

大连理工大学

硕士学位论文

热轧中厚板自由轧制计划编制的研究与应用

姓名：何平

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

受全球供需趋紧和市场竞争日益激烈的影响，钢铁工业正面临一系列严重的挑战，在能源供应紧张和激烈的市场竞争下，要求最大限度地降低生产成本，这要求企业的生产计划编制方法更加先进和科学。热轧生产批量计划编制是钢铁企业生产管理中最为重要的职能之一，轧制计划完成情况的好坏直接关系到产品的产出质量与交货日期约束，从而影响整个钢铁企业的经济效益。高效科学的热轧生产批量计划的编制方法对提高整个企业的生产效率、降低成本，提高企业经济效益具有重大的现实意义。中厚板轧制是钢铁工业中重要的生产过程，相应的轧制计划编制方法也伴随着轧制工艺技术的发展而不断的变化和改进。

本文以首钢的生产实际情况为背景，首先对热轧中厚板的生产工艺流程、热轧自由轧制计划的编制依据和工艺约束进行了阐述。在分析热轧自由轧制生产批量计划通用模型的基础上，采用了带有时间窗的车辆路径问题模型。该模型在满足热轧自由轧制计划各种轧制规程约束的前提下，以计划单元最大、热装比最高为目标。针对此模型，运用进化算法结合专家系统作为求解策略。仿真结果表明，本文的方法是可行、有效的。

基于上述方法的研究，使用 C#语言、Oracle 数据库，开发了热轧中厚板生产计划与调度系统。通过大量的现场数据测试，验证了软件系统的可行性和可靠性，达到了降低生产成本、提高生产计划的热装比的效果。

关键词：中厚板；自由轧制计划；带有时间窗的车辆路径模型；进化计算；专家系统

Research and Application on Production Planning of Free Hot Rolling Mode for Heavy Plate in Steel Industry

Abstract

By the impact of the growing global demand and intense market competition, the iron and steel industry is facing a series of serious challenges. Lack of energy supply and intensive market competition require to reduce the cost in the production as much as possible, which means more advanced methods in production planning are necessary. The batch planning in hot rolling production is an important function of production and management of steel enterprise, which gives a direct influence on production quality, due date and the economical benefit of steel enterprise. The effective methods of batch planning in hot rolling production are crucial for production efficiency, production cost and economical benefit. The technology of heavy plate hot rolling is the one of important processes in steel enterprises, whose progress accompanies with the rolling technology development. The related scheduling methods for hot free-rolling mode also have a constant changing and improvement.

The Practical production process of ShouGang Group is taken into account. The production process of heavy plate hot rolling strip, scheduling constraints and rules are illustrated firstly. The VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) model is suggested that is suitable to resolve the problems of the production lot planning in hot rolling process is suggested. All hot rolling constraints have been considered and the objectives of the model are to assign slabs into less plans and to increase the hot charge ratio. An evolutionary algorithm combined with expert system is proposed for solving this model. The simulation with real production data shows that the model and algorithms are feasible.

Based on the above-mentioned methods, a hot rolling heavy plate production planning and scheduling system has been developed using C# and Oracle 10g database. Testing with a large number of production data shows that the rolling scheduling system is feasible and reliable, the production cost is reduced and the hot charging ratio is increased.

Key Words: Heavy plate; Free rolling plan; VRP with time windows; Evolutionary computation; Expert systems

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：热轧中厚板自由轧制计划编制研究与应用

作者签名：何平

日期：2008年12月20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: 热孔中质数自由孔制计划编制研究与应用

作者签名: 张世平

日期: 2008 年 12 月 20 日

导师签名: 王伟

日期: 2008 年 1 月 12 日

1 前言

中厚板作为重要的钢铁产品之一，是工业生产中不可缺少的重要材料，被广泛用于国防、交通运输、能源、建筑等重要的国民生产部门，在国民经济中起着重要的作用。由于中厚钢板生产在整个轧钢生产中具有不可替代的地位，发展比较迅速，在其生产过程中各种新技术得到广泛的应用，而且从一定的意义上讲，它的生产工艺水平和产品质量代表了一个国家钢铁工业的发展水平。世界上许多工业发达国家中中厚板在热轧生产中占有重要的地位，其产量占热轧材总量的 9-26%，仅次于热轧带钢和型钢，居第三位。近二十年来，世界工业发达国家在中厚板的生产装备和技术上都有了长足的发展^[1-2]。

热轧中厚板生产一直是轧钢生产行业中的高新技术最为集中、人们最为关注的领域。中厚板品种繁多，它广泛应用于造船、石油化工、锅炉、桥梁及机械制造等行业，是国民经济发展所依赖的重要钢铁材料。因此，中厚板的生产水平是一个国家钢铁工业水平的重要标志。

本章首先对热轧中厚板轧制计划问题进行简单介绍，然后对热轧自由程序轧制技术进行了简要叙述，最后概述了本文的主要工作。

1.1 热轧中厚板的特点

热轧是指金属及合金在再结晶温度以上的轧制过程。按国家标准 GB709-88 规定，中厚板规格：厚度：4.5-200mm，宽度：600-3800mm，长度：1200-12000mm，中厚板的轧制过程与初轧板坯有相似之处。中厚板轧机一般为单机架或双机架布置的四辊轧机，可逆轧制。中厚板轧制过程中分粗轧和精轧，粗轧主要是展宽与延伸，保证进精轧机的料形，在精轧时，则考虑到钢板的成型。保证尺寸精确。断面横向厚差小，变形均匀，板型好。同时也要考虑到钢板性能要求。故轧制力要达到要求，否则就会出现残余应力，导致一系列的问题：钢板发生飘曲、波浪等缺陷^[3]。

现代中厚板的轧制方法很多，如全横轧法、横轧-纵轧法等。为提高成材率，还常用平面形状控制轧制法，如厚边展宽轧制法、狗骨轧制法等。这些轧制法都是为了使成品钢板矩形化，以减少切损，中厚板的轧制规程在中厚板生产中起着非常重要的作用。确定道次及压下量要在保证咬入、设备强度、轧制精度的条件下要保证板型良好，因为在精轧过程使板型良好，也就是使钢板在轧制时沿横向延伸均匀，不易出现缺陷，只有这样才能充分发挥轧机的生产能力，降低轧制能耗，而且能够保证产品的质量。一般对轧制力要求要满足轧辊及系统的强度，满足电机的传动力矩条件下，轧制力逐道次减少。

1.2 热轧中厚板轧制计划问题的研究现状

热轧中厚板自由轧制计划问题可以概述如下：假设有 n 块板坯，每块板坯的重量、及成材后的宽度、厚度和硬度已知，每个轧制计划的轧制能力一定，热轧轧制计划是确定轧批之间的批间序和组成轧批的每一个板坯的批内序，使生产满足客户的要求和工艺规程。其中分配给某个轧制计划的板坯的重量总和不能超过一个轧制计划的生产能力。本文采取生产批量计划^[4-8]的思想解决热轧中厚板自由轧制计划编制的问题。

本节首先对钢铁生产批量计划进行了简单介绍，然后分别对热轧批量计划的研究现状和热轧生产批量计划编制存在的问题进行了综述。

1.2.1 钢铁生产批量计划简介

钢铁生产计划是销售合同经过质量设计和生产设计之后所形成的生产合同在释放生产之前必须经过的管理步骤，其功能主要包括^[9]：

(1) 产能预测：根据上期剩余能力和机组生产能力静态支持计算出下期各机组可利用产能；

(2) 合同计划：根据一定的生产周期确定每一个合同的生产时间，根据生产周期的不同可分为合同月计划、合同旬计划等，在合同计划中主要解决各机组能力合理分配的问题；

(3) 批量计划：批量计划处于合同计划与日作业调动计划之间，是两者相互协调的桥梁，根据工艺约束分别对生产合同进行各工序的组批计划和批次排序计划，主要包括炉次计划、浇次计划和轧制计划：

① 炉次计划：炉次(Charge)为炼钢的最小基本单位，一个炉次是指同时在同一个电弧炉或转炉内冶炼，从开始冶炼到浇铸或模铸为止的整个过程。炉次计划的编制是对生产合同进行组炉的过程，也称为炼钢批量计划的编制。

② 浇次计划：浇次(CAST)为一个炼钢计划单位，一个 CAST 由若干炉次组成，对于某一连浇族码的炉次来说，CAST 中的最大炉数由连浇族码来决定。浇次计划是在炉次计划的基础上根据浇铸工艺要求对各炉次进行组浇排序的过程。浇次计划也成为连铸批量计划。

③ 轧制计划：通常一个完整的轧制计划(轧制单位)由烫辊材和主体材两部分组成。在轧制计划的初始轧制阶段带钢的宽度递增变化以便加热轧辊，这称为烫辊。烫辊材部分轧制完成之后，开始主体材部分的轧制，为了保证产品的质量，需要在编制轧制计划

的主体材时,保证每一块要求轧制的带钢宽度不大于其前一个带钢的宽度。在热送热装计划编制时,允许一定数量的冷/热板坯编制在一起,形成一个完整的轧制单元。

1.2.2 热轧生产批量计划的研究方法

热轧生产管理的一个主要任务是编制合理的轧制单元计划,并由多个轧制单元计划组成轧制批量计划。由于热轧带钢生产过程的高度复杂性,轧制计划的好坏直接影响产品质量、轧辊磨损成本和生产效率等。因此,热轧生产计划优化问题一直吸引着众多业者和研究者的研究与关注。1991年美国普渡大学的 Kosiba 和 Wright 建立了轧制单元优化的 TSP 模型^[10],提出限制钢板宽度、厚度、硬度的惩罚函数表来辅助求解轧制计划,在求解其 TSP 模型时使用了 Miller and Pekny 算法的编码模型,与其它方法获得的结果进行比较时,在当时来说是获得较大的改进。但是 Miller and Pekny 算法属于精确算法,而在大型钢厂中,所编制的轧制批量计划的规模是相当大的,一般很难获得精确解。然而 Kosiba 和 Wright 的惩罚函数表和所建的轧制单元计划的 TSP 模型开辟了关于热轧生产计划研究的全新方向和道路。随着后人不断的改进与创新,建立了各种各样的优化模型与算法并取得了一定的优化效果;文献[11]对 TSP 模型进行实例化,设置了宽度反映的惩罚结构表,保证板坯排序呈“双梯形”结构,采用三交换启发式变参遗传算法进行求解,求解效果比人工编制的结果的平均改进率为 20%;文献[12]对 TSP 模型进行改进,建立了轧制单元优化的 TSPP(Traveling Salesman Problem with Precedence),带前序关系的旅行商问题)模型,在模型中增加前序约束条件使每个轧制单元计划的板坯宽度按照从宽到窄的变化趋势变化,这样就不必在惩罚中考虑关于宽度跳跃的惩罚,该模型设计了禁忌搜索算法进行求解,获得了较好结果;文献[13]使用并行处理策略,把轧制计划的编制归为非对称多旅行商问题,同时编制多个轧制计划,建立了轧制批量计划优化的 MTSP(Multiple Traveling Salesman Problem)模型,并设计了改进的遗传算法,但该模型未考虑轧制计划的能力约束;文献[14]以优化轧辊磨损和拖期惩罚为目标,协调生产率、产品质量和准时生产三者间的冲突,建立了轧制批量计划的 VRP 模型,采用先排序后聚类的策略,设计了遗传算法和动态规划相结合的两阶段算法进行求解;文献[15]基于 VRP(Vehicle Routing Problem)建立了轧制批量计划优化模型,并设计了基于改进的 3-opt 交换禁忌搜索算法求解模型,模型优化结果明显优于人机交互编制的结果,而且大大地提高了轧制批量计划的编制速度,但是该模型并未考虑连续同宽轧制长度限制等工艺约束;文献[16]建立了轧制批量计划的 UMVRP(Vehicle Routing Problem with Uncertain Vehicle Number)模型,设计了遗传算法与禁忌搜索算法的混合算法,取得较好的优化结果;文献[17]提出了关于热轧批量计划的带时间窗的车辆路径问题 (Vehicle Routing

Problem with Time Window, VRPTW)模型, 考虑了钢板被加工的时间窗约束, 增加了由于早到某个客户而引起的等待时间和客户所需时间所造成的成本, 该模型使用遗传算法 (Genetic Algorithms, GA)求解, 适用于热轧生产调度的要求, 结果表明用 MX3 交叉算子取得的结果最好。

1.2.3 热轧生产批量计划国内外研究情况

(1) 国外

早在 20 世纪八十年代, 日本、韩国等国都致力于钢铁企业炼钢-连铸-热轧一体化生产计划的研究, 并应用于生产, 取得了显著的经济效益。

① 日本:

在 80 年代初期, 日本五大钢铁公司(新日铁、川崎、住友、日本钢管、神钢等)的各钢铁厂均建立了一体化计算机生产管理信息系统, 并不断扩充其功能, 取得了良好的应用效果。

新日铁大分钢厂的动态生产控制系统(DIAS)实现了板坯直装轧制, 加强了前后工序的联系, 减少生产的中间环节, 节约库存能力和吊装机组能力。该系统采用热坯装炉轧制(HCR)技术, 提高了轧制坯热装比率。由于板坯装炉的温度一般比较高, 达到了节能降耗, 减低生产成本的目的。

川铁水岛钢铁厂在 1987 年投入使用的 P2 系统为炼钢至热轧的一体化同步生产控制系统, 系统包括一体化计划和作业控制系统。系统包括以 5 天为单位的计划编制和调度系统、日调度系统、以及计划、调度方案调整系统。系统自投入使用以来, 在协调前后工序生产, 平衡各工序物流, 提高热装热送比率方面获得了优良的成绩, 并在此基础上实现了节省能源, 节约人力成本, 减少库存等的既定目标。P2 系统的开发和投入证明了钢厂从整体上实现全局优化生产是可能的。

住友公司的鹿岛钢铁厂通过改进其连铸技术, 于 1983 年实现了连铸机与热轧厂的直接连接, 从而实现真正的连铸热轧一体化操作, 将热送热装比率提高到 80%, 连铸比率则扩大到 97%。

京滨钢铁厂则于 1990 年 5 月, 利用 AI(人工智能)技术实现了从高炉-炼钢-热轧的一体化管理, 其计划设计更详细, 时间节点安排更精确, 进一步提高了生产率, 缩短工期, 减少库存, 节约了人力成本。

② 韩国:

韩国浦项钢铁公司的光阳钢铁厂在 20 世纪九十年代开发了从铁水处理到轧制成材的一体化计算机管理系统。系统投入运行后, 取得了显著的效果, 其 HCR 比率达到了

70%以上。浦项的一体化系统和日本钢铁公司的一体化系统非常相似，都是以实时调度和控制系统为核心，系统实时编制生产计划，并编制调度计划。系统动态跟踪实时生产情况，并根据实时情况对生产计划和相关调度计划作出调整。该系统还具有异常处理能力，能够实时应对各种生产异常。

由此可见，国外很多领先的钢铁企业在很早就开始进行生产计划排程方面的研究，并已达到了一个很高的高度。国内的钢铁企业必须迎头赶上，否则必将被日趋激烈的国际场所淘汰^[17]。

(2) 国内

随着中国市场对钢材的需求不断扩大，国内出现了大量的钢铁企业，钢铁产量也逐年增加，中国已经俨然成为钢铁大国。但国内钢铁企业的技术水平较低，生产成本比较高，在国际市场上缺少应有的竞争力。为此，国内钢铁企业都开始加强信息自动化建设，努力提高自身技术水平，目前已取得一定成果。

① 宝钢：

宝钢是中国现代化程度最高、生产规模最大、品种规格最齐全的大型钢铁联合企业。宝钢的信息化建设起步比较早，1998年，宝钢全厂级的信息化管理系统 9672 便已投入使用，该系统的投入使用使宝钢的信息化达到了一个新的高度。9672 系统集成、销、研功能于一体，实现从原料采购，订单管理，到质量设计，管理，计划定制，生产组织，销售运输的一体化信息管理。系统投入以来，收到了明显的效果。虽然 9672 给宝钢生产组织带来巨大方便，但其在功能实现上还存在较大缺陷，需要不断的改造扩充。

② 武钢：

武钢在 2003 年 1 月上线“武钢整体产销资讯系统”。整个系统包括销售管理、生产管理、技术质量管理、财务管理、存货与出货管理、信息作业管理六大系统，共计 33 个子功能。系统覆盖了武钢企业管理的每一个角落，是目前我国投资最大、覆盖最广、软件集成度最高的企业信息平台。该系统投入运行后，使武钢的钢铁主业生产周期平均缩短了 5 天，日库存平均降低了 30%，资金回笼的速度也平均减少了 3 天，合同交货期也由原来的 45 天缩短为 30 天，并逐渐实现按旬、按周交货。系统还提供了炼钢、连铸、热冷轧生产过程控制和跟踪系统，对“炼钢-连铸-轧钢”进行一体化计划安排和调度控制。

1.3 热轧自由轧制技术简介

为了满足用户对热轧板带材钢规则、品种、批量等方面日益多变的要求，使热连轧机能够在激烈的竞争中灵活自如地适应钢材市场的变化，近年来开发了自由轧制技术（SFR—Schedule Free Rolling Operation），改变了沿用的受限制的轧制程序，从而改善了连铸和热轧的衔接和配合，方便了热装热送和直接轧制，并为及时满足用户的要求安排生产创造了条件^[18]。

利用传统方法指定轧制程序时，为了保证优质、低耗、低成本，有以下限制条件：

- ① 轧制长度，包括轧制单位总长度和同宽度轧制长度的限制；
- ② 为保证获得满意的板形和板凸度而必须的辊型曲线；
- ③ 为避免板带钢断面发生异常凸起点，传统轧制方式采用先轧宽后轧窄的所谓“coffin”程序；
- ④ 为保证板厚精度和在精轧机组稳定穿带，避免大幅度的改变产品厚度。

为了突破上述限制，通过开发一系列新工艺、新技术、新装备，如减轻轧辊磨损和使磨损均匀的技术，运用一些先进的自动控制技术，从而实现自由程序轧制。使用 SFR 的结果不仅使生产计划的安排更加灵活自如，而且使板厚、板宽等控制精度提高，能耗下降，生产效率提高。表 1.1 给出了自由轧制方法和传统的轧制方法的对比^[19]。

表 1.1 轧制模式的规程对比

Tab.1.1 The comparison between traditional mode and free type mode

项目	传统轧制方法	自由轧制方法
板厚变化	1/2 ~ 2 倍	1/4 ~ 4 倍
由窄到宽	不允许	自由
同宽轧制长度 (km)	23	90
初始辊型曲线	8 种	1 种
混合轧制不同钢种	困难	允许
混合轧制冷热板坯	困难	允许

1.4 课题的研究背景与研究意义

20 世纪末至 21 世纪初，金属轧制技术发展迅速，轧制生产实现了高度的自动化、连续化和高精度化，产品性能和数量大幅度提高，成本显著降低，而中厚板的轧制作为金属轧制领域的重要部分，也是一个国家钢铁工业的重要标志。

近年来,随着我国进入新一轮经济高速增长周期,对中厚板需求持续旺盛。为了满足需求,新的轧线不断上马,已有轧线进行改造,轧制计划编制方法不断研究与创新,中厚板产能增长很快。在产品产能大幅度增长的同时,人们已经注意到,应当考虑如何把中厚板轧制工业的增长方式从数量型转变为质量效益型,既要改变品种结构,又要提高产品质量和降低成本,以达到提高市场竞争力的目的。借助技术进步实现上述目的已为人们所共享,并变成了企业的具体行动^[20]。

中厚板轧制拥有着很长的发展历史,相关的轧制技术也随着金属轧制技术的发展而不断的变化与改进,在这个过程中,充分研究与改进热轧生产计划编制方法就显得尤为重要。它是赢得国际市场竞争有利地位的需要;它是实现技术进步,提高我国钢铁制造业水平,带动传统产业升级的需要;它是满足我国经济建设快速发展,提高成品技术含量,实现经济增长的需要。

本文的课题来源于大连理工大学王伟教授科研团队与北京西门子(中国)研究院共同研究和开发完成的基于首钢热轧中厚板生产的“热轧中厚板生产计划与调度系统”。该系统主要用来优化并生成钢铁企业中热轧中厚板材生产线的轧制生产计划,以此来提高生产计划的热装比和生产效率。

1.5 本文的主要工作

本文在对首钢热轧中厚板轧制生产工艺进行深入了解的基础上,开发了“热轧中厚板自由轧制计划模型”,有效的发挥热装热送和直轧工艺的作用,进而达到降低成本,提高热装比和成材率,提高产品质量,缩短产品生产周期的目的。本文的主要工作如下:

- (1) 了解首钢热轧厂的生产流程、制定轧制计划的工艺约束和编制规程。
- (2) 采用板坯预收池和综合优先级的策略解决了工序优先和热装优先的问题。
- (3) 针对多约束、多目标的热轧中厚板自由轧制计划编排问题,建立了 VRPTW 模型。采用进化计算算法和专家系统相结合作为求解策略,较好的解决了单计划类型主体材计划编制中的各种问题。
- (4) 针对多计划类型主体材计划编制与单计划类型主体材计划编制区别较大,不宜使用运行速度较慢的智能算法求解的问题,采用了基于启发式算法的多计划类型主体材计划编制方法,较好的解决了混排计划的各种问题。
- (5) 完成了“热轧中厚板生产计划与调度系统”的开发设计。

2 热轧中厚板生产工艺及问题描述

钢板是国民经济各部门中广泛使用的钢材，钢板按其厚度可以分为两大类，即厚板和薄板。在我国，又分为厚板、中板和薄板，习惯上把中板和厚板通称为中厚板。尺寸范围如表 2.1 所示。

表 2.1 钢板的尺寸范围
Tab 2.1 The confine of plate and strip size

分类	厚度 (mm)	宽度 (mm)	长度 (m)	备注	
厚板	中板	4 ~ 20			
	厚板	20 ~ 60	600 ~ 5000	2 ~ 40	—
	特厚板	60 ~160			
薄板	薄板	0.2 ~ 4	60 ~2800		
	极薄带钢	0.002 ~ 0.2	20 ~ 1200	—	—

对钢板而言，主要的技术指标有：

- (1) 尺寸精度包括钢板的厚度精度和形状精度，是决定板、带钢几何尺寸精度的两大指标。随着技术的发展，用户对板、带材质量要求也在不断提高。
- (2) 表面质量钢板的表面质量也是衡量钢板质量的指标之一。
- (3) 机械性能准确的化学成分、良好的工艺性能以及最终的机械性能。

2.1 热轧中厚板的生产工艺特点

中厚板轧制主要生产 4mm 以上至 60mm 厚、600 至 5000mm 或更宽、2m 至 18m 长的板材^[21]，中厚板的生产工艺过程主要包括：原料准备、加热、粗轧、精轧、精整、热处理等工序，其生产工艺除了具有带钢轧制所具有的特性外，还具有独特的一系列工艺和操作特点，正是这些特点直接决定了中厚板计算机控制管理系统的复杂性。中厚板生产工艺和操作特点可归纳如下：

(1) 多块板坯交叉轧制工艺

为了提高产品的强度、韧性等组织性能，有些钢种需要调整最后几道次的轧制温度，这就要求采用冷却措施，同时为了保证生产产量，不能让轧机停止工作，这时就应安排第二块钢坯进行轧制。当第一块钢坯的冷却温度达到轧制要求时，第二块钢坯必须停止轧制，重新轧制第一块钢坯，由此存在两块以上的钢坯在轧机区交叉轧制的情况。

(2) 虚道次工艺

中厚板轧制工艺的复杂性决定了在轧制过程中需要用虚道次(空过)来保证轧件成品规格和轧件处于恰当的工艺位置。

(3) 人工干预较多

中厚板生产由于其工艺特点, 需要较为频繁的人工干预。

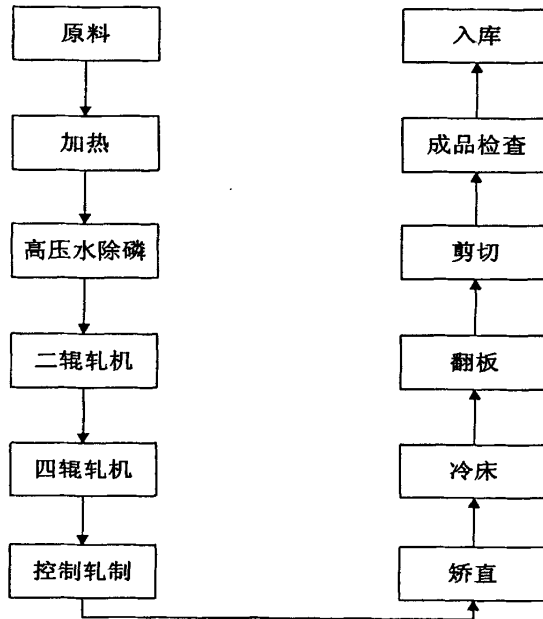


图 2.1 传统的中厚板轧制流程图

Fig.2.1 Flow chart of common heavy and medium plate rolling

2.2 连铸工序和热轧工序间的衔接方式

热轧批量计划是一体化批量计划的最后一个环节, 也是最重要的环节。热轧批量计划的好坏直接影响到下游机组生产所需的板坯质量的好坏。同时热轧计划编制的好坏直接受其上级连铸计划的影响, 主要体现在热轧和连铸的工序衔接方式和生产管理模式上。因此, 为了节约能源、降低成本、提高生产效率、提高产品质量, 如何有效地紧密结合前后工序、保持物流的一贯性、实现整个生产过程的全局优化是目前研究的重点。

在按照工序正向(炼钢-连铸-热轧)的顺序中, 轧制计划编制时不用考虑炉次和浇次计划编制的众多约束, 只需将排好连铸计划的板坯和板坯库中的板坯按照轧制计划排程要求进行热轧轧制计划的编制。编制过程中, 连铸、热轧工序衔接的好坏主要是看连铸下来的板坯是否能在一个允许的时间内以热坯的形式送到轧机, 这就要看就是板坯在连

铸机上的切断时间。明确板坯开轧时间和切断时间之间的关系就可确定该板坯是否能成为热送热装板坯，这直接关系到轧制计划热送热装比这一重要指标。连铸与热轧间的工序连接问题，除了物流的衔接外，还包括温度的衔接，根据连铸机供给热轧铸坯的方式和温度的不同，一般可将连铸与热轧工序之间的连接分成以下四种形式：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)^[22]，并以图 2.2 显示：

(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。

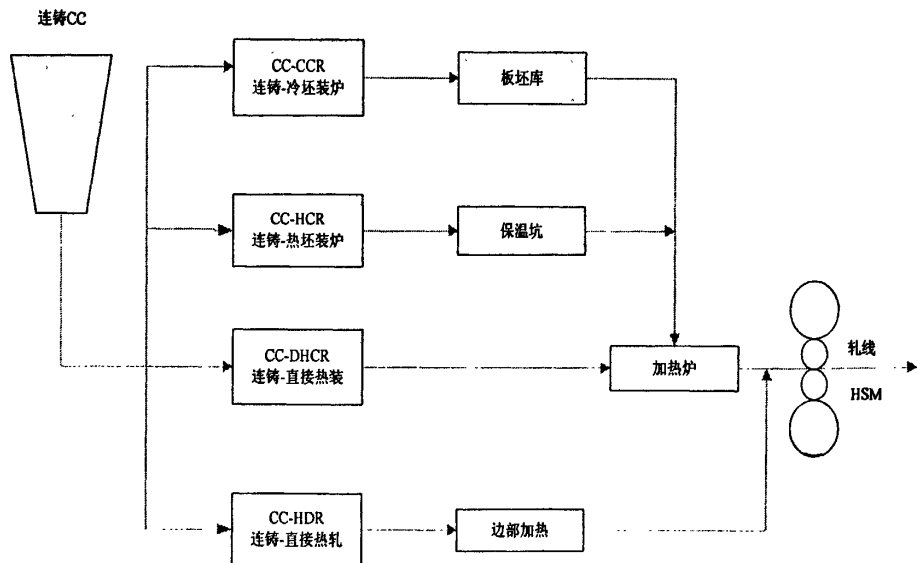


图 2.2 连铸与热轧间的工序衔接方式

Fig.2.2 Connection mode between Continuous-Casting and Hot-Rolling

(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°C 以上。无疑这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(1150°C - 1200°C)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, 但它对各个环节都提出十分严格要求, 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一段时间。

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。

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, 提高金属的所得率。而热直轧(HDR)工艺直接将从连铸机拉出的高温铸坯, 经边部加热后, 就可以将达到轧制温度(1150°C - 1200°C)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, 减少或删除加热炉的再加热过程, 是钢铁工业发展的必然方向。

2.3 目前轧制计划管理存在的问题

轧制计划主要是根据调度员自己的经验编制形成的, 计划员只能把很小一部分的虚拟板坯编制到计划中去。另外, 由于板坯在库中是有规则的堆放的, 在作当前计划的时候, 如果当前计划中需要的板坯在板坯堆的下层, 就需要计划员把这些板坯通过倒垛取出来, 这需要较长时间的工作。为了不会导致轧机断料, 通常计划员都预先做好两个计划用来应急, 新编排的计划的轧制时间总是在这两个计划的后面。这些都是编排热轧计划中不合理的地方。综合起来, 目前热轧生产管理方式存在如下几个问题^[23]:

(1) 库存大

由于计划编制的问题, 连铸坯无法在高温情况下(400°C - 700°C)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。大量的在库板坯会导致涨库, 造成人力物力的浪费不说, 也给倒垛制造了困难。

(2) 热装比低

目前宝钢轧制计划中的 CCR 占大多数, 这些板坯都需要在加热炉中加热后才能上轧机, 由于 CCR 板坯都是 400°C 以下, 在加热炉中要加热到 1200°C 以上, 造成大量的能源浪费。

(3) 计划单元偏小

通常一个轧制计划对应一个换辊周期, 每个轧制计划对应不同的计划类型。计划大小一般可以根据计划的长度(公里)、计划的板坯块数、计划的重量(吨)来衡量。在每天总产量一定的前提下, 计划单元越大, 换辊周期就越长, 需要的工作辊就越少。人工编排计划一般情况下计划的块数为 60 块左右, 长度大约为 50 公里左右, 重量为 1300 吨左右。由于编排计划是一项复杂、易疲劳的脑力劳动, 主要是根据计划员的经验来做的, 计划的大小还远没有达到理想情况。计划单元偏小, 意味着每天需要更多的工作辊, 不仅加重了工人的工作量, 还造成了经济上的浪费。

(4) 计划中存在违反轧制规程的情况

编排轧制计划需要考虑板坯间的宽度跳跃、厚度跳跃、硬度跳跃、表面等级、同宽公里数长度限制、冷热坯区间、混排计划中计划类型的衔接、混排计划中最小连续区间(MIX-ZONE)属性等多个轧制规程的约束。对于这种多约束的复杂问题, 只靠人力解决, 尤其是在长时间的脑力劳动下, 要想编制出理想的、没有任何违规的计划几乎是不可能。在目前的计划作业方式下, 轧制计划总会有或多或少的违规。一旦存在这种违规的情况, 计划的质量就会下降。热轧生产计划编制时必须同时考虑热轧、炼钢、连铸的生产约束条件, 只有对这些约束条件合理的考虑, 才能编制出可行的热送热装生产计划并进而能简化工艺流程, 缩短物流周期, 大幅度地降低消耗, 提高生产效率。

3 热轧自由轧制计划模型的研究和算法的设计

3.1 热轧自由轧制计划问题的描述

一个完整的轧制计划由烫辊材和主体材两部分组成。自由轧制计划中的主体材板坯编排在宽度上可实现连续自由变化—由宽到窄、同宽、由窄到宽，一般主要是指可“批量同宽轧制”或“大逆宽轧制”^[24]。其具体的轧制计划宽度变化如图 3.1 所示。烫辊材部分板坯宽度呈递增变化，其主要目的是初始轧制时，加热轧辊，使轧辊热膨胀均匀，保证后续钢材的质量。

通常一个轧制计划对应一个换辊周期，每个轧制计划对应不同的计划类型。若由计划员根据计划类型的要求，靠排程经验，人工挑选材料形成轧制计划，则难以综合考虑热装比、合同交货期、轧制规程、连铸热轧衔接、后续工序要求等诸多因素的影响，编制出整体最优的轧制计划。本模型基于上述问题，旨在提供一个整体最优的轧制计划形成方法。

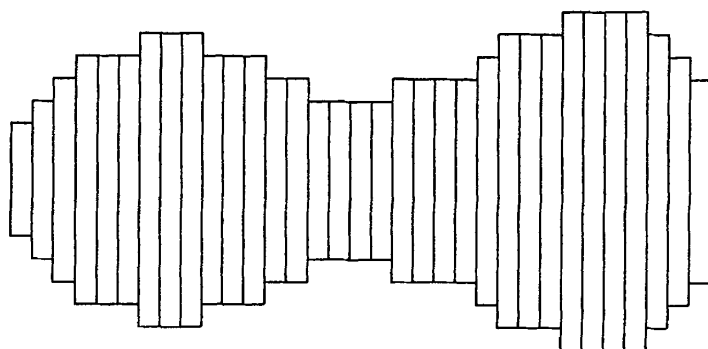


图 3.1 自由轧制计划单元宽度变化

Fig.3.1 Width Change in a free rolling unit

(1) 模型目标

- ① 保证板坯在计划单元中的计划轧制时间要求；
- ② 保证合同交货期；
- ③ 保证各工序集批要求；
- ④ 轧制厚度、宽度、硬度跳跃平滑；
- ⑤ 冷热坯尽量集中编制计划，冷热坯混装次数少，连续冷坯、连续热坯多；
- ⑥ 违规次数少；

(2) 模型约束

- ① 轧制计划公里数;
- ② 表面等级公里数;
- ③ 烫辊材段轧制规程: 宽度跳跃、厚度跳跃、硬度跳跃;
- ④ 主体材段轧制规程: 宽度跳跃、厚度跳跃、硬度跳跃;
- ⑤ 混合排程属性;
- ⑥ 冷热坯连续区间范围;
- ⑦ 板坯计划轧制时间规程;

3.2 建模思想和模型描述

3.2.1 建模思想

首钢热轧机组目前的生产计划编制任务主要采用人机交互的方式, 通过多次人工选择板坯和计算机界定规程的过程来完成。该方法由于无法同时考虑多项约束条件, 普遍存在着板坯规程跳跃大、计划单元长度小、表面质量难以保证等缺点, 使得轧辊磨损快, 生产效率低, 轧机产能无法充分发挥。为满足热送热装、直接热装以及直接轧制工艺要求, 减少连铸板坯规格并提高连铸机产量, 需要打破以往精轧机按轧制单元安排轧制计划的限制。这就要求精轧机可以由宽到窄, 也可以由窄到宽逆转轧制和不同宽窄地轧制, 同时要求同一宽度轧制批量增大, 轧制的厚度也可以一定程度上跳跃。自由轧制是一个换辊单元内, 钢质、厚度、宽度几乎可以不受限制地自由过渡的轧制技术, 宽度可以逆转而不受宽度过渡的制约。

热轧自由轧制生产计划的编制问题由于约束条件众多, 优化目标多, 是一个复杂的组合优化问题。针对自由轧制计划编制这个具体问题, 将其归结为带有时间窗的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)。VRPTW^[28]模型是VRP(Vehicle Routing Problem)问题的一般化表达, 它附加了传输时间和处理时间的因素, 模型中, 客户的服务需要在时间窗规定的时间区间开始。VRP的原型是旅行商问题, 即给定 n 个城市和每两个城市之间的距离, 求一条访问各城市一次且仅一次的最短路线。VRP问题是多路旅行商问题的扩展, 每个城市(顾客)有一个需求量, 每个旅行商(车辆)有一定的能力(载重), 一条路线上的顾客总需求量不能超过行使该路线的车辆的能力, 求从仓库出发回到仓库的一组总运输费用最少的路线。

在热轧自由轧制计划编制问题中, 板坯和轧制单元分别被看作需要服务的客户和运送车辆。宽度, 厚度, 硬度等跳跃的总惩罚值代表了运输成本。每块板坯的连铸完毕时

间和预期装炉方式的约束可看作时间窗。按照 VRPTW 的概念, 每块板坯必须放入且仅能放入一个轧制单元中。该模型的目标是要在多种约束条件下将板坯按最小的轧制计划数量和最小的惩罚值进行分配。这样, 可建立不确定轧制计划数的轧制计划 VRP 模型, 用于解决将热轧计划中的 n 块板坯编制为 M 个轧制计划的问题。

带时间窗口的 VRP^[25-27]是物流配送决策中经常遇到的实际问题, 每个顾客都有一个服务时间窗口, 车辆只能在这个时间范围内访问该顾客, 不允许早到和迟到, 称为“硬窗口”问题, 有一些模型中通过附加费用或惩罚来允许早到和迟到, 称为“软窗口”问题。

由于在编制计划的时候有很多板坯是只有切断时间的非库存虚拟板坯, 这就要求在编制计划的时候对板坯的轧制时间有特定的限制, 不能够出现轧制时间在切断时间前面的情况。基于此, 本文把热轧轧制计划的编制归结为带时间窗口的车辆路径问题 (VRPTW)。

VRP 是一个组合优化问题, 在实际应用中, 往往是多约束的复杂问题。目前学术界的诸多学者对此问题已进行了大量的研究工作。近些年来, 运筹学方法以及人工智能方法在理论和应用上被广泛用于求解该问题。文[29]详细描述了热轧及其生产过程, 将热轧生产调度归结为一个赏金旅行商规划问题, 运用基于禁忌搜索 (TS) 的启发式算法获取近似最优解。该方法已成功应用于加拿大最大的钢铁企业 Dofasco 中。文中禁忌搜索算法的初始解采用一种贪婪算法获得, 禁忌搜索对初始解的改进通过交换不同单元计划中的板坯组来实现。然而, 文中所描述的实际约束条件是针对 Dofasco 钢铁厂的特定环境下提出的, 因此文中所给出的方法并不能完全应用于其它钢铁企业中, 即其通用性较低。文[10]提出了热轧调度的数学规划模型和相关的算法, 对于热轧调度问题建立了 TSP 模型, 他们所提出来的把热轧计划编制问题归结为路径优化问题的思路, 特别是用于衡量热轧计划质量的板坯间宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值表, 对于以后的研究者影响很大。但是, 该文中仅对单个的轧制单元调度进行了研究, 而这样的情况与当前诸多钢铁企业同时编制多个轧制单元的实际情况有所不同。文[30]主要考虑了热轧生产流程的同时性, 包括板坯的加热时间, 传搁时间和轧制时间等等, 并运用贪婪算法求得数学规划模型的可行解。但是文中对于轧制单元的容量考虑较少。文[31]将加热炉和热轧机组作为一个调度单元进行整体建模, 开发了基于 Implicit Enumeration Procedure 的求解算法。系统物流模型中热轧机组仅与一个加热炉相关联的模式与现在广泛采用的多加热炉并行的生产模式有所不同。文[32]提出一种多旅行商并行策略, 采用改进的遗传算法 (MGA) 求解热轧生产调度问题。该方法已应用于上海宝钢热轧厂, 然而随着生产设备过程控制水平的不断提高, 文中提到的一些工艺约束条件已逐渐被克服, 比如相邻带

钢的轧制宽度、厚度和硬度不能同时跳跃等等。这就需要研究人员在新的工艺条件下对生产调度原则进行重新考虑。文[33]针对热轧生产调度开发了决策支持系统，系统提供了半自动调度方法来配合人工调度，用于处理现场环境的不稳定因素和不确定事件。文[34]将该问题归结为静态车辆路径问题（SVRP）。以上所述的各种算法各有所长，根据不同的实际问题可以选择不同的算法来求解，或者采用各种算法混合求解也可以得到较好的效果。本文采用进化计算结合专家系统的混合算法求解。

3.2.2 模型描述

数学模型定义如下：

$$\text{Min} \sum_{k=1}^M \sum_{i,j}^n (P_i^c + P_{ij}^w + P_{ij}^p + P_{ij}^h) x_{ijk}, \quad M \in [M_{\min}, M_{\max}] \quad (3.1)$$

$$\sum_{k=1}^M y_{ik} = 1, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1, \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.4)$$

$$\sum_{p=1}^m s_{ip} = 1, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.5)$$

$$L_{ik} \leq \sum_{p=1}^m s_{ip} R_p, \quad i=1,2,\dots,n, \quad k=1,2,\dots,M \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=1}^n z_{ijk} l_j \leq W_{\text{same}}, \quad k=1,2,\dots,M, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.7)$$

$$t_{i,\text{cut}} + T_{\text{trans}} \leq t_{ir} \leq t_{iR}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.8)$$

$$t_{ir} = T_{\text{start}} + \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{n_k} T_i y_{ik} + (k-1)T_{\text{turn}}, \quad k=1,2,\dots,M, \quad i=1,2,\dots,n_k \quad (3.9)$$

$$Wgt_{\min}^{(\text{Type})} \leq Wgt_k^{(\text{Type})} \leq Wgt_{\max}^{(\text{Type})}, \quad k=1,2,\dots,M \quad (3.10)$$

$$M_{min} = \text{int} \left(\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L_{max}} \right) + 1 \quad \text{int 表示取整} \quad (3.11)$$

$$M_{max} = \text{int} \left(\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L_{min}} \right) + 1 \quad \text{int 表示取整} \quad (3.12)$$

其中：

n	已收池的某计划类型板坯总数
m	表面等级的种类数
M	轧制单元个数
p_i^t	板坯 i 关于轧制时间的惩罚值
p_{ij}^w	板坯间宽度组跳跃惩罚值
p_{ij}^g	板坯间厚度组跳跃惩罚值。
p_{ij}^h	板坯间硬度组跳跃惩罚值。
l_i	板坯 i 的轧制长度
R_p	表面等级为 p 的板坯可允许的最大轧制长度的约束
L_{max}	轧制计划单元最大长度约束
L_{min}	轧制计划单元最小长度约束
L_{ik}	轧制计划 k 中板坯 i 之前所有板坯轧制长度
W_{same}	连续轧制相同宽度的板坯可允许的最大轧制长度
$t_{i,cut}$	板坯 i 连铸机下线时的切断时刻
T_{trans}	板坯从连铸机到轧机所需要的传搁时间
t_{ir}	板坯 i 的实际轧制时刻
t_{iR}	板坯 i 按其预期装炉方式的最晚轧制时刻
T_i	轧制第 i 块板坯所需要的时间

T_{start}	计划开轧时间
T_{turn}	轧制单元间的换辊时间
M_{min}	轧制单元的最小个数
M_{max}	轧制单元的最大个数
$Wgt_{min}^{(Type)}$	类型为 $type$ 的主体材最小重量约束条件
$Wgt_{max}^{(Type)}$	类型为 $type$ 的主体材最大重量约束条件
$Wgt_k^{(Type)}$	类型为 $type$ 的轧制单元 k 的主体材重量
$x_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	轧制计划 k 内板坯 i 后直接生产板坯 j 否则
$y_{ik} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	轧制计划 k 中包含板坯 i 否则
$z_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	板坯 i 和 j 同在轧制单元 k 中, 且 i, j 同宽度连续轧制 否则
$s_{ip} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	板坯 i 的表面等级为 p 否则

式(3.1)为模型的目标函数, 使得一个计划中相邻的板坯在宽度、厚度、硬度组跳跃惩罚最小。式(3.2)保证一块板坯只出现在一个轧制计划当中。式(3.3)和(3.4)保证板坯处理的唯一性。式(3.5) 保证一块板坯只有一种表面等级。式(3.6)表示第 k 个单元中表面等级为 p 的板坯, 其之前已轧制的总长度应小于 R_p , 此约束是从板坯的轧制表面质量角度考虑的工艺约束条件, 即轧制质量较高的板坯要求在整个轧制单元的较前部分完成轧制, 因为此时轧辊更换后不久, 磨损较小, 其轧制成卷的表面等级也相对较高。式(3.7)表示同宽度连续轧制长度的约束, 此工艺约束条件是为了防止制造过程中同宽度板坯的连续轧制而对工作辊造成的破坏。式(3.8)为板坯轧制的时间窗工艺约束, 即板坯的开轧时间应保证在板坯的连铸下线时间和板坯的传隔时间之后进行装炉轧制, 另外其最晚轧制时间还需要满足装炉方式的时间要求。式(3.9)表示板坯的实际轧制时刻计算式。式(3.10)表示计划类型为 $Type$ 的主体材总重量约束, 此约束是根据板坯的钢种类型与轧辊之间磨损程度的关系给出的工艺约束条件, 即工作辊轧制完成一定重量的板坯之后, 其轧制能力已大幅度下降, 需要对工作辊进行更换。式(3.11)和(3.12)是本模型给出的根据计划单元轧制长度的约束条件得到的单元最大个数和最小个数。

3.3 进化计算结合专家系统求解模型

本文求解步骤分为两大步,首先利用进化计算算法求解热轧中厚板自由轧制计划编制的初始最优解;然后再结合专家系统的进一步对初始最优解进行修正,得到最终的最优解。

3.3.1 进化计算

进化计算^[35,36]是模仿生物进化和自然选择的过程中表现出来的优化规律和方法而提出的一种智能计算方法,对于自然科学领域和社会科学领域以及工程技术领域提出的复杂的,用传统优化方法难以解决的优化问题,进化计算方法都可以很好的解决。目前在进化计算的理论上的研究主要以以下方面展开:

① 进化计算的数学模型和理论基础,如算法的收敛性分析,复杂性分析以及求解问题的可行性分析等。

② 将进化计算的方法与其它优化方法结合起来,提出新的混合优化算法。

③ 对现有进化计算方法提出改进,或者从自然界和社会的各种现象获得新的启发,提出新的进化计算方法,或者新的进化算子和新的编码方式,如模拟昆虫的社会性行为,提出群集智能优化算法,根据对量子相干性的研究,提出新的量子编码方式,进而提出量子进化算法等。

④ 研究进化计算在计算机上的高效的求解方法,如并行计算和小生境遗传算法等。

由于进化计算方法具有良好的鲁棒性和并行性,对问题的领域知识没有过高的要求,因此在科学和工程领域以及其它领域都获得了广泛的应用,其中有些问题用其它优化方法难以解决或者根本不能解决而只能用进化计算的方法加以解决。

(1) 染色体编码方式:

染色体编码采用整数编码方式,基因的个数为轧制预计划的板坯个数 n ,每个基因的取值为 $[1, n]$ 之间的不重复整数,即某一基因位表示板坯池中的某一块板坯。例如:

序号: 1 2 3 4 5 6 7 8.....

染色体: 5 8 9 10 20 16 2 7.....

(2) 新染色体的产生:

由于本文采用整数编码方式,而且染色体内自然数不可重复相同次序对结果也有影响,针对染色体的这种编码方式,本文中新染色体的产生以单点换位、单点移位、多点换位三种进化算子来实现。

单点换位: 假设换位的位置为 5 和 7

序号 1 2 3 4 5 6 7 8

换位前的个体	2	18	27	5	26	10	3	4
换位后的个体	2	18	27	5	3	10	26	4

单点移位：假设移位的子串为位置 3 的后面

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
换位前的个体	2	18	27	5	26	10	3	4
换位后的个体	2	18	4	27	5	26	10	3

(3) 种群更新

对生成的新染色体进行选择，为了保证最优抗体的进化，本文采用锦标赛选择方法对抗体进行更新，并更新抗体记忆库。锦标赛选择^[37,38]是一种常用的选择方式，将上一代群体中的个体和本次进化操作后产生的所有新个体放到一起按适应值从大到小的顺序排队，然后取排在前面的 N 个（群体规模）个体组成新一代群体。

3.3.2 专家系统方法

专家系统(expert system)是人工智能应用研究最活跃和最广泛的课题之一。专家系统是一个智能计算机程序系统，其内部含有大量的某个领域专家水平的知识与经验，能够利用人类专家的知识和解决问题的方法来处理该领域问题。也就是说，专家系统是一个具有大量的专门知识与经验的程序系统，它应用人工智能技术和计算机技术，根据某领域一个或多个专家提供的知识和经验，进行推理和判断，模拟人类专家的决策过程，以便解决那些需要人类专家处理的复杂问题，简而言之，专家系统是一种模拟人类专家解决领域问题的计算机程序系统。

专家系统包括某个具体专业领域的知识、对领域中某个问题的理解以及解决这些问题的技能。专家系统应该具有四个基本特征^[39]：

(1) 启发性：人类专家在科学实验和生产实践中积累起来的知识很多是经验性知识，它们没有严格的理论依据，也很难建立精确的数学模型，但对于解决实际问题往往非常有效，这就是启发性知识。以人类专家为主要部分的专家系统，不仅能使用严格的逻辑性知识，而且也要能使用启发性知识。

(2) 透明性：专家系统必须能解释其推理过程，并且对有关它的知识询问做出回答。也就是说每条知识应具有良好的用户接口。专家经验知识是在实践中总结出来的，没有上升为理论，增加透明性就能够增加用户对专家系统的信任度，有助于知识检测。

(3) 灵活性：经验知识在发现新问题，解决新问题的过程中不断更新。一个专家系统应该很容易地加入知识对象。另一方面专家经验知识的表达是非常困难的，这就应该

允许专家系统在反复修改的过程中表达出来。因而，也要求专家系统的知识必须具备灵活性。

(4) 智能性：专家系统是人工智能的一个分支，它必须具有相对独立的解决问题能力，成为独立的对象，这就要求系统能有总结经验，完善自身的功能，也就是具有自学习功能。

专家系统是基于知识的智能系统，主要包括知识库、数据库、推理机制、解释机制、人机接口和知识获取等功能模块。即能利用专家的知识进行启发式推理，能够解释其推理过程，又对用户的询问做出回答，并且能够不断的、灵活的增加新的知识的计算机程序。各部分之间的组成关系如图 3.2 所示：

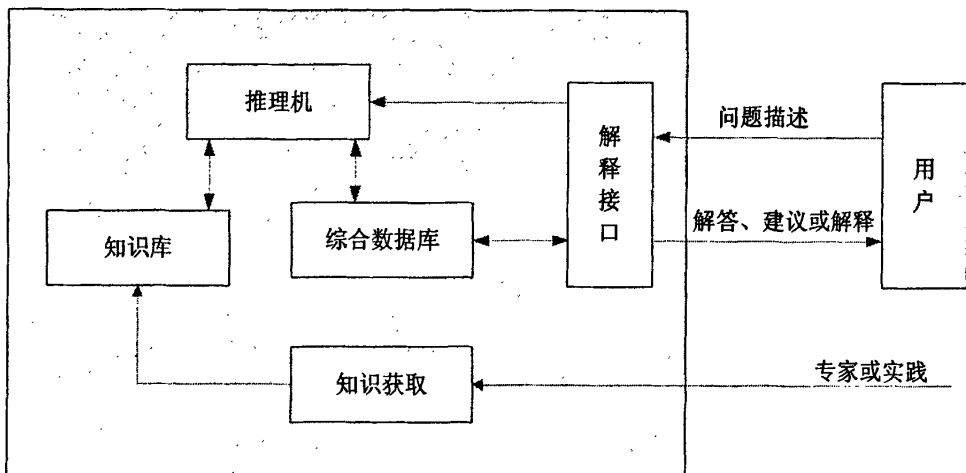


图 3.2 专家系统一般功能结构图

Fig.3.2 The features chart of expert system

专家系统第一个重要组成部分是知识库，它存储从专家得到的关于某个领域的专门知识。专家系统的第二个组成部分是推理机，它具有依据一定策略进行推理的能力。即能够根据知识推导出结论，而不是简单地去搜索现成的答案。

知识库是专家系统的核心之一，只用于存放不依赖于领域中具体问题的知识，如一些判断性知识和元知识。

为了建造知识库，我们需要解剖如何存储知识的问题，这就是知识表示，确切的说就是如何以计算机能够存储的形式表达知识。另一个与此相关的问题是如何从专家那里获得知识，即所谓的知识获取问题，这是建立专家系统过程中的重要问题。

专家系统中与领域中具体问题有关的知识(如描述问题的数据等)则放在综合数据库中。综合数据库是用于存放系统运行过程中所需要和所产生的所有信息,包括问题描述、中间结果、解题过程中的记录等信息。数据库的组织、数据间的联系、数据的管理是设计数据库时需要考虑的重要问题。在专家系统中,数据的表示与组织结构应尽量做到与知识的表示与组织相容,以便推理机制使用知识库中的知识和描述问题当前状态的数据去求解问题。

专家系统^[40]的很多能力来自于对所存储的大量专家知识和恰当地应用有效的推理技术。推理方法不可能完全独立于说要解决问题的种类,但同时,推理模型的研究又不能过于依赖某一特定问题,以致在其它场合不能使用。我们所要寻求的推理方法应该是很有效的,同时又可普遍地应用于描述和解决一类问题。

推理机除了具有推理能力以外,还包括和使用者进行对话的能力及解释的能力。解释子系统程序负责回答用户提出的问题,是实现系统透明性地主要部件。

知识获取子系统负责管理知识库中的知识,包括根据需要修改、删除或添加知识及由此引起的一切必要的改动,维持知识库的一致性、完整性等。它是实现系统灵活性的主要部件,领域专家可以修改知识库而不必了解知识库中知识的表示方法等细节,大大提高了系统的可扩充性。

3.3.3 混合算法求解流程

进化计算结合专家系统的混合算法求解步骤:

Step1: 算法初始化: 给出算法参数,并给出初始种群。

Step2: 当前种群抗体的确定: 利用专家系统方法产生当前抗体群,并计算各抗体的适应值。

Step3: 新抗体的产生: 对当前种群中的抗体进行进化算子操作,依次以不同概率进行单点换位、多点换位和单点移位操作,生成新的种群抗体。

Step4: 群体的更新: 采用锦标赛选择方法对抗体进行更新。首先对新种群进行可行化处理,计算其适应值;然后进行选择更新操作,并记录当前群体的最优抗体。

Step5: 判断是否满足结束准则: 是则转到 Step6; 否则转到 Step3, 重复进行进化操作。

Step6: 计算每个 M 条件下的适应值: 如果 M 小于等于其最大值,则记录当前 M 条件下的最优解和适应值, $M=M+1$, 转到 Step2; 否则, 转 Step7 进行计算。

Step7: 将各个 M 条件下的适应值和其对应的最优解进行比较, 取适应值最小的抗体作为初始最优解。

Step8: 最优解的确定: 将得到的初始最优解根据专家规则进行修正, 得到最终的最优解, 算法结束。

混合算法的具体流程图如图 3.3 示:

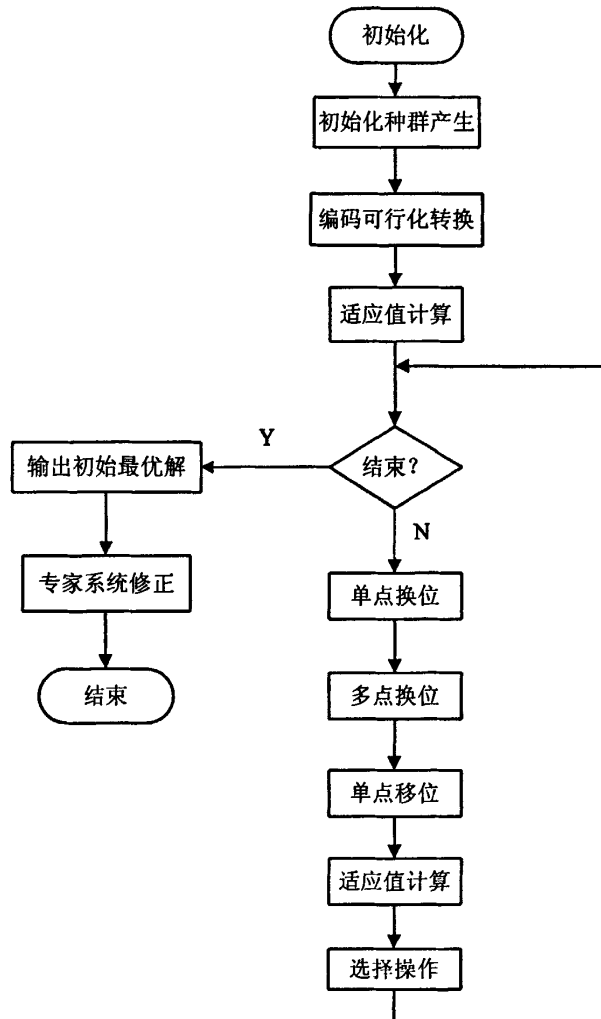


图 3.3 混合算法流程图
Fig.3.3 Flow chart of mixing algorithm

3.4 仿真试验

为了验证轧制计划模型及算法，从首钢数据库中随机抽取 589 块板坯来编制轧制计划，模型中的宽度正跳、硬度和厚度的惩罚系数参照文献^[10]的设置，宽度反跳惩罚系数的选取如表 3.1 所示的惩罚函数表。根据生产的实际情况，板坯在轧制计划中的最大轧制公里数和表面等级的关系如表 3.2 所示。

表 3.1 宽度反跳跃惩罚系数表
Tab.3.1 Width jump penalty coefficients

宽度跳跃 (mm)	惩罚	宽度跳跃 (mm)	惩罚
0~5	1	91~115	50
6~10	2	116~140	70
11~20	5	141~165	90
21~30	10	166~190	120
31~50	15	191~215	150
51~70	20	215~250	200
71~90	30	250~999	1000

表 3.2 板坯在轧制计划中的最大轧制公里数和表面等级的关系
Tab.3.2 The referring table for slab surface and slab position in rolling plan

表面等级	最大公里数
01	70
02	90
03	120
04	160

主体材的长度约束 $L=140\text{mk}$ ，轧制同宽度板坯的长度约束 $R=35\text{mk}$ ，冷热坯连续轧制最小块数为 12 块。目标函数中轧制时间惩罚系数如表 3.3 设置。种群规模为 20，单亲遗传算子的单点基因换位概率为 $p_e=0.8$ ，多点基因换位概率 $p_m=0.4$ ，单点基因移位概率 $p_s=0.4$ ，算法结束准则为连续迭代 500 代。

表 3.3 板坯轧制时间惩罚系数设置

Tab.3 Rolling time penalty coefficients

轧制时间-切断时间-传隔时间(小时)	惩罚
< 0	∞
0~2	0
2~6	5
6~10	10
10~16	50
16~24	100
>24	1000

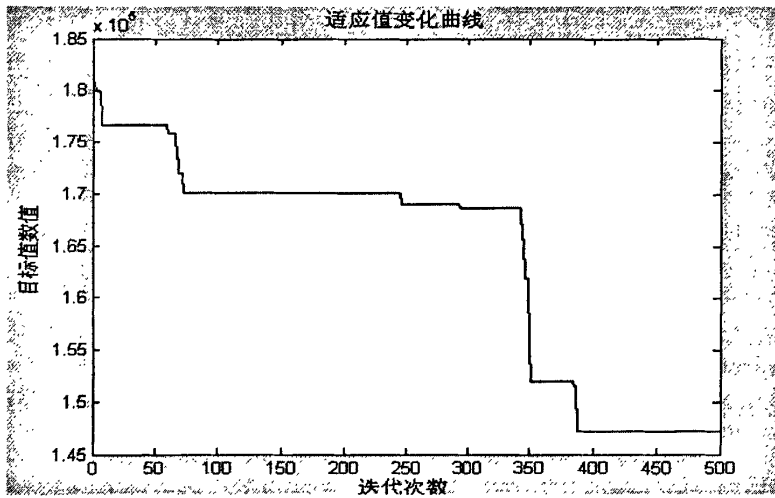


图 3.4 目标函数值随迭代次数变化图

Fig.3.4 The change figure of objective function value with iterative time

仿真结果如图 3.4 所示，迭代 388 代之后适应值趋于稳定不再变化。算法将 589 块板坯编制成 7 个轧制计划，平均块数为 84 块，主体材没有违反轧制规程的情况出现。任选 3 个计划，它们的宽度、厚度变化通过图 3.5 可以看出，模型形成的计划宽度正反跳跃、厚度跳跃平滑。仿真结果说明该模型算法可应用于生产实际。

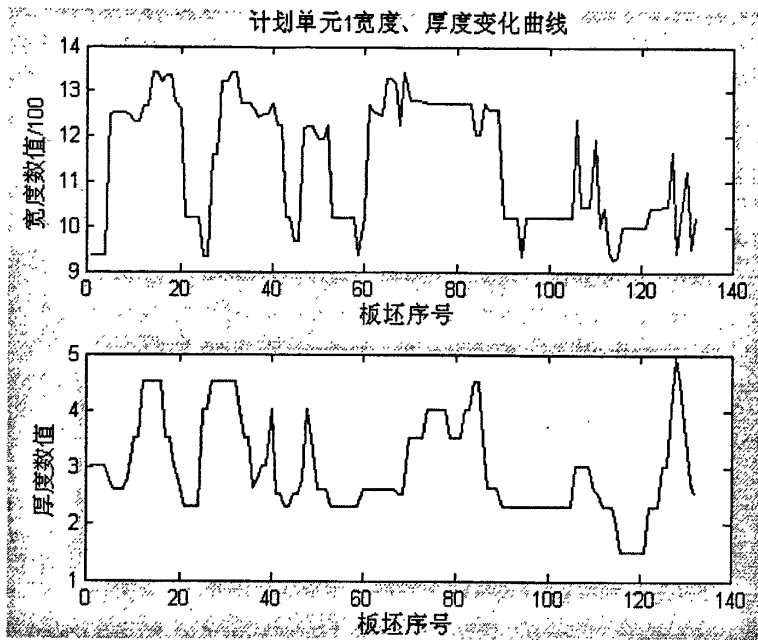


图 3.5(a) 计划单元 1 宽度、厚度变化曲线图

Fig. 3.5(a) The width and thickness change of the first unit

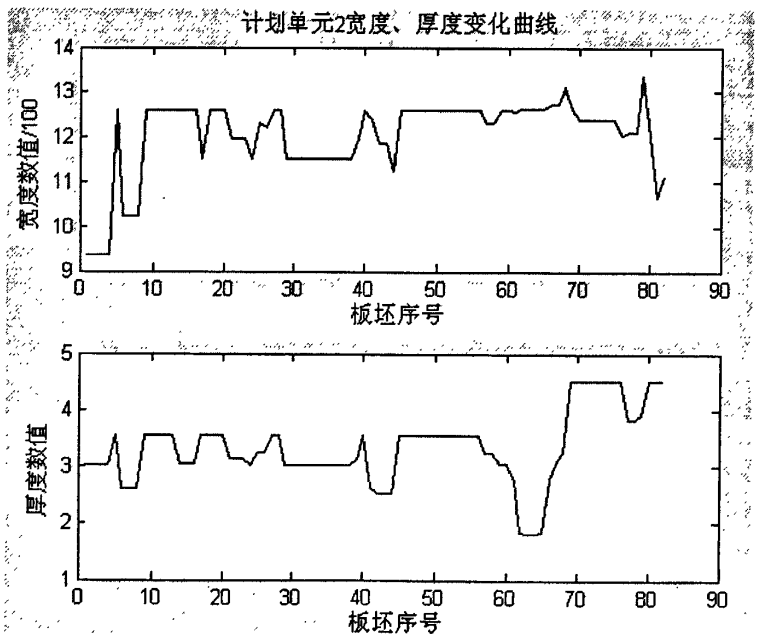


图 3.5(b) 计划单元 2 宽度、厚度变化曲线图

Fig. 3.5(b) The width and thickness change of the second unit

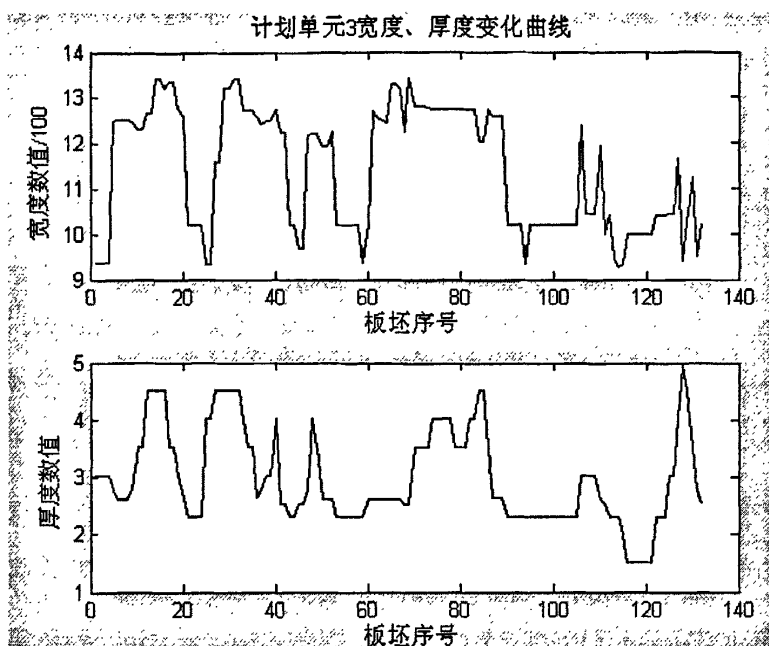


图 3.5(c) 计划单元 3 宽度、厚度变化曲线图

Fig. 3.5(c) The width and thickness change of the third unit

4 系统详细设计

4.1 板坯收池预处理

在轧制计划编制初期,可供计划编制的板坯包括实物板坯和虚拟板坯。所谓实物板坯是已完成连铸工序,暂时存放在板坯库或保温坑中的板坯;虚拟板坯是指尚未浇铸形成,但已完成连铸计划编制的板坯,此类数据带有虚拟的板坯切断时间。实物板坯和虚拟板坯都具有相应的合同交货期和工序计划日期。而板坯的此类属性是由 MES 生产计划与调度的上层,即 ERP 层根据客户需求和企业整体生产能力制定的。

根据用户需求和现场实际情况,在热轧板坯收池预处理的设计过程中,采取两种规则进行收池处理:交货期优先和热装优先。

(1) 在采用交货期优先规则进行板坯收池预处理的过程中,主要是将合同交货期和工序计划日期两项指标综合优先级作为板坯预选标准,计算公式如式(4.1)。

$$PRI = \mu_o P_o + \mu_p P_p \quad (4.1)$$

其中: P_o 、 P_p 分别表示交货期优先级和工序计划日期优先级, μ_o 、 μ_p 分别为各优先级的权重系数。 P_o 与 P_p 的计算方法如图 4.1 所示,横坐标表示交货期(计划日期)与当前日期的差值,纵坐标为优先级。若所求差值在 d_1 和 d_2 之间,则优先级计算满足线性关系;其余部分为优先级的最大、最小值。板坯综合优先级计算之后,根据机组生产能力对轧制板坯进行收池。

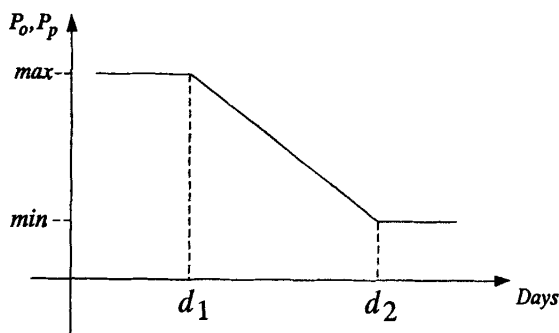


图 4.1 合同交货期、工序计划期优先级计算

Fig.4.1 The priority calculation of order delivery date and working plan date

(2) 在采用热装优先规则进行板坯收池预处理的过程中，主要是将热装时间、计划开轧时间、板坯切断时间、传搁时间等的综合考虑作为板坯预选标准。其具体计算方法如图 4.2 所示，横坐标表示时间轴，纵坐标表示优先级。图中 T_2 表示计划开轧时刻， T_1 表示计划开轧时刻的前热装时间的时刻（即 $T_2 - \text{热装时间}$ ）， T_4 表示完成轧制所有期望收池数目板坯的预估计时刻， T_3 表示 T_2 和 T_4 的中间时刻。进行收池时，如果板坯的切断时刻满足在 T_1 和 T_3 之间，则优先级为最大值；如果板坯的切断时刻满足在小于 T_1 或者在 T_3 和 T_4 间的关系时，则优先级次之；其余情况则优先级取最小值。根据此方法对优先级的计算后，根据机组生产能力对轧制板坯进行收池处理。

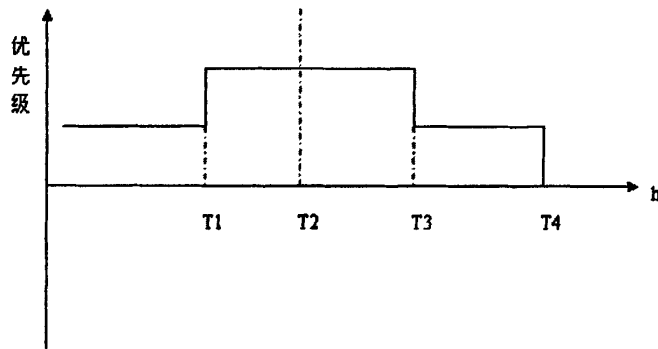


图 4.2 热装优先方式优先级计算
Fig.4.2 The priority calculation of hot charge

4.2 自由轧制计划热装比的提高

80 年代以来，围绕着节能而出现的钢的连铸坯的热送、热装和直接轧制三种工艺将炼钢、连铸到轧钢的各工序高温直接连接，连续集成一体，进行同期化生产。与传统的连铸坯装炉加热轧制工艺(简称冷装工艺)比较，具有节能，提高产品质量和成材率，简化生产工艺流程和缩短产品生产周期等特点。为此，国外许多钢铁企业，近年来致力于发展热装热送和直轧工艺，而在采用直接轧制（HDR）的时候，利用连铸机出口直接对准轧制线的有利条件，直接轧制非常方便，但现采用较少了。究其原因，主要有以下几方面：(1) 采用高速连铸后，铸坯温度显著降低，不再适于直接轧制；(2) 铸坯表面质量要求高，经常需要下线清理；(3) 直接轧制导致轧制生产刚性过高。直接热装轧制（DHCR）利用加热炉补热，铸坯装炉温度 $900^{\circ}\text{C} \sim 750^{\circ}\text{C}$ ，可以大幅度节省能源，缩短工艺流程，因此目前国内外各厂普遍采用该工艺。直接热装轧制的基本条件是：(1) 具备设备和平面布置条件(铸坯输送、连铸-热轧间距离合理等)。(2) 具备无缺陷铸坯生

产技术(铸坯无清理率 $\geq 98\%$)。(3) 生产适宜的钢种(某些钢种不适宜高温热装轧制)。(4) 具备连铸—热轧生产一体化(同期化)管理技术。提高热装比、热装温度、热装率和直装率已成为衡量钢铁生产工艺装备的重要指标。在改进工艺的同时,迫切需要对炼钢—连铸—热轧的集成生产管理方法进行研究和开发,使物流和信息流尽可能同步,有效地发挥热装、热送和直轧工艺的作用,最大限度地提高热装率和热装温度,进而达到降低产品成本,提高产品质量,缩短产品生产周期的目的。

表 4.1 四种装炉方式效果比较
Tab.4.1 The contrast table of four charge mode

方式	CCR (冷装)	HCR (温装)	DHCR (热装)	HDR (直轧)
板坯温度 ($^{\circ}\text{C}$)	<400	400~700	700~1100	>1100
炉内加热时间 (h)	4	2~3	1	0
燃料消耗 ($10^6\text{kJ}/\text{t}$)	1.338	0.878	0.335	0
氧化烧损 (%)	1.0~2.0	0.5~0.7	0.2~0.5	0
出钢-成品时间 (h)	30~40	5~10	1~2	0.5~1

表 4.1 中不难看出提高装炉温度,减少板坯在炉时间、燃料消耗、氧化烧损及物流周期,对于降低能耗与成本、提高成材率和经济效益是十分明显和直接的。此外还能使产品纯净无缺陷,有利于产品质量的稳定与提高。对生产的节能、降耗、稳定、高产有重要的意义。

在设计自由轧制计划模型的同时,由于本文通过两种板坯收池方式预先设定板坯的优先级,而两种收池方式中均有板坯切断时间的优先级,这样基本能够确保先切断的板坯先轧制,从而提高了装炉温度,提高了热装比。通过大批量数据的验证,采取此方法后,热轧自由轧制计划批次的日平均热装比基本能够达到 60%,远远大于人工编排计划的 20%水平。

4.3 自由轧制计划的编排方法

4.3.1 轧制计划编排的总体步骤

自由轧制计划编制的总体步骤为:

Step1: 板坯收池: 将入口板坯按照用户需要的收池规则设置优先级,然后按照优先级选取板坯。

Step2: 板坯分类: 将板坯池中的板坯按照轧制计划类型分类, 同一轧制计划类型的板坯分为一类, 编制轧制计划。

Step3: 先针对每种轧制计划类型用进化算法(初步考虑宽度、厚度、硬度、轧制时间)求出一个轧制计划序列的初步结果, 将未排入轧制计划的板坯放入最后一个留出的轧制计划单元中。

Step4: 针对每一类型的轧制计划按照专家系统进行修正: 最后一个轧制计划单元的板坯作为机动调整板坯, 对于每一规则的修正, 在最后轧制计划板坯中如果有板坯可用来调整则修正, 否则, 删除此违规板坯。规则处理优先次序: 表面等级轧制约束—宽度—厚度—硬度—同宽度连续轧制—同冷热坯轧制约束。

Step5: 针对每种类型的轧制计划进行板坯插入操作: 为了使轧制计划单元长度越长、编排入的板坯数量越多, 将最后一个轧制计划单元中的板坯根据各种约束条件, 考虑自由轧制计划的平滑性要求, 将其插入到各个已派自由轧制计划中。

Step6: 将每一种计划类型的最后一个轧制计划单元中的板坯汇总, 考虑混排计划, 可以混排的板坯归为一类, 采用混排模型运算出一个或多个轧制计划。

Step7: 烫辊材计划编制: 对于每一个主体材计划, 编制相应的烫辊材计划。

Step8: 计划规程检查: 对每一个轧制计划检查, 对每一块板坯做出违规标记: **width**—宽度跳跃违规; **thick**—厚度跳跃违规; **hard**—硬度跳跃违规; **samewidth**—同宽度连续轧制超长违规; **surface**—表面等级违规。

Step9: 写入轧制时间。

自由轧制计划编制的总流程图为:

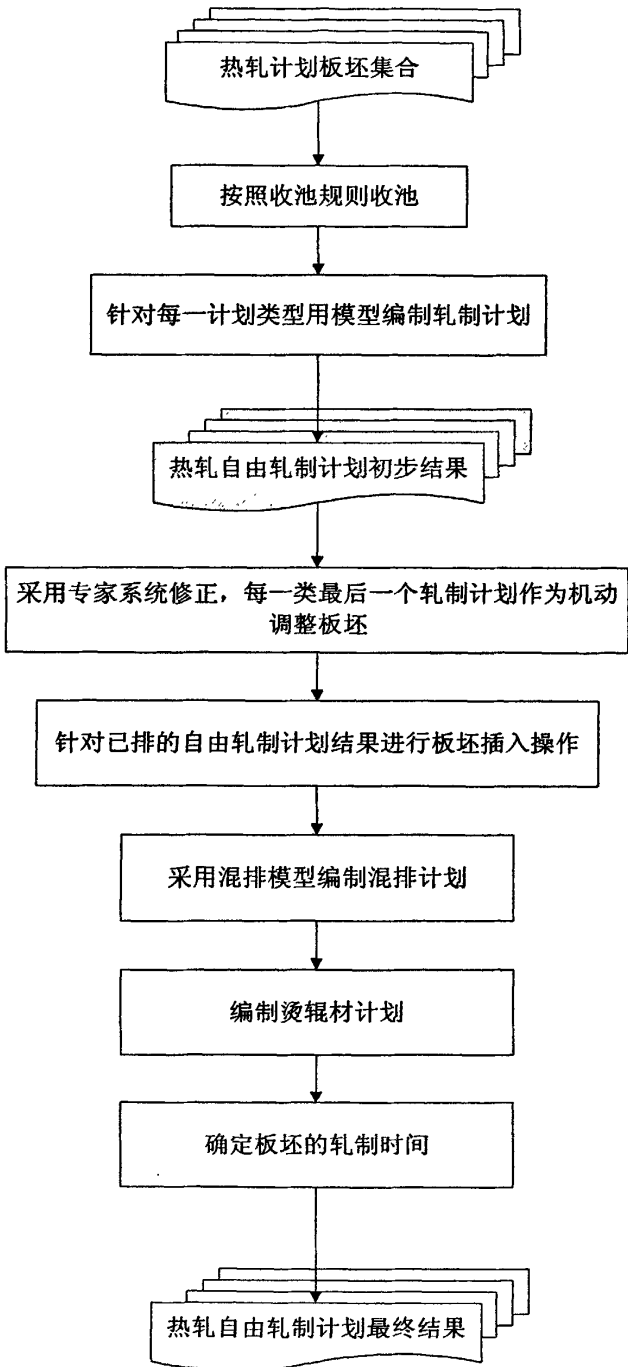


图 4.3 自由轧制计划编制整体流程图

Fig.4.3 Flow chart of Free rolling plan's forming

4.3.2 单计划类型主体材计划编制

(1) 编码到解空间的转换

本文在第三章已经讨论了进化计算方法结合专家系统规则解决带时间窗口的车辆路径问题的可行性并仿真验证了结果符合要求,算法的各参数设置,惩罚值的设置与仿真时的设置一样,本文在此不再复述。考虑到单计划类型批量调度问题板坯数量庞大、约束条件繁多,对求解时间要求较高的情况,在进行算法编码时,采用 n 位无重复的整数串对种群个体进行编码。

在将编码中的板坯向各轧制计划对应时,按照 n 位整数串的次序依次完成轧制单元的匹配,可获得编码到解空间的对应。但是可以发现,这样的映射方式在生产实际中会由于轧制单元中的长度与轧制表面等级间的约束条件而产生问题的不可行解,而且此类不可行解的产生概率是相当大的。针对这种情况,在本章中,将解空间分为可行解和不可行解两部分,以此来实现编码到解空间的转化。具体步骤如下:

步骤 1: 初始化当前各轧制单元的轧制长度 $L_k = 0$ ($k = 1, 2, \dots, M$), $i = 1$, 轧制计划号 $planNo = 0$ 。

步骤 2: 检查 $i > n$ 是否成立,若成立,去步骤 4; 否则,判断轧制单元号 $planNo \geq M - 1$ 是否成立,若成立,则 $planNo = 0$ 。

步骤 3: 计算 L_k 和当前轧制单元 $planNo$ 中板坯的表面等级不高于第 i 位板坯的总轧制长度 L_{ik} 。若 L_k 满足式(3.6),则板坯 i 可被放入轧制单元 $planNo$ 中, $i = i + 1$, $planNo = planNo + 1$, 去步骤 2; 否则,将板坯 i 放入到轧制单元 $planNo = M - 1$ 中, $i = i + 1$, 去步骤 2。

步骤 4: 编码转换完成。

按照上述步骤,算法即可将任意 n 位整数编码转化为满足约束条件的模型可行解部分和不可行解部分。对于可行解部分,可以通过使用进化计算算法进行求解;对于不可行解部分,可以通过专家系统和插入操作将一部分转化为可行解。

(2) 专家系统知识的引入

在模型的目标函数中,本章给出将相邻板坯的宽度、厚度和硬度跳跃的约束作为硬约束进行了强制规范,因此对其相应惩罚系数进行了限制。对于板坯轧制时间的相关惩罚,则是通过设定高惩罚值来进行限制的。因此,本文针对板坯的轧制时间等的违规,采用先高惩罚值过滤,再用基于专家系统的规则修正的方法来保证计划编制过程的可靠性和实用性。规则修正算子采用替换,插入和删除三种形式。对于紧急板坯而言,本文规定一旦其被编入轧制计划,将不可对其进行删除操作,其优先级在违规修正过程中处

于最高地位。实际上，上述提到的板坯轧制时间违规现象，由于之前的高惩罚值过滤，其产生的概率就是很小的，并且，在用进化计算算法求解的时候，是不能够保证算法能够在用户允许的时间范围内找到板坯的最优组合次序，一般情况下，只要找到一个可行的近优解就足够了。在算法找到了这个近似最优解后，计划间还存在着少量的违规情况，为了消除这种情况，本文引入了由 8 个规则构成的专家系统知识结合进化计算算法作为求解的策略，结果显示这种方法是非常有效的，因此，基于专家系统的违规修正是可行的。

规则 1：对同表面等级违规板坯的修正，从该轧制计划类型的最后一个轧制计划单元中查找同类型板坯且表面等级合要求的进行替换，如果没有，删除此块板坯。

规则 2：以宽度为首要满足条件，首先检查计划宽度正反跳跃，如果宽度正反跳跃太大，出现宽度违规，则从该轧制计划类型的最后一个轧制计划单元中选取可过渡的表面等级满足要求的板坯插入，如果没有合适的板坯，删除该板坯，直到整个轧制计划单元无宽度违规现象。

规则 3：采用厚度规则修正，如果厚度跳跃太大，从该轧制计划类型的最后一个轧制计划单元中选择厚度合适且宽度也合适的板坯替换，如果找不到合适板坯，删除该板坯。

规则 4：对硬度进行修正，如果硬度跳跃太大，从该轧制计划类型的最后一个轧制计划单元中选择硬度合适并且宽度、厚度也合适的板坯替换，如果找不到合适板坯，不做处理。

规则 5：同宽度连续轧制违规修正，在同宽度板坯中从后向前依次进行删除操作，直到满足约束为止；此时检查其它约束是否违规，如有违规可从该轧制计划类型的最后一个轧制计划单元中选取合适的作为过渡。

规则 6：对冷热坯约束违规的修正，如果冷热坯约束不满足，则从该轧制计划类型的最后一个轧制计划单元中选取同类型板坯插入，如果没有，不做处理。

规则 7：轧制计划长度约束的检查，如果轧制长度超出最大值，依次从后删除板坯，直到满足要求为止，如果轧制长度小于最小值，选取跳跃满足要求的板坯顺接，若选不到合适板坯，就删除此计划，板坯归入混排计划重新排。

规则 8：对轧制单元总重量违规修正，检查已编制的各轧制单元，若轧制单元总重量小于最小要求重量，则删除该单元所有板坯；若大于最大要求重量，则从后向前依次删除板坯，直到约束为止。

(3) 主体材规则修步骤及流程图

在规则修正的时候采用串行修正方式。把 8 个规程按照约束的强弱程度由强到弱排序，在修正的时候先修正约束强的，然后修正约束弱的。在修正后面的规程的时候必须满足前面的规程。这样能够保证用户最关心的约束几乎不会出现违规的现象。以宽度规则修正为例，给出规则修正的流程图如图 4.4 所示。

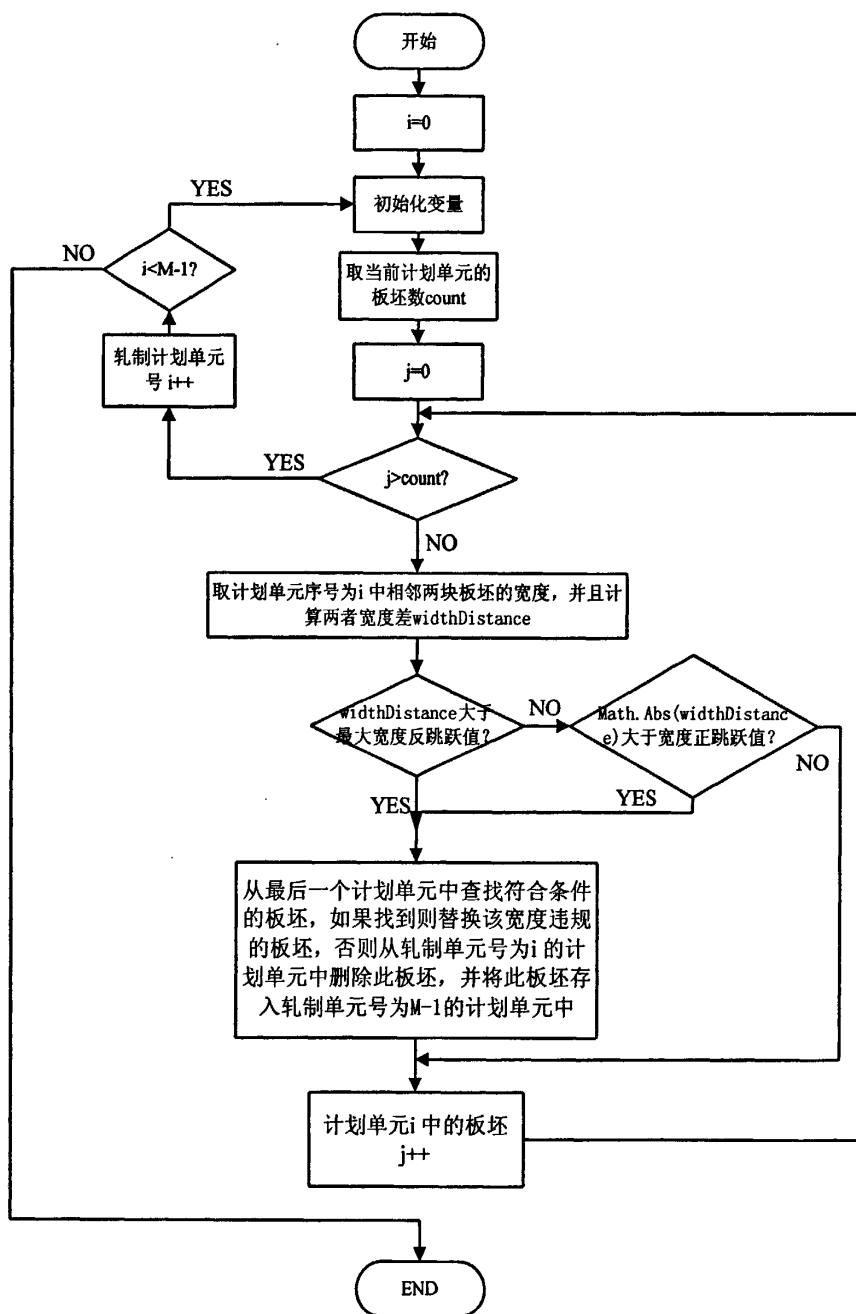


图 4.4 宽度修正流程图

Fig.4.4 Flow chart of slab width correcting

(4) 板坯插入操作

在主体材自由轧制计划单元进行规则修正后,为了使每个轧制计划单元中板坯数更多,减少后面进行混排的轧制计划单元数,从而减少轧机的换辊次数,提高生产效率。因此,在此过程中,将未排入单排计划的同类型板坯进行插入操作,以此来实现此目的,进而更能满足用户所提出的要求和适应生产实际情况。其具体的实现流程如图 4.5 所示:

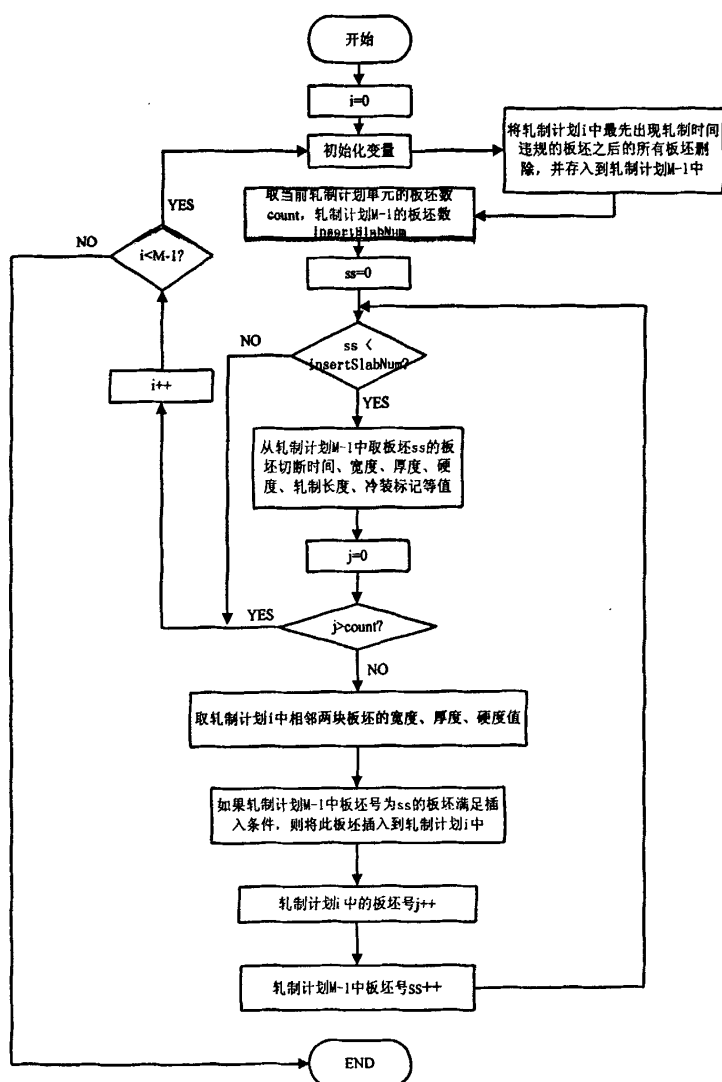


图 4.5 板坯插入流程图

Fig.4.5 Flow chart of slab inserting

(5) 单计划类型主体材自由轧制计划编制的总体求解步骤

总体求解步骤:

步骤 1: 提取已收池的某计划类型的板坯数据, 并将 n 位整数序列作为初始种群个体, 以此为基础创建初始种群。

步骤 2: 根据式(3.11)和式(3.12)对板坯数据进行轧制单元个数的最大最小值计算。

步骤 3: 设 $M = M_{\min}$ 。

步骤 4: 将初始种群中的个体分别映射到 M 个轧制计划单元中, 并计算每个种群个体的适应值, 保存适应值最小的个体的模型解。

步骤 5: 按照种群中各个个体的适应值由小到大排序, 取前 N 个(种群规模)个体构成新的种群。

步骤 6: 判断算法迭代是否结束, 若是, 则取适应值最小的个体的解作为当前 M 值下的模型最优解, 转步骤 7; 否则转步骤 4。

步骤 7: 判断当前 M 个轧制计划中是否存在轧制时间违规, 若存在, 判断 M 是否小于等于 $M_{\max}$, 若是, 则 $M = M + 1$, 去步骤 4; 否则, 算法得到当前 M 值下的最优解。

步骤 8: 对获得的最优解进行基于专家系统的违规修正。

步骤 9: 进行各个自由轧制计划单元进行同类型的板坯插入操作。

步骤 10: 算法求解结束。

4.3.3 多计划类型主体材计划编制

在编排计划的时候, 不可能所有的计划都是由单一计划类型构成的, 由于单计划类型主体材重量的限制, 仍有少量板坯尚未编入计划中。对于剩余板坯, 可将其在满足一定的约束条件下混合编入轧制单元当中, 形成多计划类型主体材单元。当一个计划中有多个计划类型的时候, 受首钢现有轧机和控制模型的制约, 必须保证每一个轧制类型连续轧制一定数量才可以变换为其他的计划类型, 这样才能保证产品的质量。同时, 以首钢热轧机组为例, 目前热轧板坯根据钢种类型可以分为 7 种计划类型, 这几种计划类型在混排计划编制时是不能任意两种都可以任意衔接到一起的, 计划类型间的衔接有着严格的规定。其具体的热轧计划类型间的混合约束规程如表 4.2 所示, 计划类型间混合编制时的最小区间板坯数如表 4.3 所示。

表 4.2 计划类型间的组合规则表

Tab.4.2 Restrictions of mixing different types

计划类型	01	02	03	04	05	06	07
01	1	2	0	2	0	2	2
02	2	1	0	0	0	0	2
03	0	0	1	0	0	0	0
04	2	0	0	1	0	0	2
05	3	0	0	0	1	3	0
06	2	0	0	0	0	1	2
07	2	2	0	2	0	2	1

表 4.3 计划类型和区间最小块数对照表

Tab.4.3 Minimum of continuous slab number in each type

计划类型	区间最小块数	计划类型	区间最小块数
01	4	05	10
02	10	06	4
03	0	07	6
04	4		

表 4.2 为多计划类型间的混合编制方式，行和列为计划类型 01~07，相交处的数字代表两种计划类型混合编制的方式，其中‘0’表示两种计划类型不可连续轧制；‘1’表示可随意连续轧制；‘2’表示可连续轧制，但需满足计划类型区间最小板坯数的要求；‘3’表示可连续轧制，除满足计划类型区间最小板坯数的要求外，还需保证连接时的前后次序，其中行为前，列为后。此处给出轧制区间（Rolling Segment）的概念，轧制区间表示某种类型的板坯在满足表 4.3 的约束条件下形成的一个小的连轧部分。

由于混排计划增加了每个计划类型的最小区间块数和计划类型衔接的约束，如果用如同单排计划一样的算法来求解，就必须在选择的时候怎么满足上述条件的强约束。由于遗传算法随机性强，大规模运行速度本来就比较慢，加了强约束后的运行速度肯定会更慢。针对这种情况，类似于调度工人的思想，提出一种启发式算法来解决多约束条件相互耦合的问题，以此方法较好的解决了混排计划的各种问题。

多计划类型的混排计划编制步骤如下：

步骤 1：对混合编制的多种类型的所有板坯按轧制宽度倒序排列，并对板坯编号，标为 1~n，设 $i=1$ 。

步骤 2: 以板坯 i 作基准板坯, 构造新轧制单元并作为主体材的第一块板坯, 按已排列次序开始尝试将后续板坯与当前轧制单元中最后一块板坯连接 (连续轧制), 详细过程如下。

步骤 3: 判断板坯类型与计划中的最后一块板坯类型是否相同, 若是去步骤 4, 否则尝试编制下一块板坯, 重复步骤 3。

步骤 4: 判断板坯的表面等级、宽度、厚度、硬度、轧制时间等与计划中的最后一块板坯是否可拼接 (跳跃量在允许范围之内), 若是将板坯编入单元, 否则尝试编制下一块板坯, 去步骤 3。

步骤 5: 判断已形成的轧制单元中当前计划类型所构成的板坯区间数量是否达到该类型的最小区间数, 若是去步骤 6, 否则尝试编制下一块板坯, 去步骤 3。

步骤 6: 检查板坯是否搜索完毕, 若是去步骤 8; 否则尝试编制下一块板坯, 判断其跳跃规程及可选类型是否满足类型连接方式, 若是将板坯编入计划, 去步骤 7, 否则尝试编制下一板坯, 重复步骤 6。

步骤 7: 若步骤 6 中所接板坯类型已发生变化, 去步骤 3, 开始编制新的计划类型区间; 否则去步骤 6。

步骤 8: 判断已形成的计划中末尾的计划类型是否达到最小区间板坯数, 若是, 主体材形成, 本次搜索结束; 否则删除轧制单元末尾计划类型的板坯, 将该计划类型存入禁忌表, 搜索过程回退至当前轧制单元末尾板坯, 去步骤 6 重新搜索;

步骤 9: 若计划类型全部填充禁忌表, 则直接输出当前轧制计划单元, 本次搜索结束; 若至此仍未形成主体材轧制单元, 则 $i=i+1$, 去步骤 2, 重新搜索。

步骤 10: 检查是否所有的紧急板坯全部编入计划, 若是, 则搜索过程结束。否则重新进行搜索。

经单计划类型和多计划类型主体材编制之后, 收池板坯已基本全部编入轧制计划单元中 (包括所有的紧急板坯)。仅有少数板坯未完成计划编制的, 可将其作为滚动计划, 刷新优先级后放入下一次计划编制中。实际生产应用中显示, 收池一次编制率均可达到 90% 以上, 完全满足现场生产调度的要求。

4.3.4 烫辊材的添加

一个完整的轧制计划单元需要由烫辊材和主体材共同组成。虽然烫辊材在整个轧制单元中所占数量较小, 但其轧制计划的合理编制对预热轧辊, 提高轧制质量起到至关重要的作用。与主体材计划相比, 烫辊材计划编制有其特殊的工艺约束以及生产模式。此部分计划编制的主要约束条件是:

- (1) 烫辊材板坯规格和钢级需满足特殊的要求;
- (2) 轧制规程跳跃量满足特定的约束;
- (3) 烫辊材部分的第一块和最后一块板坯需满足一定的规格要求;
- (4) 烫辊材部分的数量需满足一定的约束条件。

根据首钢的生产实际情况,烫辊材数量较少,因此每个轧制计划中烫辊材数目一般不大于4块。所以对于烫辊材的编制,主要采用规则编制。编制步骤如下:

Step1: 将可做烫辊材的板坯归为一类,作为计划编制的入口数据,选择板坯宽度、厚度、硬度满足烫辊材规则约束的板坯集合。

Step2: 针对某一个主体材的轧制计划编制其烫辊材计划,首先以主体材计划的第一块板坯作为依据,倒推排烫辊材计划。

Step3: 依次倒排烫辊材计划,宽度由宽到窄变化,板坯数在0~4之间。

Step4: 倒排中检查轧制长度不大于烫辊材的轧制长度的约束。

Step5: 最后结果作为该主体材计划的烫辊材计划,形成一个完整的轧制计划。

5 软件的实现

5.1 系统运行的实例界面

5.1.1 自由轧制建池界面

计划员可以进入板坯建池界面, 根据设定的开轧时间、需要建池的板坯数量、板坯号、板坯钢种组、优先级类型、合同号等条件进行板坯筛选, 将满足设定条件的板坯查询出来, 将结果显示在查询结果显示栏中, 如图 5.1 所示。

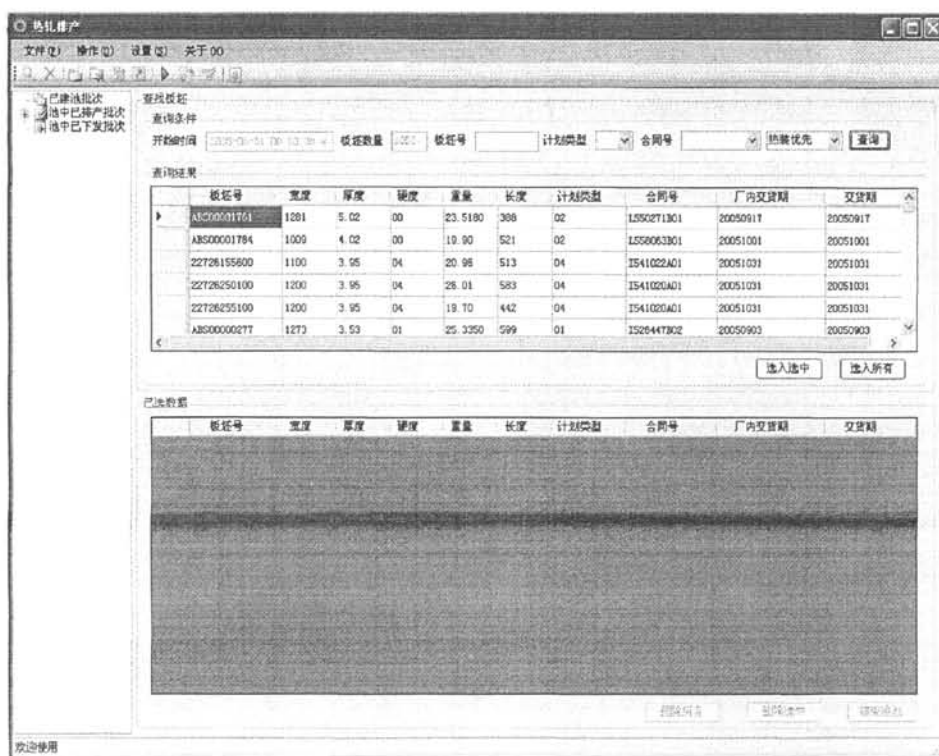


图 5.1 自由轧制建池查询板坯界面

Fig.5.1 The chart of querying the plate at the building the pool for free-rolling

筛选完成之后, 通过选择界面中的“选入选中”或者“选入所有”按钮, 分别对查询出满足条件的板坯进行建池, 如果选择“选入选中”按钮, 则将选择的板坯选入到“已

选数据”栏中；如果选择“选入所有”按钮，则将查询出来的所有板坯全部选择。如图 5.2 所示，为选择“选入所有”按钮后的结果：

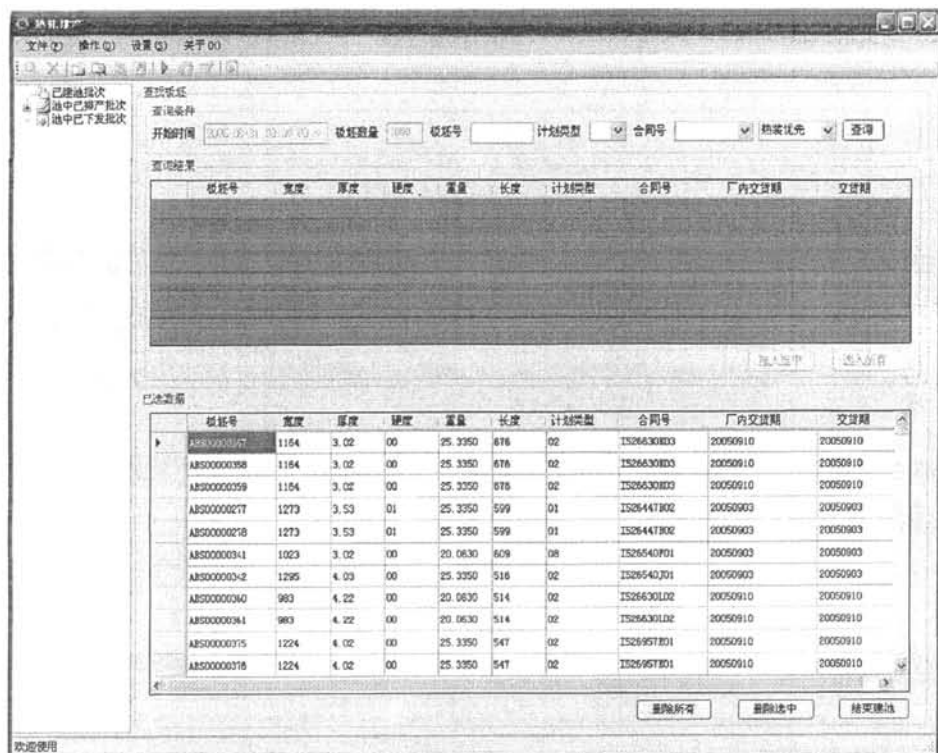


图 5.2 自由轧制建池选入板坯界面

Fig.5.2 The chart of choosing the plate to the pool for free-rolling

通过界面中的“删除所有”、“删除选中”、“结束建池”按钮，可以对已选数据进行相应的操作。通过选择“删除所有”、“删除选中”两个按钮，可以手动对已建池板坯数据进行调整。选择“结束建池”按钮，则完成建池操作，新的批次形成，并且如图 5.3 左边栏所示：

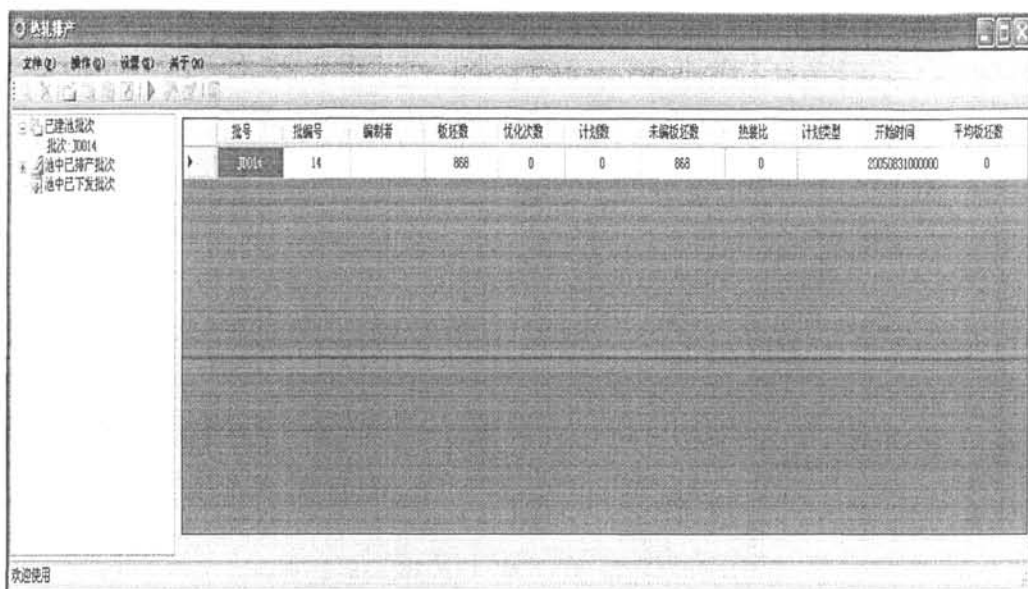


图 5.3 自由轧制结束建池界面

Fig.5.3 The chart of finishing to build the plate pool for free-rolling

5.1.2 自由轧制排产界面

热轧自由轧制建池结束后,就可以进入热轧自由轧制计划编制界面。选择主界面中的“编制计划”图标,则弹出计划编制界面。如图 5.4 所示。在此界面中,显示所选择的排产批次中板坯的切断时间在各个时间段班次的数据分布图,用户可以根据需要,选择所需排产的批次、前一个钢种组、是否使用烫辊材作为主体材、排产方式等,点击“开始排产”,则出现排产进度。

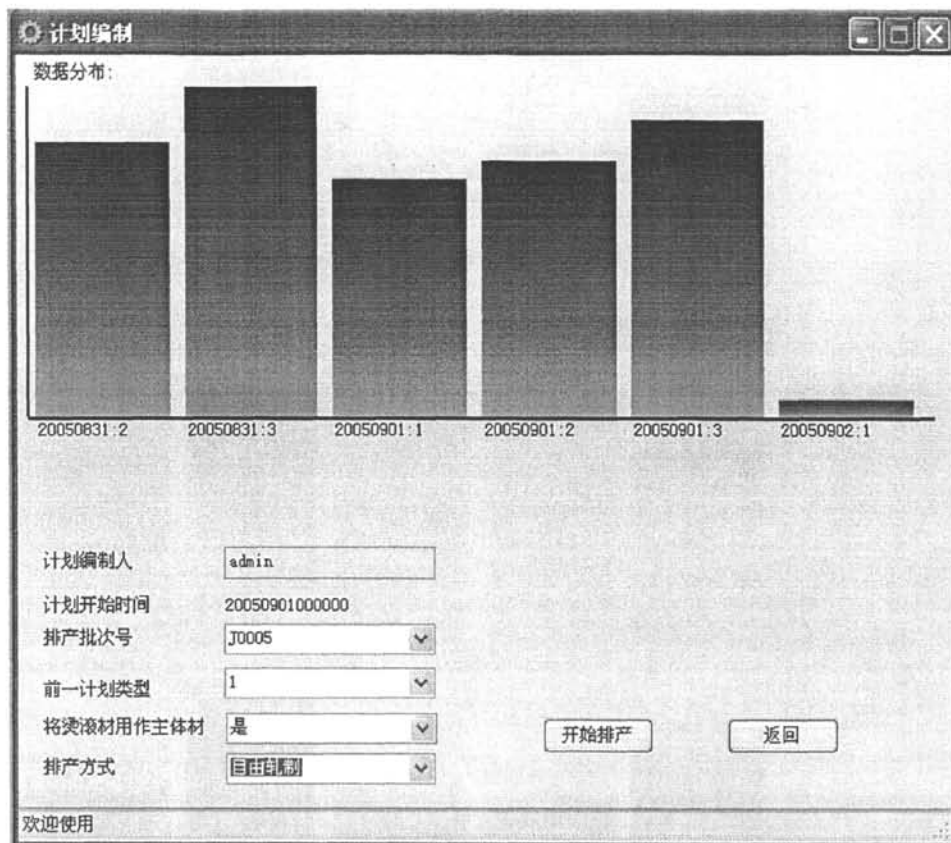


图 5.4 自由轧制计划编制界面

Fig.5.4 The chart of making the free -rolling plan

排产完成后, 用户可以根据需要选择查看排产结果的方式, 如宽度、厚度、硬度。其计划单元的板坯排序结果则通过图形直观显示出来, 如果出现宽度、厚度、硬度等约束条件的违规, 则会将违规板坯通过红色边框显示, 将鼠标移到该违规板坯附近, 将给出违规提示信息, 同时在计划单元信息栏中的“违规”列中表明违规类型。用户还可以从计划单元信息栏中查看到该计划单元中的所有板坯信息, 如宽度、厚度、硬度、开轧时间、切断时间等。下面分别给出某批次数据的单计划类型自由轧制计划的形状和多计划类型的自由轧制计划的形状, 如图 5.5 和图 5.6 所示。

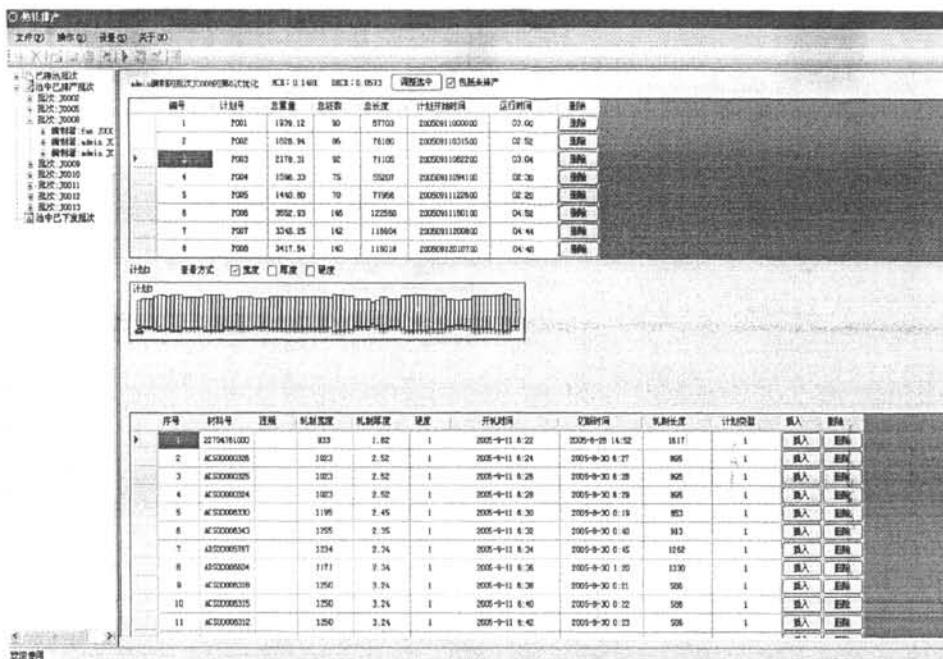


图 5.5 单一计划类型的自由轧制计划

Fig.5.5 The free hot rolling plan of single plan type

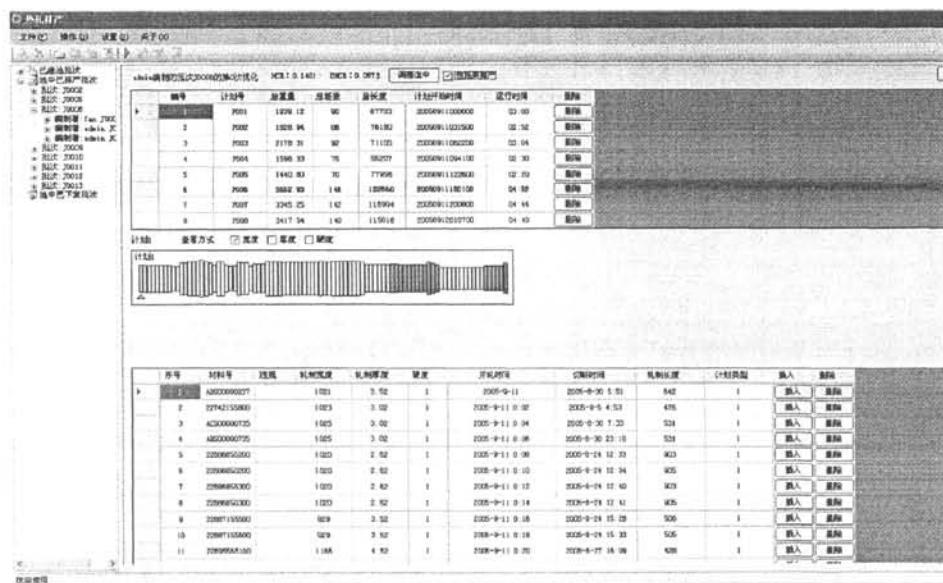


图 5.6 混合计划类型的自由轧制计划

Fig.5.6 The free hot rolling plan of mixed plan type

5.1.3 人机交互界面

人机交互界面在图 5.5 或者图 5.6 所示的排产结果查看界面中, 提供了供用户手动调整的功能, 用户可以通过此功能手工编辑计划, 移动计划单元中的板坯次序, 插入紧急板坯等操作。在此交互界面中, 通过图形形象的给出了板坯的宽度、厚度、硬度等信息, 用户可以根据此信息决定如何调整板坯, 同时每次调整操作后, 如果出现违规现象, 都能将违规板坯用红色边框提示出来。如图 5.7 所示。

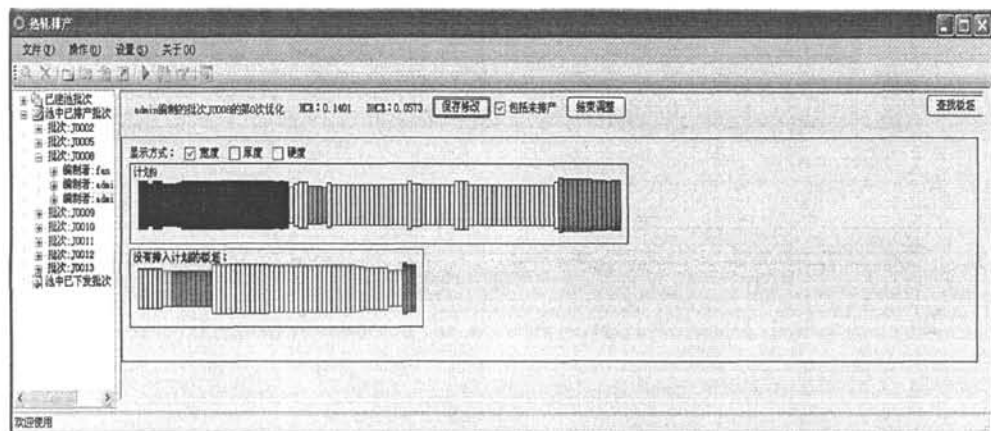


图 5.7 人工调整计划界面

Fig.5.7 The chart of artificial adjustment

5.1.4 自由轧制计划结果分析界面

用户可以通过热轧自由轧制计划结果分析界面对已形成计划的数据进行分析。图 5.8 所示, 在此画面中, 给出了所排批次的自由轧制计划单元的信息, 如自由轧制计划单元的总量、长度、计划单元开始时间等。图 5.9 所示, 在此画面中, 给出了所排批次数据的自由轧制结果, 图中给出了此批排产数据的板坯总数、热装比、形成的计划数、平均板坯数和未排入计划的板坯数等信息。

	编号	计划号	总重量	总坯数	总长度	计划开始时间	运行时间	删除
	1	P001	1939.12	90	67703	20050911000000	03:00	删除
	2	P002	1828.94	86	76180	20050911031500	02:52	删除
▶	3	P003	2178.31	92	71105	20050911062200	03:04	删除
	4	P004	1596.33	75	55207	20050911094100	02:30	删除
	5	P005	1440.80	70	77956	20050911122600	02:20	删除
	6	P006	3652.93	146	122560	20050911150100	04:52	删除
	7	P007	3345.25	142	116904	20050911200800	04:44	删除
	8	P008	3417.54	140	115018	20050912010700	04:40	删除

图 5.8 自由轧制计划单元分析

Fig.5.8 The information of each free -rolling plan

	批号	批编号	编制者	板坯数	优化次数	计划数	未编板坯数	热装比	计划类型	开始时间	平均板坯数
	J0008	8	fan	1000	0	12	101	0.132369	梯形计划	20050911000000	74
	J0008	8	admin	1000	0	15	37	0.131879	梯形计划	20050911000000	64
▶	J0008	8	admin	1000	0	9	58	0.140127	自由轧制	20050911000000	104

图 5.9 自由轧制计划批次结果分析

Fig.5.9 The information of free -rolling plan

5.2 自由轧制计划结果分析

此热轧中厚板计划与调度系统在测试期间通过了大量的现场数据验证,达到了合同要求的各项考核指标,同时在此过程中用户中途提出的新要求也逐一给予了满足。热轧自由轧制计划编制相比首钢过去的计划编制工作而言,优势主要体现在如下方面:

(1) 提高了热装比。此项指标也是用户要求达到的最重要指标。提高热装热送的比率,可以减少板坯在炉时间、燃料消耗、氧化烧损及物流周期,对于降低能耗与成本、提高成才率 and 经济效益是十分明显和直接的。此外还能使产品纯净无缺陷,有利于产品质量的稳定与提高。过去首钢的热装比平均只有 30%左右。采用了热轧预计划模型后,大量实时数据测试显示,热装比可以提高得 50%~60%,大大提高了加热炉的生产效率。对生产的节能、降耗、稳定、高产有重要的意义。

(2) 提高了工作辊的使用率。通常一个轧制计划对应一个换辊周期。在每天总产量一定的前提下,计划单元越大,换辊周期就越长,需要的工作辊就越少。人工编排计划一般情况下计划的块数为 60 块左右,现在的计划块数一般为 85 ~ 100 块。因此减少计划数,从而增加了工作辊的使用率,提高了生产效率。

(3) 提高了计划的质量。对于计划编排这种多约束的复杂问题，只靠人力解决，尤其是在长时间的脑力劳动下，要想编制出理想的、没有任何违规的计划几乎是不可能。在首钢目前的计划作业方式下，轧制计划总会有或多或少的违规，一旦存在违规的情况，就会影响的产品地质量。而采用自由轧制计划模型后，基本消除了违规的状况。提高了计划的质量，从而提高了产品的质量。

结 论

本文的研究工作的课题来源于大连理工大学王伟教授科研团队与北京西门子（中国）研究院共同研究和开发完成的基于首钢热轧中厚板生产的“热轧中厚板生产计划与调度系统”。该系统主要用来优化并生成钢铁企业中热轧中厚板材生产线的轧制生产计划，以此来提高生产计划的热装比和生产效率，所取得的结论和成果如下：

(1) 深入研究了连铸生产和热轧生产的工序衔接方式和生产组织模式。总结每种生产管理模式的优缺点。找到在当前热轧生产下由于工序衔接方式和生产组织模式搭配，导致了热轧计划编制结果中热装比偏低的不利于热轧计划生产原因。

(2) 在研究和了解了首钢中厚板生产工艺的基础上，确立采用了适应于带有时间窗口的车辆路径模型，并运用进化计算算法结合专家系统对模型进行求解。模型很好的解决了热轧中厚板自由轧制计划编制这种多约束，多目标问题。

(3) 针对多计划类型主体材计划编制与单计划类型主体材计划编制区别较大，不宜使用运行速度较慢的智能算法求解的问题，采用基于启发式算法解决了多计划类型主体材计划编制的问题。

(4) 研究了烫辊材计划编制的特殊的工艺约束以及生产模式，采用规则编制的方法对烫辊材进行计划编制，并取得较好的效果。

基于对现阶段国内外钢铁企业热轧中厚板自由轧制计划编制的研究，论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：

(1) 对于中厚板自由轧制计划的平滑跳跃要求方面存在改善空间。在本文中重点考虑的是在满足各种工艺约束和轧制规程的条件下对宽度的平滑过渡考虑，而厚度跳跃方面由于为了使轧制计划单元中排入的板坯数更多而采取的折中考虑。

(2) 在进行软件实现和文档的编写过程中，体现出对软件规范化方面有待调高。

参 考 文 献

- [1] 孙本荣. 中厚板生产. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [2] 周建男. 钢铁生产工艺装备新技术. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [3] 刘战英. 《轧制变形规程优化设计》. 冶金工业出版社, 1998.
- [4] 唐立新. CIMS 下生产批量计划理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] 熊锐, 吴澄. 车间生产调度问题的技术现状与发展趋势. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(10): 55-60.
- [6] 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, 2001, 16(2): 141-145.
- [7] 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.
- [8] 张蕾. 钢铁生产批量计划系统研究与开发: (硕士学位论文). 沈阳: 东北大学, 2004.
- [9] 王锋. 连铸批量计划系统的设计与开发: (硕士学位论文). 沈阳: 东北大学, 2006.
- [10] Kosiba E D, Wright J R. Discrete event sequence as a traveling salesman problem, Computers in Industry, 1992, 19: 317-327.
- [11] 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): 267-269.
- [12] 李大卫. GA 与 TS 混合策略的理论与应用研究: (博士学位论文). 沈阳: 东北大学, 1998.
- [13] 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.
- [14] 钱贤伟. 热轧生产批量计划建模及算法研究: (硕士学位论文). 沈阳: 东北大学, 1997.
- [15] 陈雄, 郭令忠, 徐心和. 轧制批量计划问题的模型及算法研究. 信息与控制, 1997, 26(5): 382-387.
- [16] 张涛, 王梦光, 杨建夏. 不确定计划数的轧制批量计划的模型与算法. 系统工程学报, 2000, 15(1): 54-60.
- [17] 朱俊. 热轧生产计划优化系统研究与应用: (硕士学位论文). 上海: 上海交通大学, 2006.
- [18] 韩冰, 刘相华, 王国栋等. 自由程序轧制技术. 钢铁研究, 1995, (3): 22-28.
- [19] 许小花. 中厚板水雾冷却换热系数数学模型的研究: (硕士学位论文). 北京: 北京科技大学, 2007.
- [20] 刘涵. 中厚板轧线技术分析及创新方案研究: (硕士学位论文). 重庆: 重庆大学, 2006.
- [21] 王海源. 3454 中厚板轧机轧制规程优化设计及设备能力的研究: (硕士学位论文). 秦皇岛: 燕山大学, 2004.
- [22] 徐心和. 炼钢-热轧-体化生产管理: (博士学位论文). 沈阳: 东北大学, 2000.
- [23] 张志勇. 宝钢热轧生产计划编制方法的研究与应用: (硕士学位论文). 大连: 大连理工大学, 2005.
- [24] 张清东, 何安瑞, 黄纶伟. 板形控制与热轧带钢自由规程轧制. 钢铁, 2001, 36(2): 72-75.
- [25] 宾松, 符卓. 求解带软时间窗的车辆路径问题的改进遗传算法. 系统工程 2003, 21(6): 12-15.
- [26] 李军. 有时间窗口车辆线路安排问题的启发式算法. 系统工程, 1996, 14(5): 45-50.

- [27] 张丽萍, 柴跃廷, 曹瑞. 有时间窗车辆路径问题的改进遗传算法. 计算机集成制造系统 2002, 8(6):451-454.
- [28] Desrochers M, Desrosiers J, Solomon M. A new optimization algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows, Operations Research, 1992, 40(2): 342-354.
- [29] Leo L, Michael W C, Michel G. The hot strip mill production scheduling problem: A tabu search approach. European Journal of Operational Research, 1998, 106: 317-335.
- [30] Peterson C M, Sorenson K L, Vidal R. Inter process synchronization in steel production. International Journal of Production Research, 1992, 30(3): 1415-1425.
- [31] Assaf I, Chen M, Katzberg J. Steel production schedule generation, International Journal of Production Research, 1997, 35: 467-477.
- [30] Tang L, Liu J, Rong A et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex. European Journal of Operational Research, 2000, 124(2):267-282.
- [33] Cowling P. A flexible decision support system for steel hot rolling mill scheduling. Computers and Industrial Engineering, 2003, 45(2): 307-321.
- [34] 张涛, 王梦光, 杨建夏. 不确定计划数的轧制批量计划的模型和算法. 系统工程学报, 2000, 15(1):54-60.
- [35] 张伟丰. 基于进化计算的混合优化算法及其在轧制规程优化上的应用:(硕士学位论文). 武汉: 武汉科技大学, 2006.
- [36] 张纪会. 进化算法及其在生产调度中的应用研究:(博士学位论文). 沈阳: 东北大学, 2003.
- [37] 李茂军. 单亲遗传算法理论及应用:(博士学位论文). 长沙: 湖南大学, 2002.
- [38] 李茂军, 童调生. 单亲遗传算法及其全局收敛性分析. 自动化学报, 1999, 25(1): 68-72.
- [39] 刘洪旭. 基于模糊专家系统的加速冷却仿真系统的分析与实现:(硕士学位论文). 沈阳: 辽宁大学, 2004.
- [40] 张箭. 一个钢铁企业连铸过程控制系统的设计与实现:(硕士学位论文). 上海: 复旦大学, 2007.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

何平，王伟，赵珺. 基于进化计算和专家系统的自由轧制计划编制方法，大连理工大学网刊. 2008.

致 谢

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

王孝良老师和刘文琦老师对本文进行了认真细致地审阅,并提出了积极的改进意见,在此,对他们的辛勤劳动我深表感谢。

感谢赵珺师兄、王利师兄、张晓平师姐和刘颖师姐,他们不仅在项目的进程中给予我悉心的指导,在生活中也对我十分关心照顾。我论文的内容更是得到赵珺师兄、张晓平师姐的细心指正。在此,我对几位师兄、师姐表示衷心的感谢!

感谢郝源春、范圣冲、王健、田苏洁、肖楠、邬静东、汤振兴、林永俐、时飞飞等所有师兄弟,他们的支持和鼓励使我在学习和研究中充满勇气和信心。

深深感谢含辛茹苦养育我,为我成长付出了无数心血,不断地鼓励和支持我上进的父母亲,感谢我的哥哥和嫂子对我的支持和理解,是他们从物质和精神上给予我的支持才使得我的学业能够顺利完成。

感谢所有关心、帮助和支持我的人们!