

板坯加热炉的递阶计算机控制¹⁾

杨永耀 吕勇哉

(浙江大学)

摘 要

本文以作者开发的板坯加热炉离散状态空间模型为基础提出了以启发式搜索方法求解加热炉炉温设定值最优化问题的原理,并介绍了基于上述原理的加热炉递阶计算机控制系统的设计与实施。该系统经过一年多连续运行表明其控制准确、性能可靠,降低能耗9%,明显提高钢坯的加热质量,直接经济效益可达100万元/年以上。

关键词——加热炉模型,启发式搜索,递阶计算机控制,设定值最优化。

一、引 言

七十年代以来,轧钢加热炉的模型化及计算机控制的研究日益受到人们的重视,近年来该领域在理论研究与工程应用等方面都取得了一定的进展^[1-4]。但是,总的说来该领域的研究还处在初级阶段。目前多数加热炉仍局限在传统的燃烧控制上,以动态数学模型为基础的加热炉最优控制系统在工业上获得成功应用的实例不多。

炉内钢坯温度分布的不可检测是构成加热炉控制困难的主要因素。目前多数学者认为建立数学模型以估计炉内钢坯的加热温度分布,钢坯出炉温度分布为目标(或约束)实现计算机控制将是加热炉自动化控制的发展方向。从工程应用的角度看,开发性能良好、简单可靠且易于工程实施的数学模型和控制策略将是实现加热炉高级控制的关键。

本文将介绍加热炉递阶计算机控制的主要内容,包括动态数学模型和启发式炉温设定值优化控制策略,递阶计算机控制系统的构成,人机接口的设计及系统的技术经济性能等。

二、加热炉动态数学模型简介

加热炉是钢坯热轧生产线上的关键设备之一,其控制的好坏将直接影响过程的能耗、钢耗以至最终产品的质量。目前,大多数加热炉的控制是建立在以炉温定值控制为目标的传统燃烧控制上,这与加热炉复杂多变的工况是不相适应的。如加热过程中钢坯规格和轧钢速率的变化等只能通过操作人员对炉温设定值的有限干预来调节。此外,由于钢坯加热温度的未知性使得上述方法带有较大的盲目性。因而有必要根据生产线上的工况

本文于1987年2月2日收到。

1) 本课题得到国家教委科研基金的部分资助。

(如钢坯原料、轧钢节奏等)来优化炉温设定值,以实现加热炉的高级计算机控制,为此需要有相应的数学模型支持。

加热炉数学模型的主要功能是根据生产过程中的可测变量,诸如各测温点炉温、轧钢节奏、钢坯的钢种规格及经历的加热时间等变量,计算炉内加热钢坯的温度分布,从而克服钢坯温度分布不可检测的困难,为加热炉的控制提供决策信息。考虑到优化控制和钢坯温度分布实时估计的需要,作者分别开发了钢坯跟踪加热模型和全炉钢坯加热模型^[5]。图1是建立钢坯跟踪加热模型的移动坐标示意图。根据对炉内传热机理的分析,可得到描述跟踪钢坯温度变化规律的导热方程:

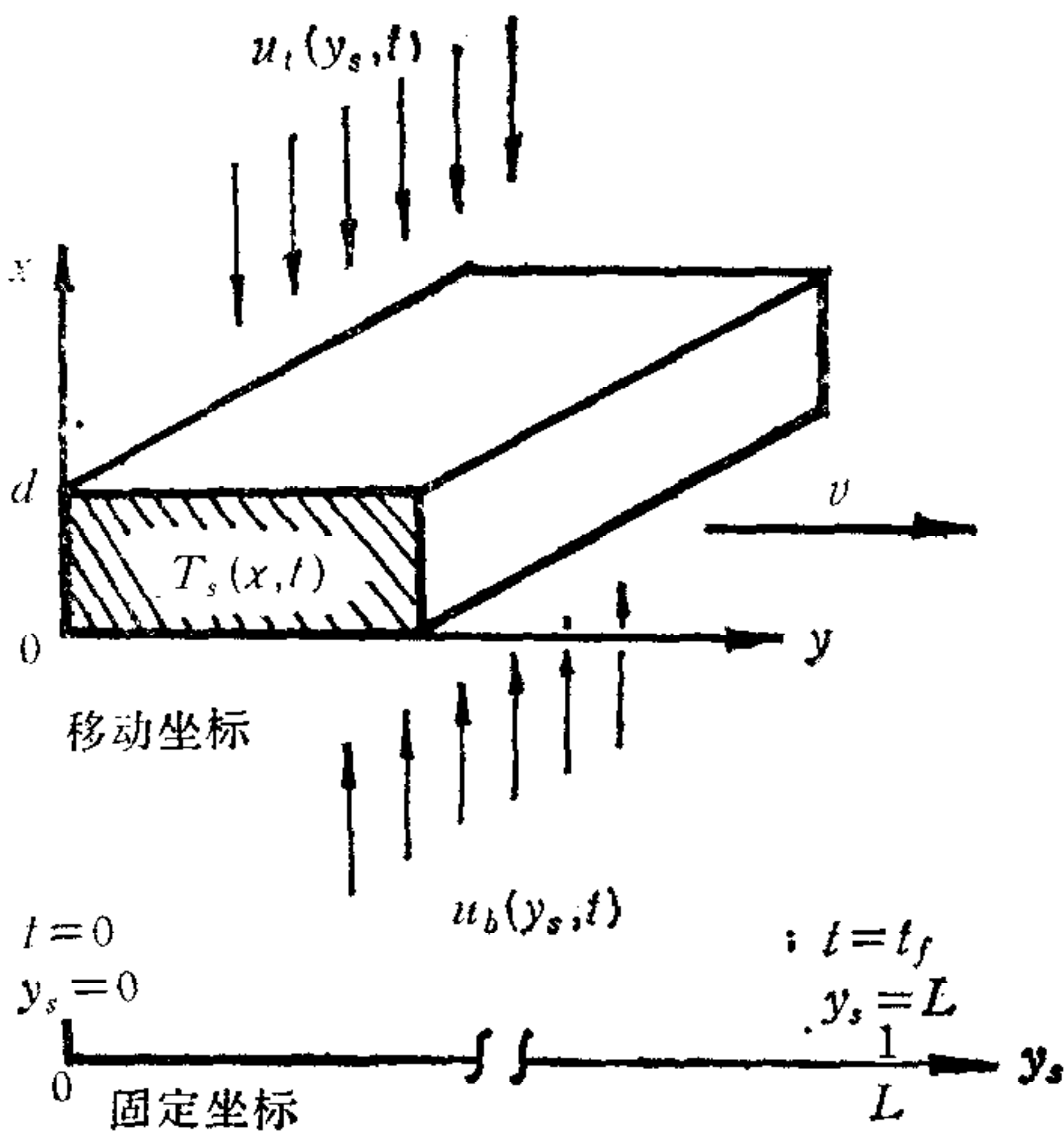


图1 钢坯跟踪加热模型的移动坐标系

$$\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{C(\bar{T}_s)\rho(\bar{T}_s)} \frac{\partial}{\partial x}$$

$$\times \left[K(\bar{T}_s) \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$0 \leq t \leq t_f, 0 \leq x \leq d, 0 \leq y_s \leq L$$

$$\left. \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -h_b(y_s, T_s(0, t), u_b, t) [u_b(y_s, t) - T_s(0, t)] / K(\bar{T}_s), \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \right|_{x=d} = h_t(y_s, T_s(d, t), u_t, t) [u_t(y_s, t) - T_s(d, t)] / K(\bar{T}_s). \quad (3)$$

式中: $T_s(x, t)$ 为跟踪钢坯的温度分布; C, ρ, K 分别为钢坯的比热系数、密度系数和导热系数; u_t, u_b 分别为上、下部炉温分布; \bar{T}_s 为 t 时刻跟踪钢坯的平均温度; L 为加热炉的有效炉长; t_f 为钢坯总的加热时间。

通过时空离散化处理,可将上述连续的偏微分方程转化为易于在计算机上实现的离散状态空间方程^[5]:

$$X_s(k+1) = A(X_s(k), U(k), k)X_s(k) + B(X_s(k), U(k), k)U(k), \quad (4)$$

$$X_s(0) = X_{s,0}, \quad 0 \leq k \leq k_f - 1. \quad (5)$$

式中,状态向量与控制向量的定义如下:

$$X_s(k) = \begin{bmatrix} T_s(1\Delta x, k\Delta t) \\ T_s(2\Delta x, k\Delta t) \\ \vdots \\ T_s(N\Delta x, k\Delta t) \end{bmatrix}, \quad U(k) = \begin{bmatrix} u_b(y_s, k\Delta t) \\ u_t(y_s, k\Delta t) \end{bmatrix}.$$

三、炉温设定值优化控制策略

热炉控制的任务是在钢坯出炉温度满足轧钢要求的前提下使某种选定的性能指标

达到最佳(如燃料消耗极小)。本文以上述离散状态空间模型为基础采用启发式搜索技术求解炉温的最优化设定值。该最优化问题可表示为如下的数学命题:

$$\text{Min } J = \sum_{k=0}^{k_f-1} \frac{1}{2} \|U(k)\|_{R(k)}^2 \quad (6)$$

Subject to:

$$X_s(k+1) = A(X_s(k), U(k), k)X_s(k) + B(X_s(k), U(k), k)U(k), \quad (4)$$

$$X_s(0) = X_{s0}, \quad (5)$$

$$U(k) = F(T_{sp}, k), \quad (7)$$

$$\|X(k_f) - X_{sim}^*\| < \varepsilon, \quad (8)$$

$$Q_T = [T_{spmin}, T_{spmax}]. \quad (9)$$

式中: Q_T 为炉温设定值允许区域; T_{sp} 为炉温设定值向量 $T_{sp} = [T_{sp1} T_{sp2} T_{sp3} T_{sp4}]^T$; F 为分段线性向量函数。

对于上述最优化问题,由于加热炉的分布参数特性及控制作用间的严重关联,因而难以用经典的优化技术来解。这里,作者提出了一种基于动态模型的启发式优化算法(如图2所示),以求解加热炉炉温设定值的最优化问题。该优化算法可表示为如下的递归过程:

(i) 根据实测生产工况与选定的稳态工况集的匹配决定生产过程所属的准稳态工况;

(ii) 根据准稳态工况由有关启发式知识,选择初始炉温设定值 $T_{sp}^{(0)}$, 置初始化标记 $i = 0$;

(iii) 由给定的设定值计算对应工况下的控制作用 $U^{(i)}(k)$ 和钢坯温度分布响应 $X_s^{(i)}(k), k = 0, 1, \dots, k_f$;

(iv) 计算性能指标 $J^{(i)}$ 和约束偏差向量 $E^{(i)}$ (按(10)式定义);

(v) 若 $J^{(i)} = J_{min}$ 且 $E^{(i)} = 0$, 则得到对应准稳态工况下的最佳炉温设定值 $T_{sp}^* = T_{sp}^{(i)}$, 优化算法结束;

(vi) 若(v)中条件不满足,则根据 $E^{(i)}$ 和 $J^{(i)}$ 的信息调用合适的启发式规则,以决定新的炉温设定值 $T_{sp}^{(i+1)} = T_{sp}^{(i)} + \Delta T_{sp}^{(i)}$, 并令 $i \leftarrow i + 1$;

(vii) 若 $i > i_{max}$, 搜索失败结束。否则,转(iii)继续进行优化搜索。

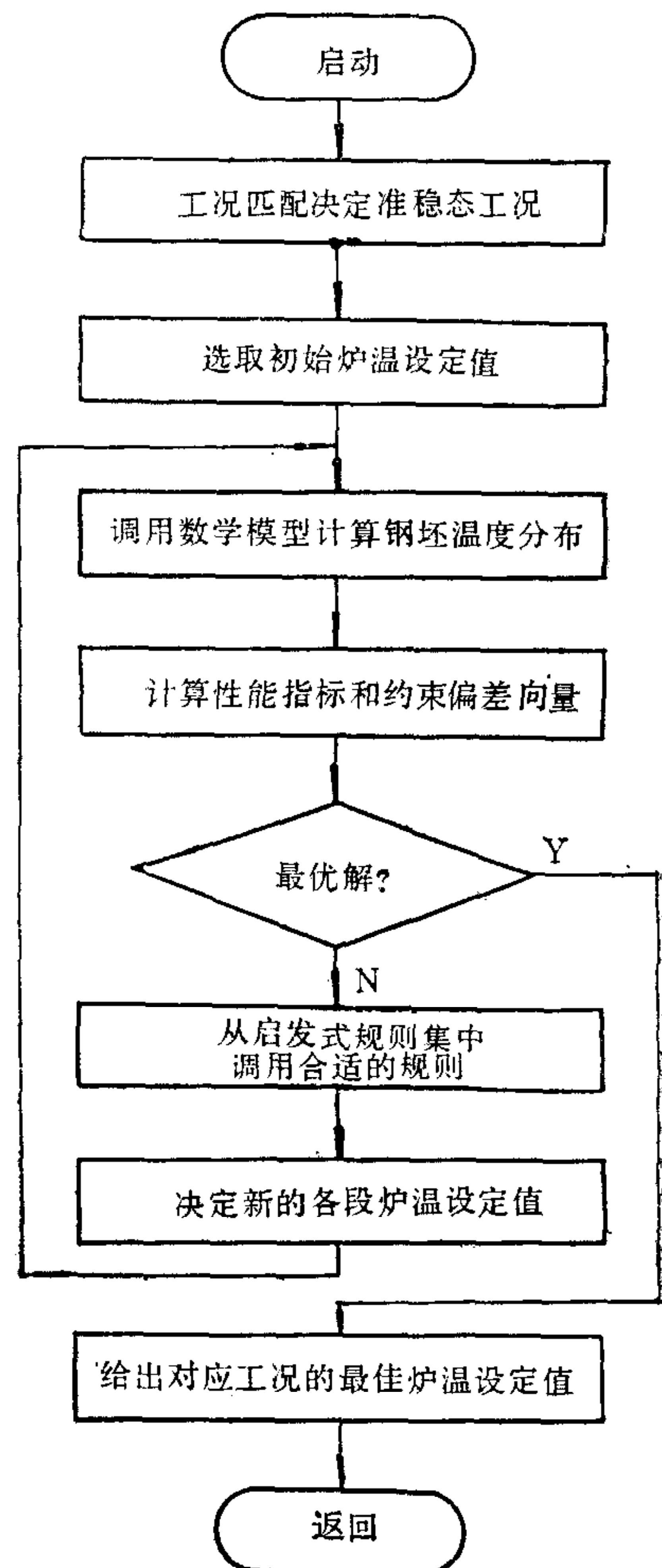


图2 启发式优化算法原理示意图

约束偏差向量主要表征了优化问题中约束条件的满足情况, 针对优化命题(4)~(9) E 由下式定义:

$$E \triangleq \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g[T_s(N, k_f) - x_{aim}^*(N)] \\ g[\Delta X_s(k_f) - \Delta X_{aim}^* - \varepsilon] \\ g[T_s(1, k_f) - x_{aim}^*(1)] \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中:

$$g(x) \triangleq \begin{cases} 0, & |x| \leq \varepsilon, \\ x - \varepsilon \cdot \text{sig}(x), & |x| > \varepsilon. \end{cases} \quad (11)$$

$\text{sig}(x)$ 为符号函数, 即 $\text{sig}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$.

$$\Delta X_s(k_f) \triangleq \text{Max} \{T_s(1, k_f), \dots, T_s(N, k_f)\} - \text{Min} \{T_s(1, k_f), \dots, T_s(N, k_f)\},$$

$$\Delta X_{aim}^* \triangleq \text{Max} \{x_{aim}^*(1), \dots, x_{aim}^*(N)\} - \text{Min} \{x_{aim}^*(1), \dots, x_{aim}^*(N)\}.$$

从上述优化算法可以看出, 启发式规则集在整个算法中起着关键的作用, 即用来制导

表 1 部分基于专家经验的启发式规则

规则序号	条件部分	动作部分
1	加热钢坯厚度增加	各段炉温设定值提高
2	轧钢速率加快	各段炉温设定值提高
3	加热特殊合金钢	比加热普通钢困难
4	以能耗极小化为目标	加大后段(远离废气出口段)热负荷
⋮	⋮	⋮

表 2 部分基于动态模型的启发式规则

规则序号	条件部分			动作部分(注)			
	e_1	e_2	e_3	均上段 ΔT_{sp1}	均下段 ΔT_{sp2}	加上段 ΔT_{sp3}	加下段 ΔT_{sp4}
1	1	1	1	0	0	-1	-1
2	0	1	1	0	0	0	-1
3	-1	1	1	1	0	0	-1
4	1	1	0	0	0	-1	0
5	0	1	0	1	1	-1	-1
6	-1	1	0	1	0	0	-1
7	1	1	-1	0	1	-1	0
8	0	1	-1	0	1	0	0
9	-1	1	-1	1	1	0	0
10	1	0	1	-1	-1	0	0
11	0	0	1	0	-1	0	0
12	-1	0	1	0	-1	1	0
13	1	0	0	-1	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	-1	0	0	0	0	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

注: $\Delta T_{spi} = T_{spi}^{(j+1)} - T_{spi}^{(j)}$; 三值变量 0: =0; 1: >0; -1: <0.

炉温设定值的搜索方向。这里,作者采用混合知识,即基于专家经验的浅层知识和基于动态模型的深层知识相结合的方法构造启发式规则集。由此而获得的部分启发式规则分别示于表 1 和表 2。所用规则均表示成产生式规则,其基本结构为:

IF 〈Condition〉 THEN 〈Action〉.

文中浅层知识主要用来选定优化过程开始时的初始炉温设定值,以给出较为合理的搜索起点;而深层知识则主要用来决定优化迭代过程中的炉温设定值的搜索方向。这两种知识各有其优缺点,两者的有机结合,往往能产生良好的效果,增强算法求解问题的能力。

前面所述的启发式优化算法是以过程所属的准稳态工况为基准来求取对应的最佳炉温设定值。在实际生产过程中加热炉工况往往会偏离其准稳态工况(但尚未达到使对应的准稳态工况的变化而启动优化算法),为了克服其对钢坯加热质量的影响本文引入了基于前馈-反馈原理及模型系数灵敏度分析的炉温设定值动态补偿。加热炉炉温优化设定控制的原理如图 3 所示。

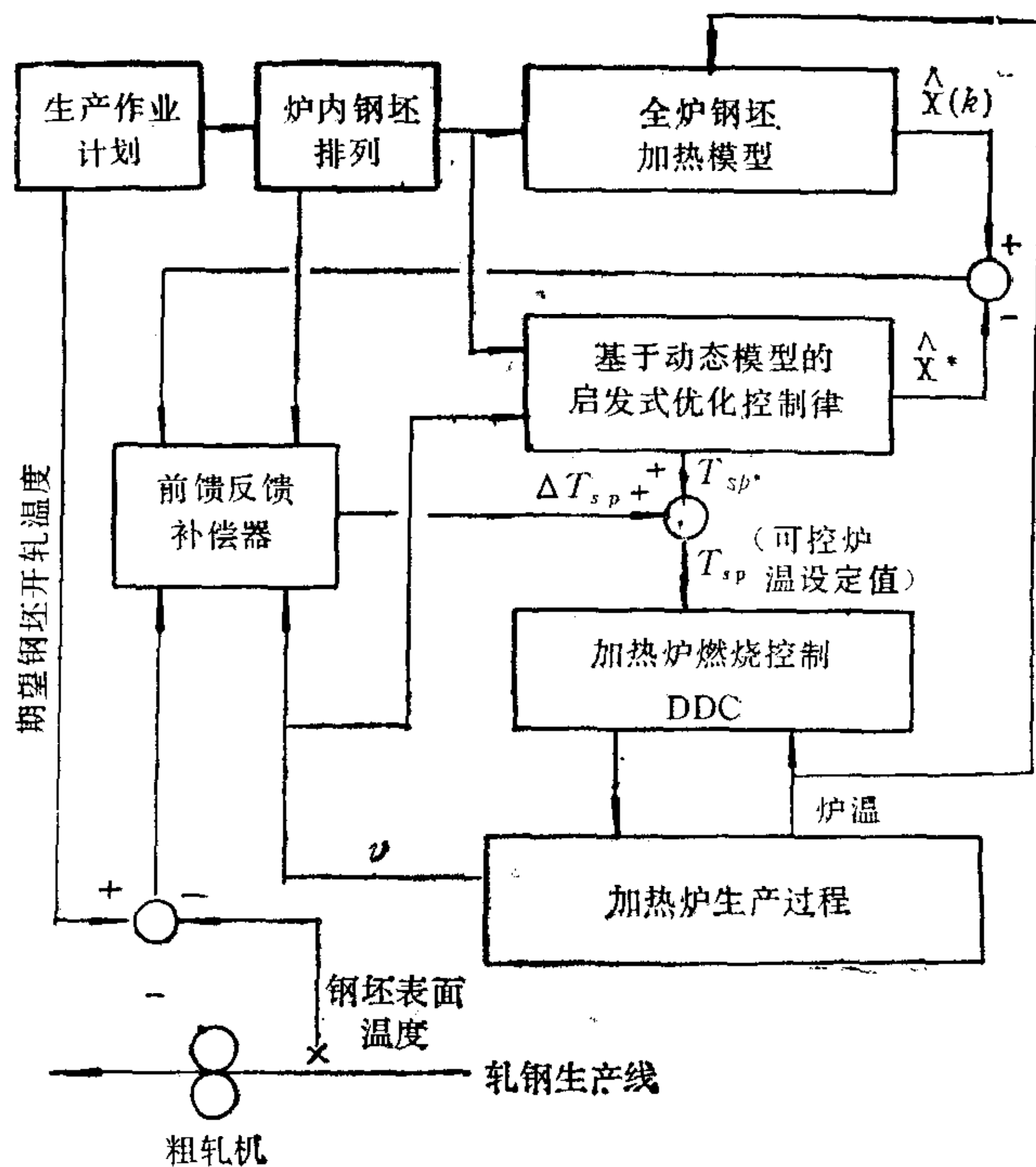


图 3 炉温设定值优化控制原理图

四、递阶计算机控制系统的实施

上面提出的炉温设定值优化控制策略在重庆钢铁公司第五钢铁厂的推钢式连续板坯加热炉上进行了工程实施。该厂热轧车间共有三台加热炉,其有效尺寸为 26.448×3.712 米²,设计最大加热能力为 40 吨钢/小时。加热炉有四个可控燃烧段,即上加热段、下加热段、上均热段、下均热段,使用天然气作为燃料。图 4 是设计的加热炉递阶计算机控制系

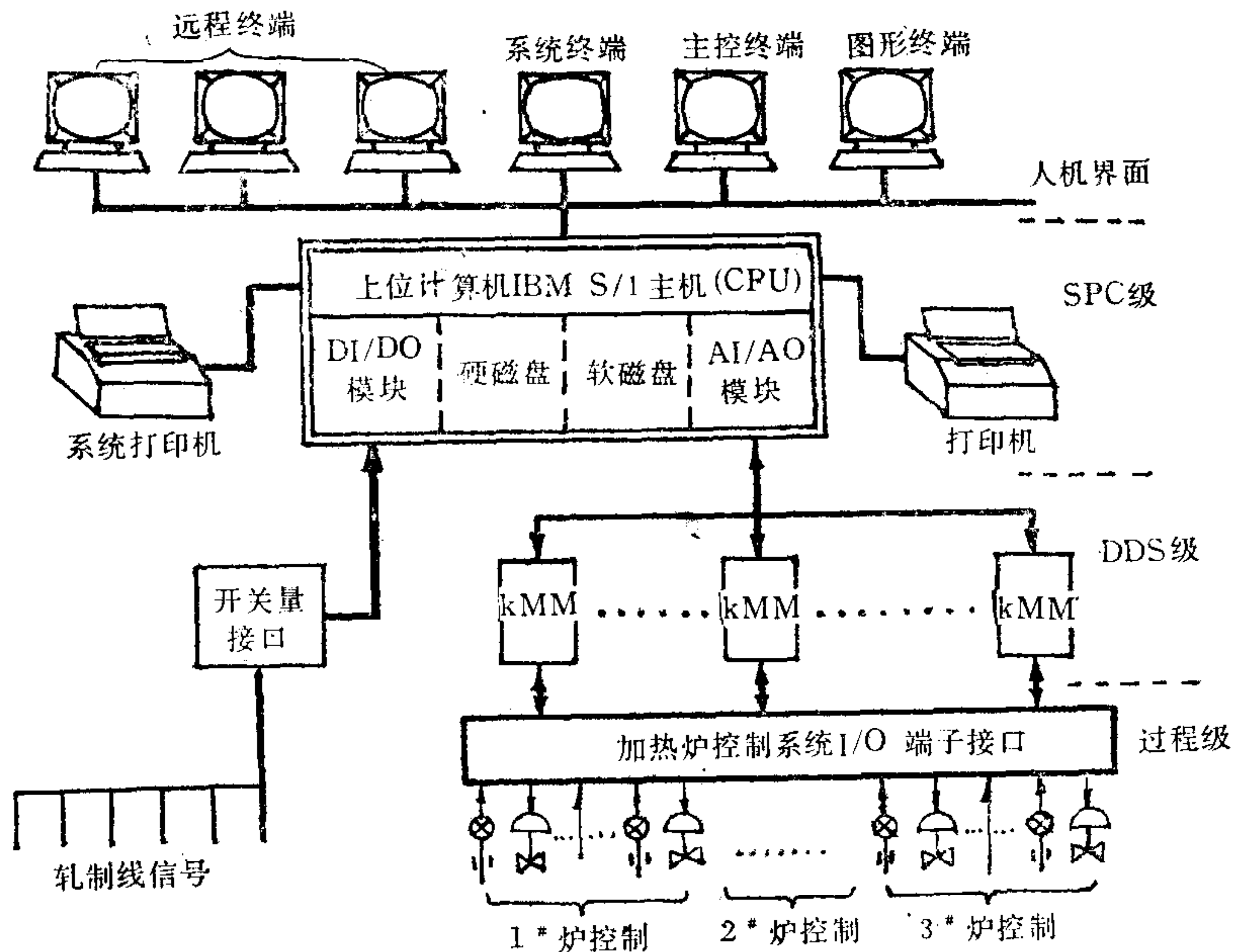


图4 加热炉递阶计算机控制系统示意图

统结构示意图,其中 DDC 级由 KMM 可编程序控制器实现,主要完成常规的加热炉燃烧控制。如空燃比控制、炉压控制、炉温与燃料流量的串级控制(炉温设定值由 SPC 级给出)等。SPC 级采用 IBMS/a 小型计算机,主要完成炉温设定值的优化计算及控制、钢坯加热温度的实时估计、过程信息的实时采集与处理、支持人机对话等,其软件采用模块结构。DDC 级与 SPC 级通过数据通讯进行联系。

系统中人机对话的设计充分考虑了工人的操作习惯,以灵活、方便、可靠为原则,采用分级菜单式对话方式。软件设计重视系统的可靠性与鲁棒性,引入了自动故障诊断及处理报警、控制方式的无扰动切换(从递阶控制到常规控制)、异常工况下的人工干预等功能,从而为系统长期可靠的运行奠定了基础。系统设计的另一个原则是控制分散(由 KMM 单回路可编程序控制器实现)信息共享,实现了加热炉生产过程中主要过程变量的实时采集和生产的基础动态管理,如加热炉产量、能耗的动态统计、生产计划的执行和完成情况,钢坯加热情况分析等,从而提高了加热炉生产过程的自动控制水平,促进了生产的现代化管理。

五、经济技术性能

加热炉递阶计算机控制系统于 1986 年 5 月在重钢五厂 1 号加热炉上投入使用,经过一年多的连续运行表明该系统性能可靠、操作简单、自动化程度高,能有效地完成加热炉炉温设定值的实时闭环控制,深受现场工程技术人员的欢迎。

由于采用了根据实际生产过程情况的炉温设定值优化策略,加热炉炉温趋于合理,克服了人工定值控制的盲目性,从而使加热炉的能耗明显下降。图 5(a) 是扣除不可比因

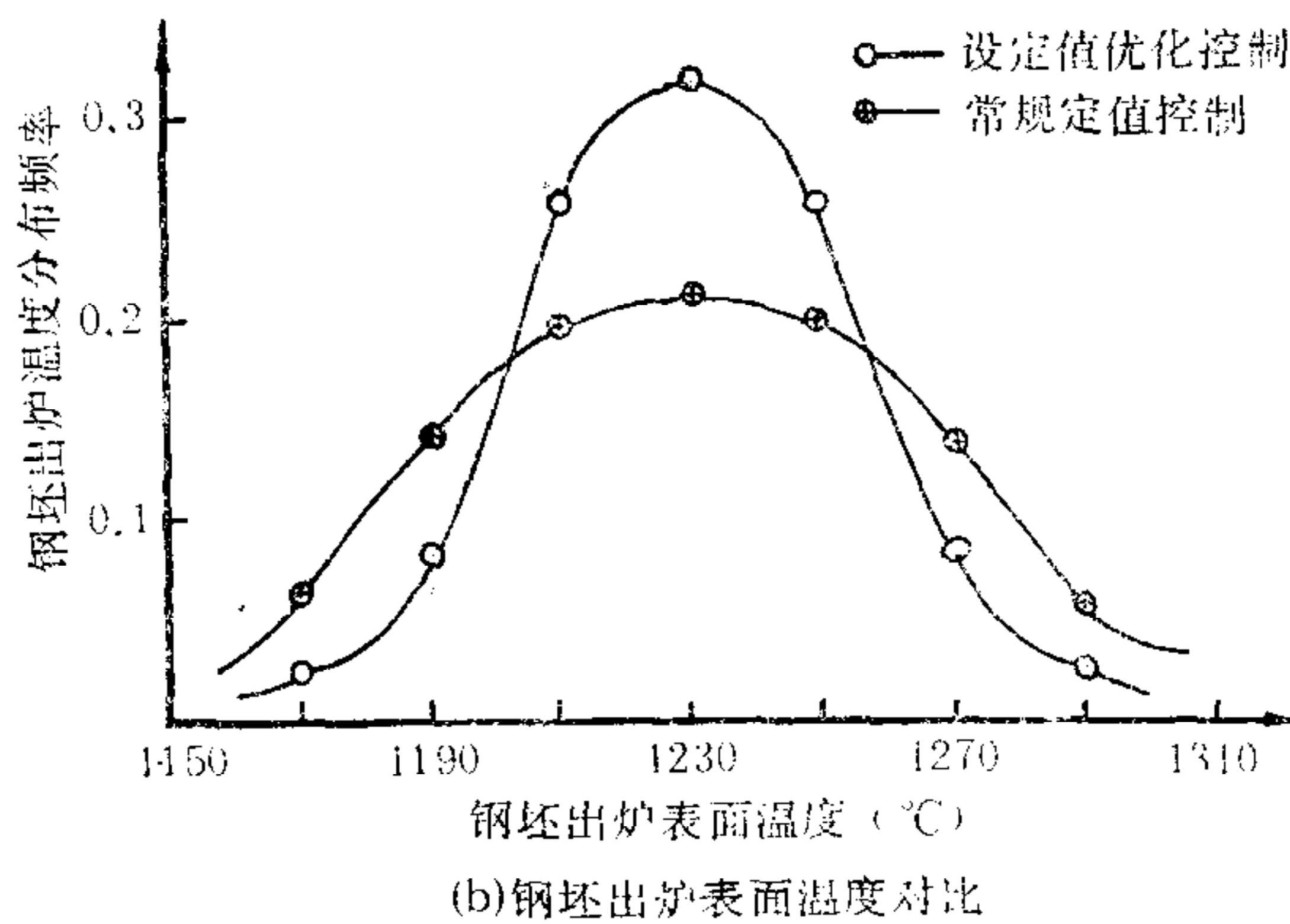
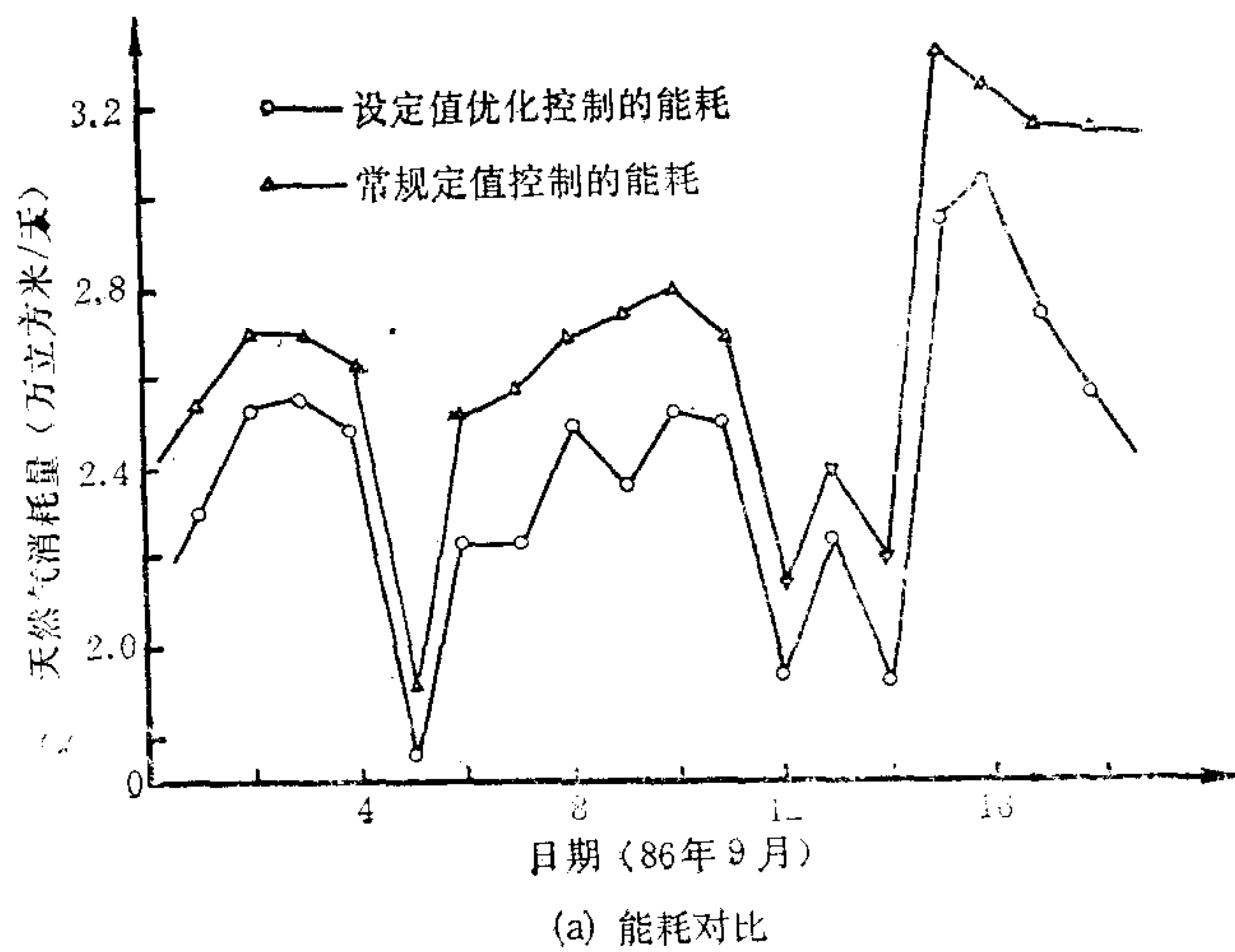


图5 设定值优化控制与常规定值控制性能对比

素后递阶计算机控制与常规的炉温定值控制的能耗对比。图中曲线起伏大是由于每天轧钢产量不等所致，但同一天内两种方案对应的钢坯加热量是相等的。由连续运行一年多的统计数据表明，采用炉温设定值优化控制后可降低加热炉能耗9%以上，仅此一项每年可节约人民币73万元。

由于采用炉温设定值优化控制，使得钢坯的出炉温度分布较为理想，提高了钢坯的加热质量。图5(b)是对应于递阶计算机控制和常规定值控制时钢坯出炉表面温度的测量对比结果。采用炉温设定值优化控制策略减少了不必要的燃料供给，使钢坯的烧损减少，实测表明使钢的烧损率从原来的0.7%降低到0.52%，每年可节约人民币45万元。

加热炉的递阶计算机控制从根本上改变了加热炉传统的控制方式，提高了加热炉的控制性能，改善了现场的工作环境，促进了企业的现代化管理，也为轧钢生产全线计算机控制创造了良好的条件。

加热炉递阶计算机控制系统的研制成功，使加热炉的自动控制从0级、1级开始向2级控制过渡。该系统投资回收期短，具有较大的推广价值。

1986年11月，该系统通过了冶金工业部、国家教委和重庆市科委联合主持的部级鉴

定。

本研究课题受到重庆钢铁公司的大力支持, 该公司周晓昕、郑晓斌、陈力等同志参加了项目的现场实施工作, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Holland, F. and Zuurbier, S. P. A., Design, Development and Performance of Online Computer Control in a 3 Zone Reheating Furnace, *Iron and Steel Engineer*, 59(1982)1, 44—52.
- [2] Misaka, Y. and Takahashi R. et al., Computer Control of a Reheating Furnace at Kaahima Steel Works' hot Strip Mill, *Iron and Steel Engineer*, 59(1982) 5, 51—55.
- [3] One M. and Makino, T. et al., The Computer Control System of a Billet Reheating Furnace, Preprints of the 8th IFAC World Congress, Kyoto, 1981, 135—140.
- [4] Kamata, M. and Murakami, S. et al., Computer Control System for Continuous Reheating Furnaces, Preprints of the 8th IFAC World Congress, Kyoto, 1981, 141—146.
- [5] Yang, Y. Y. and Lu Y. Z., Development of a Computer Control Model for Slab Reheating Reheating Furnaces, *Computers in Industry*, 7(1986)2, 145—154.

HIERACHICAL COMPUTER CONTROL FOR SLAB REHEATING FURNACE

YANG YONGYAO LU YONGZAI

(Zhejiang University)

ABSTRACT

An algorithm for solving zone temperature set points optimization of reheating furnace by using heuristic search technique is presented in this paper, based on the discrete state space reheating furnace model developed by the authors. According to the proposed algorithm a hierchical computer control system for slab reheating furnace is designed and implemented. Through over one year's online running, it shows that the proposed system is both reliable and accurate enough for reheating furnace control. Furthermore, a considerable energy saving (9%) and significant product quality improving have been achieved, thus producing an economic benefit of over 1 million Yan/year.

Key words — Reheat furnace model; heuristic serach; hierachical computer control; set point optimization.