

先进的中板加热炉数学模型控制系统

刘日新

(北京赛维美高科技有限公司 北京 100073)

摘要 本文介绍了中板加热炉先进的数学模型控制系统，提出了对加热炉进行蓄热燃烧改造时控制系统需要进行改进的一些问题。

关键词 加热炉 数学模型 优化控制

Advanced Mathematical Model Control System for Slab Re-heating Furnaces

Liu Rixin

Beijing Savemation Technology Co. Ltd., Beijing, 100073

<http://cnmeter.com> [Email:rixin@163bj.com](mailto:rixin@163bj.com)

Abstract The advanced mathematical model control system for slab reheating furnace is introduced. The control system should be improved when the furnace uses regenerative combustion technology.

Keywords: Re-heating furnace, Mathematical Model, Optimum control.

1 控制系统总体结构

酒钢中板加热炉为双排料推钢连续加热炉，产量为 90t/h，燃混合煤气，热值为 7535kJ/m³，上下各分三段控制。炉长 31050mm。坯料尺寸为 220×1350×2800mm。由 ABB 开发的 AF200FICS 和 AF200FOCS 对所有种类加热炉的控制和优化都实用，系统由模块化程序通过内部或外部通讯建立起来。系统优化了钢坯的加热质量。加热节奏可以和轧制节奏相匹配。这个系统为温度控制计算出优化设定值并优化燃料消耗，取得节能的效果。

AF200FICS 用于加热炉的燃烧控制和物料运动控制，包括最优燃烧控制、空燃比控制、加热炉起/停控制，物料跟踪、炉压控制、换热器保护、冷却系统控制、推钢动作控制、进/出料、称重等。FOCS 包括了计算和监控每一块钢坯温度的数学模型。钢坯的温度利用钢坯尺寸、位置、在炉时间、物性和炉温进行连续计算。计算得出的钢坯加热曲线与每一个加热策略确定的理想加热曲线相比较，其偏差通过各段炉温控制的设定值来调整。

2 加热炉仪表和控制系统 (FICS)

AF200FICS 包括下列功能：

- I 仪表控制 (Instrumentation)
- I 各段炉温控制 (Zone control)
- I 开炉控制 (Furnace start-up)

- l 升温/降温控制 (Turn up/down tables)
- l 趋势图显示 (Trend displays)

2.1 仪表控制 (Instrumentation)

仪表控制包括各段炉温控制、炉压控制、助燃空气压力控制、换热器保护等。

助燃空气控制: 通过调节助燃空气风机或蝶阀对助燃空气压力进行测量和控制。

炉压控制: 系统通过自调整回路对炉门打开等因素引起的炉压降进行自动补偿。

换热器保护: 通过测量助燃空气和废气的温度,相应地调整稀释风机和放散阀以保护换热器。

冷却系统控制: 冷却控制回路由水位控制、水流量控制和水温控制组成。系统通过水流量和水温监控故障,当报警出现时,煤气供应量将减少到非正常工况。

物料运动控制: 物料运动包括装料、推钢、出钢。装料序列包括装料的位置和是否装入炉内,通过高分辨率的脉冲传感器来控制或监视推钢机的动。ABB 可以准确的确定钢坯在炉内的位置并在出炉时通知轧机控制系统。

称重: 在入炉前对钢坯进行称重,钢坯的重量储存在报表生成模块中,同时在物料加热计算中使用。

2.2 各段炉温控制 (Zone control)

炉温控制器控制各段炉内温度,给定空气、煤气一个适当的流量设定值。温度控制器有四种操作模式:

- l **MAN** 由操作员直接给定温度控制器的输出
- l **AUTO** 温度设定值可以从键盘修改,当 AF200FOCS 停止运行时,所有的温度控制器处于这种模式,其设定值可以手动修改,为定温度控制。
- l **E1** 温度设定值由 AF200FOCS 给出
- l **E2** 升温/降温程序正在运行,设定值由特定的升温/降温数值表给出。

燃料控制为双交叉限幅,这将保证在动态条件下的最佳空燃比。流量控制器有三种模式:

- l **B** 由于某种错误,程序互锁
- l **M** 在开炉过程中,维持一个稳定的流量
- l **E1** 设定值由温度控制器给出。

在正常条件下空燃比自动控制达到最优燃烧,空燃比的手动调整也是需要的。空燃比的调整范围为 0.5~1.5, 正常为 1.0

2.3 开炉控制 (Furnace start-up)

开炉按程序进行。

2.4 升温/降温数据表 (Turn up/down tables)

根据预定的曲线,每一段都可以升温或降温,此时,温度控制器设定在 E2 模式,其温度曲线由多段折线图给出。

3 加热炉优化控制系统 (FOCS)

FOCS 包括了计算和监控每一块钢坯温度的数学模型。钢坯的温度利用钢坯尺寸、位置、在炉时间、物性和炉温进行连续计算。计算得出的钢坯加热曲线与每一个加热策略确定的理想加热曲线相比较，其偏差通过各段炉温控制来调整。FOCS 包括炉温控制 FTC(Furnace Temperature Control) 和物料温度控制 MTC(Material Temperature Control)。

AF200FOCS 包含下列功能：

- I FTC
- I 理想加热曲线
- I 物料温度计算
- I 物料温度反馈
- I 轧机自适应

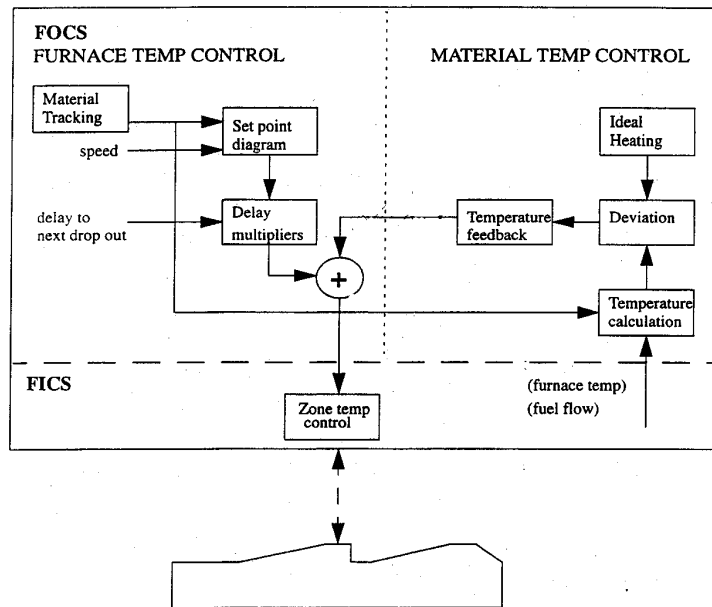


图 1 FOCS 功能模块

FTC 对装入炉内的钢种变化和发生计划性或非计划性待轧进行迅速前馈控制，系统利用对应各种物料的加热策略，得出用于最优炉温控制的炉温设定值。

基本的 FTC 包括下列功能：物料跟踪，炉温目标曲线，待轧策略，各种报表（钢坯报表、班报表、周报表），报警及事件记录。

3.1 加热策略

各段炉温设定值取决于钢坯种类、钢坯位置和炉子产量。每一块钢坯的优化炉温用一个目标表来描述，加热策略考虑钢坯的目标出炉温度、钢坯尺寸和钢种。按不同的产量间隔设定各段优化炉温设定值，这些炉温设定值从加热炉设计、数学模型计算结果以及实际操作经验得出。

系统根据物料表和物料跟踪系统中所示的策略号，选择正确的的目标表和策略表。定义了一系列的策略表，每一个表都包含单一的物料数据。策略表包含在不同产量条件下的加热策略，即不同

产量条件下的炉温设定值。加热策略表格共 100 种。第 101 种为空炉操作。产量间隔为：50，100，200，300，400。系统中包括一**优先钢坯** (*priority Stock Function*) 选项，某些钢坯比其他钢坯更优先，此时，要临界线往炉头移，使炉温设定更快地与要求优先的钢坯更匹配。

利用加热策略，在产量和待轧时间确定时对每一段设定值进行计算。根据每一段的设定值和加热炉产量，从加热策略图表上读得设定值。实际产量下的设定值可以用线性插值得到。

加热策略表中还包括了待轧表和对应产量下的理想加热曲线。一个待轧表可能对几种产量都适用。待轧表上表示了不同时间待轧后炉温的降低情况。待轧表内的值为待轧系数值(Delay multiplier) (以千分数表示)

SET POINT DIAGRAM

SPEED	50	100	200	300	400
Z1	1100	1130	1160	1170	1180
Z2	1160	1180	1200	1210	1220
Z3	1200	1210	1230	1240	1250
DELAY	1	1	2	2	2
IDEAL	1	2	2	3	3

图 2 设定点图表的数值

DELAY TIME

	1:00	2:00	4:00	8:00	15:00	8:00:00
Z1	992	977	962	947	932	
Z2	995	989	985	982	960	
Z3	999	990	985	980	970	

图 3 待轧表的系数值

例如：当第一段炉温为 1100℃时，待轧 4min 后待轧系数为 0.963，那么炉温设定值将将为 1100 × 0.963 = 1058.7℃。

3.2 待轧策略

轧钢生产中，由于各种原因(如检修、交接班、换辊、断辊和夹辊等各种事故)，加热炉待轧是不可避免的。待轧策略是指加热炉在待轧期间炉子热负荷随时间的调节规律： $Q=f(\tau)$ ，一般包括炉子的保温、降温和升温过程的控制。

正常生产时，炉子处于一种相对稳定态或动态平衡。待轧一旦发生，原有平衡不复存在，炉子产量突变为零。待轧时，钢坯在炉内不再运动，如果供热制度不做适当调整，钢坯温度将不断上升，这不仅导致燃料浪费，而且还导致更多的氧化、脱碳，严重地影响钢坯加热质量。

当待轧发生时炉温需要降低，即待轧策略。待轧分为：未知时长的短时间待轧、已知时长的短时间待轧、短时间计划性待轧、长时间待轧。

待轧策略就是当待轧发生时尽可能多地炉温，待轧结束时尽可能快地出加热好的钢坯。这意味着对未知时长的短时间待轧，均热段炉温稍微减低到维持钢坯温度。待轧后根据预定的曲线自动恢

复，而不需要操作员干预。

I 未知时长的短时间待轧

系统自动监测待轧，根据待轧策略表降低各段炉温。当过了预值时间（通常 15 分钟）以后，操作员立即输入一个估计的待轧时间。如果不输入，炉温将进一步降低。

I 已知时长的短期待轧

估计的待轧时间是由操作员输入。待轧时间一确定，加热炉就根据待轧策略表降低炉温。在待轧结束以前升高炉温，使待轧结束时钢坯加热到预定的温度。估计的待轧时间可以由操作员更改。

I 短时间计划性待轧

操作员事先知道计划性待轧。待轧何时发生，持续多长时间，由操作员输入到系统中，这样可以一段一段的降低炉温以节省能源提高加热质量。

I 长时间待轧

长时间待轧是预先计划好或直接开始，待轧时间通常是几个小时或几天。整个加热炉将降到很低的温度，此时不会产生氧化铁皮和脱碳。在重新生产之前炉子自动升温。

在 FTC 控制模型中，待轧按下列三种方式来处理：

I 自动待轧

当系统监测到自动待轧时，根据待轧表内前 15 个数据降低炉温。然后发出报警要求操作员输入一个手动待轧时间。如果没有输入的话，炉温保持在一个稳定的水平使均热段可以迅速地出钢。出钢后，炉温根据指数函数上升到炉温正常设定值。最大自动待轧的报警时间为 15min。

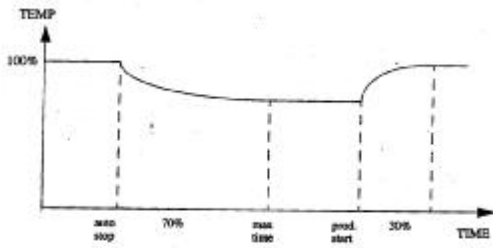


图 4 自动待轧炉温设定曲线

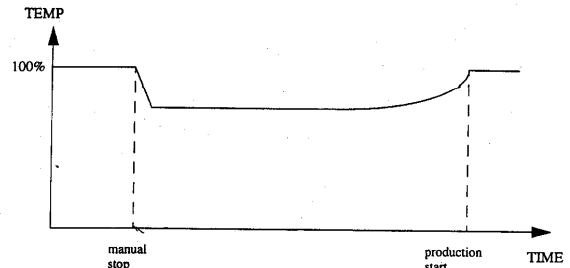


图 5 手动待轧炉温设定曲线

I 手动待轧

当一个手动待轧激活时，根据待轧表炉温直接下降和升温。当单轧时间结束后，炉温达到正常值。

I 计划性待轧

计划性待轧可以单独改变各段炉温设定值。当即将要待轧加热的钢坯达到第一段尾部时，该段炉温按待轧表炉温下降。当钢坯进入第二段尾部时，第二段炉温才下降。

升温于手动方式相同。待轧结束后，炉温升到正常值。待轧表为 20 组，21 为空炉，22 为手动待轧后的升温。待轧表内待轧时间间隔设置为：1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h。

3.3 理想加热曲线

理想加热曲线描述了钢坯通过加热炉的加热温度场，在物料温度控制模型 MTC 种应用。一系列加热曲线储存在策略表中。理想加热曲线被定义为加热炉内等距离位置上要求的钢坯温度的数值表格。理想加热曲线根据“端头供热”原则建立目标函数或根据能量平衡原理建立目标函数，考虑加

热炉的结构、加热钢种的要求、数学模型计算结果以及实际的操作经验而得出。并尽可能地降低钢坯的出炉断面温差和节省燃料。

根据理想加热曲线与钢坯种类和加热炉产量相匹配。表格中的数据为目标出炉温度的千分数。理想加热曲线共 40 条，对应炉内 20 点的位置如表。钢种为 100 种。

3.4 钢坯实际温度计算

对每一块钢坯温度采用二维数学模型连续计算。输入参数为：尺寸、物性、炉内位置、该位置上的停留时间、煤气流量、炉温、加热炉参数，可以得出每块钢坯的平均温度、表面温度、中心温度、上部和下部的温度梯度。图 8 中的 wall temperature 认为是炉温，在温度计算模型中作为输入参数进行计算。

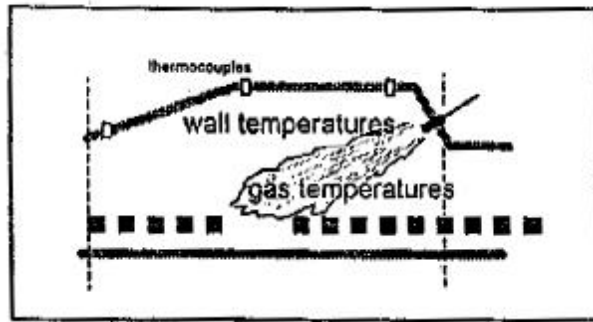


图 6 炉内传热

为简化炉内传热计算并最终提高在线控制模型的运算速度，将炉子沿长度方向分为若干计算区段，每个区段的炉温根据热电偶的采样值按线性插值来确定，忽略各区段间沿炉长方向的辐射传热，忽略钢坯长度方向(即炉宽方向)的导热。

连续加热炉的炉内换热以辐射为主，且与燃烧和气体流动相耦合，其工艺操作特点又属于典型的分布制度。描述物料加热的热传导方程并不复杂；但其边界条件却十分复杂，是由炉膛内燃烧、气体流动和热交换决定的，因此，加热炉控制模型是一个半经验模型，钢坯内的温度计算是机理模型，外部综合辐射换热是经验模型，模型系数 ϕC_g 需要用实验得出。

钢坯入炉，在炉内加热，直至出炉为止，沿厚度 y 方向的温度分布可用一个移动坐标的一维导热方程来描述。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho c} \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - v \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

边界条件：钢坯上表面热流为 $\sigma \phi_{cf, b} (T_{f, b}^4 - T_i^4)$

钢坯下表面热流为 $\sigma \phi_{cf, u} (T_{f, u}^4 - T_{ny}^4)$;

式中， θ 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t 为时间， s ； ρ 为密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； c 为比热容， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； λ 为导热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； v 为速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

而此方程的离散解，如果用矩阵形式表示即为：

$$\theta^{k+1}_j = A_j \theta_j + B_j u_j$$

$j=1\sim N_x$, N_x 为 x 方向的节点总数; $i=1\sim N_y$, N_y 为 y 方向的节点总数。其中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2\lambda_{1,2}}{r_1 c_1 \rho} & \frac{2\lambda_{1,2}}{r_1 c_1 \rho} & \dots & 0 \\ \frac{\lambda_{1,2}}{\rho_2 c_2 \rho} & 1 - \frac{\lambda_{1,2} + \lambda_{2,3}}{\rho_2 c_2 \rho} & \frac{\lambda_{2,3}}{\rho_2 c_2 \rho} & \dots \\ & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \frac{2\lambda_{n_y-1, n_y}}{\rho_{n_y} c_{n_y} \rho} & 1 - \frac{2\lambda_{n_y-1, n_y}}{\rho_{n_y} c_{n_y} \rho} & \dots \end{bmatrix} \quad B = \frac{2\Delta\theta}{\Delta y} \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho_1 c_1} & 0 \\ 0 & \vdots \\ \vdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{n_y} c_{n_y}} \end{bmatrix}$$

$$\rho = (\Delta y)^2 / \Delta t$$

$$u = \sigma \phi_{CF, b} (T_{f, b}^4 - T_1^4)$$

$$u = \sigma \phi_{CF, u} (T_{f, u}^4 - T_{ny}^4);$$

T 为绝对温度, K ; ϕ_{CF} 为总括热吸收率, 下标 f 、 u 、 b 分别代表炉子、上炉膛、下炉膛。

输入矩阵 u 的元素, 实质是加热钢坯的下表面和上表面热流密度, 即边界条件。为满足在线控制必须满足实时的要求, 在连续加热炉在线控制模型里, 热流计算已经简化, 仅仅是当地的炉温、钢坯表面温度和总括热吸收率 ϕ_{CF} 的函数。 ϕ_{CF} 一般用实验的方法求得, 在实际运行中需要通过实验进行调整。

物料温度控制 (MTC) 包括下列模块和操作表。在大于 10min 的手动待轧时, MTC 方式自动停止。理想加热曲线作为 MTC 的输入。

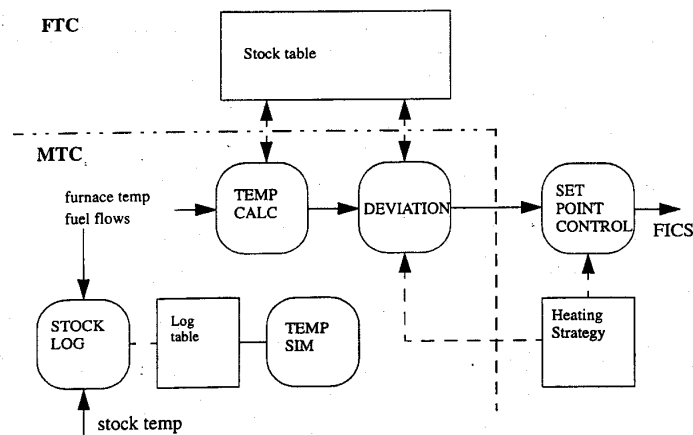


图 7 钢坯温度计算模型中的模块

每块钢坯温度计算的节点数为 25 点, 网格划分如图 8。钢坯温度采用有限差分法计算。温度计算的时间间隔 (time-out) 为 120s。

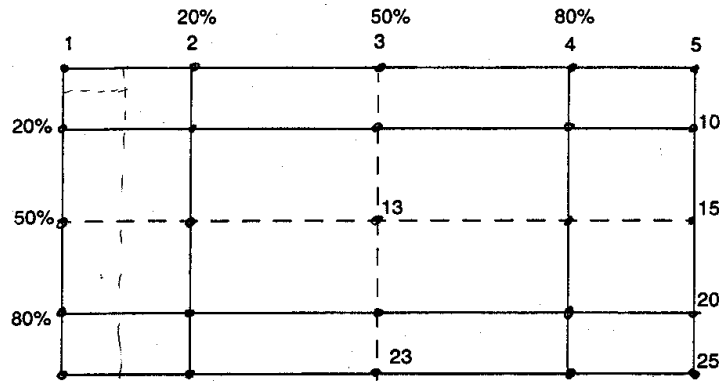
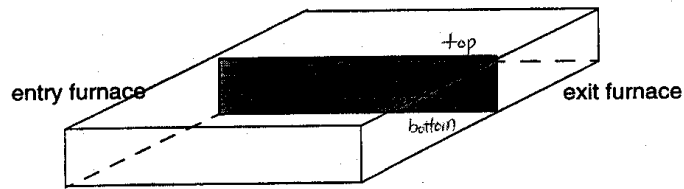


图 8 钢坯及表格的节点划分

计算出的钢坯平均温度与理想加热曲线相比较，结果表示成沿炉长方向的偏差曲线。分控制段计算出钢坯温度偏差的平均值。通常控制段内最后面的钢坯（要出控制段的钢坯）是最重要的，可以对钢温偏差进行加权计算。

IDEAL HEATING CURVE

P01	P02	P03	P20
50	100	150	1000

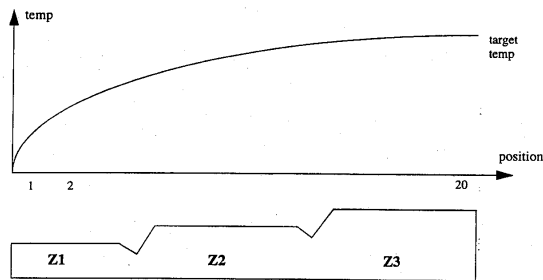


图 9 理想加热曲线

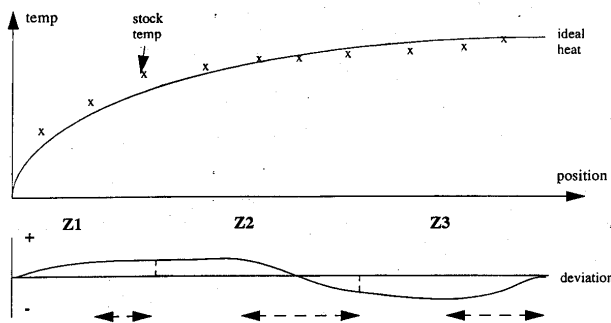


图 10 实际加热曲线与理想加热曲线的偏差

设定值的反馈控制

通过一个 PID 调节器把各段的加权钢温偏差（考虑钢种、加热优先级别、钢坯在炉内的位置）计算得出各段炉温补偿量。与 FTC 设定值相加，给定 FICS 系统进行各段炉温控制。

在 MTC 状态下，PID 调节器工作在 Auto 模式，如果调节器温度输出超过温度极限，调节器将被锁住。在下列情况下，反馈控制器处于手动状态。

- l 选择 FTC 模式
- l FOCS 没有选择
- l 手动待轧

钢坯入炉温度：如果是热装，用红外测温仪测得入炉温度作为温度计算模型的输入值。

模型校核：为了确定理论参数总括热吸收率 F_{cg} ，模型需要校核。这个参数用其他方法很难确定。

利用“黑匣子”高温温度记录器实测和记录钢坯在加热炉内的加热过程的钢坯和炉气温度分布，通过对实验结果的计算分析得出钢坯加热总括热吸收系数 ϕ_{CF} ，并对数学模型进行验证，以得出和调整控制模型中的总括热吸收系数。“黑匣子”高温温度记录器由高温温度记录仪和保温箱组成。在入炉前通过计算机编程设定测量值步长时间、触发时间和在炉时间等参数，然后将高温温度记录仪装入有耐火纤维隔热的保温箱中，连接热电偶并随钢坯进入炉内。随钢坯运动从炉子进口移动到炉子的出口，出炉后，由计算机调出记录数据。

4 加热炉进行蓄热燃烧改造控制系统需要解决的问题

- l 由于蓄热燃烧是交替燃烧方式，在换向过程中煤气流量是波动的，在换向过程中和换向后动态过程中的煤气、空气调节阀的位置保持。
- l 最优燃烧控制的双交叉限幅是否必要，是否可靠。
- l 炉温是波动的，炉温热电偶的波动远大于 10°C 。
- l 开炉程序需要修改。
- l 由于燃烧方式的改变，炉内的炉温曲线发生了变化，钢坯加热模型系数需要重新设定，煤气流量需要加入控制模型中。
- l 最佳加热曲线表需要重新调整。
- l 加热炉供热点变化，炉温补偿算法需要重新调整。
- l 待轧策略中需要改为煤气流量控制方式，确保加热炉安全操作。
- l 硬件部分可能要增加一些开关量的输入模块。