

文章编号: 1000-8152(2007)03-0374-06

一种炼钢-连铸生产计划一体化编制方法

宁树实, 王 伟, 潘学军

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 炼钢和连铸生产调度是钢铁企业生产调度的重要内容而且二者密切相关. 目前采用的调度方法多是分别编制炼钢炉次计划和连铸浇次计划, 还没有协调处理二者的有效办法. 提出了一种炼钢-连铸生产计划的一体化编制方法. 首先通过求解炼钢炉次计划编制的多目标优化模型得到炉次计划的多个候选方案, 在此基础上通过求解以最小化计划数为目标的连铸浇次计划数学模型得到浇次计划, 最后根据浇次计划从炉次计划的候选方案中确定炉次计划. 求解过程中使用了多目标模拟退火算法和改进变邻域搜索算法. 基于实际生产数据的仿真试验表明了所提方法的有效性.

关键词: 炉次计划; 浇次计划; 优化; 一体化计划编制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Integrated method of steel-making and continuous casting planning

NING Shu-shi, WANG Wei, PAN Xue-jun

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: Steel making scheduling and continuous casting scheduling have close relationships with each other, but they are often solved in a separate way. Unfortunately, there had been no effective way to integrate these two scheduling problems. An integrated method of steel-making planning and continuous casting planning is proposed in this paper. Firstly, a set of potential furnace charge plans is obtained through solving a multi-objective model of furnace charge planning. Secondly, the casting plan can be obtained in terms of the solutions of continuous casting planning mathematical model with the objective of minimizing the number of casting plans. Finally, the furnace charge plan is confirmed according to the casting plan. Multi-objective simulated annealing algorithm and modified variable neighborhood search algorithm are designed to solve the two mathematical models. Simulations based on practical data show the effectiveness of the proposed method.

Key words: furnace charge plan; casting plan; optimization; integrated planning

1 引言 (Introduction)

生产计划与调度优化是钢铁企业提高生产效率、提高产品质量和市场竞争力的重要途径. 炼钢和连铸是钢铁生产中的重要工序, 处于整个生产流程的上游, 它们的生产计划与调度水平对整个企业的生产效益和生产效率影响很大. 而且由于炼钢和连铸在工艺上衔接紧密, 在生产调度中相互影响, 制订炼钢生产计划和连铸生产计划时还必须考虑二者之间的协调.

文[1]指出炼钢-连铸是钢铁生产中的瓶颈工序, 研究炼钢-连铸的生产计划与调度优化意义重大. 文[2]中给出了连铸生产计划的整数规划模型, 并采用禁忌搜索算法求解, 但是所给出的模型实际上研究的只是板坯在炼钢炉次中的组合问题, 并没有涉及到连铸计划的编制, 研究重点在于生产环境发

生变化后的动态调度. 文[3]研究了连铸生产计划的编制问题, 所提出的整数规划数学模型以最小化连铸浇次计划数为目标, 使用了列生成(column generation)方法求解. 文[4]中给出了一种基于准时制思想的炼钢-连铸生产调度的非线性数学规划模型, 模型中考虑了准时发货和生产操作的连续性问题. 文[5]建立了炼钢计划编制问题的混合整数规划模型并提出了用于求解该问题的遗传算法. 以上文献均是把炼钢和连铸生产计划编制当做独立的问题进行研究, 然而在实际生产中炼钢生产计划和连铸生产计划联系紧密而且相互影响, 在编制生产计划时考虑到二者的协调更符合实际生产要求, 而且可产生更大的经济效益.

针对上述问题, 本文提出一种炼钢-连铸生产计划编制的一体化方法, 分别建立了炼钢炉次计划编

收稿日期: 2005-08-21; 收修改稿日期: 2006-06-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474058, 60534010); 辽宁省高等学校学科拔尖人才基金资助项目.

制模型和连铸浇次计划编制模型,模型中考虑了炼钢和连铸各自的生产约束.求解模型的过程中首先求出若干个炼钢炉次计划方案,再根据炉次计划方案求出不同的浇次计划方案,最后根据最优的浇次计划确定与之相对应的炉次计划,解决了炼钢计划和连铸计划之间的协调问题.采用生产实际数据的仿真表明该方法是有用的,对于生产实际具有一定的指导意义.

2 炼钢-连铸生产计划编制问题(Steel-making and continuous casting planning problem)

在钢铁生产流程中,炼钢生产出来的高温钢水提供给连铸机,连铸机将钢水浇铸成不同规格的板坯.同一炼钢炉里炼出来的钢水称为一个炉次,炼钢生产计划主要是确定炉次的组织,决定准备生产的板坯需要分几个炉次生产,哪些板坯可以组织到一个炉次中生产以及炉次的生产顺序.连铸机将钢水浇铸成各种形态的板坯,使用同一中间包浇铸的钢水称为一个浇次,通常一个浇次会包含多个炉次,连铸生产计划主要确定浇次的组织,决定哪几个炉次的钢水可以组织到同一个浇次计划中生产.由于高温钢水不易储存,所以要求炼钢炉次计划和连铸浇次计划的生产顺序一致,即先炼出来的炉次应当先浇铸.

下面详细说明炼钢和连铸生产中的工艺约束以及炉次计划编制和浇次计划编制的数学模型.

2.1 炼钢-连铸生产中的工艺约束 (Technical constraints in steel-making and continuous casting)

2.1.1 炼钢生产工艺约束 (Technical constraints in steel-making)

炼钢的一个炉次最多可以冶炼几十吨至上百吨的钢材.钢铁产品在生产过程中根据化学成分的不同可以划分为4个钢级序列,每个钢级序列又可以再细化为不同的钢级.只有同一钢级序列的板坯才允许安排在同一炉次中生产,而且一个炉次只能生产一种钢级的钢水,如果出现板坯钢级不同的情况,只能按照较高的钢级生产钢水.

编制炉次计划时要满足如下的生产工艺约束^[6]:

- 1) 安排在同一炉次中的板坯钢级最好相同;
- 2) 板坯宽度尽量一致,越接近越好;
- 3) 板坯厚度必须相同;
- 4) 交货期接近.

在编制炉次计划时,首先选择交货期接近的板坯作为候选板坯,这样就满足了交货期的约束.编制计划过程中,总会出现有的候选板坯由于工艺约束的

限制不能组成一炉的情况,常用的处理方法是在炉次计划中补充相同规格的板坯形成无委材,但是这会造成中间库存的增加.所以要求编制炉次计划时把尽可能多的候选板坯编入炉次计划,以尽量减少无委材的数量.

2.1.2 连铸生产工艺约束 (Technical constraints in continuous casting)

连铸生产是以炼钢炉次为单位的,为了提高连铸的生产率和成材率,降低生产消耗,需要有更多的炉次用同一中间包进行连续浇铸,工艺约束主要包括:

- 1) 中间包的寿命有一定限制,连续浇铸的炉次数不能超过中间包的寿命;
- 2) 不同炉次之间连浇时,如果相邻两个炉次之间的钢级有差异,会增加炼钢成本,所以同一浇次中的炉次的钢级差异必须在一定的限度内;
- 3) 在同一浇次中炉次宽度不能频繁改变而且相邻炉次之间的宽度变化不能太大,厚度应该相同.

2.2 炉次计划编制数学模型(Mathematical model of furnace charge planning)

根据工艺约束,编制炉次计划的目标是希望每个炉次计划中板坯的钢级差异和宽度差异越小越好,同时在计划数已经确定的炉次计划中应包含尽可能多的候选板坯(即炉次计划的剩余炉容量越小越好).假设候选板坯数量为 n 块,希望安排为 m 个炉次计划中生产,令 i 表示板坯序号($i = 1, 2, \dots, n$), j 表示炉次计划序号($j = 1, 2, \dots, m$),定义如下参数:

V : 炼钢炉容量的上限值;

v_j : 炉次计划 j 中包含候选板坯的总重量;

W_i : 板坯 i 的重量;

G_{1i} : 板坯 i 的钢级序列号;

G_{2i} : 板坯 i 的钢级量化指标;

W_{ti} : 板坯 i 的宽度;

T_i : 板坯 i 的厚度;

$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{板坯} i \text{ 属于炉次计划 } j, \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$

$G \max_j$: 表示炉次计划 j 中板坯的最高钢级量化指标, $G \max_j = \max(G_{11} \cdot X_{1j}, G_{12} \cdot X_{2j}, \dots, G_{1n} \cdot X_{nj})$;

$Wt \max_j$: 表示炉次计划 j 中最大的板坯宽度, $Wt \max_j = \max(W_{t1} \cdot X_{1j}, W_{t2} \cdot X_{2j}, \dots, W_{tn} \cdot X_{nj})$;

R_j : 表示第 j 个炉次中的剩余炉容量, $R_j = V - v_j$;

炉次计划编制的数学模型可以描述为:

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |G_{2i} - G \max_j| \cdot X_{ij}, \quad (1)$$

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |Wt_i - Wt_{\max_j}| \cdot X_{ij}, \quad (2)$$

$$\min \frac{\sum_{j=1}^m R_j}{m \cdot V} \times 100\%. \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \\ \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq 1, i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (4)$$

$$v_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_{ij} \leq V, j \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (5)$$

$$T_1 \cdot X_{1j} = \dots = T_i \cdot X_{ij}, j \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (6)$$

$$X_{ik} \cdot X_{jk} = 0, G_{1i} \neq G_{2i}, j \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (7)$$

$$i, k \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i \geq 0.6 \cdot m \cdot V. \quad (9)$$

其中公式(1)~(3)是目标函数,分别表示最小化所有炉次中板坯钢级差异、最小化所有炉次中板坯宽度差异和最小化总剩余炉容量.约束(4)表示每块板坯最多只能安排在一个炉次中;约束(5)表示分配给每个炉次的板坯总重量不能超出炉容量的上限值;约束(6)表示只有厚度相同的板坯才能合并在一个炉次中;约束(7)表示只有同一钢级序列号的板坯才能分配到同一炉次中;约束(8)表示一个炉次计划方案应该至少包括60%的候选板坯,这个约束是为了防止编制炉次计划时片面追求满足目标(1)和(2)而造成目标(3)的剩余炉容量过低.

公式(1)~(8)所建立的炉次计划编制模型属于多目标组合优化问题,该问题的3个目标函数没有优先级的区别,求解这类优化问题不能得到唯一的优化目标值,而是会得到一个由一系列无法比较优劣的解组成的pareto解集^[7].

2.3 浇次计划编制数学模型 (Mathematical model of casting planning)

根据工艺约束的描述,编制浇次计划时应当在满足工艺约束的前提下尽量减少浇次计划的数量,以减少中间包的数量,降低连铸机总调整费用^[4,5].

设最终形成的浇次计划的数量为 c ,已知炉次数为 p ,令 i 为炉次序号($i = 1, 2, \dots, p$), j 为浇次计划序号($j = 1, 2, \dots, c$),定义如下参数:

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第} i \text{个炉次分配到第} j \text{个浇次中,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

L : 中间包的寿命;

Gd_i : 第 i 个炉次的钢级;

W_i : 第 i 个炉次的板坯宽度;

T_i : 第 i 个炉次的板坯厚度;

连铸浇次计划的数学模型可以描述为:

$$\min c, \quad (10)$$

$$\text{s. t.} \\ \sum_{i=1}^p Y_{ij} = \sum_{j=1}^c Y_{ij} = 1, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^p Y_{ij} \leq L, j \in \{1, 2, \dots, c\}, \quad (12)$$

$$Gd_i - Gd_j \leq 2, \text{ 如果 } \sum_{k=1}^p Y_{ik} \cdot Y_{jk} = 1, \\ i, j \in \{1, 2, \dots, p\}, \quad (13)$$

$$|W_i - W_j| \leq 10, \text{ 如果 } \sum_{k=1}^p Y_{ik} \cdot Y_{jk} = 1, \quad (14)$$

$$i, j \in \{1, 2, \dots, p\}, \\ T_i = T_j, \text{ 如果 } \sum_{k=1}^p Y_{ik} \cdot Y_{jk} = 1, \\ i, j \in \{1, 2, \dots, p\}, \quad (15)$$

公式(9)表示优化目标为最小化浇次计划数,约束(10)表示所有炉次全部被安排而且每一个炉次只能安排在一个浇次内;约束(11)表示每个浇次内的炉次数不能超过中间包的寿命;约束(12)表示要求同一浇次中的炉次的钢级差别在一定范围之内,这里设定为2;约束(13)表示要求同一浇次中的炉次之间的板坯宽度差别有限制,这里设定为10;约束(14)表示同一浇次的炉次板坯厚度要求相同.

3 求解策略与算法设计 (Solution strategy and algorithm design)

3.1 求解策略 (Solution strategy)

上一节所建立的炼钢和连铸生产计划编制的数学模型中较为全面地考虑了炼钢生产和连铸生产中的工艺约束.但是在编制生产计划时仅考虑这些工艺约束还不能完全保证得到很好的炼钢炉次计划和连铸浇次计划,这是因为对于同样的候选板坯集合,如果编制出不同的炉次计划就会导致不同的浇次计划,由于浇次计划和炉次计划的工艺约束并不相同,不同的炉次计划编排对于浇次计划编制的影响可能差别会非常大;由于炼钢和连铸的生产必须保持一致,也要求炼钢炉次计划的安排也必须与连铸浇次计划相互协调.为了妥善解决这一问题,本文提出了一种编排炼钢-连铸生产计划的一体化编制方法,该方法的实现步骤为:

1) 根据炉次计划的多目标优化数学模型求得由多个炉次计划模型的pareto最优解构成的pareto最优解集作为候选炉次计划集;

2) 用这些pareto最优解依次作为浇次计划编制模型的输入数据,可得到多个浇次计划方案,从中选取最优方案作为浇次计划.根据公式(9),最优方案为浇次计划数最少的方案,如果这样的方案多于一

个,则选取相应的炉次计划目标值最优者作为最终的浇次计划.为使最终得到的炉次计划结果最大限度减少中间库存和降低生产费用,此时最优炉次计划按照剩余炉容量、钢级差异、宽度差异的顺序比较选取;

3) 根据浇次计划确定相应的炉次计划方案中炉次的生产顺序,形成最终的炉次计划.

按照以上方法编制的炉次计划和浇次计划不仅符合各自的生产工艺约束,而且还能达到炼钢生产计划和连铸生产计划互相协调、炼钢和连铸生产一致的要求.在运用一体化编制方法编制炼钢和连铸生产计划过程中,求解炼钢计划编制数学模型和连铸生产计划数学模型分别采用了多目标模拟退火 (multiobjective simulated annealing, MOSA) 算法和改进变邻域搜索 (modified variable neighborhood search, MVNS) 算法.

3.2 MOSA 算法 (MOSA algorithm)

本文建立的炼钢炉次计划编制问题的数学模型属于多目标组合优化问题,该问题是 NP-hard 问题,本文采用超启发式算法—MOSA 算法求解.模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法是在单目标组合优化领域应用效果很好的一种超启发式算法, MOSA 算法是在 SA 算法基础上发展而来的一种多目标超启发式算法,该算法易于实现,在求解不同的多目标组合优化问题和实际应用中表现出很强的鲁棒性,是多目标组合优化邻域应用得比较成功的超启发式算法^[8,9]. MOSA 算法在继承了 SA 算法基本框架的基础上,增加了存储 pareto 最优解集的数据结构.本文应用的 MOSA 的算法流程为:

第1步 选定一个初始解 x , pareto 解集 M 设为空集,设定温度初值 T_0 ;

第2步 用 x 更新 M ;

第3步 在 x 的邻域中选择一个可行解 y ;

第4步 判断 y 是否被 x 支配,如果 y 被 x 支配,以 y 更新 M ;

第5步 如果 y 不被 x 支配,首先确定 y 中各目标值的权重系数:

a) 若算法是第1次迭代或者 x 在其邻域中无法找到其支配解时,随机确定一组归一化的权重 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$;

b) 否则选 x 的邻域中的支配 x 的解 x' , 设置权重 $\lambda_j = \begin{cases} \alpha \lambda_j^x, & \text{if } f_j(x) \geq f_j(x') \\ \lambda_j^x / \alpha, & \text{if } f_j(x) < f_j(x') \end{cases}$, 然后归一化;

第6步 依概率

$$P(x, y, T, \Lambda) = \min\{1, \exp(\max_j(\lambda_j(f_j(x) - f_j(y))))/T\}$$

接受 y 作为当前解;

第7步 如果达到温降条件,降低退火温度;

第8步 如果满足停止条件算法终止,如果不满足停止条件转到第3步.

解 x 的邻域设定为在所有炉次计划中选取两块板坯交换位置形成的一组新炉次计划,所有按照这种方式可能形成的炉次计划集合构成了解 x 的邻域.

T_0 是初始退火温度, T 是当前退火温度, $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j\}$ 是权重系数, $P(x, y, T, \Lambda) = \min\{1, \exp(\max_j(\lambda_j(f_j(x) - f_j(y))))/T\}$ 是接受一个新解作为当前解的概率.

算法执行一定步数(每要求或拒绝新解作为当前解一次,认为算法执行了一步)后退火温度下降,下降速率为一常数 β ,即设 k 时刻下降前的温度为 $T(k)$,则 $k+1$ 时刻下降后的温度为 $T(k+1) = T(k) \cdot \beta$.

算法的停止条件为退火温度达到一定值后算法停止.

3.3 MVNS 算法 (MVNS algorithm)

本文建立的连铸浇次计划编制问题的数学模型也属于组合优化难题,精确算法难以得到满意的结果,为了求得全局优化的效果,需要采用超启发式算法,以得到问题的近优解.

局部搜索技术在很多超启发式算法中都起到了重要的作用,邻域结构的适当与否是局部搜索能否成功的关键.通过对组合优化问题的分析可以看出:对于不同的邻域结构来说,某种邻域的局部最优解不一定是另一种邻域结构的局部最优解;全局最优解对于所有的邻域结构来说同时都是局部最优解;通常来说不同邻域结构的局部最优解彼此间相对距离得很近.基于这些认识, VNS 算法被提出来并在组合优化问题中有很好的表现^[10],这种算法的最大特点在于在求解问题的过程中使用了一种以上的邻域结构,算法易于实现并且具有极强的全局搜索能力.

本文根据浇次计划编制问题的实际情况对 VNS 算法进行了改进,改进的 VNS 算法即 MVNS 算法的流程为:

第1步 算法初始化,确定算法中将用到的 N_k ($k = 1, 2, \dots, k_{\max}$) 种邻域结构、确定一个初始解 x , 其值为 $f(x)$ 、建立历史最优解集合 $P = \phi$ 并用 x 更新 P ;

第2步 令 $k = 1$, 开始算法的迭代过程;

第3步 在 x 的第 k 类邻域中随机选取一点 x' ;

第4步 以 x' 作为在该类邻域中局部搜索的起点,

得到局部最优解 x'' ;

第5步 如果满足 $f(x'') \leq f(x)$, 令 $x = x'$ 及 $k = 1$, 用 x'' 更新 P 然后转到第3步; 如果 $f(x'') > f(x)$ 转到第6步;

第6步 判断是否满足停止条件, 如果满足算法终止, 如果不满足令 $k = k + 1$ 转到第3步.

在MVNS算法中:

设炉次计划数为 p , 令每个炉次计划都对应一个唯一的序号. 浇次计划的解可以表示为序列 $S = p_i (i = 1, 2, \dots, p)$, 其中 p_i 的值为炉次计划的序号, 根据 S 确定浇次计划的方法为依序将炉次计划归入同一浇次计划中, 遇到某个炉次计划不满足工艺约束就开始归入下一个浇次计划, 直到所有的炉次都排完.

浇次计划编制问题解的评价函数 f 设定为公式(9)的浇次计划数.

本文中用到的邻域结构共有3类 ($k_{\max} = 3$): 插入型邻域、紧邻交换型邻域和交换型邻域. 插入式邻域中对于序列 P 中的两个不同位置的炉次计划 i 和 j , 将 i 插入位置 j 后形成新的浇次计划, 序列 P 中所有这样的变换构成了插入式邻域. 紧邻交换邻域是将第 i 个位置的炉次计划与其后紧邻的第 $i + 1$ 个炉次计划交换位置, 所有这种交换构成了紧邻交换型邻域. 交换型邻域是指对于两个炉次计划 i 和 j , 交换这两个炉次计划的位置后形成了新的浇次计划, 所有这种变换构成了交换型邻域.

算法每获得一个局部最优解视为迭代一次, 算法的终止条件设定为算法迭代一定次数.

4 仿真实验 (Simulation experiment)

为验证本文提出的一体化生产计划编制方法, 用某厂的实际生产数据作为算例进行仿真实验. 共有3批试验数据, 其中算例1包括767块板坯, 算例2包括1032块板坯, 算例3包括500块板坯.

应用本文方法(方法1)求得的炉次计划与计划人员手工编制(方法2)的结果以及用文[2]中算法(方法3)得到的仿真结果做比较, 结果列于表1中. 表1中目标1表示钢级差异, 目标2表示宽度差异单位为mm, 目标3表示剩余炉容量百分比. 用于炉次计划编制的MOSA算法参数设置为: 退火温度初值 T_0 设为50, 降温系数为 $\beta = 0.96$, 算法停止条件为退火温度达到 $T = 9$ 时.

一体化编制方法(方法1)生成的浇次计划与计划人员手工编制(方法2)的结果以及应用文[3]中算法(方法3)得到的结果做比较, 结果列于表2中. 为了加强仿真结果的可比性, 应用手工编制方法和文[3]的算法求解浇次计划时使用的输入数据(炉次计划)为按照本文方法求得的炉次计划. 用于浇次

计划编制的MVNS算法的停止条件设定为算法迭代100次.

表1 炉次计划编制结果

Table 1 Results of furnace charge plan

		方法1	方法2	方法3
算例1	目标1	77	109	93
	目标2	108	136	128
	目标3	27.16	47.51	43.70
算例2	目标1	107	142	121
	目标2	119	163	167
	目标3	29.37	48.28	39.02
算例3	目标1	58	73	62
	目标2	72	91	62
	目标3	24.32	54.11	25.36

表2 浇次计划编制结果

Table 2 Results of casting plan

	方法1	方法2	方法3
算例1浇次计划数	3	5	4
算例2浇次计划数	5	5	5
算例3浇次计划数	3	4	3

根据表1的仿真结果可以看出, 应用本文所提出的一体化方法编制的炉次计划, 3个优化目标值均优于人工编制方法得到的炉次计划, 也均优于应用文[2]中算法得到的炉次计划. 根据表2的仿真结果可以看出, 本文所提出的一体化编制方法得到的3个算例的浇次计划数, 有两个算例的结果优于人工编制方法和文[3]中算法的结果, 有一个算例3种方法得到的浇次计划数相等, 说明本文所提出的一体化编制方法在浇次计划编制方面的性能也优于人工编制方法和文[3]中的方法.

5 结论 (Conclusion)

根据钢铁生产中炼钢-连铸两道工序紧密相连、生产调度相互制约与影响的实际情况, 本文提出了一种炼钢-连铸生产计划一体化编制方法. 该方法首先建立炉次计划编制和浇次计划编制的整数规划数学模型, 然后采用MOSA算法求得候选炉次计划方案, 并在此基础上采用MVNS算法求得浇次计划, 最后根据浇次计划确定炉次计划. 基于生产实际数据的仿真实验表明了本文所提出的计划编制方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] LEE H S, MURTHY S S, HAIDER S W, et al. Primary production scheduling at steelmaking industries[J]. *IBM J of Research and Development*, 1996, 40(2): 231 - 252.

- [2] OUELHADJ D. A multi-agent system for the integrated dynamic scheduling of steel production[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2003.
- [3] CHANG S Y, CHANG M R, HONG Y. A lot grouping algorithm for a continuous slab caster in an integrated steel mill[J]. *Production Planning & Control*, 2000, 11(4): 363 – 368.
- [4] TANG L X, LIU J Y, RONG A Y, et al. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production[J]. *European J of Operational Research*, 2000, 120(2): 423 – 435.
- [5] 唐立新, 杨自厚, 王梦光. 炼钢-连铸最优炉次计划模型与算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1996, 17(4): 440 – 445.
(TANG Lixin, YANG Zihou, WANG Mengguang. Model and algorithm of furnace charge plan for steelmaking-continuous casting production scheduling[J]. *J of Northeastern University(Natural Science)*, 1996, 17(4): 440 – 445.)
- [6] 唐立新. CIMS 下生产批量计划理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
(TANG Lixin. *Theory and Application of Lot-Sizing Problem in CIMS*[M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [7] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
(XUAN Guangnan, CHENG Runwei. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004)
- [8] PIOTRCZYK A K, JASZKIEWICZ A. Pareto simulated annealing: a metaheuristic technique for multiple objective combinatorial problem[J]. *J of Multi-Criteria Decisions Analysis*, 1998, 7(1): 34 – 47.
- [9] ULUNGU P L, TEGHEM J, FORTEMPS P H, et al. MOSA method: a tool for solving multiobjective combinatorial problems[J]. *J of Multi-Criteria Decisions Analysis*, 1999, 8(4): 221 – 236.
- [10] HANSEN P. Variable Neighborhood Search[M]// *Handbook of Meta-heuristics*. New York, American: Prentice Hall, 1996.

作者简介:

宁树实 (1973—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为流程工业生产计划及优化调度、智能算法, E-mail: ningshushi@163.com;

王伟 (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为自适应控制、模糊预测控制、流程工业生产过程建模与控制、CIMS, E-mail: wangwei@dlut.edu.cn;

潘学军 (1966—), 男, 副教授, 目前研究方向为工业生产过程建模与控制、智能控制, E-mail: panxj@dlut.edu.cn.

(上接第370页)

- [4] KOLMANOVSKY I V, MAIZENBERG T L. Optimal control of continuous-time linear systems with a time-varying, random delay[J]. *Systems & Control Letters*, 2001, 44(1): 119 – 126.
- [5] 谢林柏, 方华京, 纪志成, 等. 时延网络化控制系统的 H_2/H_∞ 混合控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 1020 – 1024.
(XIE Linbo, FANG Huajing, JI Zhicheng, et al. Mixed H_2/H_∞ control for networked control systems with delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 1020 – 1024.)
- [6] WANG Z, HO D W C, LIU X. Robust Filtering under randomly varying sensor delay with variance constraints[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2004, 51(6): 320 – 326.
- [7] YANG F, WANG Z, HUNG Y S, et al. H_∞ control for networked systems with random communication delays[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2006, 51(3): 511 – 518.

作者简介:

王武 (1973—), 男, 讲师, 博士, 目前研究方向为网络化系统的控制与滤波、非脆弱控制, E-mail: wangwu@fzu.edu.cn;

林琼斌 (1976—), 男, 讲师, 在职博士研究生, 目前研究方向为网络化系统的控制与滤波, E-mail: qiongbnlin@fzu.edu.cn;

杨富文 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为鲁棒控制、鲁棒滤波、迭代学习控制等, E-mail: ofwyang@fzu.edu.cn.

(上接第373页)

- [8] TSATSANIS M K, GIANNAKIS G B. Time-varying system identification and model validation using wavelets[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3512 – 3523.
- [9] DELYON B, JUDISKY A, BENVENSITE A. Accuracy analysis for wavelet approximations[J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1995, 6(2): 332 – 348.
- [10] 王耀南. 智能信息处理技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
(WANG Yaonan. *Intelligent Information Processing Technologies* [M]. Beijing: High Education Press, 2003.)

作者简介:

孙炜 (1975—), 男, 博士, 湖南大学电气与信息工程学院副

教授, 目前研究方向为智能控制理论及应用、电力电子技术、智能机器人控制等, E-mail: david-sun@tom.com;

翟晓华 (1982—), 男, 湖南大学电气与信息工程学院硕士研究生, 目前研究方向为智能控制, E-mail: zhaixiaohua@163.com;

张路金 (1983—), 男, 湖南大学电气与信息工程学院硕士研究生, 目前研究方向为智能控制, E-mail: zhanglujin@163.com;

王耀南 (1957—), 男, 博士, 湖南大学电气与信息工程学院教授, 目前研究方向为智能控制理论及应用、智能信息处理、智能机器人控制、电力电子、电动汽车控制等, E-mail: yaonan@mail.hunnu.edu.cn.