，使物流和信息流尽可能同步，前后工序紧密衔接，保持物流的一贯性，从而使局部工序的最优化转变为整体工序的最优化，可以充分提高大型设备的生产效率，减少工序等待时间，降低物耗和能耗，从而降低成本、提高产品竞争力。钢铁生产管理的理论与实践已经引起了国际上著名的钢铁计划与调度研究机构的重视，它是一个国际上极为关注的热点研究课题^[12]。

中厚板热轧生产是钢铁企业热轧生产的一个重要组成部分，中厚板热轧生产调度是钢铁生产调度中的一个重要环节，其生产过程具有高度复杂性，轧制计划的好坏直接影响产品质量、轧辊成本和生产效率等，因此热轧生产调度问题一直是钢铁企业最为关注的问题之一。

1.2.1 中厚板热轧生产工艺介绍

钢铁生产是一个非常复杂的制造过程，其生产工艺流程长、环节多、工艺复杂、物料处理量大。一个典型的现代化的钢铁联合企业的生产工艺流程如图1.1所示：

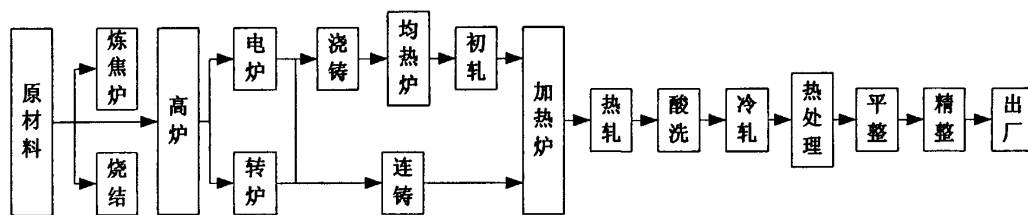


图1.1 钢铁生产工艺流程图

Fig. 1.1 The flow chart of steel production process

整个钢铁企业的生产工艺流程，从各工序间的紧密衔接程度，大致可分为四个主要工序：炼钢工序（Steel Making）、连铸工序（Continuous Casting）、热轧工序（Hot Rolling）和冷轧工序（Cold Rolling）。根据成品钢材的种类不同，生产工序和生产工艺也不尽相

同。一般说来，成品钢材分为五大类，分别为：线材、型材、板材、管材和金属材料，详细分类情况如图1.2所示。

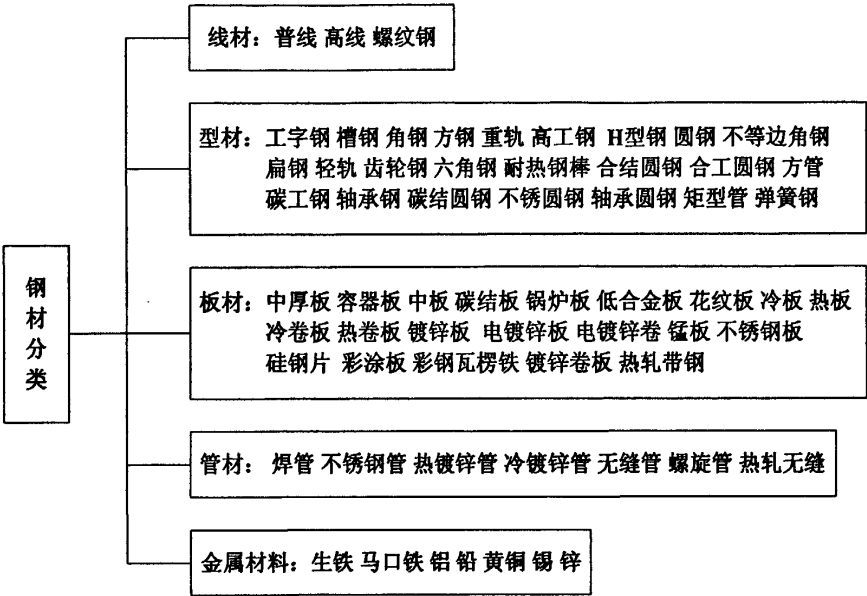


图1.2 钢材分类
Fig. 1.2 Steel classification

中厚板属于板材的一种。厚度在4.5~25.0mm的钢板成为中厚板，厚度在25.0~100.0mm的称为厚板，厚度超过100.0mm的成为特厚板。本文所依据的实际数据就是厚度范围在4.5~25.0mm的中厚板。在实际使用中，中厚板主要用于建筑工程、机械制造、容器制造、造船、桥梁等用途，不同用途的中厚板依据合同规定会在宽度、厚度、硬度、表面等级等规则要求上有所不同^[13-15]。

本文所研究的是中厚板的热轧工艺，中厚板热轧工序就是从连铸或者浇铸出板坯成形并切断之后经过加热炉到达热轧轧机的过程，热轧工序是关系中厚板生产过程能耗和生产效率的重要环节。近年来，国内外在中厚板热轧生产工艺上不断改进和创新。

中厚板轧机生产工艺方案有两种，一种是传统的常规中厚板生产线，采用单张钢板轧制方式；另外一种为卷轧中厚板生产线（炉卷轧机），是从上世纪80年代逐步发展起来的，即可单张钢板轧制，又可采用卷轧方式生产中厚板^[16]。

常规中厚板生产线适合生产高档次中厚板，由于坯料长度较短，一般在1300—4500mm之间，因此可以采用横轧方式生产中厚板，能够生产具有双向性能要求的钢材

品种。常规中厚板生产线运行成本相对较低,生产品种灵活,适合生产小批量、多品种产品。但是常规中厚板生产线成材率相对较低,老企业落后的生产线成材率为88%左右,现代化的生产线成材率可达到92%—94%,不适合生产薄而宽规格的中厚板产品。

卷轧中厚板生产线是用卷轧的方式生产钢板,通过增大坯料长度(最大18000mm),可大幅度提高单重,实现多倍尺轧制,减少单张钢板轧制的切头尾损失,提高综合成材率和生产效率,降低生产成本。该工艺可以生产薄而宽规格的中厚板产品,适合少品种、大批量生产。但是卷轧中厚板生产线由于采用卷轧生产工艺,连铸坯长度较长,不能实现横向轧制,因此不能生产具有双向性能要求的钢材品种。由于采用中等厚度板坯,连铸坯厚度相对较薄,压缩比受到限制,不能生产较厚规格的专用板,产品定位以市场容量较大的一般中厚板品种为主。一次性投资大,引进比高,备品备件暂时不能实现国产化,运行成本相对较高。

传统的常规中厚板生产线与卷轧中厚板生产线各有优缺点,鉴于我国仍有大量装备水平落后的中厚板轧机正在运行,并且每年约有30%的中厚板是由热连轧宽带钢轧机生产的,因此在改造、淘汰现有轧机的同时,还需限量建设现代化的宽厚板轧机及中厚板炉卷轧机,以逐步替代现有落后设备,提高国内中厚板轧机的总体装备水平。

近些年,我国的中厚板生产企业、设计、科研和制造等有关单位围绕中厚板生产的工艺、设备、电气和自动化控制系统等方面进行了大量的研究与开发工作。通过消化吸收引进技术,结合生产和市场的实际情况进行技术、科研的攻关,已经和正在利用国内自己的力量,建设一批具有国际先进水平的中厚板轧机(如表1.1所示)^[17],在中厚板生产、设备和自动化控制系统等各个方面都取得了重要的成果,积累了宝贵的经验。经过自主技术集成、集成中创新的模式,使我国中厚板轧制技术不断发展,逐步形成具有中国自主知识产权的现代化的中厚板生产、设备、自动化技术体系。

表1.1 我国建设中的中厚板轧机

Tab. 1.1 Heavy plate rolling mills under construction in China

序号	公司	轧机参数	序号	公司	轧机参数
1	宝钢	5000单机架(引进)	8	南钢	3500炉卷轧机(引进)
2	江西新余	3800双机架(引进)	9	辽宁北台	3500双机架
3	沙钢	5000单机架(引进)	10	安阳	3500炉卷轧机(引进)
4	湖南华菱	3800双机架(引进)	11	河北唐山	3000双机架
5	河南永兴	3500单机架	12	韶钢	3500炉卷轧机(引进)
6	首钢秦皇岛	4300双机架(引进)	13	天津	3000双机架
7	河北文丰	3000双机架			

1.2.2 热轧计划编制与计划优化

热轧是通过轧辊的挤压作用使高温板坯成为符合要求的钢卷或钢板。加工过程中要用到两类轧辊：工作辊和支撑辊，如图1.3所示。

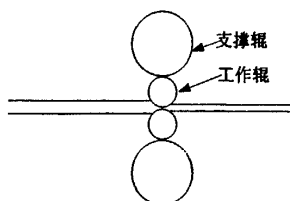


图1.3 热轧轧辊示意图

Fig. 1.3 The sketch map of hot roller

由于轧制过程中板坯对轧辊有磨损，所以需要及时更换轧辊。工作辊直接与板坯接触，受到的磨损相对较重，其更换频率要高于支撑辊。编制生产计划时，使用相同工作辊轧制的板坯称为一个轧制单元计划，多个单元计划组成一个轧制批量计划。热轧生产计划编制通常也称为批量计划编制。

一个完整的轧制单元由烫辊材和主体材两部分组成，单元中的板坯编排方式有经典编排方式和现代编排方式两种。经典编排方式一般称为“梯形轧制计划”，要求板坯在宽度上呈“双梯形结构”，而现代编排方式一般称为“自由轧制计划”，要求板坯在宽度上均匀变化，二者结构如图1.4所示。

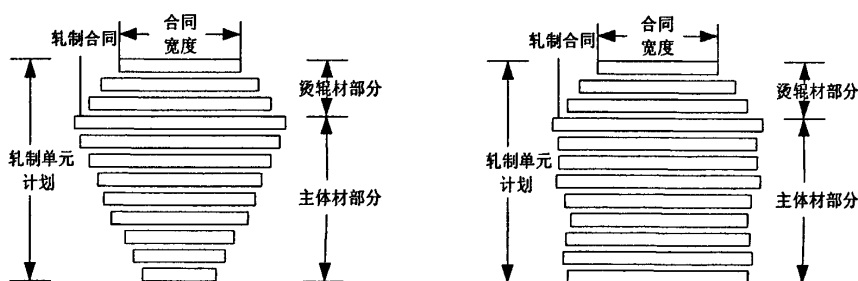


图 1.4 梯形轧制计划(左)和自由轧制计划(右)的组成结构

Fig. 1.4 Structures of Coffin Rolling Plan (left) and Free Rolling Plan (right)

热轧计划编制的任务就是编制出多个诸如图 1.4 所示的轧制单元组成的批量计划，以梯形轧制计划编制出的批量计划叫梯形计划批量计划，如图 1.5 所示，以自由轧制计

划编制出的批量计划叫自由轧制批量计划，如图 1.6 所示。热轧轧制批量计划编制过程就是根据轧制规程约束，对原料板坯进行选择、聚类 and 排序的过程，从而减少轧辊磨损，提高轧辊利用率，提高产品质量和生产效率。

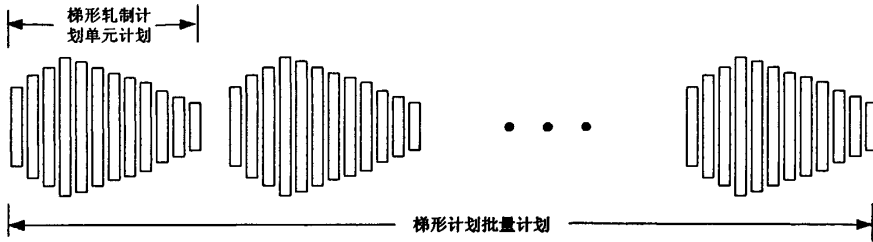


图 1.5 梯形计划批量计划示意图

Fig. 1.5 The sketch map of Coffin Rolling Lot Plan

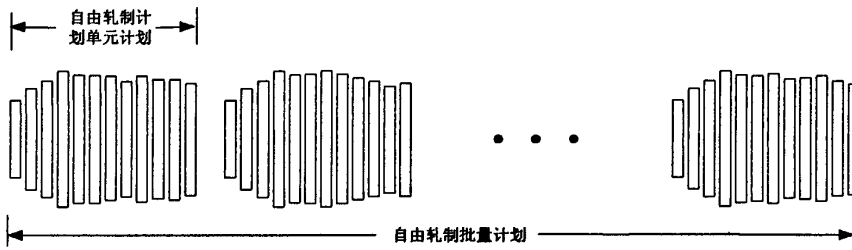


图 1.6 自由轧制批量计划示意图

Fig. 1.6 The sketch map of Free Rolling Lot Plan

中厚板热轧计划编制问题可描述为：有 n 块板坯编制成为 M 个轧制单元进行轧制， M 值不确定，使得计划单元中主体材板坯的宽度由宽到窄变化且变化平缓（梯形轧制计划）或者主体材宽度均匀变化（自由轧制计划），并且具有同宽定义的相邻板坯的长度不能超过一定限制，相邻板坯的厚度和硬度组的跳跃量尽量平缓，总轧制长度尽量大，但要小于轧辊的最大轧制长度，总重量也要在合同规定的最大最小重量范围之内。

中厚板热轧计划编制的过程中还要考虑不同板坯计划类型的搭配。由于板坯有多种不同的计划类型，而且不同计划类型的工艺约束也不尽相同，因为在进行计划编制的时候要考虑不同计划类型的板坯在混排的时候要符合混排规则，而且前后两个单元计划的首尾板坯的计划类型也要在工艺约束要求的范围之内。

中厚板热轧计划编制的另外一个重要指标就是板坯的热装条件，即额定冷装板坯不能编制到热装板坯的位置，而且所有板坯的计划轧制时间和切断时间之差要大于标准传摘时间，即大于从连铸机切断到热轧机之间的最小传送时间。

基于上述中厚板热轧计划编制的所有约束条件，可以发现，批量计划编制的一个重要目标就是最大化平均单元计划轧制长度，这是为了最大限度利用轧辊寿命，从而降低成本，增加利润。

在实际生产中，连铸与热轧之间的连接有 4 种不同的工艺：连铸坯直接轧制工艺 (HDR)，连铸坯直接热装工艺 (DHCR)，连铸坯热装工艺 (HCR) 和传统的冷装工艺 (CCR)，如图 1.7 所示。

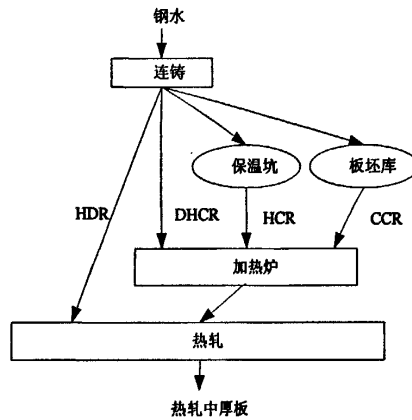


图1.7 连铸—热轧连接工艺示意图

Fig. 1.7 The sketch map of joining technology between continuous casting and hot rolling

以上4种工艺中只有HDR不需要经过加热炉，但由于HDR对设备和生产组织水平的要求过于严格，在生产中还很少得到应用。CCR、HCR和DHCR这3种在生产中常见的工艺都需要将连铸生产的板坯经过加热炉加热后才能进入热轧工序生产。HCR和DHCR在加热炉中加热的时间短，能耗低，而CCR需要在加热炉中加热的时间长，能耗高。

加热炉位于钢铁生产中连铸工序和热轧工序之间，是钢铁生产中的高能耗环节。当前，世界能源紧缺，节能降耗已成为钢铁工业发展的目标之一，如何在满足生产工艺的情况下，优化加热炉的生产调度，减少板坯在加热炉中的停留时间，对钢铁生产节能降耗显得尤为重要。

因此，为了使加热炉的能耗降到最低，因此要采用一定的优化方法提高批量计划的热装比，即提高HCR和DHCR在总板坯中的百分比，从而达到提高企业效益的目的。

由于在热轧批量计划中，任何一块板坯是 DHCR、HCR 或 CCR 不是固定的，是由板坯的温度来决定的，而在实际生产中，由于板坯从连铸机切断之后的降温速度是类似的，因此企业往往通过计算板坯的计划轧制时间和切断时间之差来判断该板坯是

DHCR、HCR 或是 CCR。因此，不同板坯在批量轧制计划中的不同位置会极大地影响整个批量计划的 HCR 和 DHCR 的数量，即影响整个批量计划的热装比。所以，本文主要研究的问题是对中厚板热轧批量计划的排产结果进行优化，通过对热轧批量计划的板坯次序进行调整从而达到提高热轧批量计划的热装比的目的。

1.3 热轧批量计划优化的必要性

我国钢铁工业每年能耗约占全国总能耗的10%，能耗高是我国钢铁工业发展过程中一直存在的问题^[18]。钢铁工业能源消耗结构中，煤炭占主导地位，其次是电力，其它能源占的份额很少。尽管近年来能耗指标不断降低，但是与国外先进指标相比，还存在很大差距。作为钢铁行业重要工序之一的热轧工序在钢铁生产流程中起着至关重要的作用，热轧工序的能耗也在整个钢铁企业能耗中占有着较大的比重，因此，如何降低热轧工序的能耗已成为国内外重点研究的节能降耗方向之一。

为了缩小与国际上的差距，在过去的十余年里，经过不断学习和改进，我国轧钢生产技术有了巨大的发展，开发了许多新技术。预计未来各种先进的节能降耗技术、工艺和设备将得到进一步的普及和推广应用。

(1) 连续化。近年来，轧钢生产内部多个工序的连续化生产发展迅速，轧钢技术向着大型化、高速化、节能化方向发展。采用板坯连铸直送轧制、薄板坯连铸连轧和带钢连铸冷轧，既能缩短整个钢铁生产流程，又能达到节能降耗的效果。

(2) 控轧控冷技术。通过精确控制热轧加热条件、轧制条件和冷却条件，采用蓄热式加热炉等节能设备，在较大范围内控制钢板的微观组织，得到不同性能、满足不同用途的热轧板卷。

论文研究的背景就是在当今世界钢铁行业技术突飞猛进发展的同时如何降低热轧工序能耗、节约能源的问题。位于热轧工序之前的加热炉占据着热轧工序能耗的大部分，因此，如何降低加热炉能耗成为降低热轧工序能耗的关键所在。

对于进入热轧工序的中厚板热轧批量计划，为了使其在加热炉的加热总时间最短，加热炉的能耗最低，就必须提高热轧批量计划中DHCR和HCR在整个批量计划中的百分比，即提高整个热轧批量计划的热装比。文章研究的目标就是通过有效的算法优化排产结果，提高整个批量计划的热装比。因此，中厚板热轧批量计划的优化便成为降低加热炉能耗、提高热轧厂效益的一个不可或缺的一环。

在我国实现由钢铁大国向钢铁强国转变的关键时期，钢铁工业走高效、节能的新型工业化道路已成为国民经济发展的必然要求。通过节能降耗，促进企业资源的综合利用，实现集约化生产经营，实现经济增长方式的转变，加快与国际接轨。同时提高我国钢铁

企业的国际市场竞争力，促进钢铁工业的可持续发展。因此，通过有效措施实现钢铁企业的节能降耗，势在必行。

1.4 本文主要内容

本文在对钢铁企业生产计划编制及优化充分调研的基础上，研究了中厚板热轧批量计划优化中存在的问题。中厚板热轧批量计划优化问题属于组合优化问题中的 NP-Hard 问题，本文提出并设计了用于求解该问题的禁忌模拟退火算法（Tabu-SA 算法），在针对首钢中厚板热轧生产计划调度系统中得到了成功应用。

本文主要章节内容安排如下：

第一章介绍了中厚板热轧生产工艺流程，描述了热轧批量计划编制和优化的方法，并提出了中厚板热轧的工艺约束，最后在当今世界钢铁行业普遍采取技术改进和有效措施进行节能降耗的大环境下，分析了中厚板热轧批量计划优化的必要性。

第二章提出了解决中厚板热轧批量计划优化问题的有效算法——禁忌模拟退火算法（Tabu-SA）的概念，并介绍了 Tabu-SA 的两个基础算法——禁忌搜索算法和模拟退火算法的基本原理以及优缺点，同时分析了 Tabu-SA 算法的特点和优越性。

第三章建立了中厚板热轧批量计划优化的数学模型，并介绍了利用 Tabu-SA 算法进行模型求解的具体步骤，分析了中厚板热轧批量计划的两步优化，最后简单介绍了优化系统的软件主体结构。

第四章介绍了中厚板热轧生产计划调度系统的系统功能和软件结构，并描述了系统数据库的设计，详细介绍了热轧优化子系统的软件程序设计和系统运行实例，最后展示了该系统对中厚板热轧批量计划进行优化的效果。

结论对本文的工作作了总结，并对进一步开展的工作进行了展望。

2 禁忌模拟退火算法概述

禁忌搜索算法和模拟退火算法都是典型的启发式算法 (Heuristic Algorithm)。启发式算法是相对于最优算法提出的, 早在 20 世纪 40 年代末期, 由于实际问题的需要和科技发展的状况, 人们已经提出一些解决实际问题的快捷有效的启发式算法。随着计算机技术的发展和广泛应用, 自 20 实际 80 年代以来, 以禁忌搜索算法、模拟退火算法、遗传算法、蚁群优化算法和人工神经网络算法等现代优化算法为代表的启发式算法得到了快速发展, 并广泛应用于对复杂的组合优化问题的求解, 这些算法求解 NP-Hard 问题的全局最优解, 具有一定的普遍适用性^[19]。正是由于禁忌搜索算法和模拟退火算法对于解决 NP-Hard 组合优化问题有着普遍的适用性, 本文对两种算法进行了研究, 并将其用来解决论文研究的实际问题。

2.1 禁忌搜索和模拟退火算法介绍

2.1.1 禁忌搜索算法概述

禁忌搜索算法^[20-23]是一种启发式迭代算法, 最初由Glover在1986年提出, 主要用于解决组合优化问题。禁忌搜索算法的基本思想是: 随机给出一个初始解作为当前解, 在当前解的领域中确定若干候选解; 如果某一候选解对应的目标值满足藐视规则, 则忽略其禁忌特性, 并用它替换当前解和全局最优状态 (best so far), 然后将它加入禁忌表, 同时更新禁忌表。如果不存在上述解, 选择候选解中的非禁忌的最佳状态为当前解, 同样将其相应的对象加入禁忌表, 并更新禁忌表。如此重复上述过程, 直至满足终止准则。

禁忌搜索算法是本文所研究和采用的算法的一个基础算法, 主要利用禁忌搜索算法的快速性来解决中厚板热轧批量计划优化这类组合优化问题, 问题的数学模型可简单描述如下:

$$(P) \begin{cases} \max f(x) \\ s.t.: x \in \Omega \end{cases} \quad (2.1)$$

式中, f 是目标函数, 即批量计划的热装比, Ω 是中厚板热轧批量计划优化的所有约束条件集合。禁忌搜索算法就用来解决这类数学模型的寻优问题。在本文中, 禁忌搜索算法的各项参数如下。

(1) 解的表示方法。本文将批量轧制计划中的轧制单元计划的排列顺序作为解的表示方法, 解表示为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 是由 n 个轧制单元计划组成的有

向序列, 序列排序不同, 解就不同, 其中 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代表了当前解下第 i 个轧制单元计划的单元名。

(2) 邻域的搜索。确定邻域的搜索方法是禁忌搜索算法的一个重要步骤, 本文采用互换法进行领域操作, 即随机交换两个不同的轧制单元计划的位置。如当前解为 $x^j = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 随机交换其中两个轧制单元计划, 比如交换 x_2 和 x_n , 之后的邻域解变为 $x^{j+1} = (x_1, x_n, x_2, \dots, x_{n-1}, x_2)$ 。

(3) 禁忌对象和禁忌表。禁忌对象是指那些被置入禁忌表中的变化元素, 禁忌的目的是为了尽量避免迂回搜索, 本算法将每次邻域搜索的当前解作为禁忌对象置入禁忌表。

(4) 禁忌长度。禁忌长度是禁忌对象在不考虑藐视准则的情况下不允许被选取的最大次数, 禁忌长度的选取与问题特征和经验有关, 它决定了算法的复杂度。本文考虑到中厚板热轧批量计划的实际情况, 选取的禁忌长度为6, 禁忌步长为3步。

(5) 藐视准则。在禁忌算法中, 可能会出现候选解全部被禁忌, 藐视准则可使某状态解禁, 以实现更高效的优化性能。如某个候选解被禁忌, 但它的目标值优于 “best so far”, 则解禁此候选解并更新 “best so far”。

(6) 终止准则。本文采用了指定迭代次数的终止准则。

在本文中, 禁忌搜索算法的步骤如下:

- (1) 给定算法参数, 随机产生初始解 x , 将禁忌表置空。
- (2) 判断终止条件是否满足, 如满足, 结束算法并输出最优结果。
- (3) 利用当前解 x 的邻域函数产生其邻域解, 从中确定候选解 y 。
- (4) 判断 y 是否满足藐视规则。满足则用此候选解 y 替代 x 成为当前解, 并将 y 置入禁忌表, 同时替换 “best so far” 状态, 转步骤(2)。
- (5) 判断候选解的禁忌属性, 选择候选解集中非禁忌对象对应的最佳状态为新的当前解, 同时将其相应的禁忌对象置入禁忌表。
- (6) 转步骤(2)。

2.1.2 模拟退火算法概述

模拟退火算法 (Simulated Annealing, 简称SA) 的思想最早是由Metropolis等于1953年提出的, 1983年Kirkpatrick等将其用于组合优化^[24-27]。模拟退火算法的基本思想出于物理退火过程, 因此我们首先简单介绍物理退火过程。

简单而言, 物理退火过程由以下三步组成:

(1) 加温过程。其目的是增强粒子的热运动，使其偏离平衡位置。当温度足够高时，固体将熔解为液体，从而消除系统原先可能存在的非均匀态，使随后进行的冷却过程以某一平衡态为起点。熔解过程与系统的熵增过程相联系，系统能量也随温度的升高而增大。

(2) 等温过程。物理学告诉我们，对于与周围环境交换热量温度不变的封闭系统，系统状态的自发变化总是朝自由能减少的方向进行，当自由能达到最小时，系统达到平衡态。

(3) 冷却过程。其目的是使粒子的热运动减弱并渐趋有序，系统能量逐渐下降，从而得到能的晶体结构。

由于物理系统倾向于能量较低的状态，而热运动又妨碍它准确落到最低态，采样时着重取那些有重要贡献的状态则可较快达到较好的结果。因此Metropolis等在1953年提出了重要性采样法^[28]，即以概率接受新状态。具体而言，在温度 t ，由当前状态 i 产生新状态 j ，两者的能量分别为 E_i 和 E_j ，若 $E_j < E_i$ ，则接受新状态 j 为当前状态；否则，若概率

$$P = e^{-\frac{E_j - E_i}{kt}} \quad (2.2)$$

大于 $[0, 1]$ 区间内的随机数，则仍接受 j 为当前状态，若不成立则保留状态 i 为当前状态，其中 k 为Boltzmann常数。当这种过程多次重复，即经过大量迁移后，系统将趋于能量较低的平衡态。这种重要性采样过程在高温下可接受与当前状态能量差较大的新状态，而在低温下基本只接受与当前能量差较小的新状态，这与不同温度下热运动的影响完全一致，而且当温度趋于零时，就不能接受比当前状态能量高的新状态。这种接受准则通常称为Metropolis准则。

基于Metropolis接受准则的优化过程，以一定的概率接受恶化解，可避免搜索过程陷入局部极小，并最终趋于问题的全局最优解。

因此，基于Metropolis接受准则的组合优化过程与物理退火过程存在一定的相似性，我们用表2.1归纳。

表2.1 组合优化与物理退火的相似对应

Tab. 2.1 The correspondence between combinatorial optimization and physical anneal

组合优化	物理退火
解	粒子状态
最优解	能量最低态
设定温度	溶解过程
Metropolis抽样过程	等温过程
控制参数的下降	冷却
目标函数	能量

本文利用了SA算法在求解组合优化问题中寻求最优的能力,将其引入到中厚板热轧批量计划优化的实际问题的解决中去。结合问题实际,本文中SA算法的步骤如下:

(1) 算法以一个任意初始解 x_0 开始, 给定初始温度 T_0 、终止温度 T_n 和降温速度 Δ_T , 计算初始解的目标函数值 $f(x_0)$;

(2) 进行随机抽样, 取出另外一个解 x_1 , 计算该解的目标值 $f(x_1)$, 计算相应的目标函数值之差:

$$\Delta f = f(x_1) - f(x_0) \quad (2.3)$$

(3) 如果 $\Delta f \leq 0$, 则新解 x_1 被接受; 如果 $\Delta f > 0$, 则产生 $[0, 1]$ 范围内的一个随机数 r , 并计算接受概率:

$$P = e^{-\frac{f(x_1) - f(x_0)}{T}} \quad (2.4)$$

其中, T 表示当前温度。如果 $P > r$, 则接受新解 x_1 , 并且 $x_0 = x_1, f(x_0) = f(x_1)$;

(4) 重复步骤(2)和(3), 直至满足内循环终止条件;

(5) 执行退火过程, 缓慢降低温度:

$$T = T * \Delta_T \quad (2.5)$$

(6) 重复步骤(2)到(5), 直到退火终止条件: $T < T_n$ 算法结束。

2.1.3 禁忌搜索算法和模拟退火算法的优缺点

模拟退火算法最早是针对组合优化提出的, 其目的在于:

- (1) 为具有NP-Hard的问题提供有效的近似求解算法;
- (2) 避免优化过程陷入局部极小;
- (3) 克服初值依赖性。

模拟退火算法为求解上述传统方法难处理的问题提供了一个有效的途径和通用框架,并逐渐发展成一种迭代自适应启发式概率性搜索算法,用以求解不同的非线性问题,对不可微甚至不连续的函数优化,SA能以较大概率求得全局优化解;具有较强的鲁棒性、全局收敛性、隐含并行性及广泛的适应性;并且能处理不同类型的优化设计变量(离散的、连续的和混合型的);不需要任何的辅助信息,对目标函数和约束函数没有任何要求^[29]。利用Metropolis算法并适当地控制温度下降过程,在优化问题中具有很强的竞争力。

理论上,模拟退火算法在某一温度下,只要计算时间足够长,就可以保证以概率1收敛于全局最优解。但在算法的实现过程中,由于计算速度和时间的限制,往往在优化结果和计算时间之间存在着矛盾,这是有待我们解决的,但模拟退火算法在解决中小规模组合优化问题上的优势是显而易见的。

模拟退火算法的主要优点是:不用求目标函数的偏导数及解大型矩阵方程组,即能找到一个全局最优解,而且易于加入约束条件,编写程序简单;更重要的是,模拟退火算法能以一定的概率接收目标函数值不太好的状态,即算法不但往好的方向走也可向差的方向走,这使得算法即便落入局部最优的陷阱中,理论上经过足够长的时间后也可跳出来从而收敛到全局最优解。

模拟退火算法的主要缺点是解的质量与求解时间长之间的矛盾。模拟退火算法虽然避免了参数估计的结果依赖初始模型的选取,但是容易导致解落入局部极小值的情况,为得到一个好的近似最优解,需要进行反复迭代运算,当问题的规模不可避免地增大时,缺乏可行的解决途径;而且SA算法的理论收敛条件过于苛刻而在实际应用中往往无法得到满足,使得有限计算量条件下算法性能对参数有着很强的依赖性,参数设定成了算法应用过程中的一个关键环节。

禁忌搜索算法通过记忆能力和期望准则达到搜索解空间的目的,禁忌算法的主要优点是避免了搜索中的迂回、重复,这就迫使算法探索新的区域,但是禁忌算法对初始解的依赖性较强。

由于禁忌算法具有灵活的记忆功能和藐视准则,并且在搜索过程中可以接受劣解,所以具有较强的爬山能力,搜索时能够跳出局部最优解,转向解空间的其他区域,从而增强获得更好的全局最优解的概率。但是禁忌搜索算法对于初始解的依赖性很强,一个好的初始解可使禁忌搜索算法在解空间中搜索到更好的解,而一个差的初始解则会降低禁忌搜索算法的收敛速度,搜索到的解也相对较差。

综上所述,模拟退火算法和禁忌搜索算法各有优缺点,对于本文所研究的中厚板热轧批量计划优化这种组合优化问题,虽然两种算法都可以应用,但如果想取得更好的优化效果和更快的优化效率,将两种算法相结合,为更好的解决该类优化问题提供了思路。

2.2 禁忌模拟退火算法介绍

综合模拟退火算法和禁忌搜索算法的优点,扬长避短,再结合热轧中厚板生产的实际情况,引入了一种新的算法——禁忌模拟退火算法,算法利用禁忌搜索算法避免重复、迂回搜索的能力,控制抽样邻域群体的范围,再利用模拟退火算法的简单易编程和寻优能力,实现全局快速寻优。

2.2.1 Tabu-SA 概述

禁忌模拟退火算法(简称 Tabu-SA 算法)是一种将禁忌搜索算法和模拟退火算法相结合的一种新型算法,该算法外循环执行退火,内循环采用禁忌搜索选取邻域解。Tabu-SA 很好地将模拟退火算法解决具有 NP-Hard 的组合优化问题的寻优能力和禁忌搜索算法避免重复迂回搜索的能力,扩大邻域搜索范围,防止陷于局部最优,为解决中厚板热轧批量计划优化问题提供了很好的解决途径。

在本文中,Tabu-SA 基本流程图如图 2.1 所示。

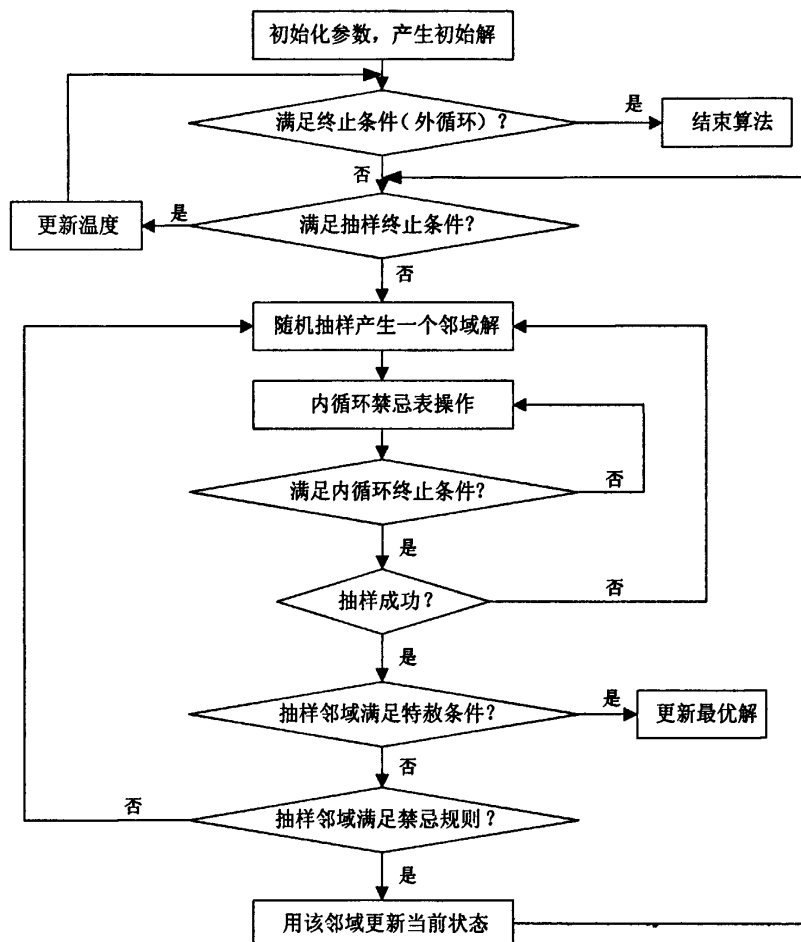


图2.1 Tabu-SA算法流程图

Fig. 2.1 The flow chart of Tabu-SA

2.2.2 Tabu-SA 求解步骤

本文研究的是中厚板热轧批量计划的优化问题，将批量轧制计划中的轧制单元计划的排列顺序作为解的表示方法，即解表示为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，其中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 是由 n 个轧制单元计划组成的有向序列，其中 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代表了当前解下第 i 个轧制单元计划的单元名，序列排序不同，解就不同。本文所研究的Tabu-SA算法的内循环采用互换法进行领域操作，即随机交换两个不同的轧制单元计划的位置，如当前解为 $x^i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，随机交换其中两个轧制单元计划，比如交换 x_2 和 x_n ，之后的邻域解变为 $x^{i+1} = (x_1, x_n, x_3, \dots, x_{n-1}, x_2)$ ，而且将每次随机搜索到的交换计划对放入禁忌表中，

禁忌表的长度为6（3对），禁忌步数为3步。外循环采用模拟退火算法执行退火操作。本文算法的具体步骤如下：

(1) 算法以一个任意初始解 x_0 开始，该初始解作为算法执行的运行解 x 、局部最优解 x_c 和全局最优解 x_b ；给定初始温度 T_0 、终止温度 T_n 和降温速度 Δ_r ，给定禁忌搜索的步长，读取热轧所有规则的相关参数；

(2) 进行随机抽样，取出另外一个解 x_i ，判断该解是否在禁忌表内，在禁忌表内则重新进行抽样取解，否则计算该解的目标值 $f(x_i)$ ，如果目标值优于局部最优解的目标值，则以当前运行解作为局部最优解，如果目标值优于全局最优解的目标值，则以当前运行解作为全局最优解；如果目标值差于局部最优解的目标值，则计算两个目标值之差的自然指数：

$$e^{-\frac{f(x_i)-f(x_c)}{T}} \quad (2.6)$$

其中， T 表示当前温度。如果该指数值大于0到1之间的一个任意随机数，则以当前运行解作为局部最优解，否则放弃该解，继续进行下次抽样；

(3) 如果内循环达到循环次数限制，则外循环执行一次退火：

$$T = T * \Delta_r \quad (2.7)$$

如果退火温度 T 达到终止温度 T_n ，则算法结束，全局最优解中的解就是本次算法的最终的最优解。

2.3 Tabu-SA 在中厚板热轧批量计划优化中的可行性分析

在工程技术、管理科学、自然科学等领域中，存在着大量的组合优化问题，这类问题的共同特征是需要复杂而庞大的搜索空间中寻找最优解或近似最优解，其求解时间随问题规模呈指数级增长，当规模稍大时就会因时间限制而失去可行性^[30]。因此，人们一直在研究一系列的搜索算法，以便能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识并且控制搜索过程，最终得到最优解。这一类问题称为组合优化问题，即通过对数学方法的研究去寻找离散事件的最优编排、最优分组、最优次序等。如何将生活中的组合优化问题转变为精确的数学模型描述，如何求得数学模型的最优解，这已经成为人们研究的焦点。

组合优化问题^[31]通常可以描述为：令 $\Omega = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为所有状态构成的解空间， $C(s_i)$ 为状态 s_i 对应的目标函数值，要求寻求最优解 s^* ，使得 $\forall s_i \in \Omega, C(s^*) = \min C(s_i)$ 。组合优化往往涉及排序、分类、筛选等问题，它是运筹学的一个重要分支。组合优化问题具有很强的工程背景，数学描述虽然简单，但最优化求解却很困难，由于大量的排列组合方式会引起优化过程的“组合爆炸”。因此，求解这类问题的关键在于寻求有效的优化算法。

本文所研究的中厚板热轧批量计划优化问题是典型的多约束组合优化问题，该问题具有高度复杂性，而且是具有NP-Hard的问题，因此无法通过常规寻优算法进行求解，必须采用某些智能算法。模拟退火算法就是针对于组合优化问题提出来的，对于解决具有NP-Hard的问题具有更大的优越性。理论上，模拟退火算法在某一温度下，只要计算时间足够长，就可以保证以概率1收敛于全局最优解。但在算法的实现过程中，由于计算速度和时间的限制，往往在优化结果和计算时间之间存在着矛盾，因此，在模拟退火算法中引入禁忌搜索算法，结合成本文所采用的Tabu-SA算法，为解决中厚板热轧批量计划的优化问题提供了一条很好的解决途径。

3 中厚板热轧批量计划优化模型及求解算法设计

3.1 中厚板热轧批量计划优化的数学模型

3.1.1 中厚板热轧批量计划优化的目标和工艺约束

本文以首钢中厚板热轧生产实际为背景，目标为：通过调整中厚板热轧批量计划中不同轧制单元的位置次序和调整不同轧制单元之间板坯的位置，提高整个批量计划中热装板坯 HCR 的比例，即提高热装比，同时还要保证整个批量计划中所有板坯的占库时间最小。

本文同时还研究了首钢中厚板热轧生产的工艺约束，约束条件总结如下：

(1) 板坯在硬度和厚度上要求平稳变化，即相邻板坯的硬度和厚度跳跃值不能大于最大跳跃值；

(2) 梯形计划板坯在宽度总体上呈递减变化，相邻板坯的宽度跳跃不能超过最大跳跃值，并且具有相宽度的板坯连续轧制长度不能超过某一限制，即同宽长度最大值；自由轧制计划唯一区别在于取消了宽度递减变化要求；

(3) 整个轧制单元总轧制长度应小于轧辊最大轧制长度，总重量要在合同规定的最大最小重量范围之内；

(4) 不同计划类型的板坯进行混排时要满足前后类型搭配和区间最小块数要求，而且前后两个计划也要满足邻近首尾主体材的计划类型搭配要求；

(5) 所有板坯要满足额定热装要求，即额定冷装CCR的板坯不能编制到热装HCR的位置，而且所有板坯的计划轧制时间和切断时间之差要大于标准传搁时间。

由此可见，本文所研究的问题可归纳为一个多目标、多约束的组合优化问题，正确地建模和选择智能优化算法，是解决本文所研究的实际问题的关键。

3.1.2 中厚板热轧批量计划优化的数学模型

通过分析中厚板热轧生产实际，以梯形轧制计划批量计划的优化为例，确定了中厚板批量计划优化的目标和约束条件，建立问题的数学模型如下：

$$\max \frac{\sum_{i=1}^n C_{fi}}{n} \quad (3.1)$$

$$\min \sum_{i=1}^n (t_{ri} - t_{ci}) \quad (3.2)$$

$$S. T. : \quad t_n \geq t_{ci} + T, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

$$t_n < t_{di}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

$$t_{hij} - t_{hcj} > T_{HCR}, j \leq n \quad (3.5)$$

$$F \min \leq \sum_{i=1}^n f_i \leq F \max \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} l_{ki} \leq l_{\max}, k = 1, 2, \dots, N_p \quad (3.7)$$

$$|H_{k(i+1)} - H_{ki}| \leq H_{\max}, k = 1, 2, \dots, N_p, i = 4, 5, \dots, n_k - 1 \quad (3.8)$$

$$|G_{k(i+1)} - G_{ki}| \leq G_{\max}, k = 1, 2, \dots, N_p, i = 4, 5, \dots, n_k - 1 \quad (3.9)$$

$$0 \leq W_{ki} - W_{k(i+1)} \leq W_{\max}, k = 1, 2, \dots, N_p, i = 4, 5, \dots, n_k - 1 \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^m l_{wi} \leq l_{w\max} \quad (3.11)$$

其中:

- n 表示所有板坯数量
- C_{fi} 表示第 i 块板坯的热装标记 ($i = 1, 2, \dots, n$), 1 为热装, 0 为冷装
- t_n 表示第 i 块板坯的轧制时间, 即板坯上轧机的时间
- t_{ci} 表示第 i 块板坯的切断时间, 即板坯从连铸机切断的时间
- T 表示传搁时间, 即板坯从切断到上轧机的最少传送时间
- t_{di} 表示第 i 块板坯的交货期时间
- t_{hij} 表示第 j 块热装板坯的轧制时间
- t_{hcj} 表示第 j 块热装板坯的切断时间
- T_{HCR} 表示热装板坯的最大切断时间
- f_i 表示第 i 块板坯的重量
- $F \min$ 表示批量计划的总重量最小值
- $F \max$ 表示批量计划的总重量最大值
- n_k 表示第 k 个轧制单元计划的板坯数
- N_p 表示批量中的轧制单元计划数
- l_{ki} 表示第 k 个轧制单元计划的第 i 块板坯的轧制长度
- $l_{\max}$ 表示轧机轧辊可轧制的最大长度

- H_{ki} 表示第 k 个轧制单元计划的第 i 块板坯的硬度
 $H_{\max}$ 表示相邻板坯的硬度跳跃最大值
 G_{ki} 表示第 k 个轧制单元计划的第 i 块板坯的厚度
 $G_{\max}$ 表示相邻板坯的厚度跳跃最大值
 W_{ki} 表示第 k 个轧制单元计划的第 i 块板坯的宽度
 $W_{\max}$ 表示相邻两个板坯的宽度跳跃最大值
 m 表示同一单元计划内具有相同宽度的连续板坯的块数
 l_{wi} 表示第 i 块同宽板坯的长度
 $l_{w\max}$ 表示同宽板坯轧制的最大长度

其中, 式 3.1 和式 3.2 共同构成了文章研究问题的数学模型的目标函数, 式 3.1 表示在整个热轧批量计划中热装板坯在全部板坯中所占的比例要求达到最大, 式 3.2 表示全部板坯的总传送时间, 即全部板坯的计划轧制时间与板坯切断时间之差的和要求最小; 式 3.3 到式 3.11 表示了文章所研究的热轧中厚板批量计划优化的全部工艺约束条件。根据该数学模型, 文章所讨论的问题就归纳成了有两个目标函数多个约束条件的组合优化问题。

3.2 中厚板热轧批量计划的两步优化及算法求解

本文所研究的系统对中厚板热轧批量计划的优化分为两步: 第一步是计划优化, 即以批量计划中的轧制单元为单位进行调整, 采用禁忌模拟退火算法进行寻优求解; 第二步是板坯优化, 即在计划优化最优解的基础上通过调整板坯的位置进一步提高整个批量计划的热装比。

3.2.1 计划优化求解步骤

计划优化部分采用本文所研究的禁忌模拟退化算法 (Tabu-SA), 以批量计划中不同轧制单元的排列次序作为算法的解, 算法内循环执行禁忌搜索, 通过随机扰动, 改变轧制单元的排列次序, 获得新的邻域解; 算法外循环执行退火算法, 通过多次迭代获得全局最优解。计划优化部分的具体实现步骤如下:

(1) 读取优化部分参数, 包括时间参数、算法参数、规则参数三部分。其中时间参数包括: 批量计划的开轧时间, 热装时间, 连铸到热轧的标准传搁时间, 换辊时间, 停机时间; 算法参数包括: 模拟退火算法起始温度, 终止温度, 降温速度; 规则参数包括: 宽度、厚度、硬度最大跳跃值, 区间最小块数, 计划类型搭配规则。

(2) 判断当前温度是否小于终止温度，若小于终止温度，则退出算法，优化结束，否则继续下步。

(3) 判断内循环次数是否到达最大次数限制，如果到达则执行一步退火： $T = T * \Delta_T$ ，转到步骤(2)；否则继续下步。

(4) 在邻域内执行一步禁忌算法操作，即随机取两个计划，判断两个计划号是否在禁忌表内，如果在的话重新进行随机搜索，否则将两个计划号放入禁忌表中，同时对禁忌表中已存在的禁忌对象执行步数减 1 操作，同时执行下步。

(5) 判断上步取出的两个随机计划是否满足首尾板坯计划类型搭配，不满足则进行状态回退，并转回步骤(3)进行下次邻域搜索；满足则交换两个计划的位置，并对交换后的批量计划的每块板坯重写轧制时刻表，然后执行下步。

(6) 判断批量计划的所有板坯是否满足热装要求，即：额定冷装 CCR 不能进入到热装 HCR 的时间范围内，而且每块板坯的计划轧制时间与板坯切断时间之差要大于标准传搁时间。如果不足热装要求，则转到步骤(3)进行下次邻域搜索；如果满足，则执行下步。

(7) 计算当前解中的热装块数 $count_1$ 和总闲置时间 $time_1$ ，同时计算最优解中的热装块数 $count_2$ 和闲置时间 $time_2$ ，判断条件：

$$count_1 > count_2 \parallel (count = count_2 \& \& time_1 < time_2) \quad (3.12)$$

如果条件成立，则用当前解覆盖最优解；否则计算接受概率：

$$P = e^{\frac{count_1 - count_2}{T}} \quad (3.13)$$

其中 T 表示当前温度，然后取 0~1 之间的一个随机数 ε ，如果 $P > \varepsilon$ ，则接受当前解，即用当前解覆盖最优解，并转到步骤(3)；否则进行状态回退，并转到步骤(3)进行下次邻域搜索。

计划优化部分程序的流程图如图 3.1 所示：

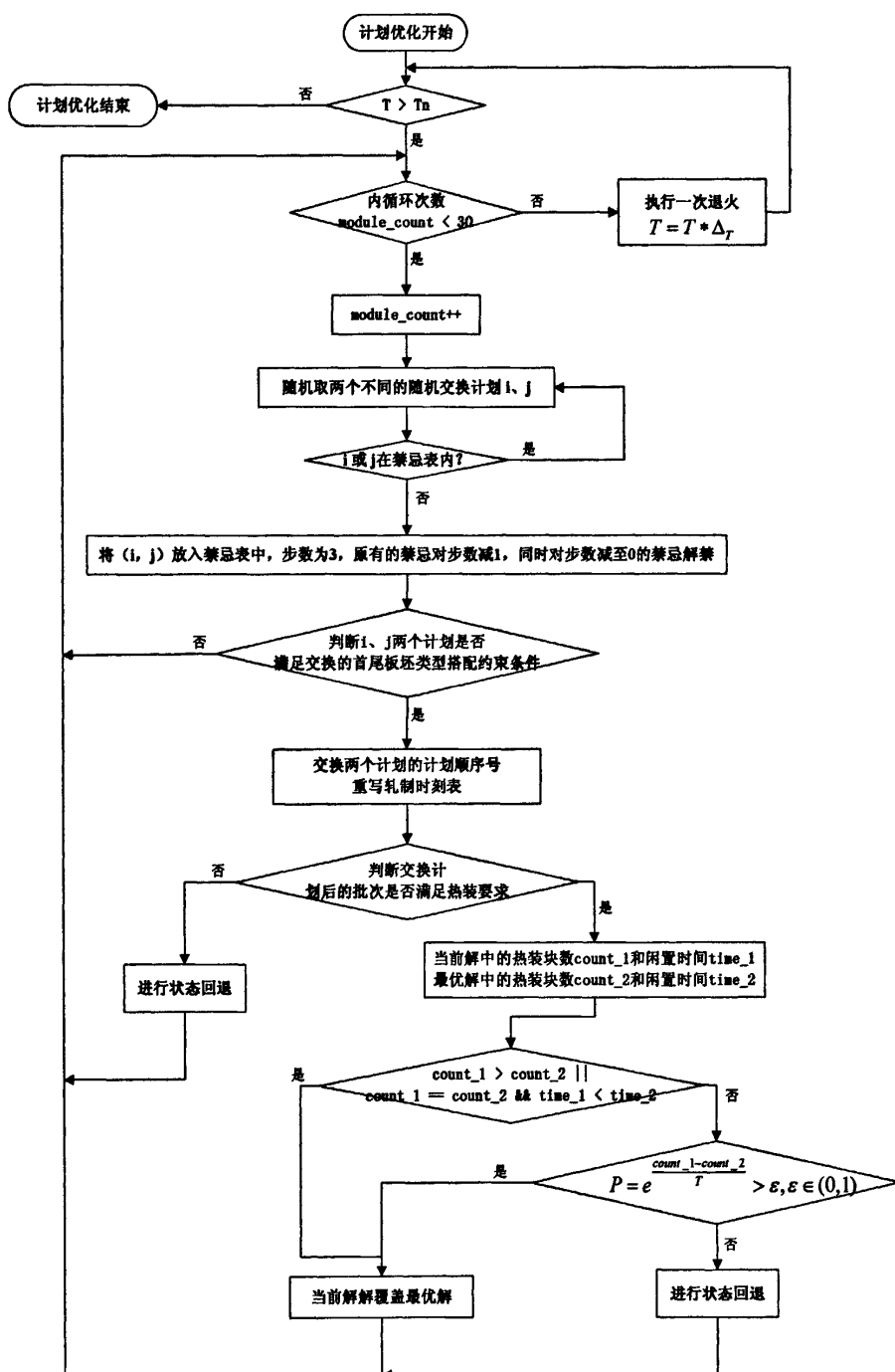


图 3.1 计划优化部分程序流程图

Fig. 3.1 The flow chart of plan optimization program

3.2.2 板坯优化求解步骤

板坯优化是中厚板热轧批量计划优化的第二步，是在计划优化部分获得最优解的基础上对结果进行进一步优化，以期望再次提高热装比。板坯优化部分以整个批量计划中的板坯为单位，寻找合适的板坯从后往前插，从而增加其由冷装 CCR 变为热装 HCR 的可能性，为再次提高整个批量计划的热装比提供可能。

板坯优化的具体实现步骤如下：

(1) 将上一步计划优化获得的最优解作为这一步板坯优化的初始解，为进一步提高热装比提供基础。

(2) 对整个批量计划的所有板坯从头到尾进行写热装标记：以每块板坯的计划开轧时间和板坯切断时间之差 Δ_1 以及整个批量计划的总开轧时间和板坯切断时间之差 Δ_2 作为区分标准 ($\Delta_1 > \Delta_2$)，若 $\Delta_1 < T_{HCR}$ (T_{HCR} 为用户定义的热装时间)，则该板坯为热装 HCR；若 $\Delta_2 > T_{HCR}$ ，则该板坯为“超 CCR”；如果 $\Delta_1 < T_{HCR}$ 且 $\Delta_2 > T_{HCR}$ ，则该板坯为“准 HCR”，即为往前插有可能变为 HCR 的 CCR。本部操作的目的是寻找整个批量计划中的所有“准 HCR”并标记出来，然后继续下步。

(3) 遍历所有“准 HCR”，如果遍历完，则板坯优化结束；否则对于当前“准 HCR”板坯，继续下步。

(4) 对于当前“准 HCR”板坯，从批量计划的头位置开始，一直到当前板坯的位置为止，依次寻找插入位置，如果未能找到，则转到步骤(3)为下一块“准 HCR”寻找插入位置；如果能找到插入位置，则继续下步。

(5) 获取当前插入板坯和插入位置的轧制单元计划号和轧制顺序号，更新之间所有板坯的轧制顺序号，并对所有板坯重新写轧制时刻表，并重新做热装标记，然后继续下步。

(6) 对执行抽出板坯和插入板坯操作的两个计划进行规则检查，包括：同宽最大长度规则、混排规则、热装规则，如果不满足任一规则条件，则转入步骤(3)为下一块“准 HCR”寻找插入位置；如果全部满足，则继续下步。

(7) 计算当前解中的热装块数 $count_1$ 和总闲置时间 $time_1$ ，同时计算最优解中的热装块数 $count_2$ 和闲置时间 $time_2$ ，判断条件：

$$count_1 > count_2 \parallel (count = count_2 \& \& time_1 < time_2) \quad (3.14)$$

如果条件成立，则用当前解覆盖最优解，然后转到步骤(3)；否则直接转到步骤(3)，继续为下块“准 HCR”往前寻找插入位置。

板坯优化部分程序的流程图如图 3.2 所示：

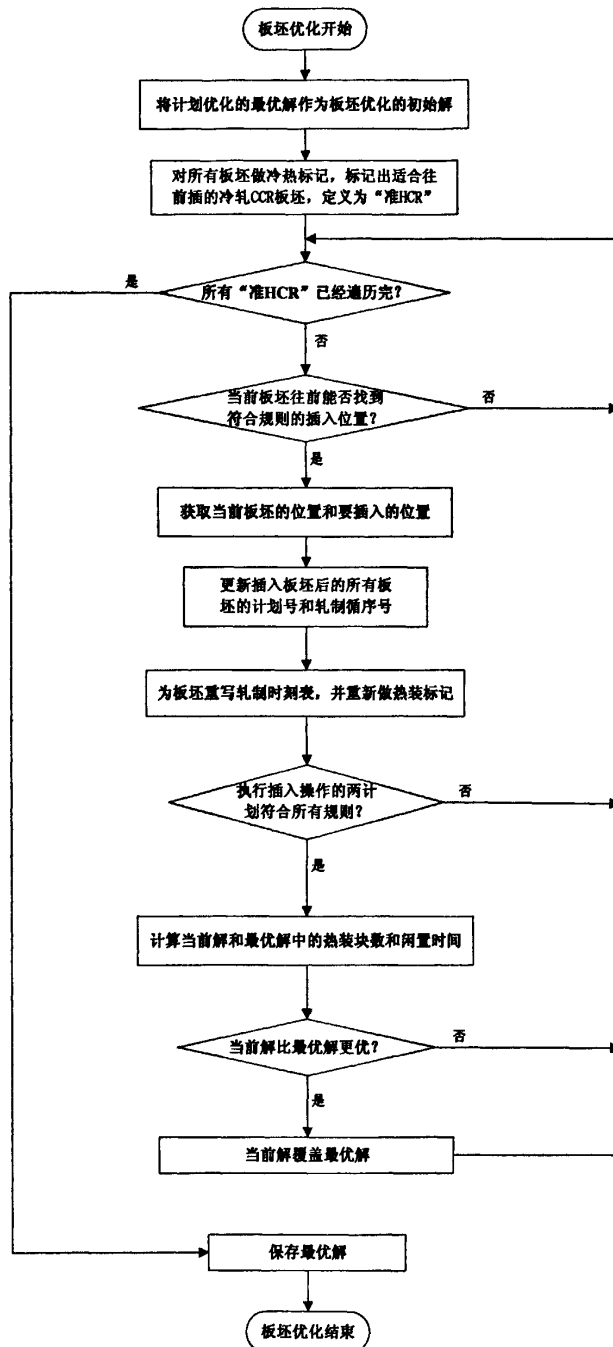


图 3.2 板坯优化部分程序流程图

Fig. 3.2 The flow chart of slab optimization program

3.3 算法程序设计

该算法是采用 C/S 架构软件系统的窗体类调用实现的,用户通过点击窗体控件调用优化类来完成对选定批量计划的优化操作。优化部分作为整个软件系统的子系统,应该设计好与主系统合理的接口。中厚板热轧批量计划的排产结果是优化子系统的入口数据,而优化之后的批量计划则是优化子系统的出口数据,因此,优化部分软件系统的设计位于二者之间,通过对优化函数的调用完成入口数据的优化操作。优化系统详细软件结构如图 3.3 所示。

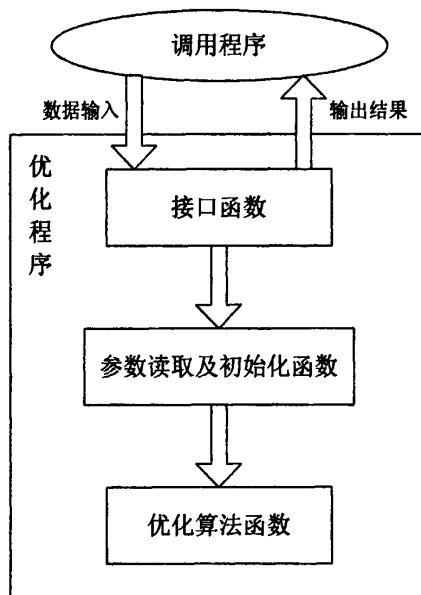


图 3.3 软件系统结构图

Fig. 3.3 Software system structure

整个优化程序设计到一个类文件里,其中包括了从参数读取到算法实现的全部优化过程,系统通过对该类进行实例化来调用优化功能。接口函数用来完成与主系统的交互,参数读取及初始化函数包含了优化部分所有涉及到的参数的读取和对入口数据的全部初始化操作,优化算法函数则调用计划优化和板坯优化两部分优化算法,对初始化后的数据进行优化操作,之后将具有更优目标值的数据作为结果进行输出,回馈到主系统,为用户操作提供优化结果。

4 中厚板热轧排产优化系统软件开发及应用效果

结合首钢实际需要,与北京西门子中国研究院共同开发了基于 C/S 架构的中厚板热轧排产优化系统。运行该系统的服务器端采用的是 Windows 2000 Advanced Server 操作系统,客户端需要奔腾 III 以上、256MB 以上内存的计算机。开发平台采用了 Microsoft 公司的 Visual Studio.NET 2005,编程语言采用 C#, C#是由 Microsoft 开发的一种新型编程语言,是一种类型安全的、现代的、简单的、并由 C 和 C++衍生出来的面向对象的编程语言,它牢牢植根于 C 和 C++语言之上,并可立即被使用者所熟悉。.NET Framework 将 Html、JavaScript、Vml、GDI+等多种技术有机地结合在一起,使开发更加简单。本系统前台采用中英双语可切换界面,数据库采用 Oracle 10g。

本系统着重解决中厚板热轧生产线的生产计划编制和优化问题,针对实际生产的需要,将该生产调度问题采用模型算法求解结合人机交互的方式:模型求解——人机交互干预——调度方案优化——人机交互干预的多阶段模式来获得应用合理的生产调度方案,提高了系统应用的灵活性和实用性。

4.1 系统功能介绍

该系统在 CIMS 三层体系结构 ERP/MES/PCS 处于中间一层,即制造执行系统 MES,它是衔接上层企业资源计划 ERP 和下层过程控制系统 PCS 的重要环节。该系统主要由四大功能模块组成:板坯建池预处理、轧制批量计划编制、轧制计划全局优化和人工干预。各模块的功能如图 4.1 所示。

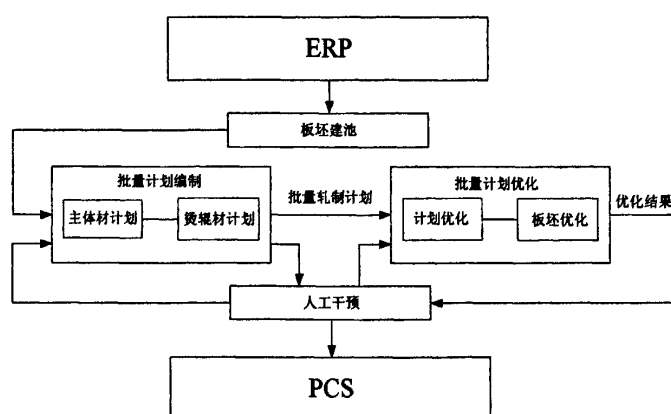


图 4.1 系统功能模块图

Fig. 4.1 The system function module map

系统主界面如图 4.2 所示。

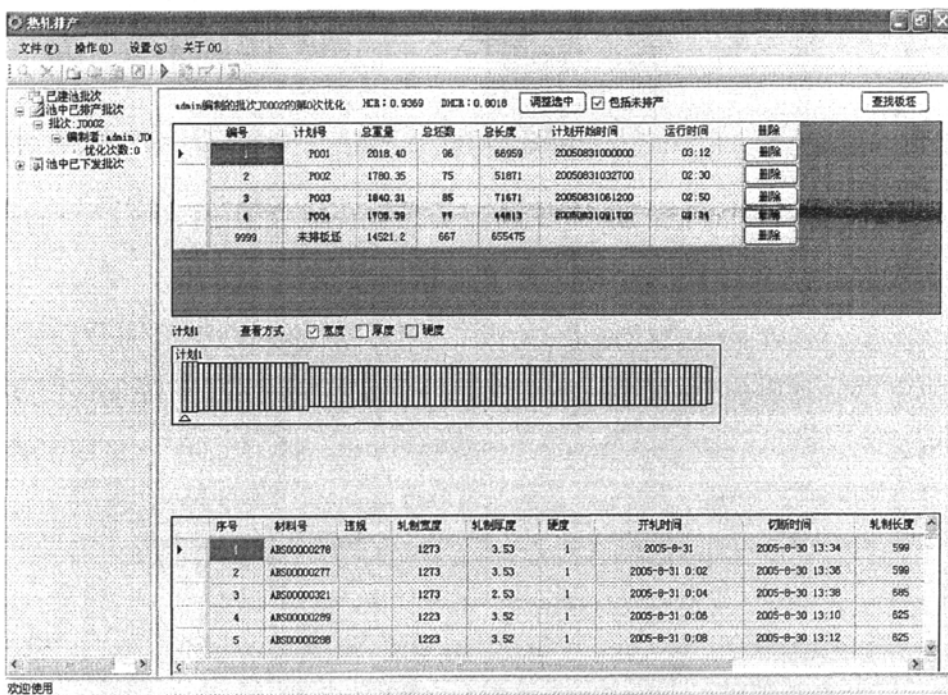


图 4.2 系统主窗口

Fig. 4.2 The main window of the system

(1) 板坯预计划建池：此功能可供用户选择按板坯交货时间优先级和按板坯切断时间优先级两种方式进行板坯建池预处理，通过人机交互设定使得中厚板轧制计划与轧机产能以及调度时间窗大小相匹配，可提高系统调度方案形成的灵活度。板坯预计划建池操作窗口如图 4.3 所示。首先通过一定规则查询需要的板坯，之后再将其导入池中，点击“结束建池”按钮完成建池操作。

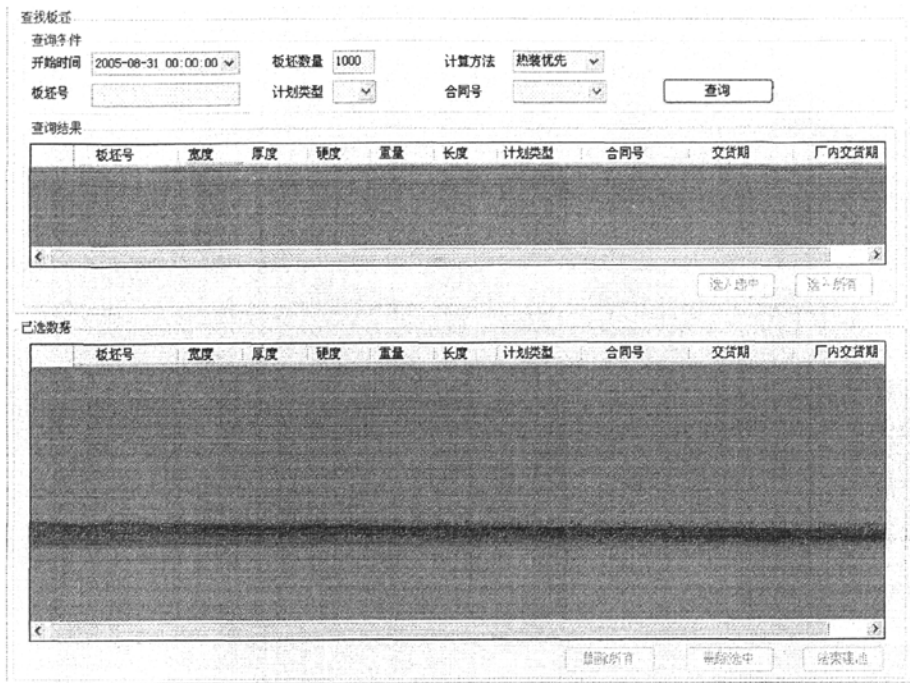


图 4.3 板坯建池窗口

Fig. 4.3 Slab creating pool window

(2) 轧制计划自动编制：此功能针对已建池板坯调用数学规划模型及智能搜索算法自动形成轧制批量生产计划（多个 RSQ）。此过程主要求解目标为在工艺约束条件下，每个 RSQ 内包含的板坯数量尽可能大。轧制计划自动编制窗口如图 4.4 所示。选择需要排产的批次，并设置计划排产的类型和约束条件，点击“开始排产”按钮即可完成计划编制操作。

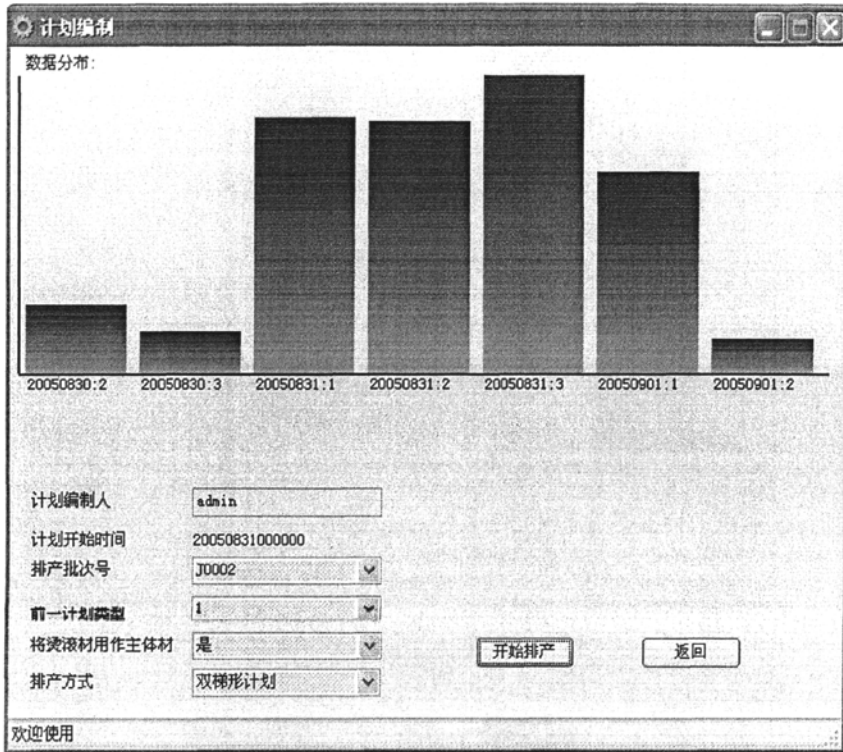


图 4.4 计划编制窗口

Fig. 4.4 Plan making window

(3) 批量计划全局优化：此功能针对已编制好的轧制计划以最大化全局热装比为目标函数，进行轧制生产计划自动优化。此过程主要包括轧制单元（RSQ）次序优化和板坯次序优化两过程。选择需要进行优化的批次，在菜单栏中选择计划优化功能菜单，即可弹出批量计划全局优化窗口，如图 4.5 所示。

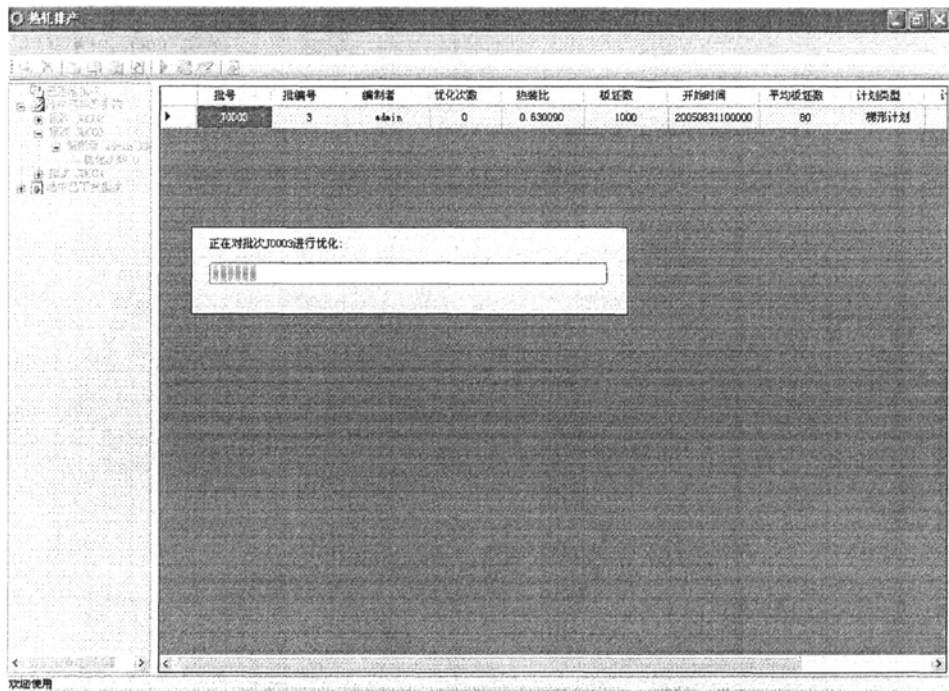


图 4.5 批量计划优化窗口

Fig. 4.5 Lot plan optimization window

(4) 人工干预：利用本系统友好的人机交互方式，针对轧制计划自动编制的结果和批量计划自动优化的结果，结合生产实际情况对模型求解进行人工干预，对经确认的调度方案进行下发生产。人工干预窗口如图 4.6 所示。用户可以通过手动拖动，在已排计划和未排计划的板坯中任意调整，如果拖动后出现违规现象，则在出现违规的板坯上显示红色边框。

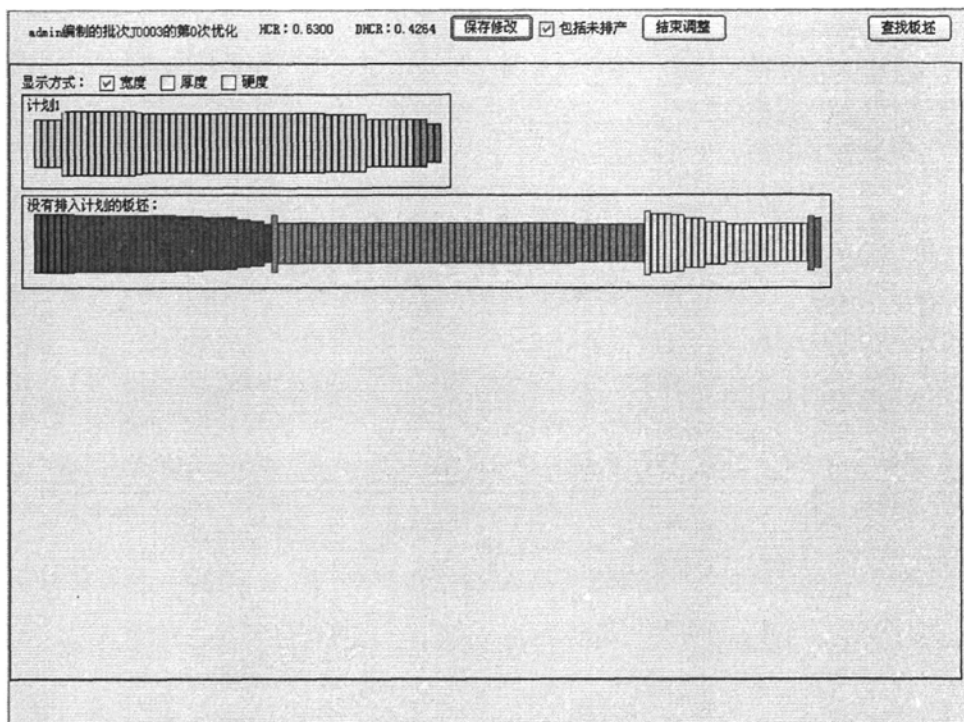


图 4.6 人工干预窗口

Fig. 4.6 Human-machine coordination window

4.2 数据库设计

热轧厂产销数据库管理全厂的生产和物流信息，它不仅包括用户订单、交库量、机组库存等信息，也包括了生产车间的实时数据，庞大的数据库量和数据的重要性使得对数据库的访问权限设置非常严格，以增强数据的安全性。如果产销数据库出现问题，将影响从原料供应、订单下达直至成品交货所有的环节，所以再排产时不能直接对产销库进行操作，而只能将排产所要用的信息读取到一个本地用户可以读写的数据库中进行操作，操作完毕，确认无误后，再用已经下发成为作业计划的数据去更新产销数据库，下达作业计划。为此，本系统设计了自己需要的数据库，系统登陆用户满足一定权限之后可以对数据库进行操作。

系统主要分为两大工作：排产和优化。因此，数据库要有针对于两个不同功能的相应数据库结构和表结构。排产数据库部分负责将产销数据库中的数据按照合同订单的方式读到排产池中，为排产程序进行排产操作服务；然后排产程序启动排产功能，将池中的数据排序成用户要求的批量轧制计划；该排产结果如果满足用户要求，可以直接写入

产销数据库中作为下发的作业计划，也可以作为优化部分的入口，准备进行优化功能。优化数据库部分负责将已排产的数据进行优化操作，用以提高批量轧制计划的热装比，其中排产的结果作为优化的入口，之后启动优化功能，当优化结果满足用户要求时，可以写入产销数据库中作为下发的作业计划。

排产程序、优化程序以及主程序的其他部分会涉及到一些规则约束和算法参数等条件，也会设计到用户登陆、用户管理等相关功能，因此还需要搭建一个生产数据库，它负责保存系统所需要的所有约束和算法的参数，还用来保存用户信息，并且该数据库实时地与排产数据库和优化数据库进行交互。

综合上面考虑到的所有因素，设计了如图 4.7 所示的数据连接库结构图。

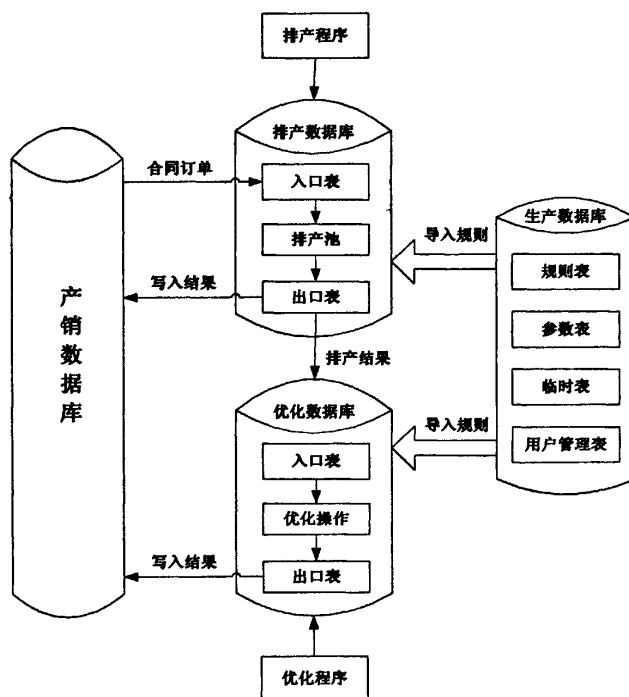


图 4.7 系统数据库连接结构图

Fig. 4.7 The connection structure map of system database

4.3 热轧优化子系统软件程序设计

4.3.1 程序主流程

中厚板热轧批量计划优化的程序部分分为四大部分，分别是：参数读取，计划优化，板坯优化，结果输出。程序的主流程以及对应的类名如图 4.8 所示。

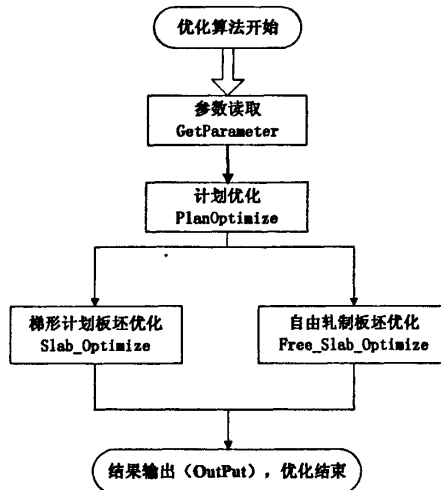


图 4.8 系统程序主流程

Fig. 4.8 The main flow chart of the system program

如图 4.8 所示，优化部分程序是从参数读取开始的，该步骤主要负责读取优化部分所需要全部参数；之后便是计划优化部分，该部分主要采用 Tabu-SA 算法进行寻优操作，获取一个初步的最优解；然后执行的是板坯优化部分，该优化部分以上步计划优化的最优解作为板坯优化的初始解，同时根据用户的不同需求，分为梯形计划和自由轧制两种轧制类型，二者在规则上唯一的不同点在于前者要求宽度平稳下降，后者要求宽度均匀变化而无下降要求，该部分主要利用规则的方法从后往前为板坯寻找插入位置，为进一步提高热装比提供可能；最后一部分是结果输出，将经过计划优化和板坯优化之后的最优解保存到数据库中，至此优化部分全部结束。

4.3.2 计划优化部分程序设计

(1) void PlanOptimize()

该函数是优化系统计划优化的主函数，主要采用 Tabu-SA 算法进行优化求解，程序结构和流程图如前面图 3.1 所示。下面主要介绍该函数调用的一些包括规则检查函数、结果计算函数、辅助操作函数等的主要函数的功能、结构和流程图。

(2) bool f_Request(int i, int j)

该函数的主要功能是利用轧制单元计划首尾计划类型搭配规则对两个轧制单元计划 i 和 j 进行规则检查，主要用于判断两个轧制单元计划是否可以交换。如果满足搭配规则，说明两个轧制单元计划可以交换，函数返回 `true`；否则，说明两个轧制单元计划不可以交换，函数返回 `false`。该函数的程序流程图如图 4.9 所示。

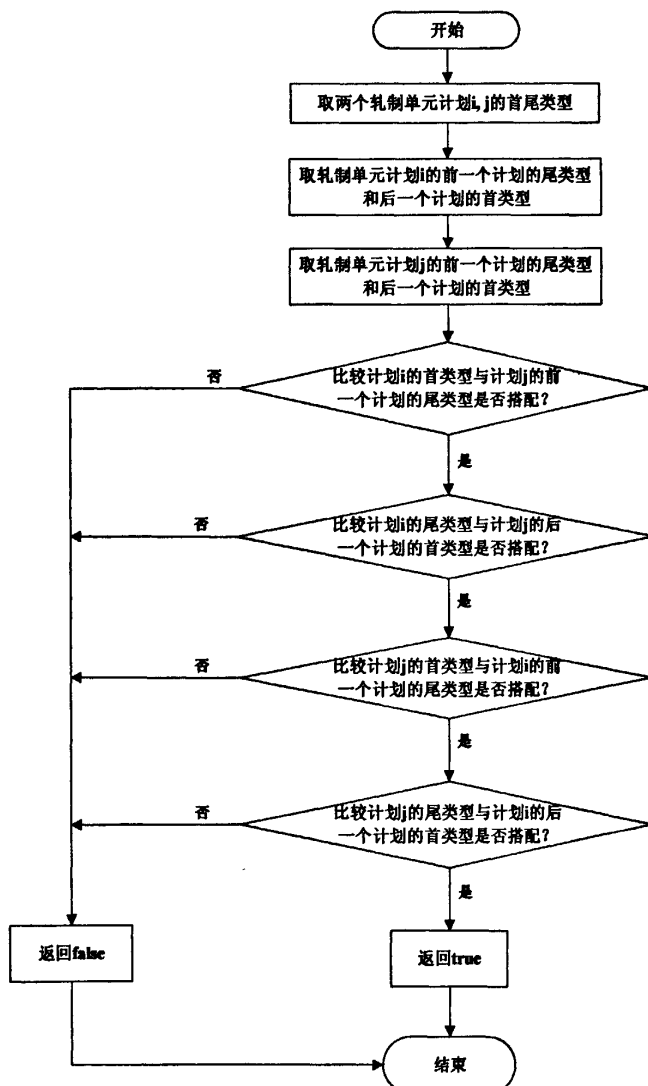


图 4.9 f_Request 函数程序流程图

Fig. 4.9 The flow chart of f_Request

(3) bool RuleForPlan(long plan_1, long plan_2)

该函数主要用来对轧制单元计划号在 plan_1 和 plan_2 之间的所有计划的所有板坯进行热装规则检查和停机规则检查, 如果满足规则, 说明两个计划交换后没有热装违规和停机违规出现, 函数返回 true; 否则, 说明两个计划交换后出现热装违规或者停机违规, 返回 false。

程序执行的步骤为: 规定轧制单元计划的所有板坯的计划轧制时间和板坯切断时间之差, 然后判断是否存在差值小于标准传搁时间, 如果存在, 则函数返回 false, 否则继续检查对于额定热装要求为冷装 CCR 的板坯是否有进入热装 HCR 时间范围之内的, 如果有, 则返回 false, 否则继续检查停机规则, 即检查所有板坯的计划轧制时间是否有落入停机时间范围的, 如果有则返回 false, 否则返回 true, 表明两个计划交换后所有板坯符合热装规则和停机规则。

(4) void f_GetOrder()

该函数的主要功能是为整个批量计划中的所有板坯编制唯一序号, 该序号保存在一个二维整型数组 order[][] 中, 其中数组第一维表示该板坯的轧制单元计划号, 第二维表示该板坯在该轧制单元计划中的轧制顺序号。该二维数组的值按照整个批量计划所有板坯从头到尾的先后顺序按照自然数的顺序依次标记。

(5) void f_StartRoll()

该函数的主要功能是以用户输入的总开轧时间为基准, 为整个批量计划的所有板坯写计划轧制时刻表, 其中要考虑到轧制单元计划之间的换辊时间和停机时间。该函数的程序流程图如图 4.10 所示。

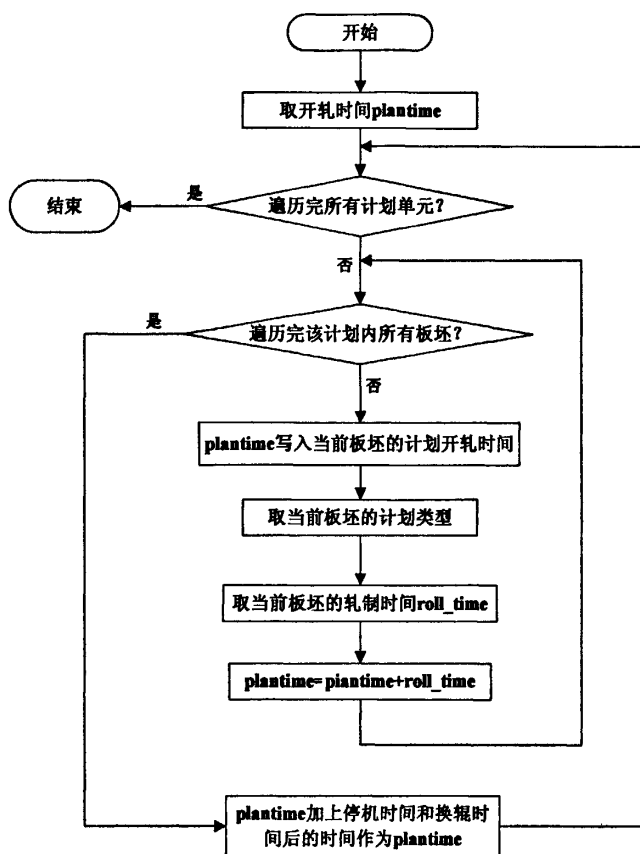


图 4.10 f_StartRoll 函数流程图

Fig. 4.10 The flow chart of f_StartRoll

(6) void ExchangePlanSequenceNo (int i, int j)

该函数的主要功能是交换两个轧制单元计划 i 和 j 的计划号，表示将两个轧制单元计划的位置交换，从而完成计划交换操作。

(7) void BackPlanSeqNo (int i, int j)

该函数的主要功能是将原先交换后的两个轧制单元重新换回到原先的位置，表示二者交换后发生违规，交换操作执行不当，位置换回。

(8) void Result ()

该函数的主要功能是计算当前解中的热装块数和总闲置时间，将其与最优解中的结果相比较，如果结果优于最优解，则当前解覆盖最优解，如果劣于最优解，则使用模拟退火算法的接受概率去决定当前解的接受与否。该函数的程序流程图如图 4.11 所示。

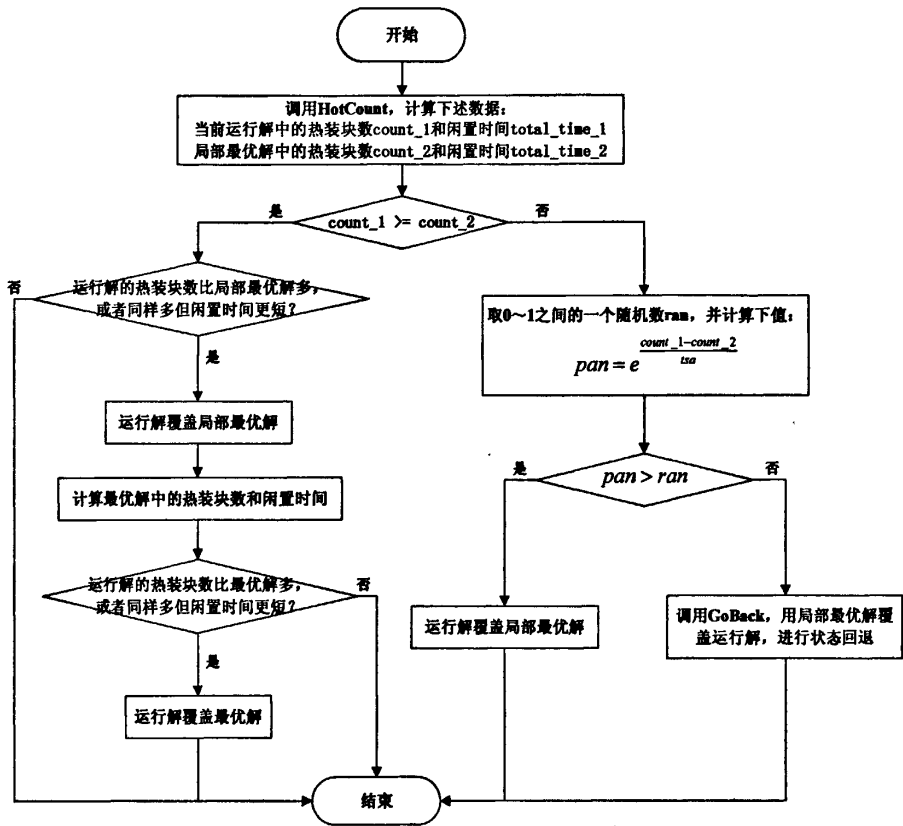


图 4.11 Result 函数流程图

Fig. 4.11 The flow chart of Result

4.3.3 板坯优化部分程序设计

(1) void SlabOptimize()/Free_Slab_Optimize()

该函数是优化系统板坯优化部分的主函数，根据轧制计划单元约束条件不同分为梯形计划和自由轧制两种类型，二者只是在宽度约束上稍有不同，梯形计划要求宽度平缓下降，而自由轧制要求宽度平缓变化，因此两种板坯优化的入口函数也不同：SlabOptimize()是梯形计划板坯优化的主函数，Free_Slab_Optimize()是自由轧制板坯优化的主函数，二者有如前面图 3.2 所示的程序结构和流程图。该函数除了执行插入板坯操作外，还计算执行插入操作后的新解的目标值，并保留最优解。

下面主要介绍该函数调用的一些包括规则检查函数、结果计算函数、辅助操作函数等主要函数的结构和流程图。

(2) void GetOrder()

该函数的主要功能是为整个批量计划中的所有板坯编制唯一序号，该序号保存在一个二维整型数组 `order[][]` 中，其中数组第一维表示该板坯的轧制单元计划号，第二维表示该板坯在该轧制单元计划中的轧制顺序号。该二维数组的值按照整个批量计划所有板坯从头到尾的先后顺序按照自然数的顺序依次标记。

(3) void WriteTempChargeFlag()

该函数的主要功能是为整个批量计划的所有板坯从前到后依次写热装标记：热装 HCR 板坯写 1，“准” HCR 板坯写 2，“超” CCR 板坯写 3。其中关于三类板坯的定义如下：每块板坯的计划开轧时间和板坯切断时间之差定义为 $time_1$ ，整个批量计划的总开轧时间与每块板坯的板坯切断时间之差定义为 $time_2$ ，这两个时间差是每个板坯的两个时间属性，一旦板坯位置确定，并且有关系 $time_1 < time_2$ 成立，这两个属性的值便随之确定，然后定义三类板坯的分类标准如下：

$$\begin{cases} time_1 < T_{HCR}, & \text{热装 HCR} \\ time_1 > T_{HCR} \ \&\& \ time_2 < T_{HCR}, & \text{“准” HCR} \\ time_2 > T_{HCR}, & \text{冷装 CCR} \end{cases}$$

该函数的主要目的就是标记出“准” HCR，该类板坯在当前位置是冷装 CCR，但是往前寻找插入位置的话有可能变成热装 HCR，因此，这类板坯就是后面执行插入操作需要寻找的板坯。

该函数的程序流程图如图 4.12 所示。

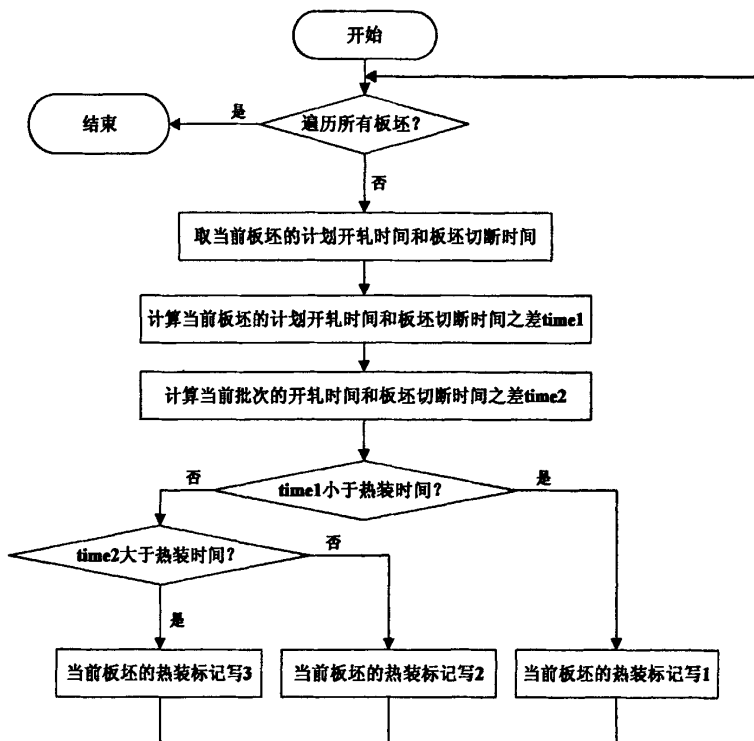


图 4.12 WriteTempChargeFlag 函数流程图

Fig. 4.12 The flow chart of WriteTempChargeFlag

(4) bool RightPositionForInsert()

该函数的主要功能是把批量计划中热装标记为 2 的“准”HCR 依次往前寻找合适的插入位置，增加其变成热装 HCR 的可能，从而为提高整个批量计划的热装比提供可能。

该函数主要考虑的是抽出板坯以及插入板坯后的约束条件是否满足，如果能找到一块合适的板坯抽出并且往前能找到合适的插入位置的话，该函数返回 true，否则返回 false。该函数的程序流程图如图 4.13 所示。

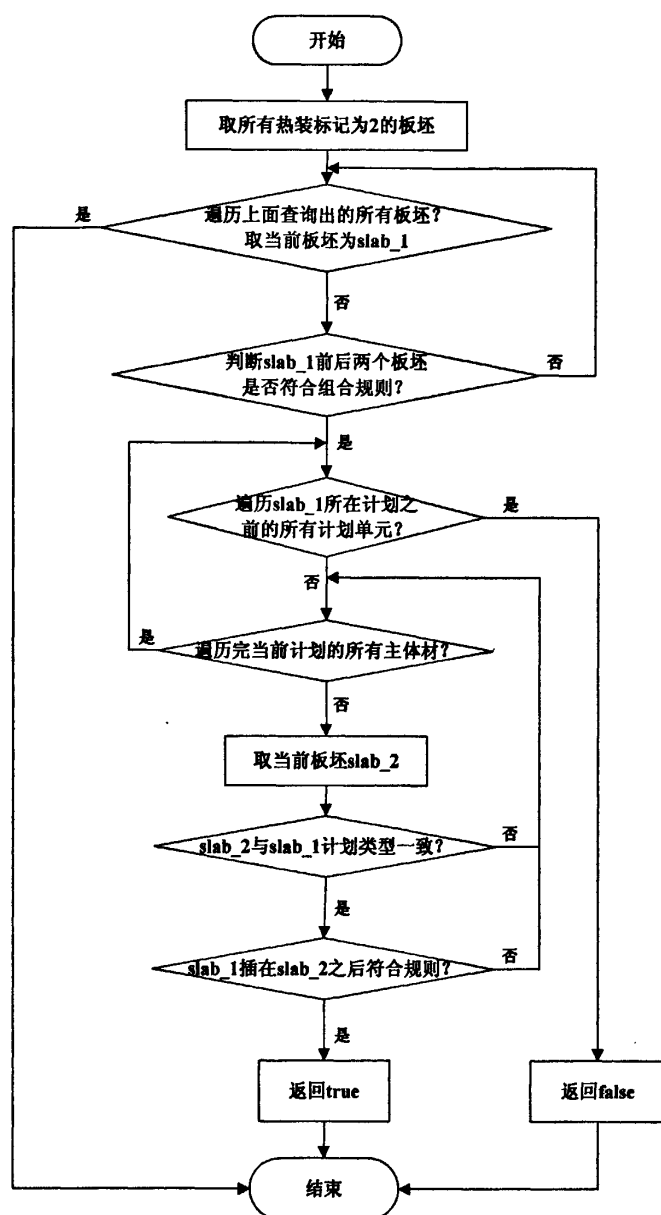


图 4.13 RightPositionForInsert 函数流程图

Fig. 4.13 The flow chart of RightPositionForInsert

(5) bool Condition(int position_1, int position_2)

该函数的主要功能是对两块位置号为 position_1 和 position_2 的板坯进行规则检查, 包括: 宽度规则、厚度规则、硬度规则。其中宽度规则分为梯形计划规则和自由轧制规

则两种，前者要求宽度下降而且跳跃值不能超过限制，后者只是要求宽度跳跃值不能超过限制；厚度规则主要是两块板坯的厚度跳跃值不能超过限制；硬度规则同样是两块板坯的硬度跳跃值不能超过限制。

如果两块板坯对于所有规则都满足，则函数返回 true，否则返回 false。

(6) bool rule(long plan_seq_1, long plan_seq_2)

该函数的主要功能是对执行抽出和插入板坯的两个轧制单元计划 plan_seq_1 和 plan_seq_2 进行规则检查，包括：同宽长度规则、热装规则、混排规则。其中同宽长度规则是要求同一个轧制单元计划内具有同宽范围的相邻板坯总长度和总块数不能超过规则限制；热装规则是要求整个批量计划中所有板坯的计划轧制时间和板坯切断时间之差要大于标准传搁时间，而且额定热装标记为冷装 CCR 的板坯不能进入热装 HCR 的位置；混排规则是检查执行抽出和插入操作的两个轧制单元计划内的所有板坯满足混排计划类型搭配规则和计划类型区间最小块数规则。

如果对于所有的规则都满足，函数返回 true，否则返回 false。

(7) bool FreshInsertSlab()

该函数的主要功能是将批量计划后面抽出的板坯 slab_1 往前插入到板坯 slab_2 之后，主要进行的是对涉及到的板坯更新轧制单元计划号和单元计划内的板坯轧制顺序号，程序流程图如图 4.14 所示。

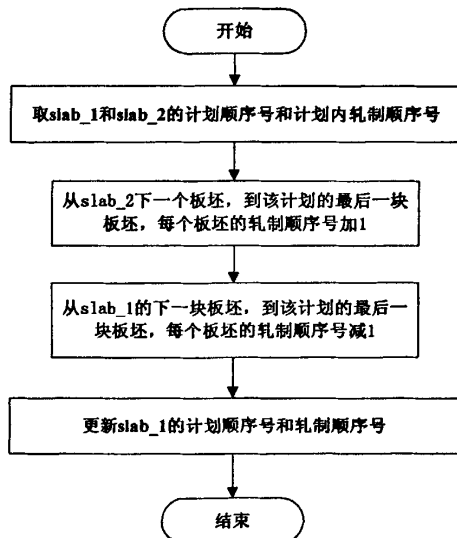


图 4.14 FreshInsertSlab 函数流程图

Fig. 4.14 The flow chart of FreshInsertSlab

(8) void BackInsertSlab()

该函数的主要功能是将执行插入操作的板坯 slab_1 重新放回到原来抽出的位置，这是因为往前插入 slab_1 后出现了同宽长度、热装或者混排违规，表明该板坯不可执行此次插入操作。该函数进行的是函数 FreshInsertSlab() 的逆操作。

4.3.4 其他主要函数介绍

(1) void GetParameter()

该函数的主要功能是读取优化系统执行计划优化和板坯优化所需要的全部参数，主要包括：时间参数、算法参数、规则参数；另外还要读取当前优化数据的轧制单元计划个数和板坯总数，为后续优化服务。程序执行的流程图如图 4.15 所示。

(2) void OutPut()

该函数的主要功能是把经过计划优化和板坯优化之后的最优解保存到数据库中，作为最终的优化结果。

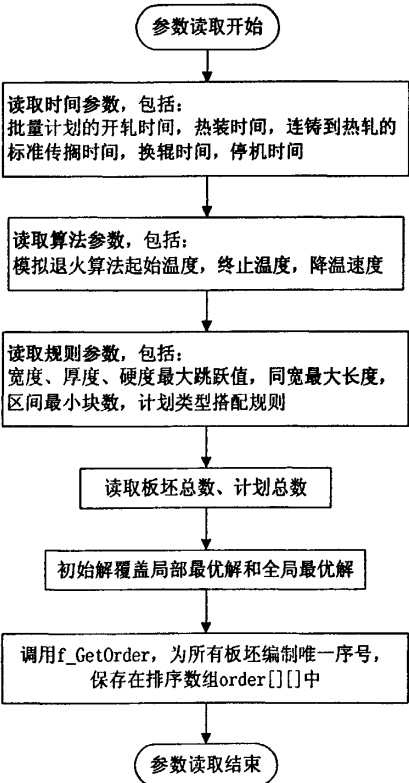


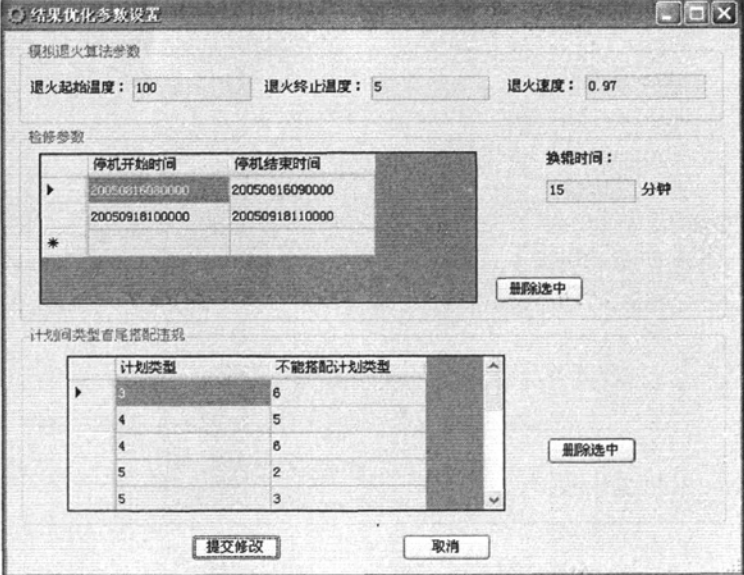
图 4.15 GetParameter 函数流程图
Fig. 4.15 The flow chart of GetParameter

4.4 热轧优化子系统运行实例

本文所研究的子系统就是该系统四大模块下的第三大模块——批量计划全局优化模块。该模块负责将已排产的批量计划进行优化，或者对于已经优化过的批量计划进行再次优化，目标是通过多次优化最大程度地提高热轧批量计划的热装比，从而为热轧企业达到节能降耗的目的。

在对热轧批量计划进行优化操作之前，首先需要用户设置优化程序部分所需要的参数，如算法参数、规则参数等。在系统的主菜单栏的“设置”菜单包括了整个系统要用到的所有的参数，便于用户维护和修改。以跟系统优化部分联系最近的优化排产参数设置为例进行介绍。

在系统主界面的主菜单上依次选择“设置→优化排产参数设置”，之后弹出结果优化参数设置窗口，如图 4.16 所示。其中模拟退火算法参数栏用来设置程序计划优化部分用到的模拟退火算法的三个参数：退火起始温度、退火终止温度和退火速度，退火起始温度越高、终止温度越低、退火速度值越大，退火越慢，循环次数越多；检修参数用来设置停机开始结束时间以及换辊时间，是对批量计划的所有板坯写轧制时刻表时考虑的因素；计划间类型首尾搭配违规用来规定轧制单元计划主体材首尾板坯的计划类型不匹配情况，用于在计划优化部分交换计划时的规则检查。



结果优化参数设置

模拟退火算法参数

退火起始温度: 100 退火终止温度: 5 退火速度: 0.97

检修参数

停机开始时间	停机结束时间
20050816090000	20050816090000
20050918100000	20050918110000

换辊时间: 15 分钟

计划间类型首尾搭配违规

计划类型	不能搭配计划类型
3	6
4	5
4	6
5	2
5	3

提交修改 取消

图 4.16 优化参数设置窗口

Fig. 4.16 Optimization parameter setting window

用户设置好所有的参数之后，便可以对批量计划进行优化操作，具体操作步骤如下。

首先在系统主界面的左侧树形目录中选择需要进行优化的批量计划（批次），然后在菜单栏中依次选择“操作—>计划优化—>计划优化”，系统自动弹出优化确认提示窗口，如图 4.17 所示。

点击“是”则对该批量计划的优化自动开始，系统出现优化过程进度条，用以显示优化程序进行的进度，如图 4.18 所示。

优化完成后，系统会弹出优化完成提示小窗口，确认后系统自动进入主界面，显示优化后的结果，如图 4.19 所示。该批量计划的热装比由优化前的 63%变成了优化后的 70%，有了显著提高。还可以通过点击工具栏的查看图标，查看优化后的具体结果，如图 4.20 所示。

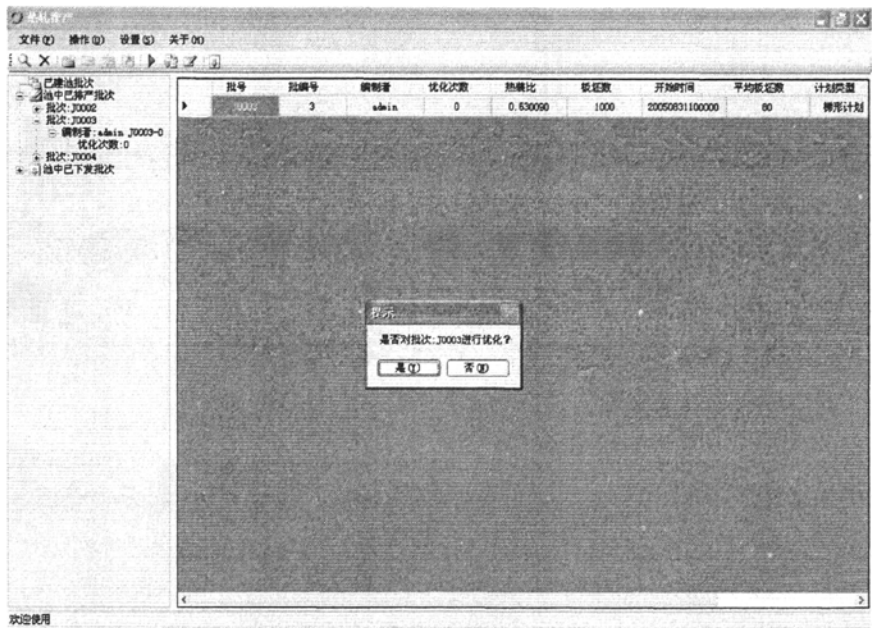


图 4.17 批量计划优化开始窗口

Fig. 4.17 Lot plan optimization starting window

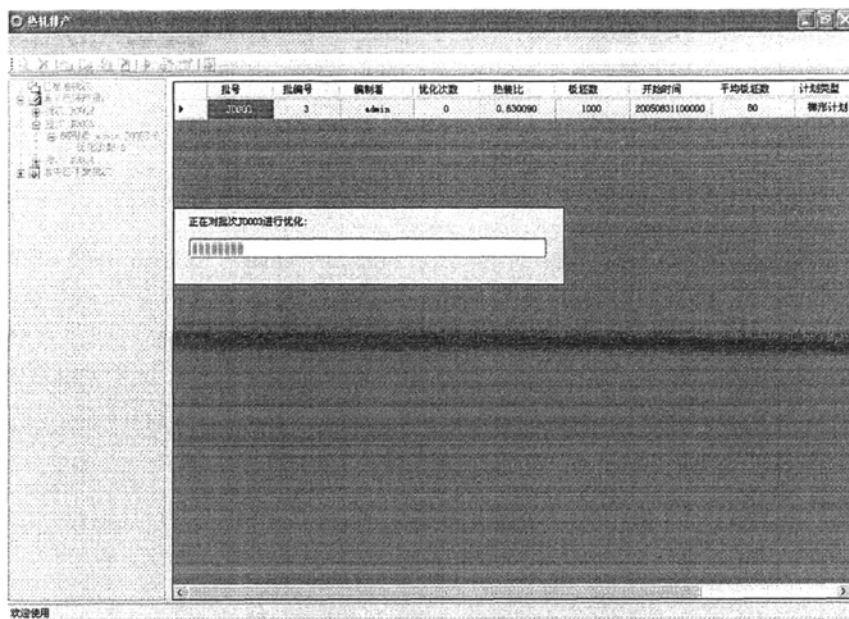


图 4.18 批量计划优化窗口

Fig. 4.18 Lot plan optimization window

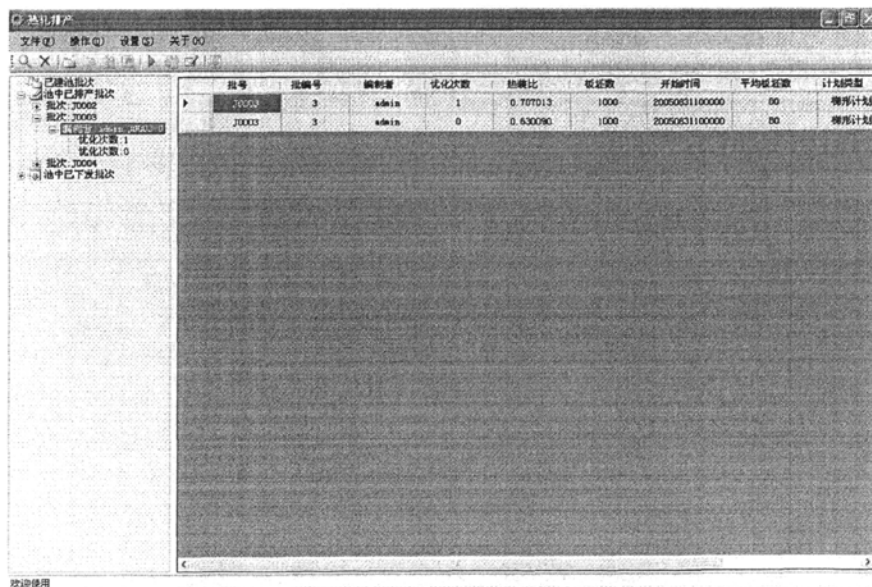


图 4.19 优化结果查看窗口

Fig. 4.19 Optimization result viewing window

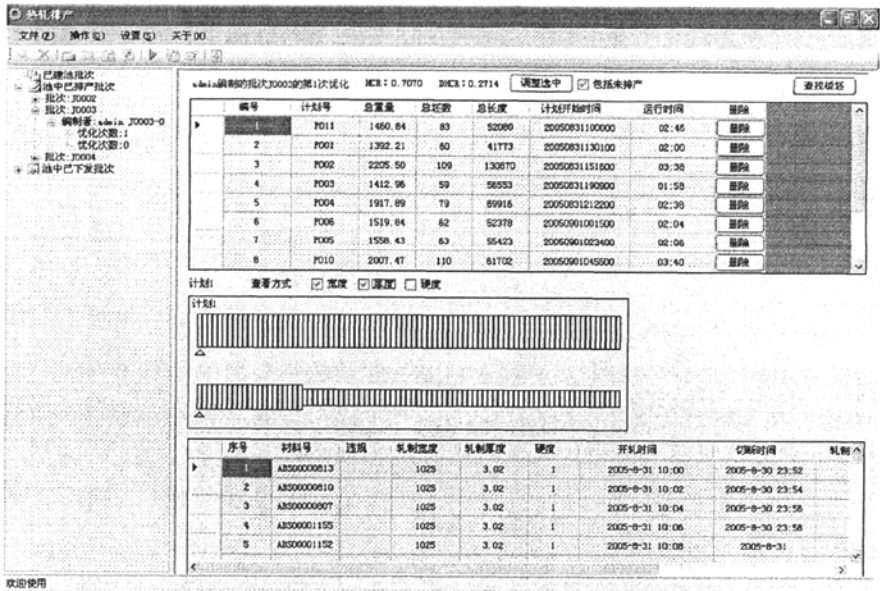


图 4.20 优化详细结果查看窗口

Fig.4.20 Optimization detailed result viewing window

4.5 热轧优化子系统应用效果

通过对北京西门子中国研究院提供的首钢中厚板热装大量实际数据进行试验，本优化子系统在对基于已排产数据的批量轧制计划进行优化操作后，热装比有了明显提高。为了验证所研究的优化算法的优越性，取了5个批量计划进行优化，5个批量计划的详细信息如表4.1所示。

表4.1 实验数据信息

Tab. 4.1 The information of the experiment data

批号	计划数	板坯数	计划平均重量/t	计划平均长度/km	热装比/%
1	15	1000	1682	46	36.7
2	12	1000	1483	52	44.1
3	10	1000	1605	68	26.3
4	13	1000	1544	58	13.5
5	12	1000	1578	61	42.2

为了进一步对比验证Tabu-SA算法在提高热装比和节省优化时间上的优越性，本文在数据实验中还采用基于SA算法对问题进行了求解，普通SA算法和Tabu-SA算法采用相

同的算法参数设置,对表4.1提供的同一批数据进行对比实验,具体对比实验结果如表4.2所示。

表4.2 数据实验结果

Tab. 4.2 The result of the experiment on the real data					
批号	优化前热装比 /%	热装比 (SA)/%	热装比 (Tabu-SA)/%	优化时间 (SA)/min	优化时间 (Tabu-SA)/min
1	36.7	46.2	60.5	8.4	4.2
2	44.1	55.8	63.3	7.7	3.6
3	26.3	38.9	54.6	9.0	3.5
4	13.5	28.8	43.4	7.8	4.0
5	42.2	56.4	68.7	8.2	3.8

由表 4.2 可见,采用算法进行优化的批量计划比优化前热装比有了明显提高,而且采用基于禁忌搜索的模拟退火算法(Tabu-SA)比单纯的模拟退火算法(SA)无论在热装比上还是优化时间上都有更好的效果,这是因为 Tabu-SA 算法采用禁忌搜索,扩大了邻域搜索的范围,避免了 SA 算法重复、迂回搜索,避免了陷于局部最优,为获得全局最优创造了条件,因此能得到更高的热装比;同时 Tabu-SA 算法比 SA 算法减少了内循环次数,从而节省了优化时间,使得优化时间比 SA 算法减少了近一半,从而验证了本文所提出的算法的有效性。

结 论

热轧是钢铁生产三大关键工序炼钢、连铸、热轧之一，热轧批量轧制计划的优化不仅关系到热轧生产的进行，对炼钢、连铸工序也都有很大的影响，而且是钢铁企业实现节能降耗的一项主要措施。在炼钢、连铸、热轧之间存在着生产平衡问题，包括物流和资源平衡以及时间平衡。热轧生产中的资源约束、能源约束和工艺约束给热轧计划编制带来很大的难度。这些平衡关系和约束条件给热轧计划的编制带来了巨大的难度，如何实现热轧计划编制的优化也是当今国内外钢铁企业为了节能降耗、提高整体经济效益迫切需要解决的问题之一。

本文以与北京西门子（中国）研究院合作的基于首钢中厚板实际生产的中厚板热轧计划与调度系统的研究和开发为依托，深入了解了中厚板热轧生产的工艺流程，对中厚板热轧批量计划的优化进行了深入研究，所取得的结论和主要成果如下：

(1) 根据钢铁生产中的连铸—热轧生产工艺的特点和连接方式，找出了提高中厚板热轧批量计划优化的途径，即以通过对中厚板热轧批量计划的排产结果进行重新排序的方法提高热装 HCR 和 DHCR 在整个批量计划中的百分比，即提高整个批量计划的热装比，从而达到本文所讨论的降低加热炉能耗的目的。

(2) 结合中厚板热轧生产实际情况，归纳了中厚板热轧批量计划编制的目标和工艺约束，建立了中厚板批量计划优化的数学模型，并创造性地采用禁忌模拟退火算法（Tabu-SA 算法）进行模型求解，获得全局最优解。

(3) 研究开发了中厚板热轧生产计划与调度软件系统，该系统将本文所研究的 Tabu-SA 算法用于解决中厚板热轧批量计划优化问题，利用分模块、分步骤的方法将算法思想和软件架构思想成功应用于实际项目，并在对大量实际数据的试验中证明了方法的有效性。

基于对现阶段国内外钢铁企业热轧计划编制和优化研究，本文初步解决了实际项目中存在的问题，但仍然存在一些需要进一步研究的空间，具体如下：

(1) 由于模拟退火算法这种智能算法的优化效果和时间是一对矛盾，虽然引入禁忌搜索算法节省了大量时间，但热轧生产往往需要快速反应，故板坯优化阶段没有采用该算法，而是采用规则的方法进行优化操作；在今后的工作中，如何选取一种更快更有效的方法应用到板坯优化中去，是可供研究的方向。

(2) 虽然启发式智能算法的种类多种多样,但由于项目时间限制,没有采用其他智能算法对中厚板热轧批量计划优化问题进行求解,因此也没有进行多种算法之间的比较。

(3) 中厚板热轧优化系统虽然在一定程度上提高了批量计划的热装比,但是只考虑的是连铸之后的热轧计划编制和优化问题,因此为热装比的提高产生了数据依赖性的限制,要想获得更高的热装比,把连铸工序考虑在内进行中厚板连铸—热轧一体化的计划编制和计划优化,会具有更好的整体优化效果。

参 考 文 献

- [1] 柴天佑, 金以慧, 任德祥. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统. 控制工程, 2002, 9(3): 1-6.
- [2] 国家 863 项目“冶金工业 MES 架构和关键技术与示范应用”报告, 2002.
- [3] 漆永新. 钢铁信息化告别盲从年代. 信息系统工程, 2004, 132(12): 60-61.
- [4] 王冰. 热轧生产计划优化方法的研究及应用:(大连理工大学硕士论文). 大连: 大连理工大学. 2005, 12.
- [5] 唐诗全, 祁双扬. 攀钢连铸坯热送热装节能增产效果显著. 世界金属导报, 2004, 011.
- [6] 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:(东北大学博士论文). 沈阳: 东北大学, 2000, 1.
- [7] 干勇, 仇圣桃. 先进钢铁生产流程进展及先进钢铁材料生产制造技术. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 25-29.
- [8] 2007 年中国钢材市场研究报告, 2007.
- [9] 国家 863 项目“冶金工业 MES 关键技术(EMS-EAM-IPS)研究与示范应用”报告, 2005.
- [10] Arai O. The Integrated Production Planning and Scheduling System in Kashima Steel Works. Proceeding of IBM International Steel & Metals Conference, Belgium, 1995, 433-438.
- [11] Yushin H, Deokhyun S. Production planning and control in major industries in Korea. Production Planning and Control, 1998, 9(2): 114-20.
- [12] MESA International. MES Functionalities & MRP to MES Data Flow Possibilities[R]. Pittsburgh, USA: MESA International White Paper Number2, 1997.
- [13] 黄庆学, 赵兵, 张维新. 我国的中厚板轧机现状与发展. 重型机械, 1993, (2): 13-18.
- [14] 2006 年中国中厚板年度分析报告. 钢结构, 2007, 22(1): 106-107.
- [15] 党军. 中厚板卷厂工艺描述及分析. 南钢科技与管理, 2006, (1): 45-49.
- [16] 杨佳直. 我国新建中厚板轧机工艺方案的介绍. 冶金管理, 2004, (8): 44-46.
- [17] 王国栋, 刘相华, 王君. 我国中厚板生产设备、工艺技术的发展. 中国冶金, 2004, (9): 1-8.
- [18] 李震. 我国钢铁工业节能降耗技术的现状和发展趋势. 鞍钢技术, 2005, (5): 1-5.
- [19] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法. 北京: 清华大学出版社. 2005.
- [20] Glover F. Tabu search-Part I. ORSA Journal on Computing, 1989, 1(3): 190-206.
- [21] Glover F. Tabu search-Part II. ORSA Journal on Computing, 1990, 2(1): 4-32.
- [22] Leo Lopez, etc. The hot strip mill production scheduling problem: a tabu search approach. European Journal of Operation Research, 1998, (106): 317-335.
- [23] G. Michel. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. Management Science, 1994, 40(10): 1276-1290.
- [24] 范千, 许承权, 陈伟. 单纯形-模拟退火算法混合算法及其在参数估计中的应用. 地理空间信

息, 2005, (3):57-59.

[25] 孙燮华. 用模拟退火算法解旅行商问题. 中国计量学院学报, 2005, (1):66-71.

[26] 唐立山. 非数值并行算法-模拟退火算法. 北京:科学出版社. 1997.

[27] Kirkpatrick S, Gelatt C D and Vecchi M P. Optimization by simulated annealing. Science, 1983, (220):671-680.

[28] D S Johnson, C R Aragon, L A McGeoch. C Schevon. Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation, Part1. AT&T bell Laboratories, Murray Hill (NJ), 1999.

[29] 冯剑, 岳琪. 模拟退火算法求解 TSP 问题. 森林工程, 2008, 24(1):94-96.

[30] 赵天玉. 模拟退火算法及其在组合优化中的应用. 计算机与现代化, 1999, (3):17-21.

[31] 王凌. 智能优化算法及其应用. 北京, 清华大学出版社, 2001.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

郝源春，王伟，赵珺. 基于禁忌表的模拟退火算法在中厚板轧制计划优化中的应用. 大连理工大学研究生网络学刊. 2008.

致 谢

本文是在导师王伟教授的悉心指导下完成的，值此完稿之际，谨向导师表示最诚挚的感谢！导师渊博的学识、活跃的思想、严谨的态度以及宽厚的待人令学生获益匪浅；导师的谆谆教导和无微不至的关怀将让我终生难忘；导师特有的人格魅力和可贵的精神将激励我不断刻苦学习、努力工作。

感谢赵珺师兄给予的耐心指导和悉心帮助，从开题到终稿，赵珺师兄都给予了无微不至的关心和帮助，为本次论文的撰写和相关项目的开展提高了大量宝贵的经验，为论文顺利完成起到了极为重要的指导作用。

感谢信息与控制研究中心 CIMS 项目组的所有师兄弟、师姐妹：王利、刘颖、张晓平、范圣冲、何平、王健、田苏洁、肖楠、林永俐、汤振兴、邬静东、时飞飞。他们在本次论文的完成过程中给予了很大的帮助，整个 CIMS 项目组严谨的作风、良好的氛围将让我终生难忘。

感谢信息与控制研究中心的每一位老师！由于他们的辛勤工作，为我提供了优越的学习环境和科研条件，使我在参加实际项目中获得了锻炼的机会。

感谢北京西门子中国研究员提供了这次项目合作的机会，使我在项目开展过程中学到了很多实用的知识和技能。

感谢杨建华教授、孟华副教授在百忙之中抽出时间审阅本论文，期间提出了许多宝贵的意见，使论文更加完善。

还要感谢我的父母和家人，在他们养育和支持下，我才能顺利完成学业，在学术领域不断收获成果。

感谢所有关心和支持我的人们！