



加热炉的炉温优化设定模型¹⁾

柴天佑 王中杰 张 莉

(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

摘 要 针对冶金工业的步进式加热炉炉温设定中存在的问题,以面向生产目标的集成控制技术为基础,建立了加热炉的炉温控制回路的优化设定模型,解决了炉温控制回路的优化设定问题,从而节省了吨钢的耗油量,提高了产品质量。

关键词 优化设定,加热炉。

OPTIMAL SETTING MODEL OF REHEAT FURNACE TEMPERATURE

CHAI Tianyou WANG Zhongjie ZHANG Li

(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract Aiming at the problems in temperature setting for metallurgical walking beam reheat furnace, this paper presents an optimal setting model for the furnace temperature control loops, which solves the problem of optimal setting for temperature control loops. As a result, the fuel consumption is reduced and the product quality is increased.

Key words Optimal setting, reheat furnace.

1 引言

现代工业生产过程控制系统将生产过程分解成多个单输入单输出回路,采用 DCS 来实现自动控制,如何解决各回路的设定值,从而提高产品质量,降低生产成本已成为工业自动化领域具有挑战性的重要课题。

步进式加热炉是轧钢工业的主要生产设备之一。加热炉控制的功能是根据钢坯的入炉参数、生产工况和工艺指标,通过控制炉温,空气燃料流量及空燃比,空气燃料压力,烟气残氧浓度以及炉膛压力,尽可能地降低能耗,减少氧化烧损,使钢坯在炉中均匀受热,出

1) 国家 863 关键技术攻关(863-511-9700-013)和国家自然科学基金资助项目(69674018)。

炉时达到工艺要求的轧制温度. 在上述控制回路的设定中, 炉温与燃料流量及空气流量构成串级控制, 因此流量控制回路的设定值由炉温调节器的输出给定; 而燃料、空气压力控制回路, 残氧浓度控制回路以及炉膛压力控制回路可进行定值控制, 所以炉温的优化设定问题是非常重要的. 由于钢坯的加热过程复杂^[1,2], 影响炉温的因素众多, 且工况复杂多变, 炉温的优化设定问题一直没有得到很好解决. 本文在文[3]的基础上, 建立了炉温优化设定模型, 从而提高了产品质量, 节约了能源.

2 炉温优化设定模型

加热炉的炉温优化设定模型结构如图 1 所示.

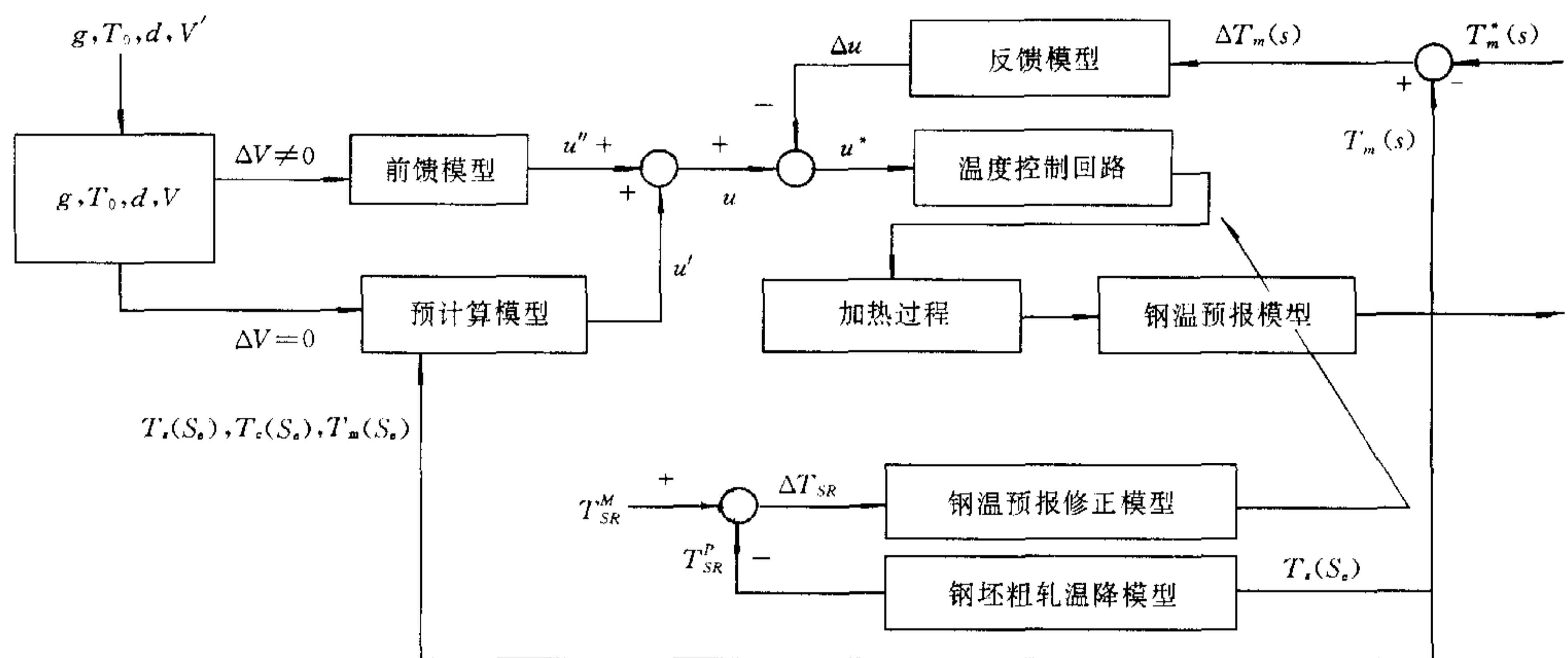


图 1 加热炉的炉温优化设定模型结构

g ——钢种; T_0 ——钢坯装炉温度; d ——钢坯厚度; v ——典型轧制节奏; v' ——实际轧制节奏; Δv ——实际轧制节奏与典型轧制节奏偏差; u' ——预计算模型输出的炉温设定值; u'' ——前馈模型输出的炉温设定值; Δu ——反馈模型输出的炉温设定值; $T_m^*(s)$ ——钢坯在加热过程中的期望平均温度, $s \in [0, s_e]$ 为钢坯在炉内的位移; $\Delta T_m(s)$ ——钢坯在加热过程中的平均温度偏差; $T_m(s)$, $T_s(s)$, $T_c(s)$ ——钢坯在加热过程中的平均预报温度、表面预报温度和中心预报温度; $T_s(s_e)$ ——钢坯在出炉位置的表面预报温度; T_{sr}^p , T_{sr}^M ——钢坯在粗轧机组末端的表面温度预报值和测量值; ΔT_{sr} ——钢坯在粗轧机组末端的表面温度预报值和测量值的偏差

钢坯的种类、规格、入炉温度和轧制节奏的所有组合组成了加热炉的全部工况空间. 对于特定的加热炉来说, 钢坯的入炉温度是已知且固定的, 因此工作点上的参数仅为钢坯的种类、规格和轧制节奏. 首先按照这三个输入参数确定若干个准稳态工作点, 由预计算模型完成初始炉温设定, 并将结果作用于加热过程, 使过程处于准工作状态下. 当过程的预想输入参数和实际输入参数之间有偏差时, 启用前馈模型对此偏差进行补偿. 当前馈模型不准确或系统存在其它不可测干扰时, 对于一次加热过程会带来较大的误差, 则用反馈模型对此偏差进行修正, 实现一次加热过程的闭环控制. 每次钢坯粗轧完成后, 钢温预报修正模型完成对钢温预报模型的修正, 以实现整个加热过程的闭环控制.

2.1 预计算模型

预计算模型是静态模型, 用于计算稳态时的优化炉温设定值. 对于给定的钢坯来说, 入炉参数仅为轧制节奏, 而轧制节奏是与钢坯在炉内的位移速度相对应的. 根据工艺分

析,炉温被描述为沿炉长分布的二次函数^[4]

$$u(s) = d + es + fs^2, \quad (1)$$

满足约束条件

$$(a) s = s_i \text{ 时, } u_{1i} \leq d + es_i + fs_i^2 \leq u_{2i};$$

$$(b) \min J = \min \left\{ \frac{1}{2} P [T_m(s_e) - T_m^*(s_e)]^2 + \frac{1}{2} Q [T_s(s_e) - T_c(s_e)]^2 + \frac{1}{2} R \int_0^{t_e} u(t)^2 \right\}.$$

这里 $T_m(s_e)$, $T_s(s_e)$, $T_c(s_e)$, $T_m^*(s_e)$ 分别为出炉时刻钢坯平均预报温度、表面预报温度、中心预报温度^[5]和平均期望温度; $u(s)$ 为炉温; s 为钢坯在炉内的位移; t_e 为钢坯的加热时间; P, Q, R 为加权系数, 且 $P, Q \gg R$. 第一个约束条件表示炉温在炉内某关键点 s_i 处理想分布范围, 第二个约束条件考虑到生产工艺对钢坯加热质量的要求并使能耗最小. 采用全局寻优法求解函数(1)中的最优参数, 则稳态最优炉温分布为

$$u(s) = d^* + e^* s + f^* s^2, \quad (2)$$

则各段炉温的设定值为

$$u(s_i) = d^* + e^* s_i + f^* s_i^2, \quad (3)$$

其中 s_i 为各段的关键点.

2.2 前馈模型

如前所述, 预计算模型实际上是根据钢坯入炉参数的不同组合划分为不同的工作点. 实际上不可能、也不必要对每一档轧制节奏都确定其最优炉温分布, 因为这样不仅占用大量的内存空间, 而且也不利于实时控制. 因此, 预设定模型通常是根据典型的轧制节奏形成的稳态最优炉温设定值表. 如当前的轧制节奏不属于典型轧制节奏之列, 则视为工作点的漂移, 而对于轧制节奏所引起的炉温设定值变化, 可采用插值法求解. 如果当前的轧制节奏位于该设定值表中, 则相应的各段炉温设定值直接由该表读出, 否则通过线性插值来获得所对应的各段最优炉温设定值, 从而使炉温设定适应轧制节奏变化这一实际生产工况.

2.3 反馈模型

在钢坯的实际加热过程中, 除了钢坯的种类、规格及轧制节奏这些因素影响炉温设定值之外, 其他扰动如炉压、炉体绝缘条件及炉膛气氛的变化等最终都会造成钢坯的温度分布偏离理想加热曲线, 因此必须对这些干扰加以补偿. 本文采用基于钢坯温度偏差分布的 PID 方法补偿该偏差. 如图 2 所示, 钢坯温度偏差通过变换转化为炉温偏差, 通过 PID 调节器和初始炉温设定值相加, 作为新的炉温设定值.

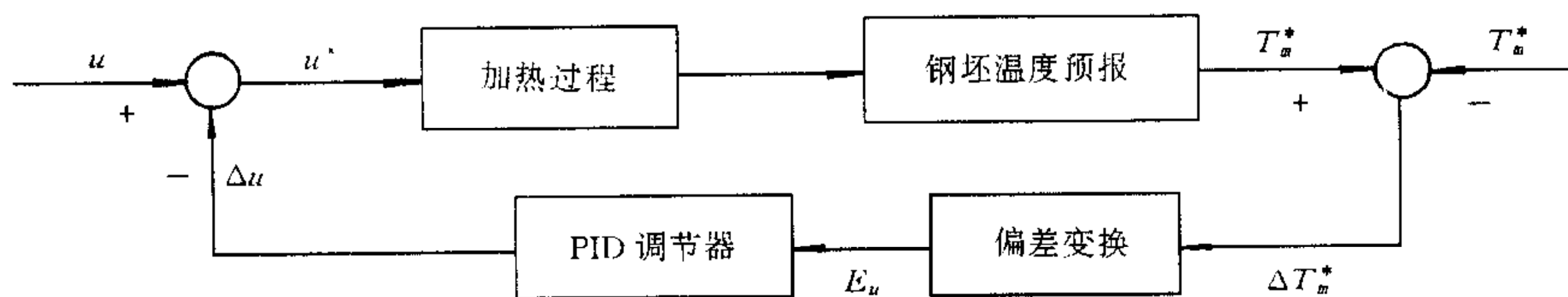


图 2 炉温设定的反馈补偿结构

u ——稳态炉温设定值; Δu ——反馈输出的炉温调节量; u^* ——最优炉温设定值; E_u ——炉温偏差;
 ΔT_m^* ——钢坯平均温度偏差; T_m^* ——钢坯平均预报温度; T_m^{**} ——钢坯平均期望温度

2.4 钢温预报修正模型

当现场的检测仪器工作失常的时候,对于钢坯温度会出现预报误差.因此,从系统的整体控制角度出发,有必要修正由此而引起的钢温预报偏差.根据钢坯的出炉温度和粗轧过程特征,预报出钢坯在粗轧机末端的温度,并和该点的钢坯温度检测值比较,其偏差用以调节后续钢坯的温度预报值.

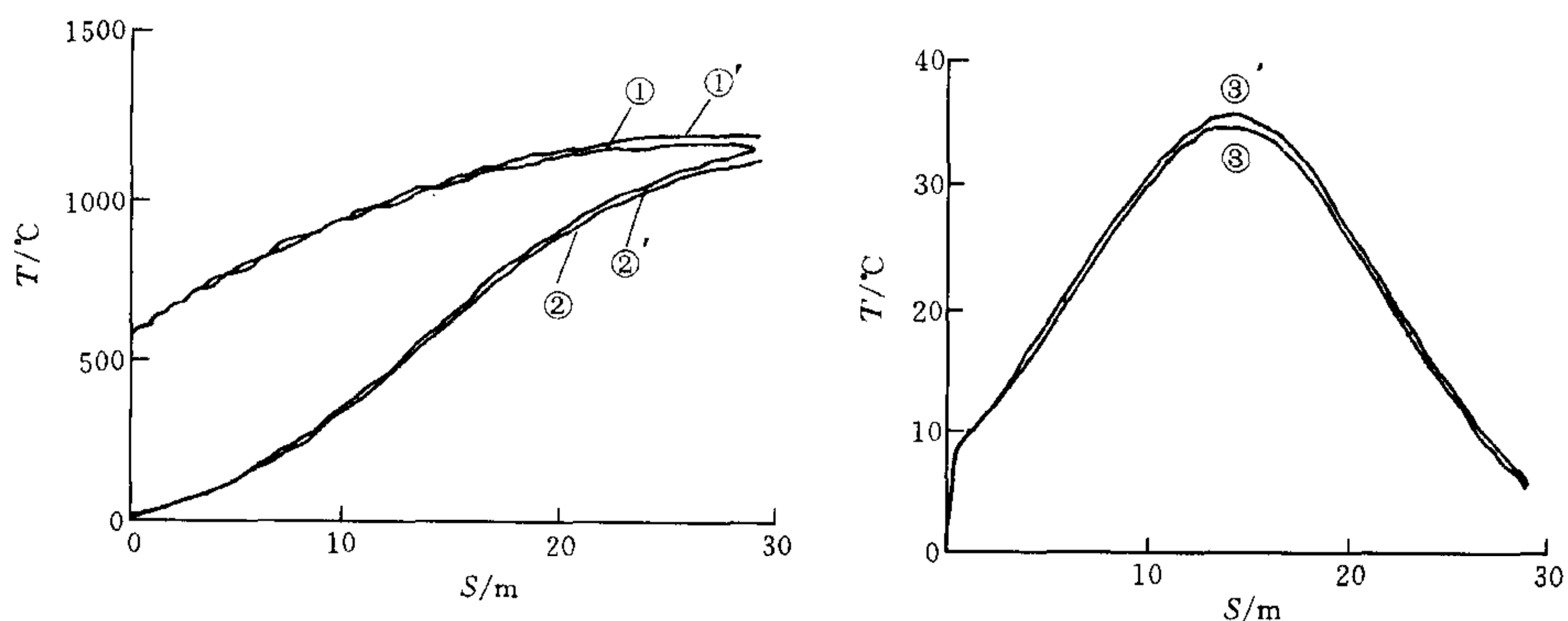
2.5 待轧时的炉温优化设定模型

当轧机出现计划待轧或非计划待轧时,钢坯就会出现“趴炉”现象.此时,为了避免钢坯过烧,必须适当降低炉温.我们不必区分待轧的原因如何,只是按待轧时间的长短设定炉温.本文采用“斜坡函数”法.即待轧开始时,炉温以最大速率降至某一最低值;待轧结束时,炉温沿某一斜率上升到正常生产时的设定温度值.炉温最低值由斜坡函数和选择的待轧时间决定,斜坡函数的斜率值取决于恢复生产时钢坯和耐火材料所能承受的最大升温梯度.这种待轧策略能保证待轧结束后充分恢复生产率.

3 仿真及工程实验研究

本文以某六段步进式加热炉为对象,进行了仿真研究.加热钢种包括轴承钢、不锈钢、碳工钢和弹簧钢等,钢坯装炉温度为 20°C ,出炉温度为 $1030^{\circ}\text{C}\sim 1250^{\circ}\text{C}$.加热炉的装料方式为端进侧出,有效炉长为 29348mm ,炉宽为 5800mm ,有效炉底面积为 161.5m^2 ,最大产量为 70t/h .全炉分为预热段、加热 I 段、加热 II 段和均热段,燃料为煤气.步进梁的步进周期调整为 34s .工艺要求钢坯出炉温差和断面温差均小于 30°C .

本文采用 Matlab 语言编写了炉温优化设定模型,根据变化的工况,定时地设定各段炉温,以保证钢坯加热质量.图 3 示出了优化前和优化后的炉温和钢坯温度比较.优化前的钢坯出炉温度和断面温差分别为 19.64°C 和 6.33°C ,优化后的钢坯出炉温度和断面温差分别为 6.69°C 和 5.88°C .按照节 2 定义的性能指标,优化前和优化后的性能指标分别为 4046 和 3973.仿真结果表明,和优化前相比,优化后的钢坯出炉温差及断面温差均有所减小.而且工程实验也表明,使用该优化设定方法每吨钢能节油 5kg .



(a) 炉温及钢坯平均温度分布比较

(b) 钢坯断面温差分布比较

图 3 优化前与优化后的炉温分布和钢坯温度分布比较

①,②,③——优化后的炉温分布、钢坯的平均温度分布及钢坯的断面温差分布;

①',②',③'——优化前的炉温分布、钢坯的平均温度分布及钢坯的断面温差分布

结论:本文从生产过程的特点及过程控制的特殊要求出发,强调系统模型与实际系统之间存在着不可避免的差异,从实际系统引入反馈,同时考虑到系统模型多数是非线性的,而且具有等式与(或)不等式约束以及非平稳干扰的情况等等,在文[1]的基础上,建立了炉温优化设定模型,实现了建模和控制相结合,闭环控制,滚动优化,从而解决了炉温的优化设定问题,提高了钢坯的加热质量,且节能效果显著.

参 考 文 献

- 1 Leden B. A control system for fuel optimization of reheating furnaces. *Scan. J. Metallurgy*, 1986(15):16~24
- 2 蔡乔方. 加热炉. 北京:冶金工业出版社, 1987. 81~153
- 3 Chai T Y. Object-oriented integrated control technology of complex industrial process (plenary paper). IFAC 5th Symposium on Low Cost Automation, 1998
- 4 张冬花. 一个分布参数系统的最优边界控制问题的矩量方法——连续加热炉最优炉温分布的设计. 见:辽宁省首届青年学术年会论文集, 1992, 317~322
- 5 王中杰, 柴天佑, 邵诚. 基于 RBF 神经网络的钢温预报模型. 系统仿真学报, 1999, 11(2):181~184

柴天佑 男, 1947 年生, 教授、博士生导师, 东北大学自动化研究中心主任. 主要研究方向为: 智能控制、自适应控制、复杂工业过程的建模、控制与优化等.

王中杰 女, 1971 年生, 东北大学自动化研究中心博士研究生, 1994 年毕业于吉林工业大学. 感兴趣的研究方向为: 复杂工业过程的建模与控制、智能控制、图像处理等.

张 莉 女, 1957 年生, 东北大学自动化研究中心高级工程师, 1982 年毕业于东北大学. 主要从事 DCS 在复杂生产过程中的应用技术等研究工作.

(上接第 514 页)

5. 参考文献按文中出现的先后次序排列, 文献如为期刊时, 按编号, 作者(姓在前如 Wiener L N, Kalman R E, Wang H.). 文章题目, 期刊名(外文可根据国际惯例使用缩写词), 年份, 卷号(期号): 页码顺序编排. 文献如为图书时, 则按编号, 作者(姓在前). 书名, 版次(初版不写), 出版地点: 出版者, 年份, 页码顺序排列. 文中未引用的文献不得列入参考文献栏目.

6. 来稿请用 A4 纸 1.5 倍行距打印.

七、作者必须对稿件内容的真实性和可靠性负责.

八、本编辑部在收稿后一周内通知作者, 并在稿件修订过程中与作者保持联系. 如果作者在来稿中不作特殊说明, 编辑部将只与第一作者联系.

九、已被本刊接受发表的稿件, 按审查意见和“作者加工稿件须知”修改后一式两份同软盘一起寄编辑部. 并需附所有作者的简介.

十、来稿刊登与否由编委会最后审定. 编委会有权对来稿作适当文字删改或退请作者修改. 来稿一经发表, 按篇酌付稿费, 并赠送当期杂志 1 本及 30 份抽印本. 经审查后不拟刊登的文稿, 一般在半年内退还.

十一、来稿(一式叁份)请寄北京市中关村中国科学院自动化研究所转《自动化学报》编辑部, 邮政编码 100080. E-mail: aas@ sunserver. La. ac. cn