

文章编号: 1001-0920(2011)02-0297-06

基于蚁群算法的加热炉作业计划研究与应用

陈友文, 柴天佑

(东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要: 加热炉的作业效率直接影响企业的最终效益. 由于加热炉的复杂性, 其作业计划仍然处于手动操作状态. 针对加热炉这样一个复杂工业过程, 提出一个优化作业计划与调度的编排方法, 用于加热炉在正常和异常生产的优化排产. 利用最短时间和最早缴期算法进行加热炉正常作业排序. 采用蚁群算法搜索异常情况下的最优解, 通过跟踪形成作业计划闭环控制, 从而实现加热炉作业优化的实时控制. 该方法在某钢铁公司进行了实际应用, 效果良好.

关键词: 加热炉; 作业计划; 最短时间; 最早缴期; 蚁群算法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research and application based on ant colony algorithm for heating furnace scheduling

CHEN You-wen, CHAI Tian-you

(Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: CHEN You-wen, E-mail: cywjy@126.com)

Abstract: The scheduling of heating furnace has a direct impact on steel productivity in the steel rolling process. Because furnace is a complex industrial process, manual operations is still widely used in the furnace scheduling. For the manual scheduling of heat furnace in steel enterprises, a method for scheduling is proposed for furnace plan control. The scheduling system is established, which is suitable for normal and abnormal operating conditions. The system consists of some modules, including the production plan, the intelligence pre-handled process data, the tracking inside the furnace, the available furnace capacity parameter, the shortest possible date of operation plan and earliest due date of operation plan, the ant colony algorithm, the operation plan made in both the normal operating conditions and the abnormal operating conditions. Finally, heating rate and billet lot number are yielded by scheduling model for control on line. The proposed scheduling method is successfully applied to some steel plant and significant result is obtained.

Key words: heating furnace; scheduling; shortest possible date; earliest due date; ant colony algorithm

1 引言

一个半世纪以来, 钢铁工业一直是支持与推动其他行业进行产业革命和发展的最重要基础. 随着钢材在市场中竞争的加剧, 提高质量, 降低消耗, 提高生产率成为提高我国钢铁企业竞争力的关键^[1-2].

在钢铁行业中, 加热炉是将钢坯轧制成最终产品而对钢坯进行再加热的设备. 钢铁生产是典型的流程工业生产过程, 如果加热炉效率低下, 必然影响其前后工序炼钢与轧钢的生产效率, 进而影响整个生产线的作业率, 最终影响到企业的整体效益^[3-4]. 因此, 提高加热炉的生产效率是钢铁生产过程中一个非常有实际意义的研究课题.

目前, 在钢铁行业, 用户需求的多样化、高级化、多品种、小批量、短交货期的生产特点是目前的主流. 现代钢铁生产管理对象变得越来越大规模、复杂化. 对于现代加热炉作业计划的优化研究越来越引起企业和学者的重视. 文献[5-6]提出了基于集成控制的优化设定方法, 将该方法用于步进加热炉, 改善了钢坯的加热效果, 但并不能提高加热炉的效率. [7-8]研究了步进加热炉作业计划编制, 但由于方法过于复杂且约束条件较多, 很难在大多数钢厂中有实际应用. 目前加热炉的作业计划仍然主要由人工凭经验编制, 然后再由操作人员去执行. 如果出现误工, 则完全依靠人工操作处理. 这种人工计划与调度方式效率极

收稿日期: 2010-03-18; 修回日期: 2010-07-19.

基金项目: 国家863计划项目(2007AA041405); 国家自然科学基金项目(60821063, 60828007).

作者简介: 陈友文(1964—), 男, 博士生, 从事复杂工业过程建模、控制与决策优化的研究; 柴天佑(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模、控制与决策优化等研究.

为低下,消耗了大量的人力和能源.为此,进行加热炉生产计划的实时自动优化编制与调度具有重要意义.

本文设计了一个加热炉作业计划系统.用最短时间^[9](SPD)和最早缴期^[10](EDD)算法进行钢坯加热正常作业排序;通过建立商务旅行模型^[11](TSP),并采用蚁群优化算法(ACT)来搜索异常情况下的最优解;通过跟踪产能模型和钢坯位置,形成对作业计划的闭环控制,从而为实现加热炉综合自动化打下坚实基础.最后,该系统成功集成到某钢铁公司中板厂加热炉自动化系统,取得了良好的应用效果.

2 加热炉工艺过程描述与控制现状

2.1 工艺过程与排产分析

以连续式加热炉为研究对象如图1所示.加热炉沿炉长方向划分为预热段、加热一段、加热二段和均热段.在炉膛内,煤气与空气通过烧嘴后混合进行燃烧,产生大量的燃烧热加热钢坯.炉膛换热和金属导热是相互耦合的,化学反应、燃烧、流体流动以及相变同时发生,造成加热炉是一个复杂工业控制过程^[4-5].

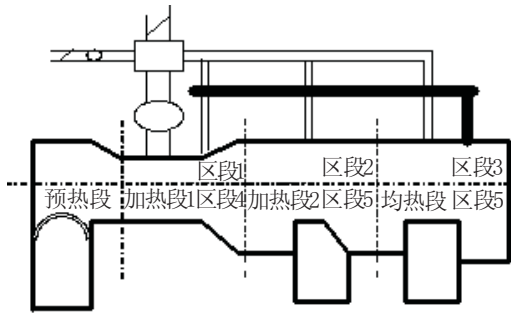


图1 加热炉示意图

工艺过程是合格的钢坯吊至上料垛板台.上料时,剥板台抬升,其后面的推出机前进,将钢坯推入受料辊道.进入受料辊道的钢坯,按规定的入炉顺序依次经过炉前运输辊道,将其精确定位在相应的入炉辊道.当炉内有空位时,推钢机前进,将钢坯推入炉内,或继续前进将此排最前一块钢坯推至待出料位.钢坯自装料端开始,顺序经过加热炉各段,移送到加热炉的出料端,期间钢坯温度达到要求的温度.当轧线要钢时,开启出料炉门,出钢机托出钢坯,放在出料辊道,经除鳞后送往轧机进行轧制.

对于加热炉作业的计划与调度而言,主要涉及两个内容,一个是顺序,另一个是时间.有了顺序,确定了每块钢坯的加热周期,根据当前加热炉被加热钢坯的运行情况,不难排出作业计划.影响加热周期的因素有:钢坯的种类、规格和初始温度;还有线路选择,包括上料辊道线路,出料辊道线路,配置的加热炉数量,每座加热炉内的料排数量;以及装炉模式,冷装、热装和混装;另外需要考虑的一个因素就是固定

的设备检修时间.如果以加热炉效率最大进行作业计划的优化排序和调度,是一个非常复杂的问题.

在正常工况下,依据经验编排计划,也是可以的.但加热炉在生产过程中由于设备、操作和炉体因素会出现乱序工况,造成原有的顺序混乱,导致加热炉温度控制的跟踪系统缺乏正确的跟踪原则,故障后无法建立跟踪规则,无法处理顺序混乱问题,这会影响加热质量,甚至最终造成严重后果.所以针对加热炉生产过程的复杂工况,设计了加热炉作业计划与优化调度系统.

2.2 作业控制现状

目前,对于加热炉的作业计划编制与调度,如图2所示.

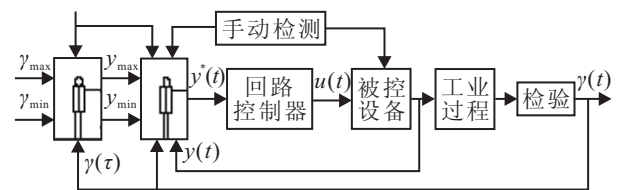


图2 加热炉作业控制现状

过程控制基本上还是由人工操作来完成,所以仍然沿用过去金字塔式操作控制方式.即通过工序计划员凭经验排产,依据轧制计划以及库存钢坯情况,按照先后入库顺序,按先入先出的方法进行排产.给出每班产量、质量和能耗指标,以及偏差范围,由作业人员手动操作执行.在实际生产中,由于炉体、炉基、机械、管道和燃气输送的设备原因,或者操作、控制等人为原因都会产生故障与事故,常出现打破正常生产秩序的情况.如果出现某钢坯掉道、掉轨、粘连、过烧、脱碳,这块钢坯必然不能送往轧线,原来正常的钢坯加热次序被打破.在这种情况下,目前的做法是:一方面申请更改作业计划;另一方面凭经验“赶产”.这样做造成了效率低下,以及潜在的安全问题,导致人力和能源大量浪费.

3 加热炉作业计划优化策略

提出如图3所示的加热炉作业计划控制结构.其中:正常排序、赶工排序、产能跟踪模型是主要模型,其他是辅助模型.

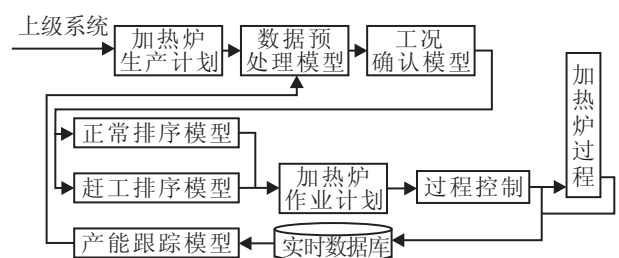


图3 加热炉作业控制现状

3.1 问题的定义

针对加热炉作业排序需要考虑钢种集合 $S \in (1, 2, \dots, s)$, s 为钢坯种数量; 钢类集合 $P \in (1, 2, \dots, p)$, p 为钢坯类数量; 钢的规格集合 $G \in (1, 2, \dots, g)$, g 为钢坯规格数量; 装炉模式集合 $O \in (1, 2, \dots, o)$, o 为装炉模式数量; 炉子集合 $F \in (1, 2, \dots, f)$, f 为炉子数量; 料排集合 $S_L \in (1, 2, \dots, s_l)$, s_l 为料排数量. 建立如下目标函数:

$$\begin{cases} J_Q \sim T(S, P, G, M, F), \\ \min \Gamma(s) \min \Gamma(p) \min \Gamma(m) \min \Gamma(f) \min \Gamma(s_l); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \min |T_u^*(x, y, \tau) - T_u(x, y, \tau)|, \\ & \min |T_l^*(x, y, \tau) - T_l(x, y, \tau)|, \\ & T(x, y, \tau) + |\delta| \geq 1/2 |T_u(x, y, \tau) - T_l(x, y, \tau)|, \\ & v_u \leq L_o / (\tau_e - \tau_s), 0 \leq \tau \leq (\tau_e - \tau_s). \end{aligned} \quad (2)$$

其中: Γ 为时间函数; $T(x, y, \tau)$, $T_u(x, y, \tau)$, $T_l(x, y, \tau)$ 分别为钢坯中心温度、上表面温度和下表面温度, 单位为 $^\circ$; T_u^* , T_l^* 为上下表面目标温度, 单位为 $^\circ$; x , y 为炉长方向和横向的位置, 单位为 m ; τ 为加热时间, 单位为 s ; δ 为容许的中心温度偏差, 单位为 $^\circ$; τ_s 为钢坯的开始加工时刻, 表示为 hh: mm: ss ; τ_e 钢坯的实际完工时刻; v_u 为实际运行速度, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; L_o 为炉内有效长度, 单位为 m .

对于这类排序属于 NP-hard 问题, 如果考虑出现故障情况, 问题就更加复杂. 这里的故障可分为两类, 一类是造成的延误时间不长, 在加热炉一个上料周期内就可以完成赶产; 另一类是造成的延误时间长, 需要若干个周期后才可以完成赶产.

3.2 正常排序

正常生产的排序思路是: 首先考虑全局优化; 然后考虑局部优化; 最后考虑全局与局部优化协调. 具体步骤如下:

Step 1: 全局优化, 采用 SPD 算法, 将影响加热时间的集合从弱到强排序, 即

$$\Gamma_1 \leq \Gamma_2 \leq \dots \leq \Gamma_i \leq \dots \leq \Gamma_n, \quad (3)$$

其中 Γ_i 为第 i 批钢坯的加工时间.

Step 2: 局部优化, 继续采用上述算法, 将在钢种、钢类、规格、装炉模式、炉组和料排每个集合中的元素进行不同优化.

Step 3: 如果存在小延误, 采用 EDD 算法, 则有

$$D_1 \leq D_2 \leq D_3 \leq \dots \leq D_i \leq \dots \leq D_n, \quad (4)$$

其中 D_i 为第 i 次钢坯的延误时间.

Step 4: 如果在 Step 3 后顺序中的钢坯没有任何延误, 则最优解已找到, 随即可进行 Step 6; 否则要找

出顺序中的第 1 批延迟钢坯, 假设现在是第 i 批钢坯.

Step 5: 选出开端的 i 批钢坯中时间加热时间最长的钢坯, 把它从顺序中取走; 然后修正钢坯完工时间, 随即进行 Step 4.

Step 6: 如果有未排入顺序的钢坯, 则把这些钢坯以任何次序加在顺序之后, 便得到最优顺序.

3.3 赶工排序

上述排序中钢坯的参数都是常数或者固定不变的随机变量. 事实上, 加热炉生产中工况经常变化, 经常会出现较大延误可能, 这必然需要进行赶产. 此时排序以成本最低为优化目标, 表达式如下:

$$\min K(x, s) = \sum w_j U_j + \sum v_j V_j \{x \in X, s \in S\}; \quad (5)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq x_j \leq u_j \leq p_j. \quad (6)$$

其中: n 为批钢坯的集合, $J = \{1, 2, \dots, n\}$, $j \in J$; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为赶产向量, X 为所有可能的赶产向量全体; $s = (s(1), s(2), \dots, s(n))$ 为 $1, 2, \dots, n$ 的一个全排列, S 为 $1, 2, \dots, n$ 所有排列的全体; p_j 为一批钢坯加热时间; d_j 为预定完成的加热时间; w_j 为误产费用; v_j 为赶产费用; u_j 为容许的最大赶产量; x_j 为实际的赶产量.

$$U_j = \begin{cases} 0, & \text{if piece } j \text{ no detain;} \\ 1, & \text{if piece } j \text{ detain.} \end{cases} \quad (7)$$

$$V_j = \begin{cases} 0, & jj; \\ 1, & kk. \end{cases} \quad (8)$$

由于 ACT 求解 TSP 取得了较好的效果^[8], 可采用蚁群优化算法求解加热炉异常情况下的赶工. 为此, 进一步规定把已经排好序的钢坯作为一个整体来考虑, 不再考虑其他问题, 并将 n 块钢坯看作 N 座城市, 用 $p_{ij}^k(t)$ 表示时刻 t 位于节点 i 上的第 k 只蚂蚁转移到节点 j 的概率, 即

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta / \sum_{ij \in al_k} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta, & j \in al_k; \\ 0, & j \notin al_k. \end{cases} \quad (9)$$

其中: α 为信息素浓度的相对权重; β 为启发信息的相对权重; η_{ij} 为节点 i 转移到节点 j 时的启发信息; $\tau_{ij}(t)$ 为节点 i, j 之间信息素浓度. 这里

$$\eta_{ij} = 1/d_{ij}, \quad (10)$$

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + (1-\rho) \Delta \tau_{ij}^k. \quad (11)$$

其中: ρ 为 $[0, 1]$ 上的常数, 局部残留信息素权重; $\Delta \tau_{ij}^k$ 为第 k 只蚂蚁在时刻 t 到 $t+1$ 之间节点 i 和 j 之间的路径上增加的信息素浓度, 即

$$\Delta \tau_{ij}^k = Q/d_{ij}. \quad (12)$$

这里: d_{ij} 为节点 i, j 之间的惩罚, 根据经验确定; Q 为

常量,用来表示每只蚂蚁所持有信息素总量.

定义全局更新规则为:当所有的蚂蚁都完成一次循环后,生成了全局最优解的蚂蚁按下式:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho_l \tau_{ij} + (1 - \rho_l) \Delta \tau_{ij}, \quad (13)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t+1) = Q/d_n \quad (14)$$

对所有路径上的信息素进行全局更新,不属于最优蚂蚁走过的路径,其信息素更新为 0. 其中: ρ_l 为 $[0, 1]$ 上的常数,全局残留信息权重; d_n 为第 n 次循环中最优解的惩罚总和.

算法实施步骤如下:

Step 1: 为每只蚂蚁 k 建立 3 张表: 节点表 J_k , 禁忌表 naI_k 和路径表 aI_k .

Step 2: 初始化参数,迭代次数 $n = 0$, 最大迭代次数 $n_{\max} = 1000$, 完成任务的蚂蚁数 $l = 0$, 每条路径上 $\tau_{ij}(0) = 1$, $\Delta \tau_{ij} = 0$, ρ 和 ρ_l 取 0.5, 蚂蚁数量取 100, 所有权重参数在调试中确定.

Step 3: 以上节编号为 00001 的钢坯为初始节点,将蚂蚁都放在其上.

Step 4: 置空禁忌表和路径表.

Step 5: 确定第 k 只蚂蚁的可移动的下一节点路径表.

Step 6: 根据式 (9) 计算转移概率,按照转移概率确定下一转移节点 s , 将 s 节点添加到禁忌表,并将 s 从路径表中删除.

Step 7: 当第 k 只蚂蚁到达节点 s 后,按照式 (11) 的信息素更新规则对出发节点 r 和到达节点 s 之间的路径进行信息素的局部更新.

Step 8: 如果禁忌表中包含了所有节点,在表中会获得一个解(排序),如果 l 小于总蚂蚁数时,转到 Step 5.

Step 9: 在所有生成的解中找出惩罚最小的一个解,也就是本次 n 循环的最优解,则得出该解的蚂蚁就是最优蚂蚁.

Step 10: 对最优蚂蚁经过的每一条路径,按式 (13) 的全局更新原则进行一次信息素的全局更新.

Step 11: 转到 Step 3, 重复执行直到迭代次数 n 达到指定的最大迭代次数 n_{\max} 时为止,或当连续若干次迭代内没有更好的解出现时为止,输出全局最优解.

3.4 赶工能力分析

赶工在加热炉有充裕加热能力的情况下进行,实际上,本模型提供赶工过程总的具体约束. 钢坯跟踪是整个加热炉优化控制的基础,建立跟踪模型在于可以在入炉时识别每一块钢坯,同时钢坯在炉内和出炉

也能识别到每一块钢坯,并把相应的钢坯位置数据送到相关控制模型中. 赶工能力分析利用钢坯当前能力过剩情况,预告赶工量.

每一块钢坯的序号中都带有自己的身份信息以及特征信息. 控制系统周期性地计算炉内每一块钢坯的升温信息,掌握当前的炉内钢坯的加热情况.

对于加热炉钢坯计算模型,首先建立炉气段能量平衡方程^[2],即

$$Q_{\text{com},i} + Q_{a,i} + Q_{f,i} + Q_{\text{mov},i} = Q_{c,i} + Q_{r,i} + Q_{\text{water},i} + Q_{\text{stove},i} \quad (15)$$

其中: 等号左边为能量收入项,依次为燃料化学热、助燃空气物理热、燃料物理热和烟气流动载热,单位为 J; 右边为能量支出项,依次为炉气对钢坯及炉墙的对流换热和辐射换热、炉内水冷装置的冷却介质吸热和炉气蓄热,单位为 J; 下标 i 为任意炉气段序号.

然后建立热电偶热点的能量平衡方程^[2],即

$$\sigma(\overline{GT}(T_g^4 - T_t^4) + \overline{WT}(T_w^4 - T_t^4) + \overline{ST}(T_s^4 - T_t^4)) + \alpha F_t(T_g - T_t) = 0. \quad (16)$$

其中: \overline{GT} , \overline{WT} , \overline{ST} 分别为炉气、炉围和钢坯对热电偶的辐射全交换面积,单位为 m^2 ; T 为温度,单位为 $^\circ\text{C}$; α 为热电偶与炉气间的对流换热系数,单位为 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$; F 为热电偶表面积,单位为 m^2 ; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常量, $5.67 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$; 下标 g , w , s , t 分别为炉气、炉围、钢坯和热电偶.

\overline{GT} , \overline{WT} , \overline{ST} 的表达式如下:

$$\overline{GT} = \left(-(1 - \varepsilon_g)^2 \left(\frac{1}{\varphi_{ws}} - 1 \right) \right) / \left((1 - \varepsilon_g)^2 \varphi_{st} \varphi_{ss} \varphi_{st} \varphi_{sw} \left(\varphi_{tw} - \frac{\varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} + 1 \right) + \varphi_{sw} \left(\frac{1}{\varphi_{ws}} - 1 \right) - \frac{1}{\varphi_{ws}(1 - \varepsilon_g)} \right) + \varphi_{st} \varphi_{ts} \varphi_{ss} \varphi_{st} \varphi_{sw} / \left((1 - \varepsilon_g) \left(\varphi_{ss} \varphi_{sw} + \frac{\varphi_{ss} \varphi_{st} \varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} + \frac{\varphi_{st} \varphi_{sw} \varphi_{st} \varphi_{tw}^2}{\varphi_{ts}} \right) \right), \quad (17)$$

$$\overline{WT} = \left(-\varepsilon_t \varepsilon_s \varphi_{ss} F_t \frac{\varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} \right) / \left((1 - \varepsilon_g)^2 \varphi_{st} \varphi_{ss} \varphi_{st} \varphi_{sw} \left(\varphi_{tw} - \frac{\varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} + 1 \right) + \varphi_{sw} \left(\frac{1}{\varphi_{ws}} - 1 \right) - \frac{1}{\varphi_{ws}(1 - \varepsilon_g)} \right) + \left[(1 - \varepsilon_g) + \frac{1}{\varphi_{ts}} \frac{\varphi_{tw}}{\varphi_{ss}} \right] / \left((1 - \varepsilon_g) \left(\varphi_{ss} \varphi_{sw} + \frac{\varphi_{ss} \varphi_{st} \varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} + \frac{\varphi_{st} \varphi_{sw} \varphi_{st} \varphi_{tw}^2}{\varphi_{ts}} \right) \right), \quad (18)$$

$$\overline{ST} = -\varepsilon_t \varepsilon_s \varphi_{ss} F_t / \left((1 - \varepsilon_g)^2 \varphi_{st} \varphi_{ss} \varphi_{st} \varphi_{sw} \left(\varphi_{tw} \frac{\varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} + 1 \right) + \right)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\varphi_{ws}} - 1 \right) - \frac{1}{\varphi_{ws}(1 - \varepsilon_g)} + \left[(1 - \varepsilon_g) \left(1 - \frac{\varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} \right) + \frac{1}{\varphi_{ws}} \frac{\varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} \right] / \left((1 - \varepsilon_g) \left(\zeta_s \zeta_w + \frac{\zeta_s \zeta_t \varphi_{st} \varphi_{ts}}{\varphi_{ws}} + \frac{\zeta_t \zeta_w \varphi_{st} \varphi_{tw}^2}{\varphi_{ts}} \right) \right). \end{aligned} \quad (19)$$

其中: ε 为黑度, ζ 为表面反射率, φ 为角系数。

将钢坯的加热过程简化为一维非稳态导热问题, 即

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y} \right). \quad (20)$$

其中: ρ 为密度, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为比热容, 单位为 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$; λ 为导热系数, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 是温度的函数, 在具体计算中采取变物性处理。

对钢坯表面热流密度的计算采用总括热吸收率法^[2,9], 表达式为

$$q_u = \sigma \phi_{CF} (T_{f,u}^4 - T^4)|_{y=d}, \quad (21)$$

$$q_b = \sigma \phi_{CF} (T_{f,b}^4 - T^4)|_{y=0}. \quad (22)$$

其中: ϕ_{CF} 为模型段的总括热吸收率; T 为模型段内的物料温度, 单位为 K ; T_f 为模型段的炉温, 单位为 K ; 下标 u, b 分别表示上、下炉膛。

以钢坯能量平衡为基础, 内部节点采用中心差分, 边界节点 l 和 N 处分别采用向前差分和向后差分。差分格式采取显格式差分, 可得如下差分方程:

$$\begin{cases} T_1^{k+1} = T_1^k + 2Fo_{1,2} \left(T_2^k - T_1^k + q_b \frac{\Delta y}{\lambda_{1,2}} \right), \\ T_i^{k+1} = T_i^k + Fo_{i,i+1} (T_{i+1}^k - T_i^k) - Fo_{i,i-1} (T_i^k - T_{i-1}^k), \\ T_N^{k+1} = T_N^k + 2Fo_{N,N-1} \left(T_{N-1}^k - T_N^k + q_u \frac{\Delta y}{\lambda_{N,N-1}} \right). \end{cases} \quad (23)$$

其中: Fo 为傅立叶数, 即

$$Fo_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j}}{\rho c_{i,j}} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta y^2}. \quad (24)$$

关键参数 ϕ_{CF} 的求解方程如下:

$$\phi_{CF} = \varepsilon_{gws} \frac{T_g^4 - T_s^4}{T_f^4 - T_s^4}. \quad (25)$$

其中: ε_{gws} 为系统黑度, 取 $0.75 \sim 0.98$ 。

根据图4可分析炉内钢坯的质量。根据当前炉温和产量情况, 计算加热炉的能力是多少, 是否存在过

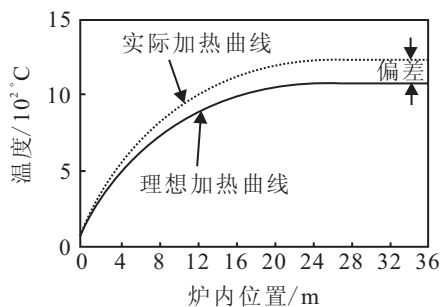


图4 加热炉作业控制现状

剩能力, 确定加热炉是否赶产。由于本模型涉及的模型多, 限于篇幅, 其他定量内容请参看作者相关文章。

3.5 辅助模型

生产计划的功能是接受上一级系统下达给加热炉的生产计划, 并将计划内容送达数据预处理模型处理。参数与处理模型主要是对参数进行预测、下正误检验、下替代值更换和替代值更新, 使控制系统具有良好的稳定性, 并提高系统控制精度。工况确认的功能主要是分析加热炉生产过程中各种数据, 根据专家经验区, 依据产生式规则, 分正常工况、下赶产工况, 以及产能过大过小工况; 对异常工况进行分类、归并和存储, 并按照分类情况将相关信息下达到相关模块进行处理。作业计划模型对3类不同工况产生排产内容进行检查、下存储, 并根据加热炉能力情况, 对计划进行校验修正, 给出加热策略号与产量, 通过过程控制系统, 实现作业计划的实时优化控制。

4 工业应用

4.1 系统建立

研究实体是某钢铁公司中板厂的两座常规3段推钢式连续加热炉, 以及由于后来轧线产能扩大, 又增加的一座具有同样能力的蓄热3段推钢式连续加热炉。系统硬件组态情况是, 计算机系统的操作站都采用HP微型计算机, 系统是IBM至强2.1, 交换机都为思科29系列产品, 现场控制计算机采用MOX65系列产品。系统实时数据库是info puls。关系型数据库都采用了Oracle 10i。加热炉作业计划系统在2009年3季度安装、调试后进行了功能与性能测试。

4.2 应用结果与分析

按照原来手工编制模式, 正常情况下的排产达不到最优, 在异常工况下不能及时处理, 从而影响生产效率, 机械损耗严重, 能源浪费很大。另外, 加热炉温度的稳定与作业计划及其执行情况有密切关系, 计划的编制影响到加热炉温度的均匀性和稳定性, 最终影响到钢坯的加热质量。优化的作业计划同样能提高钢坯的加热质量。表1为季度综合指标对比, 第1个季度运行的是1#和2#炉, 第4个季度运行的是1#和3#炉。从季度综合指标可以看出, 优化后的结果比较明显, 产量提高, 损失时间减少, 能耗下降, 氧化烧损降低。

对比加热炉作业计划系统应用前后, 从年度综合情况看, 设备利用率达到了100%, 原设计生产能力为

表1 指标对比

时间/h	小时单产/t	季度总产/ 10^4 t	时间损失/h	煤气单耗/GJ	氧化烧损/%
1-3	86	35.5	29	1.56	1.10
10-12	110	42.6	8	1.25	0.90

90 t/h, 现在可达到 110 t/h. 其他指标分别为: 单位能耗小于 1.25 GJ/t, 氧化烧损小于 0.9%, 季度总产达到 42.6×10^4 t, 时间损失小于 8 h, 出钢温度与目标温度偏差在 $[-10, +10]$ °C, 板坯“黑印”和非“黑印”处心表温差小于 30 °C, 板坯长度方向“黑印”与非“黑印”处温差小于 30 °C, 额定产量下标准坯的出炉钢温达到 1250 °C, 电气设备投运率和功能投运度为 100%. 这些指标都是该工序生产作业的历史最好水平.

本系统在投入应用后, 由于计划的编排充分地考虑了加热炉的各种工况, 尤其是将各种异常的情况都归结于异常排序或产能异常来处理, 通过相关模型的求解及时处理异常工况, 尽快恢复到正常的排序作业中, 保证了钢坯足够的加热或均热时间, 以及设备合理的检修时间, 从而减少了机械设备故障, 降低了能耗, 使生产在有条不紊的秩序下运行. 因此, 取得良好的经济技术指标是必然结果.

5 结 论

针对加热炉板坯生产作业计划中存在的排序问题, 采用 SPD 和 EDD 方法进行钢坯加热正常作业排序; 然后采用 ACT 求解 TSP 的方法搜索异常情况期间的最优解, 并通过跟踪实现计划闭环实时控制, 产能模型产生加热炉当前能力余量; 最后, 通过作业计划模型实现加热炉优化作业计划的实时编制与调度.

实际应用表明, 针对加热炉作业计划与调度的自动优化编制提出的解决措施合理, 结构得当, 采用的算法正确, 达到了预期目的, 为实现加热炉综合自动化提供了有力支持.

参考文献(References)

- [1] 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 641-649.
(Chai T Y. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 641-649.)
- [2] 张家驹. 我国钢铁工业现状及远景[J]. 钢铁, 1998, 33(1): 69-71.
(Zhang J J. Present state and prospects of iron&steel industry in china [J]. Iron and Steel, 1998, 33(1): 69-71.)
- [3] Wang Z J, Wu Q D, Chai T Y. Optimal-setting control for complicated industrial processes and its application study[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(1): 65-74.
- [4] Ditzhuijzen V, Slaalman G, Koorn D. Identification and model predictive control of a slab reheating furnace [C]. Proc of the 2002 IEEE Int on Conf on Control Applications. Glasgow: IEEE Press, 2002: 361-366.
- [5] Wick H J. Estimation of ingot Temperatures in a soaking pit using an extended kalman filter[C]. IAFC 8th Triennial World Congress. Kyoto: IAFC Press, 1981: 94-99.
- [6] Chen H G, Wang Z W, Wu B. Simulation of online control system for reheating furnace[J]. Iron and Steel, 2006, 41(12): 75-78.
- [7] 吕志民, 张武军, 徐金梧. 专用炉混装模式下作业计划优化方法[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(7): 929-933.
(Lv Z M, Zhang W J, Xu J W. Optimization method for operation planning of special furnace hot charge mode[J]. J of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(7): 929-933.)
- [8] 梁合兰, 李苏剑, 邓又好. 两阶段法求解混装模式下的加热炉调度[J]. 中国管理信息化, 2009, 31(5): 42-44.
(Liang H L, Li S J, Deng Y H. A two stage method for optimal scheduling problem of reheating furnace in hybrid charge mode production[J]. China Management Informationization, 2009, 31(5): 42-44.)
- [9] Valiev R, Murashkin M Y, Straumal B B. Enhanced ductility in ultrafine-grained Al alloys produced by SPD techniques[J]. Materials Science Forum, 2010, 633(3): 321-332.
- [10] Kong P Y, Teh K H. Performance of proactive earliest due date packet scheduling in wireless networks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2004, 53(4): 1224-1234.
- [11] Dorigo M, Maniezzao V, Colorni A. The ant system optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.