

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.10.008

中厚板坯料优化设计系统研究与应用

郑忠¹, 呼万哲¹, 龙建宇¹, 高小强²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 经济与工商管理学院, 重庆 400045)

摘 要: 通过对生产和设计流程的分析,采用分层模块化设计方法,将应用维护、设计管理与数据支撑按不同类型问题分别进行功能模块划分并构建系统的体系结构,开发了中厚板坯料优化设计系统. 系统重点解决了生产中涉及的一维和二维两种组合模式下的母板板坯一体化设计问题,综合考虑最小化余材、最大化板坯轧制成材率,提出了结合最优化技术和启发式规则的混合优化设计方法. 基于某钢厂的实例数据测试表明,系统在整体设计质量和效率方面均明显优于人工设计.

关 键 词: 中厚板; 坯料设计; 下料问题; 一体化; 系统开发

中图分类号: TP 317.1; O 221 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1405-06

Research and Application for Medium Steel Plate-Slab Design System

ZHENG Zhong¹, HU Wan-zhe¹, LONG Jian-yu¹, GAO Xiao-qiang²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400045, China. Corresponding author: ZHENG Zhong, professor, E-mail: zhengzh@cqu.edu.cn)

Abstract: On the basis of the analysis of the production and design process, a medium steel plate-slab design system (MSPSDS) was built by employing the layered modular design method. The system architecture of MSPSDS was developed by separating the functional moduli for different types of problems including application maintenance, design management and data supporting. MSPSDS focuses on solving steel plate-slab integrated optimal design problems under one and two dimensions. A hybrid solving method was proposed by combining optimization techniques and heuristic rules for minimizing the amount of surplus material and maximizing the rolling yield. The test experiments conducted by using the data instance from a steel plant showed that MSPSDS significantly outperforms manual design both in terms of quality and efficiency.

Key words: medium steel plate; slab design; cutting stock problem; integration; system development

在“互联网+”时代背景下,钢铁行业电商平台蓬勃发展,导致品种规格多样、批量较小的用户订单日益增多,企业生产组织的难度不断加大. 坯料设计是后续生产组织(轧制单元计划、炉次浇次计划等)的编制基础^[1],主要是依据生产订单设计待生产的坯料集,确定各坯料的钢种、尺寸、产量等信息,使生产坯料与订单需求之间建立直接的对应关系,设计的合理性会对生产计划安排产生显著影响. 中厚板坯料设计包含母板、板坯两种原料的设计,较其他钢材设计问题更加复杂. 国内钢铁企业信息系统具备坯料优化设计功能的比较少,生产中主要由设计员设计完成,即人工决定各订单子板的组合方式、母板和板坯规格等,设计效率低且质量难以保证.

近年来,国内外学者已对坯料设计相关问题展开研究;Dawande 等^[2]对带钢坯料设计过程中各类质量约束进行了详细描述,并给出了一种基于图匹配和装箱问题的启发式设计方法;Gargani

收稿日期: 2016-04-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474044); 重庆市科技攻关重点项目(CSTC2011AB3053).
作者简介: 郑忠(1963-),女,浙江淳安人,重庆大学教授,博士生导师; 高小强(1963-),男,四川崇州人,重庆大学教授.

等^[3]针对订单质量需求为固定值的情况,基于逻辑和全局约束建立约束规划模型,并设计了新的变量和值选择策略进行模型求解;李铁克等^[4]针对订单需求质量分配过程具有最小限制的问题,以最小化板坯数量为目标建立优化模型并求解.此类研究主要针对带钢订单需求在各坯料中的分配问题,适用于宽度种类少且对长度无严格要求的情况,组合时无需考虑产品之间规格组合约束问题,因此难以适用于中厚板.马有辉等^[5]从轧制工艺的角度对影响中厚板生产效率、成材率的多个因素进行分析,并讨论了单个订单进行子板组合和板坯断面选择的局部优化设计方法,缺乏对适用于多规格小批量中厚板订单的多订单子板组合设计方法和全局优化性能的考虑,可能导致大量余材的产生.

通过以上讨论不难发现,现有应用系统和理论研究中的方法在处理中厚板坯料优化设计问题时尚存在一定的局限性,有必要针对中厚板展开进一步的优化设计方法研究.同时,由于现场生产组织影响因素和工艺时常变动,会对设计方法及自动化设计系统有适用性与灵活性的要求,这在设计模型及系统构建中必须予以考虑^[6].本文通过对现场生产工艺和设备条件的分析,对母板、板坯设计过程涉及的条件和约束进行了分类总结.基于此并考虑现场条件约束、参数等调整需求,采用分层模块化思想设计并开发中厚板坯料优化设计系统.重点解决生产中一维和二维两种组合模式下的中厚板母板板坯一体化设计问题,通过对系统的数据测试验证了方法的有效性.

1 问题描述与系统设计

1.1 问题描述

中厚板坯料设计具体分母板设计和板坯设计两个阶段,如图 1 所示.母板设计主要解决订单组合优化问题,而板坯设计主要解决适宜的板坯断面选择及母板板坯之间转换的合理优化问题.

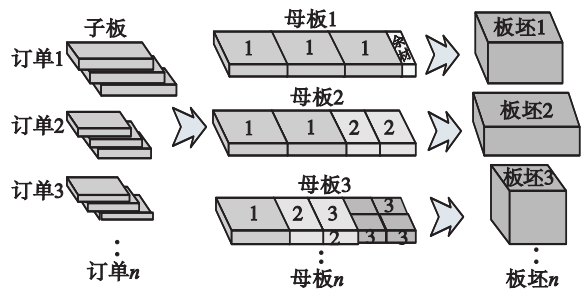


图 1 中厚板坯料设计

Fig. 1 Medium steel plate-slab design

母板设计是要在符合生产工艺设备约束的前提下,确定母板规格及其包含各订单子板的组合方式.组合方式从切割维数的角度可分为一维和二维两类:一维是同厚同宽子板在长度方向上进行组合,设计方法仅需考虑长度方向的约束;二维是指同厚子板在宽度和长度两个方向上进行组合,即增加宽度方向的组合后带来约束和组合方式的增加,后者由现场设备的切割能力引起.约束条件的调整可能导致设计模型决策变量、约束和性质的改变,针对不同约束下的一维和二维两种组合方式应分别选择适用的模型和求解算法^[7].生产中受限于设备可轧母板宽度 $[w_{min}^p, w_{max}^p]$ 和子板宽度 $[w_{min}, w_{max}]$ 范围限制,宽度小于 w_{min}^p 的子板必须通过二维组合进行生产,宽度大于 $w_{max}^p - w_{min}$ 的子板只能进行一维组合.由于二维切割繁琐、耗时,容易成为工序瓶颈,可在 $[w_{min}, w_{max}^p - w_{min}]$ 范围内设置宽度条件控制二维组合母板的生产量.需要指出:受限于生产工艺约束、炼钢牌号、热处理工艺等要求不同的子板不能组合成一张母板;由于母板规格的约束,母板上各子板不一定都存在订单与之对应,无订单对应子板被称为余材,设计时应尽量减少余材的产生.

中厚板生产需要对板坯进行展宽和压缩轧制,不均匀形变会导致母板边部不规则,需要切割齐整,造成损失.展宽比、压缩比的设计是影响轧制生产的一项重要因素,过大或过小可能导致切割损失增加甚至轧制废品.生产中考虑铸机等设备的限制,设计人员预先为各尺寸母板设计了若干可选板坯断面(即厚度、宽度),并给出不同断面下轧制切割损失量的设计值,采用不同板坯断面设计会导致材料损耗的差异.显然,板坯断面选择、母板板坯转换和长度等都是板坯设计时必须考虑的约束.除此之外一些生产组织因素也需要加以考虑,如用户相同或交货期相近的母板应优先选择同一板坯断面在同一浇注周期进行生产,这样便于后续成品入库和交货等操作.因此,板坯设计应综合考虑相关约束为母板选择合适的板坯断面,以满足需求并提高轧制设计成材率.

综上所述,中厚板坯料优化设计是指在符合生产工艺、设备及生产组织要求等前提下,以最小化余材、最大化成材率为目标,对各订单子板进行母板和板坯设计,据此进行生产,满足用户需求.其中,约束主要包括以下 4 类.

1) 母板约束:可组合子板钢级、厚度、厚度公差、热处理工艺属性必须相同;母板最大长度约束;可进行一维和二维两种组合方式,一维具有长

度约束,二维同时考虑长度、宽度和组合方式约束,根据现场切割设备具有切割次数、长度等条件限制.

2) 板坯约束:可选板坯断面约束;母板对板坯断面的选择规则;板坯长度最小值、最大值约束.

3) 母板板坯转换约束:

$$F = \frac{(H+h) \times (K+k) \times (L+l)}{B_h \times B_k \times s} + g.$$
式中: F 为板坯长度; H 为母板厚度; h 为(相对于公差下限的)厚度余量; K 为母板宽度; k 为宽度余量; L 为母板长度; l 为长度余量; B_h 为板坯厚

度; B_k 为板坯宽度; s 为烧损; g 为割缝值.厚度余量、宽度余量、长度余量、割缝值分别具有取值约束.

4) 生产组织约束:一个订单的各子板生产对应的板坯应具有统一的断面;不同订单子板间交货期尽量接近,满足客户要求.

1.2 系统结构与功能设计

基于对生产工艺的分析和设计过程目标、约束的梳理,综合考虑一维和二维两种组合方式涉及的不同设计约束条件和参数灵活变动等现实需求,采用分层模块化方法设计中厚板坯料优化设计系统,系统的体系结构和主要功能如图 2 所示.

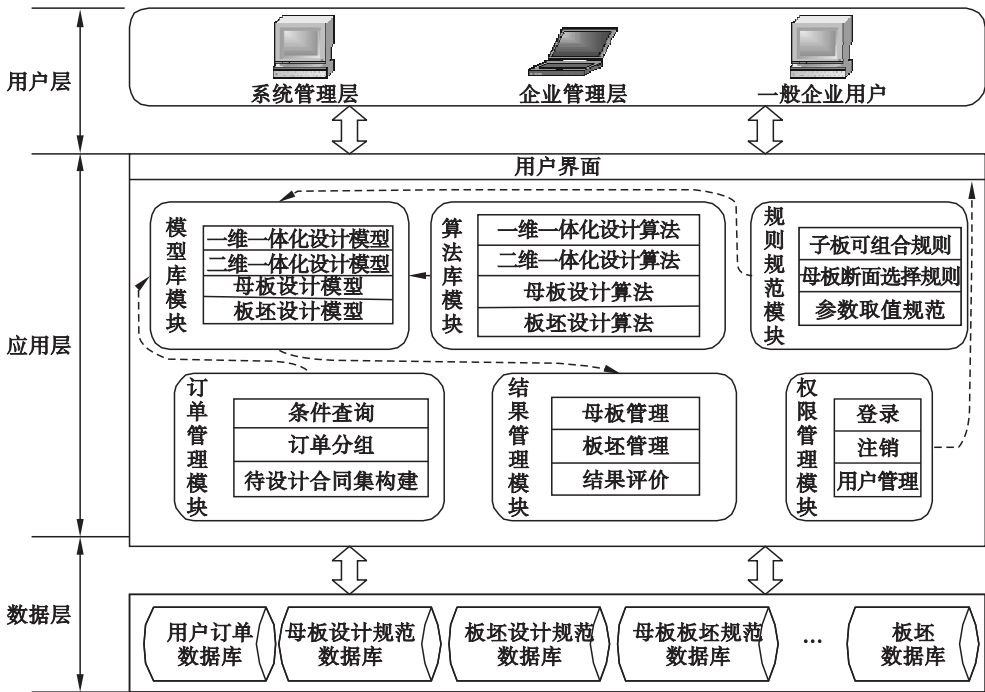


图 2 体系结构和主要功能
Fig. 2 Architecture and main functions

使用系统进行坯料优化设计时,用户首先需要登录系统进而拥有相应的用户权限,然后即可从数据库中读取订单,设置查询条件:炼钢牌号、厚度等信息,将符合条件的订单加入待设计订单集.开始设计前需先对设计规则和参数规范进行调整和确认,然后点击相应按钮即可开始进行设计:订单先依据母板上子板可组合约束(炼钢牌号、厚度、热处理工艺等)进行分组,然后可依次独立对各组订单选择相应的模型和求解算法进行母板板坯设计.最终形成的板坯需要经过设计专家确认、调整或取消,重新进行订单选取和设计约束参数的选择,若满足要求则将结果保存在数据库中,设计结束.

2 母板板坯一体化设计方法

模型库和算法库模块是进行坯料优化设计的关键,针对固定板坯断面下的母板设计目前已有相关研究可供借鉴^[8],然而生产中大多数订单均具有多个可选板坯断面,需要协同考虑母板、板坯约束进行一体化设计,下文分别针对一维和二维组合的设计方法进行讨论.

2.1 一维组合

设计方法的选择涉及模型和求解算法两个方面,系统建立了一维组合母板板坯一体化设计问题的整数规划模型.目标为最小化余材、最大化板坯轧制成材率,主要约束为母板和板坯长度约束、

可选板坯断面约束及同订单子板所属母板必须选择相同断面的生产组织约束. 针对模型性质和特点, 综合考虑大规模问题求解质量和时间两方面的因素, 将设计专家经验转化为启发式规则, 结合最优化理论, 设计了求解算法. 具体分 3 个阶段: 订单分类、整订单设计和零星订单设计. 其中, 订单分类阶段负责对给定订单集进行预处理, 将订单划分为 3 种类型: 整订单、伪整订单和零星订单. 整订单设计阶段主要对各整订单进行子板组合和板坯设计; 零星订单设计阶段用于处理剩余的伪整订单和零星订单. 为便于对算法作进一步的探讨, 现给出以下符号及相关定义: i 为订单序号; O 为订单集合, $i \in O$, 设共有 m 个订单; t 为订单子板的厚度; w 为订单子板的宽度; l_i 为 i 订单中所要求子板的长度; d_i 为 i 订单中所要求子板的数目; j 为母板序号; l_j^b 为 j 母板的长度; l_{\max}^b 为母板的最大长度约束; u_{ik} 为非负整数, 代表 i 订单在 k 断面下组板时, 一块板坯可包含该订单子板的块数上限; k 为板坯断面序号; t_k^b 为 k 类型板坯断面的厚度; w_k^b 为 k 类型板坯断面的宽度; s_l, s_w, s_t 为板坯设计时所采用的厚度余量、宽度余量、长度余量, 钢种确定时, 取值为母板尺寸、板坯规格的函数; l_{\min}^b, l_{\max}^b 板坯的最小、最大长度限制.

定义 1 订单类别: 计算订单 i 在各个板坯断面下的 u_{ik} 值, 如果在任何断面下, 均有 $d_i \geq u_{ik}$, 则称订单 i 为整订单; 如果只有部分断面下满足 $d_i \geq u_{ik}$, 则被称为伪整订单, 所有断面下均不满足的为零星订单.

定义 2 断面优先级: 对于整订单而言, 订单 i 可选择不同断面 k 以 u_{ik} 块子板进行板坯设计, 不同断面 k 对应不同的成材率, 依此成材率对订单可选的多个断面进行优先级定义, 高成材率断面对应更高优先级, 设计时优先使用高优先级的断面.

定义 3 订单相容图: 给定订单集合 O , 构建图 $G = (V, E)$, O 可分割为两个互不相交的子集 A, B . 对于订单集 A 中的每个订单 $i \in A$, 引入顶点 $v_i \in V$; 对于订单集 B 中的每个订单 $i' \in B$, 引入顶点 $v_{i'} \in V$, 顶点与订单一一对应. 如果两个订单 $i \in A, i' \in B$ 所包含的所有子板组合在一起构成一张母板, 其长度满足当前断面下的约束 $l_{\min}^b \leq (t + s_t) \cdot (w + s_w) \cdot (l_j^b + s_l) / t_k^b \cdot w_k^b \cdot s \leq l_{\max}^b$ 且 $l_j^b \leq l_{\max}^b$, 则添加边 $e = (v_i, v_{i'})$, 此图称为订单相容图.

生产中为有利于安排订单交货, 要求某一订单所有子板拥有统一的板坯断面, 以便在同一浇

铸周期生产. 为保证生产组织的灵活性, 应尽量避免订货量都比较大的不同订单进行组合, 所以坯料设计问题最终表现为订单的板坯断面选择和子板组合决策问题. 综合上述因素, 结合坯料设计专家经验, 提出以下设计规则.

1) 订单分类: 按定义 1 将订单集分为整订单集、伪整订单集和零星订单集, 不同类订单在断面选择和子板组合方式不同.

2) 整订单集处理: 按定义 2 对整订单可选断面进行优先级排序, 优先选择优先级高的断面, 在保证无余材产生的情况下, 采用自身或与其他订单组合的方式进行设计, 如果有余材产生则可选择相邻低优先级断面.

3) 零星订单集处理: 整订单设计阶段与整订单进行组合设计, 以减少余材产生, 提高生产效率, 零星订单设计阶段则优先考虑生产效率, 进行多订单组合设计, 减少母板张数.

4) 伪整订单集处理: 整订单设计阶段依当前板坯断面确定其处理方式; 零星订单设计阶段将其看作零星订单进行处理.

设整订单集 G_z , 伪整订单集 G_w , 零星订单集 G_L , 订单集合 Ω, Ψ , 一维组合母板板坯一体化设计算法具体实现步骤如图 3 所示. 其中, 订单相容图采用匈牙利算法求最优解, 零星订单设计阶段则建立考虑长度柔性约束和轧制材料损耗的下料问题模型, 并基于列生成和 FFD 启发式设计改进的整数求解方法, 根据母板长度需求确定最终的板坯断面选择.

2.2 二维组合

二维组合的方式多样^[9], 但目前钢铁企业在线切割设备主要由切头分段剪、双边剪、剖分剪和定尺剪构成, 只能进行边到边的 Guillotine 切割方式, 且仅能进行前后两次纵切和中间一次横切. 从组合的角度属于一种受限的二维三阶段下料问题^[10], 受限于轧机的宽度范围和设备的剪切能力, 可能进一步对切割长度、相邻子板宽度差异等条件进行限制. 系统进行一体化设计协同考虑二维组合、母板和板坯规格设计三个方面, 建立了问题的非线性整数规划模型. 目标同样追求余材和轧制材料损失的最小化, 约束增加了对二维组合方式限制的考虑, 包括宽度方向上最多组两块子板, 相邻纵切线间长度不超过某一限定值等. 针对此问题设计了基于启发式规则、动态规划和列生成技术的混合优化算法.

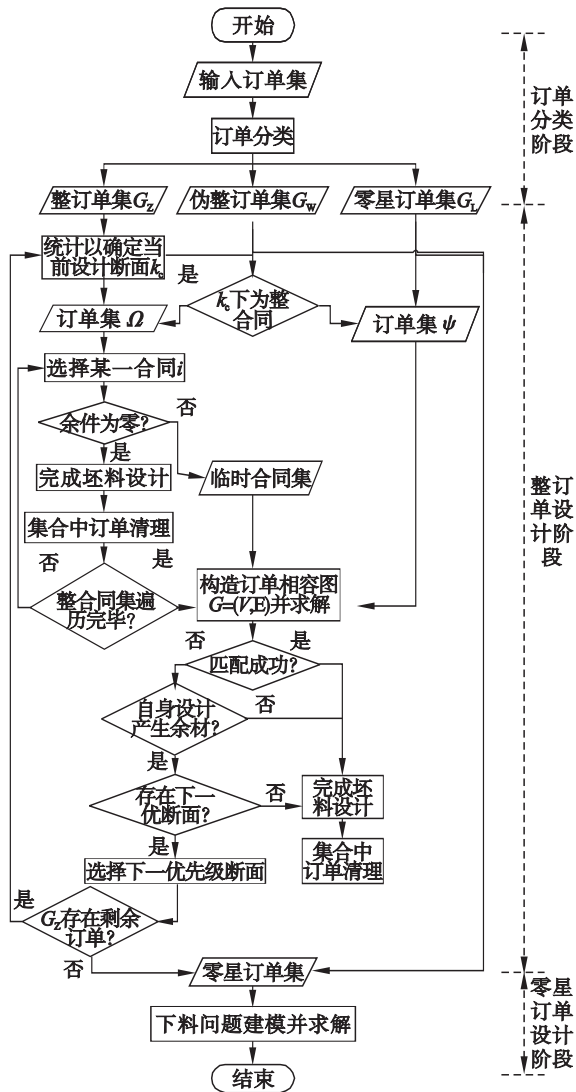


图 3 一维组合母板板坯一体化设计模型求解算法
Fig. 3 Algorithm for one dimensional mother plate-slab integrated optimization design model

3 系统实现与应用

3.1 系统实现

某钢铁企业现有中厚板坯料设计功能位于 ERP 系统,主要起到信息管理的作用,为提高设计质量和效率,基于上述的系统设计方案,开发中厚板坯料优化设计系统. 系统利用 SQL Server 2012 建立各数据库,实现系统输入订单数据、设计规则规范数据和输出板坯数据的必要存储. 以 Visual Studio 2010 为开发平台,基于 MFC 技术为各模块开发用户交互界面,系统板坯管理模块人机交互界面如图 4 所示. 使用 C++ 语言结合 Gurobi 优化软件开发应用程序的各个功能模块. 最后通过 Socket 协议和 ODBC 技术开发数据接口,实现本地 SQL Server 数据库与企业 Oracle 数据库之间的订单和板坯等数据信息交换.

3.2 数据测试

为测试系统的稳定性和有效性,以某钢厂的生产数据为基础,以月为单位,选取了具有代表性的两组订单: A 组订单共 11 159 个,其厚度范围为 5 ~ 200 mm,宽度范围为 1 500 ~ 3 800 mm,长度范围为 1 850 ~ 16 480 mm; B 组订单共 3 928 个,其厚度范围为 8 ~ 170 mm,宽度范围为 1 600 ~ 3 800 mm,长度范围为 4 500 ~ 16 000 mm. 系统分别对两组订单进行了设计,并与人工设计结果进行了对比,结果见表 1.

测试中,两组订单均完成设计,设计成材率平均提升 1.28%,余材产生量比率平均下降 1.26%.

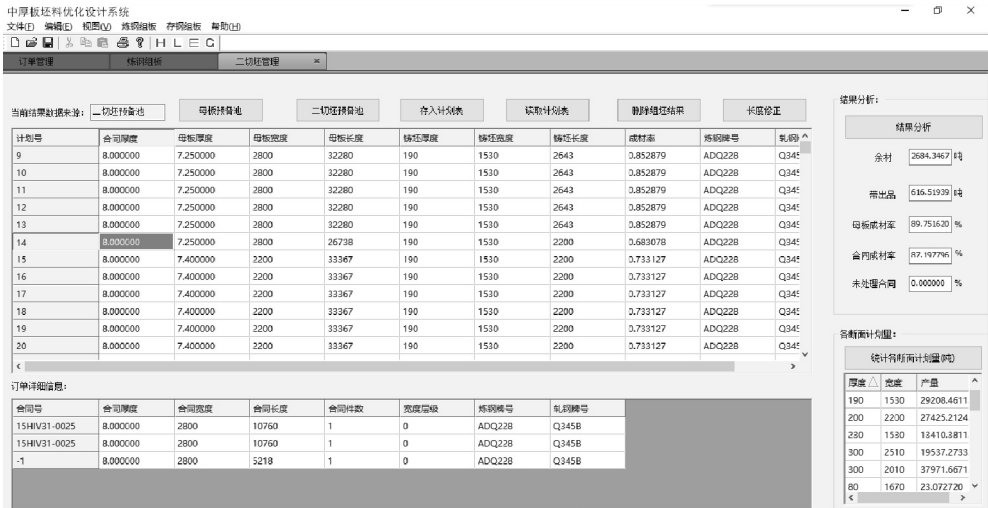


图 4 板坯管理模块界面
Fig. 4 Slab management module interface

在时间方面,系统设计 A 组订单耗时小于 6 min, 设计 B 组订单耗时小于 3 min,而生产中两组订

单均需多名设计员数天才能完成. 显然, 系统优化设计方式不仅保证了结果的可行性, 同时有效提高了结果的质量和效率.

表 1 设计结果

Table 1 Design results

%

组	人工设计		系统设计	
	成材率	余材率	成材率	余材率
A	86.70	2.33	87.66	0.48
B	87.37	1.03	88.97	0.36

4 结 论

1) 通过对生产工艺流程及设计流程目标约束等进行分析,考虑工艺、生产组织等条件灵活变动的现场需求,采用分层模块化思想设计并开发了中厚板坯料优化设计系统,设计规则和参数便于调整,具有良好的灵活性和适用性.

2) 系统重点解决生产中一维和二维两种组合模式下的母板板坯一体化设计问题,分别设计了相应的模型和求解算法,经测试模型和算法可行有效.

3) 通过某钢厂的生产实例数据对系统的适用性和方法的有效性进行了验证,结果表明系统在设计质量和效率两方面均明显优于人工设计,获得优良的设计效果.

参考文献:

[1] Tang L, Liu J, Rong A, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 133(1): 1-20.

[2] Dawande M, Kalagnanam J, Lee H S, et al. The slab-design problem in the steel industry[J]. *Interfaces*, 2004, 34(3):

(上接第 1393 页)

[8] Jhang K Y, Qian H H, Ha J, et al. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(8) : e1339 - e1342.

[9] Sayed A N, Meng A D. Optical monitoring of bolt tightening using 3D electronic speckle pattern interferometry [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2007, 129(2) : 89 - 95.

[10] 吴宝强, 孙炜, 曹成. 柔性和摩擦力不确定条件下 BP 神经网络自适应轨迹跟踪方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19) : 23 - 28.

(Wu Bao-qiang, Sun Wei, Cao Chen. Flexible and friction under conditions of uncertainty BP neural network adaptive tracking method [J]. *Mechanical Engineering* , 2012, 48

[illegible]