

钢坯加热炉计算机控制动态数学模型的开发

杨永耀 吕勇哉
(浙江大学)

摘 要

本文论述了一个应用于加热炉计算机控制和优化操作的离散状态空间模型的开发。模型基于描述钢坯不稳定导热的两维偏微分方程和相应的边界条件,应用系统分解和离散化方法,最终转化为由一系列相互关联的子系统组成的大规模离散状态方程。根据加热炉的可测炉段温度和钢坯的几何尺寸、钢种、移动速度等有关操作条件,模型实时地给出钢坯在炉内任意位置温度分布的动态响应。

由大型加热炉工业试验数据表明,模型的精度能满足工程应用的要求。
本文还提出了应用数学模型实现加热炉递阶计算机控制的策略。

一、引 言

加热炉是钢厂热轧生产过程的关键设备之一。钢坯入炉后,以一定的速度移动,并由炉墙辐射和炉气辐射及对流实现对钢坯的加热。工艺上要求钢坯到达炉出口时,其内部的温度分布满足轧制的要求。由此可见,钢坯在炉内的温度分布的实时信息,对于实现加热炉的最佳操作具有重要的意义。但是,至今在实际生产过程中,人们还无法直接测量钢坯在炉内的温度分布,以致加热炉的操作与控制只能依赖于可测炉温的信息,其控制策略仍停留在各段炉温交叉限幅燃烧控制的水平。

近十多年来,加热炉数学模型及相应控制策略的研究日益受到人们的重视。如Pike^[1]应用分布参数理论建立数学模型,并通过近似集中参数模型研究加热炉静态、动态最优化。文献[2—6]也相继发表了关于加热炉模型化和控制的研究成果。但是,有关数学模型在工业上的实时应用和大型工业试验验证的报道至今为数不多。

本文以加热炉实时计算机控制为目的,以作者^[12]所开发钢锭轧前过程单一数学模型的方法为基础,从描述钢坯内部不稳定导热的二维偏微分方程及相应的边界条件出发,把炉内的钢坯考虑为一股被加热的物料流,并按几何位置分解为一系列相互关联的子系统,从而研究开发了描述钢坯热状态的大规模离散状态空间模型,为实时计算机控制奠定了基础。该数学模型的输入-输出关系如图1所示,模型描述了炉段温度分布 T_i^a, T_i^b , 钢坯

厚度分布 $d(y)$, 推钢周期 TT 及钢种等操作参数与炉内钢坯温度分布的动态关系。

本文将介绍模型开发、工业试验结果、计算机仿真和计算机递阶控制策略等。

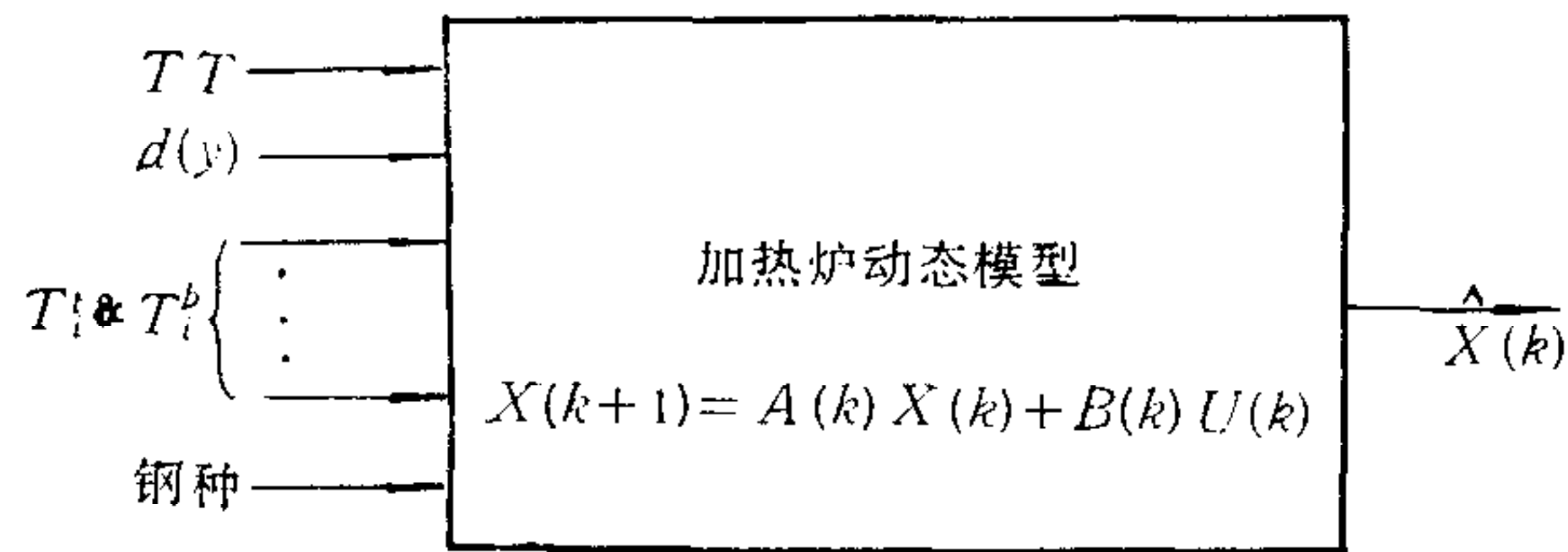


图 1 模型的输入-输出关系

二、模型的开发

加热炉是一个极其复杂的工业对象,为了简化所建立的机理模型,对过程作如下假设^[2,5]:

1) 炉温为沿炉长 y 方向的一维分段线性分布,钢坯温度假设为沿长度 y 和厚度 x 的两维分布; 2) 钢坯传热的端部效应忽略不计,双排料加热时,位于同一 y 位置的两块钢坯热状态视作相同; 3) 辐射角系数、黑度系数、对流传热系数等,在同一炉段假设为常数。

1. 全系统模型的开发

全系统模型是描述炉内全部钢坯温度分布的模型。

1) 钢坯不稳定导热方程

由上述的基本假设,考虑钢坯在炉内移动所产生的传送热^[7],钢坯在炉内的不稳定导热可描述为下列偏微分方程:

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{C_s \rho_s} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) \right) - v(t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y}. \quad (1)$$

式中 C_s, ρ_s 分别为钢坯的比热和重度; $v(t)$ 为钢坯在炉内的移动速度; K_s, K_y 分别表示钢坯的导热系数和沿 y 方向的等效导热系数。

2) 边界条件

边界条件描述钢坯表面层热量传递的动态关系。上、下表面可分别表示为

$$K_s \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -Q_b(y, t); \quad (2)$$

$$K_s \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=d(y)} = Q_t(y, t). \quad (3)$$

式中 Q_t, Q_b 分别为钢坯上、下表面的热流密度。

应用可见温度的概念^[4],钢坯边界上的热流密度可表示为

$$Q_t(y, t) = \varepsilon_t(y) \sigma (u_t^4(y, t) - T^4(d(y), y, t))$$

$$+ h_{ct}(u_t(y, t) - T(d(y), y, t)). \quad (4)$$

式中

$$\varepsilon_t(y) = F_{swt}\varepsilon_s + \frac{1}{2}(\varepsilon_w + \varepsilon_g(y)). \quad (5)$$

h_{ct} 为炉气对钢坯上表面的对流传热系数; F_{swt} 为钢坯对上部炉墙辐射角系数; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; $\varepsilon_s, \varepsilon_g, \varepsilon_w$ 分别为钢坯表面、炉气和炉墙的黑度系数。

在处理下表面热流密度时,应用有效遮热系数法修正水冷滑管的影响,即把水冷滑管的影响等效地看成下表面有效辐射传热面积的减少,则

$$Q_b(y, t) = \varepsilon_b(y)\sigma(u_b^4(y, t) - T^4(0, y, t)) + h_{cb}(u_b(y, t) - T(0, y, t)). \quad (6)$$

式中

$$\varepsilon_b(y) = (1 - \eta_F) \left(F_{swb}\varepsilon_s + \frac{1}{2}(\varepsilon_w + \varepsilon_g(y)) \right). \quad (7)$$

η_F 为水冷管有效遮盖系数; h_{cb} 为炉气对钢坯下表面的对流传热系数; u_t, u_b 分别表示钢坯上、下表面所对应的炉温。

显然,(2),(3)式所描述的边界条件是非线性的,必将导致非线性的模型.为了适应实时控制的要求,引入等效综合传热系数 h , 将边界条件线性化,以简化为线性模型¹⁾。

3) 离散状态空间模型

为了便于计算机实时控制的实现,可将上述不稳定导热方程及相应的边界条件,通过时间和空间同时离散化方法^[9],转换成相应的离散状态空间模型.先将连续变量离散化:

$$\begin{aligned} t &= k\Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K; \\ y &= j\Delta y, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ x &= i\Delta x, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (8)$$

再对(1),(2)和(3)式中的偏微分项用有限差分近似之,而对于边界网格则应用区域平衡法^[10]进行离散化处理,则可得描述钢坯内部各网格点温度分布响应的一系列差分方程.由于 n, m 通常很大,故差分方程组的维数很高.为了简化起见,可将该系统沿 y 方向将炉内钢坯分解为 n 个子系统.令各子系统的状态向量和输入向量分别为

$$\begin{aligned} X_j(k) &= [T_i(1, k), \dots, T_j(m, k)]^T, \\ U_j(k) &= [u_b(j, k)u_s(j, k)]^T, \end{aligned} \quad (9)$$

则子系统的状态方程可表示为

$$\begin{aligned} X_j(k+1) &= A_j(k)X_j(k) + C_j(k)X_{j-1}(k) + D_j(k)X_{j+1}(k) \\ &\quad + B_j(k)U_j(k), \quad j = 1, 2, \dots, n. \\ X_0(k+1) &= X_0(k). \end{aligned} \quad (10)$$

式中

1) 杨永耀,加热炉的模型化、优化操作及计算机控制,硕士学位论文,浙江大学,1984.

$$\begin{aligned}
 A_j(k) &= \begin{bmatrix} a_{11}(j, k) & a_{12}(j, k) & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21}(j, k) & a_{22}(j, k) & a_{23}(j, k) & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_{m, m-1}(j, k) & a_{mm}(j, k) \end{bmatrix}, \\
 B_j(k) &= \begin{bmatrix} b_{11}(j, k) & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & b_{m^2}(j, k) \end{bmatrix}^T, \\
 C_j(k) &= \text{diag} [c_1(j, k), \cdots, c_m(j, k)], \\
 D_j(k) &= \text{diag} [d_1(j, k), \cdots, d_m(j, k)].
 \end{aligned} \tag{11}$$

通过定义全系统的状态向量和控制向量

$$\begin{aligned}
 X &= [X_0^T, X_1^T, \cdots, X_n^T]^T, \\
 U &= [U_1^T, U_2^T, \cdots, U_n^T]^T,
 \end{aligned} \tag{12}$$

则由(10)式可得到全系统的离散状态方程

$$X(k+1) = A(k)X(k) + B(k)U(k). \tag{13}$$

式中系数矩阵 A, B 中的元素是加热炉操作条件的函数。钢坯的热物理性质 C_s, ρ_s, K_s 均描述为温度的函数,由相应的子程序实现^[11]。

2. 钢坯跟踪模型

所谓钢坯跟踪模型是指跟踪某一钢坯的加热过程,描述其整个加热过程温度变化规律的模型。某一特定钢坯在炉内的位置是随时间而变化的,本文采用移动坐标系,即坐标系与钢坯同步移动。这样钢坯所处的边界条件就转化为一个时变温度场问题。

考虑炉内的任意一块钢坯 j , 由于其沿 y 方向的温差较小, 因此, 对于同一块钢坯其不稳定导热方程可以简化为

$$\frac{\partial T^{(j)}(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{C_s \rho_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \frac{\partial T^{(j)}(x, t)}{\partial x} \right). \tag{14}$$

式中 $T^{(j)}(x, t)$ 为第 j 块钢坯温度分布的动态响应。

钢坯在炉内的位置 y_j 由钢坯的移动速度决定

$$y_j(v(t), t) = \int_0^t v(\tau) d\tau, \quad 0 \leq t \leq t_f. \tag{15}$$

$$L = \int_0^{t_f} v(\tau) d\tau. \tag{16}$$

式中 L 为加热炉的有效炉长; t_f 为第 j 块钢坯由炉入口至炉出口所经历的时间。

相应于钢坯跟踪模型的边界条件为

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\partial T^{(j)}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} &= -Q_b(y_j, t)/K_s, \\
 \left. \frac{\partial T^{(j)}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=d_j} &= Q_t(y_j, t)/K_s.
 \end{aligned} \tag{17}$$

应用与前面类似的方法,进行离散化处理定义下列状态向量和控制向量

$$\begin{aligned} X^{(j)}(k) &= [T^{(j)}(1, k), \dots, T^{(j)}(m, k)]^T, \\ U^{(j)}(k) &= [u_b(y_i, k), u_t(y_i, k)]^T, \end{aligned} \quad (18)$$

则(14)~(17)式所表示的连续模型即可转化为下列离散状态空间模型

$$X^{(j)}(k+1) = A^{(j)}(k)X^{(j)}(k) + B^{(j)}(k)U^{(j)}(k). \quad (19)$$

(13),(19)式中矩阵元素的计算可参阅作者的硕士论文.实际上,钢坯跟踪模型与全系统模型有一定的联系.当加热炉处于稳定工况下,炉内所有钢坯经历完全相同的加热历程,其差别仅是时间先后而已.设在稳定工况下,全系统模型给出的热状态为

$$X = X_c = [X_{1c}^T \dots X_{jc}^T \dots X_{nc}^T]^T, \quad (20)$$

而钢坯跟踪模型给出的热状态为 $X^{(j)}$, 则 $X^{(j)}$ 与 X_{jc} 之间的关系可表示为

$$X_{jc} = \left(\frac{(j-1)\Delta y}{v\Delta t} \right) X^{(j)}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (21)$$

由此可见,在稳定工况下可以由钢坯跟踪模型所给出的钢坯热状态,决定炉内任意位置钢坯的温度分布.从而大大简化了模型的计算,为模型的实时应用及优化操作提供了必要的条件.

三、模型的验证和计算机仿真

1. 模型的工业试验

为了验证所开发的动态数学模型的精度,在一个大型的三段推钢式加热炉上进行了工业试验.在一块试验钢坯上沿不同的厚度方向安装三支热电偶,以分别测取钢坯上、下表面和中心温度 T_t , T_b , T_c . 该钢坯与其它钢坯一样被推入加热炉,在炉内由入口至出口跑完全程.试验过程中,由数据采集装置记下三点试验热偶的温度和加热炉的各段炉

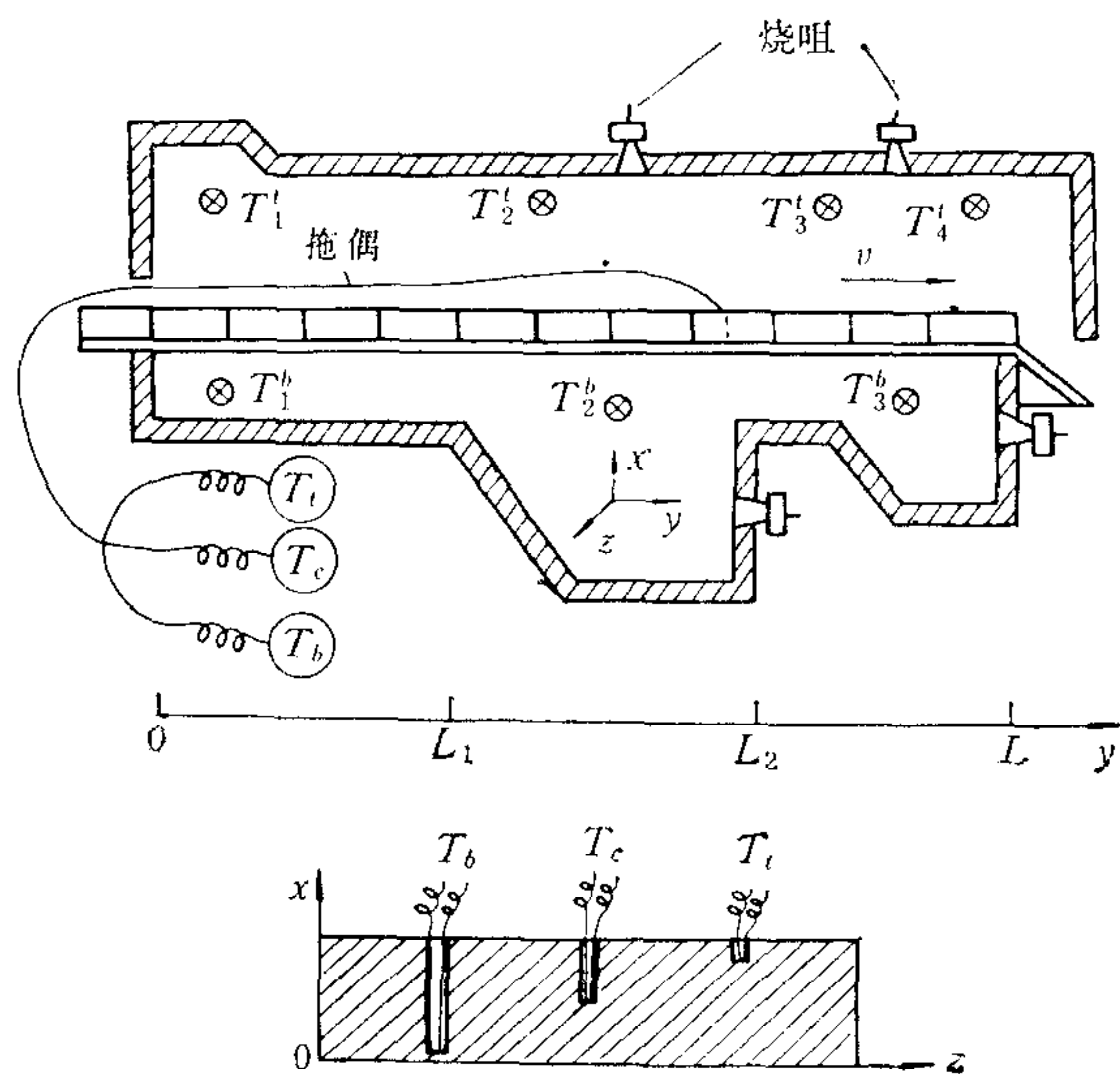


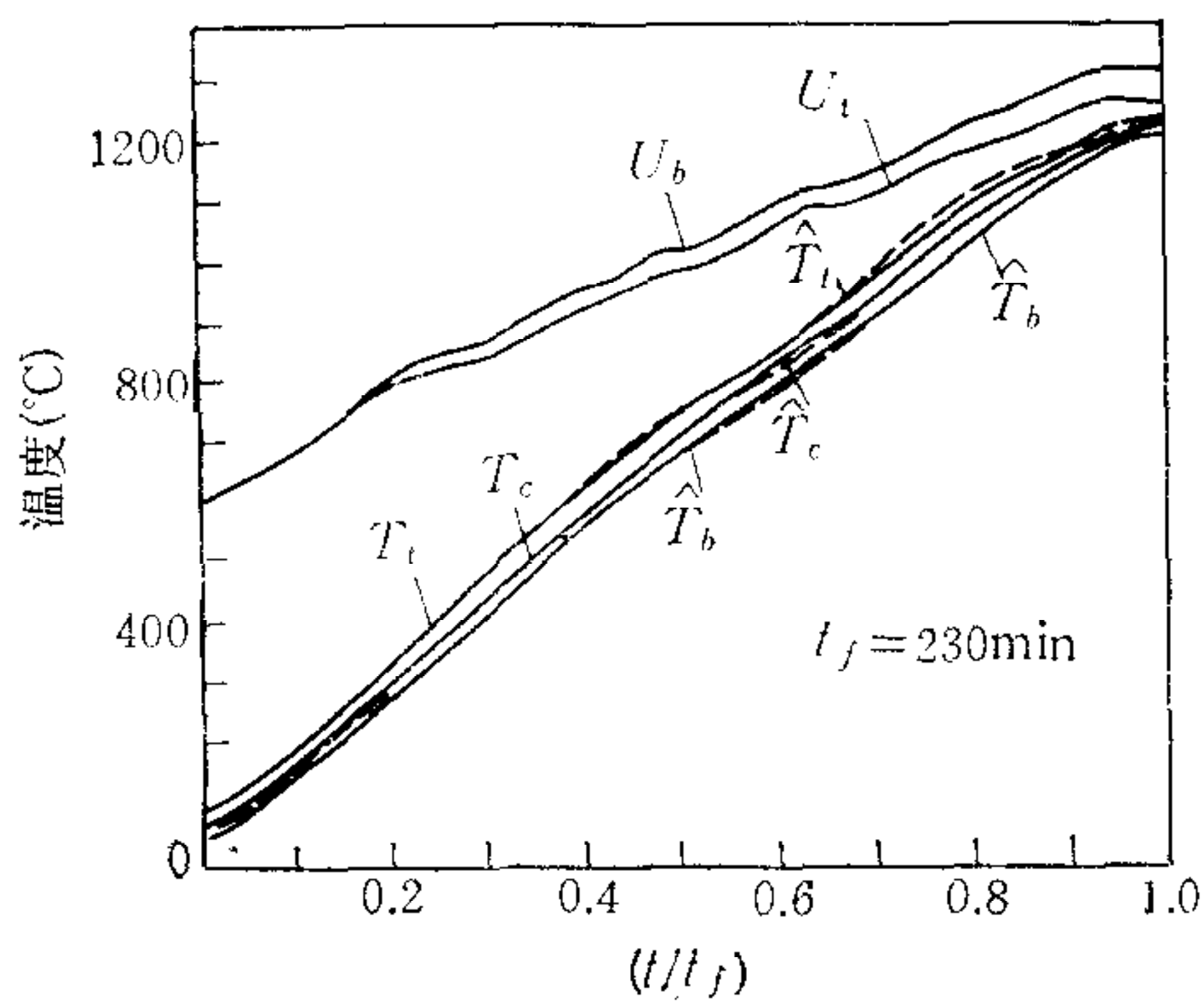
图2 钢坯拖偶试验方案示意图

温, 试验安排如图 2 所示, 重复进行了两次试验。

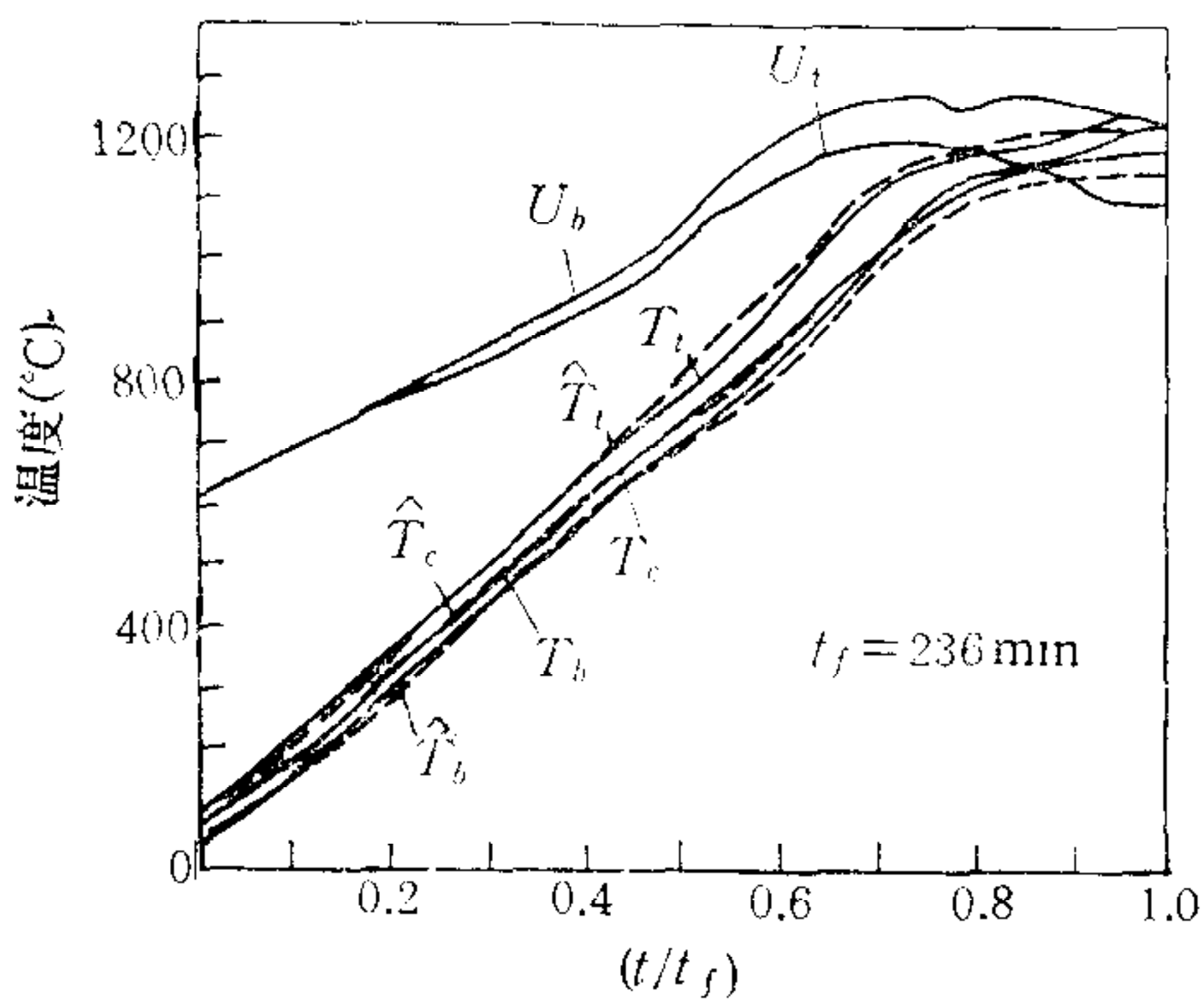
试验的测量值与模型输出的比较示于图 3, 由比较图示曲线可见, 模型的精度可以满足一般控制工程应用的要求。

2. 计算机仿真结果

在微型计算机上应用所开发的数学模型对加热炉操作进行了仿真研究, 如各段炉温、热负荷、推钢周期和钢坯几何尺寸等操作条件对钢坯在炉内温度分布的影响。图 4 表示了部分仿真结果, 不难看出, 图示的结果是符合加热炉操作规律的, 当钢坯厚度或推钢周期变更时, 为了仍然保持钢坯在炉出口的温度分布, 则必须适当调整加热炉的各段炉温, 这样可以避免钢坯在炉内的过烧, 从而降低能耗与表面烧损, 并可避免由于钢坯加热不够而造成轧制困难或损坏轧机的情况。

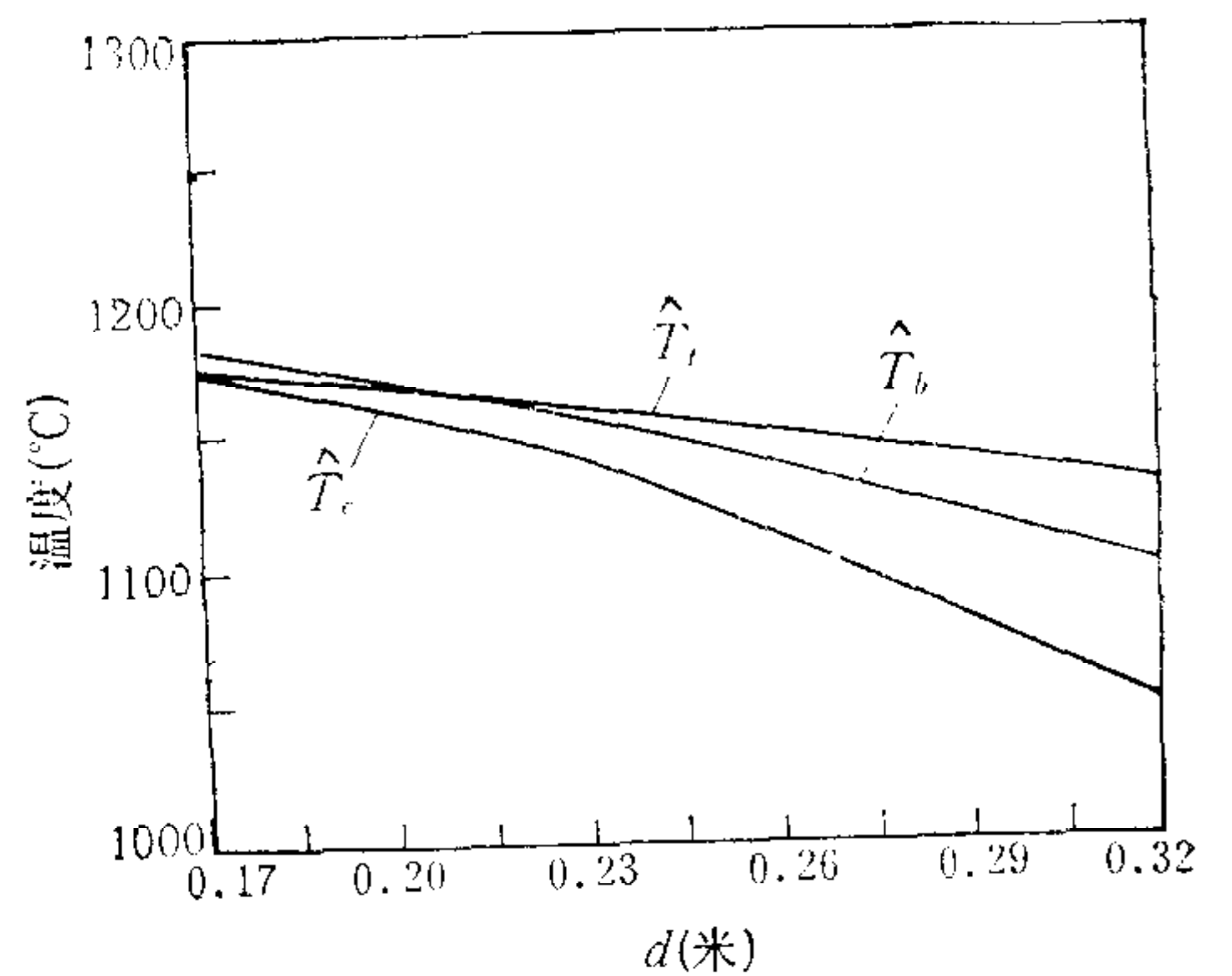


(a) 试验一

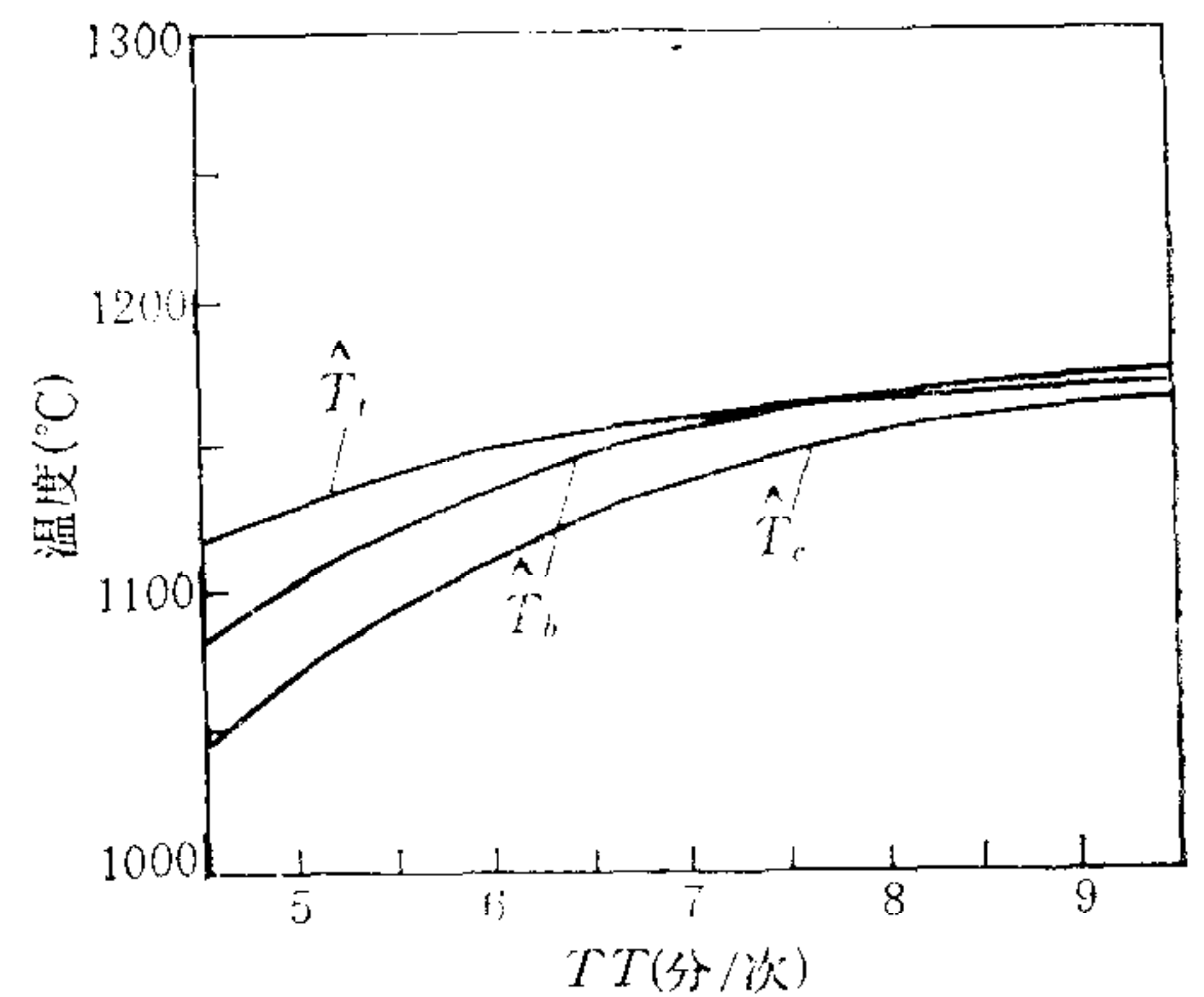


(b) 试验二

图 3 测试数据 T 与模型输出 \hat{T} 的比较



(a) 钢坯厚度对钢坯出炉温度的影响



(b) 推钢周期对钢坯出炉温度的影响

图 4 计算机仿真结果示例

四、模型的在线应用

由上述讨论可知, 该模型系机理分析模型, 因此, 如何通过反馈可测的信息实现对模

型系数的修正是在线应用模型的重要保证。对于钢坯加热过程,在现有条件下,仅有炉出口处钢坯表面温度可作为实时反馈修正信号。为了避免表面氧化层所引入的测量误差,通常可取第一次开轧后的表面温度来替代炉出口处的钢坯表面温度,红外测温器可用于表面温度的实时测量。

加热炉控制的根本目的是实现在满足钢坯出炉温度及轧机负荷的前提下的加热炉最小能耗控制。这一最优控制的命题是求取在不同操作条件下,各段炉温的最佳设定值,一个启发式的优化控制策略应用于加热炉的最佳设定值决策¹⁾,计算机仿真结果显示了明显的经济效益。一个递阶的计算机控制策略如图 5 所示,图中的 $G(z)$ 用于实现设定值修正的动态协调。

此外,数学模型还可以应用于实现加热炉和轧机之间的最佳协调。

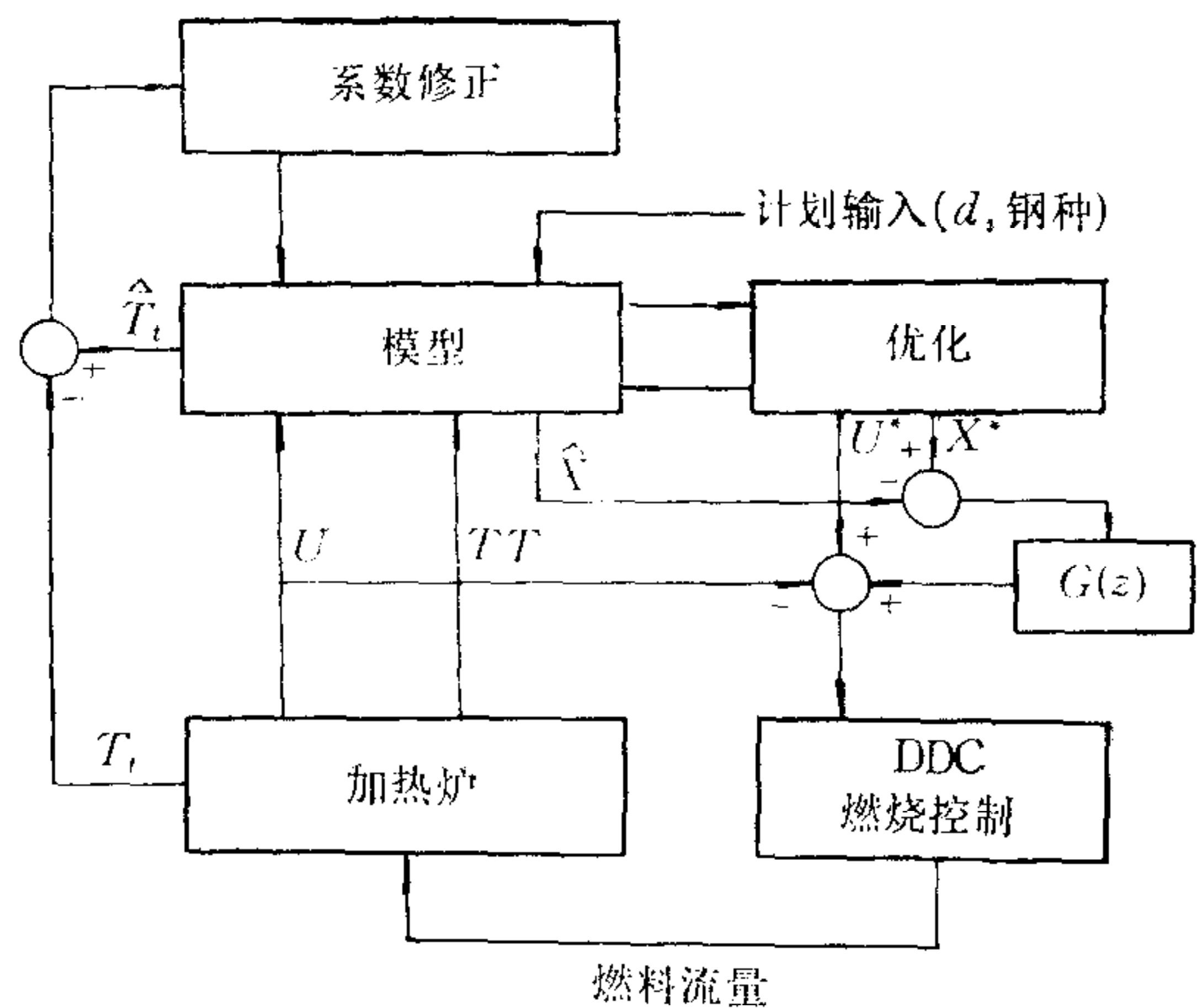


图 5 加热炉计算机递阶控制策略

此外,数学模型还可以应用于实现加热炉和轧机之间的最佳协调。

五、结 论

本文基于加热炉内钢坯传热的机理,运用现代控制理论的状态空间分析方法和系统分解技术,研究开发了描述加热炉内钢坯温度分布的离散状态方程。

模型经大型工业试验验证,证明其精度完全能满足工程应用的要求。由于所开发的模型简单、计算量小,一般内存为 256KB 的微型计算机即可满足模型的实时应用和优化的计算,为实现以动态模型为基础的计算机在线最佳控制奠定了基础。

加热炉的计算机仿真结果揭示了加热炉操作条件与炉内钢坯温度分布的定量关系,论证了应用模型所能产生的经济效益。

本文所应用的模型开发和优化方法,可以方便地推广到其它工业窑炉,诸如环形炉,隧道窑等,乃至管式固定床反应器、换热器及其它分布参数过程。

作者对重庆钢铁公司自动化所、重钢五厂,在完成本文工业试验中所提供的人力、财力资助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Pike, H. E. and Citron, S. J., Optimization Study of a Slab Reheating Furnace, *Automatica*, 6(1972), No. 3 41—50.
- [2] Hollander, F., and Zaubier S. P. A., Design Development and Performance of On-line Computer Control in a 3-Zone Reheating Furnace, *Iron and Steel Engineer*, 59(1982), No. 1, 44—52.
- [3] Work, A. H., Optimal Control of Slab Reheating Furnaces, Preprints of Papers for IFAC Symposium on the Control of Distributed Parameter Systems, 1971, 1—4.

1) 杨永耀,加热炉的模型化、优化操作及计算机控制,硕士学位论文,浙江大学,1984。

- [4] Purdy, D. J. and Williams, T. J., Temperature Control of a Continuous, Pusher Type, Five Zone, Slab Reheating Furnace for Minimum Fuel Usage, Report Number 91, Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, 1981.
- [5] Fitzgerald, F., Mathematical Modelling of Furnaces and Primary Rolling, *Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking*. Metals Society, London, 1975, 225—230.
- [6] Iwahashi, Y., Takanashi, K., et al., Computer Control System for Continuous Reheating Furnaces, *Proceedings of the Eighth Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control*, 5(1981), 2625—2631.
- [7] Bord, R. B., Stewart, W. E. et al., *Transport Phenomena*. John Willey, New York, 1969.
- [8] 蔡乔方, 加热炉, 冶金工业出版社, 1983.
- [9] Y. Lu, and Williams, T. J., Energy Saving and Productivity Increase with Computers—A Case Study of Ingot Handling Process, *Computers in Industry*, 4(1983), 1—18.
- [10] 俞昌铭, 热传导及数值分析, 清华大学出版社, 1981.
- [11] Y. Lu, and Williams, T. J., Modelling, Estimation and Control of the Soaking Pit—An Example of the Development and Application of Some Modern Control Techniques to Industrial Processes, Instrument Society of America, Research Triangle Park, USA, 1983.
- [12] 吕勇哉, 钢锭处理过程的模型化及计算机控制策略(上、下), 冶金自动化, 1983年第三期, 1—7; 1983年第四期, 2—7.

THE DEVELOPMENT OF DYNAMIC MATHEMATICAL MODELS FOR COMPUTER CONTROL OF SLAB REHEAT FURNACES

YANG YONGYAO LU YONGZAI

(Zhejiang University)

ABSTRACT

The development of the discrete state space models for computer control and operation optimization of reheat furnaces is presented in this paper. The model development is based on the two-dimensional partial differential equations describing the unsteady-state heat conductions and the corresponding boundary conditions of the heated slabs, which finally are converted to a large-scale discrete state space model with a series of interconnected subsystems through using the techniques of system decomposition and discretization. Real-time dynamic responses of the temperature profiles for any slabs at any positions in the furnaces, geometric size and grade of the steel slabs and their moving rate in the furnace can be provided based on the measurable furnace zone temperatures by the models. The industrial experimental results show that the models' precision is good enough to satisfy the engineering demands.

The Mathematical model based hierachical computer control strategies for reheat furnaces are also proposed in this paper.