

均热炉最佳加热策略的开发¹⁾

吴铁军 吕勇哉
(浙江大学)

摘 要

本文以均热炉的离散状态空间模型和最优控制理论为基础,应用作者所提出的一种处理带约束条件的最优控制问题的新算法,从理论上求解均热炉最小燃料消耗的最佳加热策略,即均热炉的最佳温度轨迹。

本文的研究结果经计算机仿真,给出了均热炉操作条件与最佳加热策略的关系和应用最佳策略所能获得的经济效益。本开发方法可用于其它批量生产过程的最佳控制轨迹的综合。同时,本文的研究证明作者所开发的最优控制算法可应用于高维、非线性、时变系统最佳控制轨迹的综合。

一、引 言

均热炉是将在锭模内固化成型、冷却后的钢锭加热至轧机所要求的均匀温度分布,以送至轧机开坯。在加热过程中,均热炉要消耗大量的能量。显然,均热炉的燃料消耗主要依赖于钢锭装炉时的热状态(热状态决定于钢锭由铸锭至装炉所经历的时间)、均热炉温度的燃烧控制状况及均热炉的加热策略^[1]。而后者通常由经验所决定。

自世界范围的能源危机以来,不少研究者试图寻求均热炉的最佳加热策略,以降低均热炉的能耗,其中以 Yooichi 等提出的逆 L 型策略^[2]和 Lu 等提出的改进逆 L 策略^[3]为典型代表。但是这些方法多以能量守恒为基础,缺乏最优控制理论方面的严格证明。

现代控制理论中的最小能耗控制已在航天工业中获得成功的应用,但是,由于工业生产过程的复杂性,至今关于复杂工业对象最佳控制轨迹综合方法的报道还少见。

本文以 Lu 等所开发的均热炉离散状态空间模型^[4]为基础,应用作者所开发的一种求解带约束条件的最优控制问题的算法,从理论上和工程上解决了以最小能耗为目标的均热炉最佳加热策略的开发。本文所研究的方法几乎可用于处理所有批量生产过程的最佳控制策略(相应于最佳输出或状态轨迹)的综合。

计算机仿真结果表明,应用所综合的加热策略可以大大改进现有的热工制度,从而获得显著的经济效益。

二、均热炉最小能耗控制的命题

关于均热炉系统的动态模型研究已有若干报道^[5-7],但从实时控制的要求出发,以 Lu

本文于 1984 年 12 月 7 日收到。

1) 本课题为国家教委基金资助项目。

等提出的离散状态空间模型最为完善和适用^[9]。该模型可表示为以下时变、非线性离散状态空间方程

$$\mathbf{x}(k+1) = f[\mathbf{x}(k), u(k), k], \quad (1)$$

其中状态向量 $\mathbf{x}(k)$ 表示均热炉炉壁和炉内钢锭在 k 时刻的温度分布, 控制变量 $u(k)$ 表示 k 时刻进入炉内的燃料流量。根据以上模型, 均热炉最小能耗控制的命题可表示为

$$\min J = \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^{k_f} u^2(k); \quad (2)$$

$$\mathbf{x}(k+1) = f[\mathbf{x}(k), u(k), k], \quad k = k_0, \dots, k_f - 1; \quad (3)$$

$$g[\mathbf{x}(k), u(k), k] \leq 0, \quad k = k_1, \dots, k_f; \quad (4)$$

$$T_{s,n}(k) \leq T_{\max}, \quad k = k_0, \dots, k_f; \quad (5)$$

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}, \quad k = k_0, \dots, k_f; \quad (6)$$

$$\mathbf{x}(k_0) = \mathbf{x}_0; \quad (7)$$

$$\theta[\mathbf{x}(k_f)] \leq 0, \quad k_0, k_f \text{ 给定}. \quad (8)$$

其中 $T_{s,n}$ 为钢锭表面温度。对于式 (4) 至式 (8) 简单说明如下:

1) 式 (4) 及式 (5) 表示钢的热处理工艺对均热炉加热策略的约束。这类约束一般可分为两部分, 即加热速度的限制与加热温度的限制。加热速度的限制一般可表示为

$$|T_{s,i}(k+1) - T_{s,i}(k)| \leq T_p, \quad i = 1, \dots, n. \quad (9)$$

实际上, 可只考虑钢锭表面的温度变化速度, 即

$$|T_{s,n}(k+1) - T_{s,n}(k)| \leq T_p. \quad (10)$$

根据状态方程式 (3), $T_{s,n}(k+1)$ 可表示为

$$T_{s,n}(k+1) = f_n[\mathbf{x}(k), u(k), k]. \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10) 以消去 $T_{s,n}(k+1)$ 项, 可得

$$|f_n[\mathbf{x}(k), u(k), k] - T_{s,n}(k)| \leq T_p. \quad (12)$$

如定义

$$g[\mathbf{x}(k), u(k), k] = |f_n[\mathbf{x}(k), u(k), k] - T_{s,n}(k)| - T_p, \quad (13)$$

并代入式 (12), 即得到式 (4)。式 (5) 则表明钢锭在整个加热过程中, 其表面温度不能高于某个规定的温度 T_{\max} , 这样就保证了避免钢锭的过温和过烧, 以满足某些钢种热处理工艺的要求。

2) 由于均热炉实际操作条件的限制, 进入炉内的燃料流量只能在某一个范围内改变。这一约束条件由式 (6) 表示。

3) 式 (7) 表明钢锭装炉时其内部初始温度分布为已知。这一初始温度分布可应用 Lu 等提出的钢锭单一动态模型^[9]估计得到。

4) 钢锭在炉内均热结束后, 其内部各点温度应满足规定的出炉温度范围, 即

$$|T_{s,i}(k_f) - T_f| \leq \varepsilon, \quad i = 1, \dots, n. \quad (14)$$

为便于数学处理起见, 式 (14) 可由另一种终端约束所代替,

$$\sum_{i=1}^n (T_{s,i}(k_f) - T_f)^2 \leq \varepsilon^2. \quad (15)$$

其一般表示形式即式 (8)。

三、均热炉最小能耗控制问题的求解及计算机仿真

1. 均热炉最小能耗控制问题的求解

由以上均热炉最小能耗控制问题的命题式(2)至式(8)可以看出,为易于求解起见,采用了二次型性能指标式(2),但是由于状态方程式(3)的时变及非线性特性,以及存在着形如式(4)至式(8)的复杂约束条件,因此在微型计算机上用一般方法求解这一问题存在许多难以克服的困难.为此,采用了作者提出的一种求解带约束最优控制问题的新算法^[8],这一算法将非线性规划中的 Hestenes 乘子法 (Hestenes' Multiplier Methods) 与最优控制理论中 Pontryagin 极大值原理的哈密尔顿函数相结合,从而以满意的计算精度,较小的计算机内存容量和较短的计算时间,在微型计算机上解出了这一问题.

对于由式(2)至式(8)所定义的最优控制问题的命题.定义 $c_i > 0, i = 1, 2, 3, 4$ 以及实数序列 $\{\lambda(k)\}, \{\mu(k)\}, \{\nu(k)\}$ 和 ξ 分别为对应于约束条件式(4)–(6)和式(8)的 Hestenes 罚因子及 Hestenes 乘子序列.则在此基础上可构造一个增广的哈密尔顿函数 H_c , 满足

对于 $k_0 \leq k < k_f$, 有

$$H_c(k) = \begin{cases} H_c^{(1)}(k), & k_1 \leq k \leq k_2, \\ H_c^{(2)}(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$k_0 \leq k_1 < k_2 < k_f,$$

$$\begin{aligned} H_c^{(1)}(k) = & \frac{1}{2} u^2(k) + \mathbf{p}^T(k+1)f[\mathbf{x}(k), u(k), k] + \frac{1}{2c_1} \\ & \cdot \{\max^2(0, \lambda(k) + c_1 g[\mathbf{x}(k), u(k), k]) - \lambda^2(k)\} \\ & + \frac{1}{2c_2} \cdot \{\max^2(0, \mu(k) + c_2(T_{s,n}(k) - T_{\max})) - \mu^2(k)\} \\ & + \frac{1}{2c_3} \cdot \{\max^2(0, \nu(k) + c_3(u(k) - u_{\max})) \\ & + \min^2(0, \nu(k) + c_3(u(k) - u_{\min})) - \nu^2(k)\}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$H_c^{(2)}(k) = H_c^{(1)}(k) - \frac{1}{2c_1} \{\max^2(0, \lambda(k) + c_1 g[\mathbf{x}(k), u(k), k]) - \lambda^2(k)\}, \quad (18)$$

$\mathbf{p}(k)$ 为协状态矢量,维数与 $\mathbf{x}(k)$ 相同.则算法的主要步骤为

1) 给定 Hestenes 罚因子及 Hestenes 乘子的初始值,分别记为 $c_i^0, i = 1, 2, 3, 4$ 以及 $\lambda^0(k), \mu^0(k), \nu^0(k)$ 和 ξ^0 . 令 $j = 0$.

2) 对于已知的 c_i^j 以及 $\lambda^j(k), \mu^j(k), \nu^j(k)$ 和 ξ^j , 求解以下两点边值问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_c^T(k)}{\partial u(k)} = 0; \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_c^T(k)}{\partial \mathbf{x}(k)} = \mathbf{p}(k); \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_c^T(k)}{\partial \mathbf{p}(k)} = \mathbf{x}(k); \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k_0) = \mathbf{x}_0; \\ \mathbf{p}(k_f) = c_4 \cdot \max(0, \xi^i + c_4 \cdot \theta[\mathbf{x}(k_f)]) \cdot \frac{\partial \theta[\mathbf{x}(k_f)]}{\partial \mathbf{x}(k_f)}. \end{cases} \quad (22)$$

$$\mathbf{p}(k_f) = c_4 \cdot \max(0, \xi^i + c_4 \cdot \theta[\mathbf{x}(k_f)]) \cdot \frac{\partial \theta[\mathbf{x}(k_f)]}{\partial \mathbf{x}(k_f)}. \quad (23)$$

记该问题的解为 $\mathbf{x}^i(k)$ 及 $u^i(k)$.

3) 进行如下迭代:

$$\lambda^{i+1}(k) = \max(0, \lambda^i(k) + c_1 g[\mathbf{x}^i(k), u^i(k), k]), \quad (24)$$

$$\mu^{i+1}(k) = \max(0, \mu^i(k) + c_2^i (T_{s,n}^i(k) - T_{\max})), \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \nu^{i+1}(k) = \max(0, \nu^i(k) + c_3(u^i(k) - u_{\max})) \\ + \min(0, \nu^i(k) + c_3(u^i(k) - u_{\min})), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\xi^{i+1} = \max(0, \xi^i + c_4 \theta[\mathbf{x}^i(k_f)]), \quad (27)$$

$$c_i^{i+1} = \beta_i c_i^i, \beta_i \geq 1, \quad (28)$$

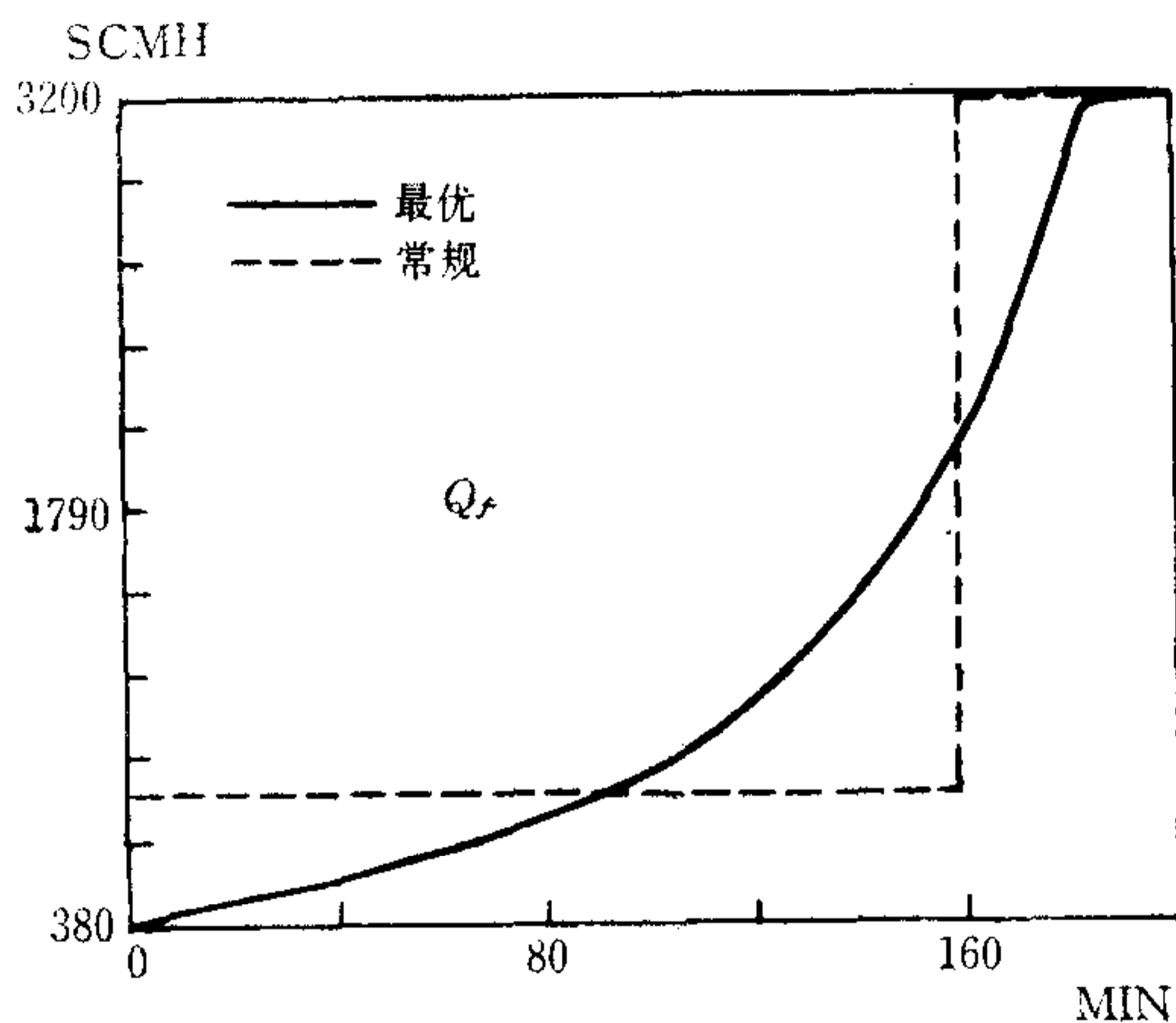


图1 最佳加热策略与逆L型加热策略的比较
钢锭液芯率36%； Q_f 为燃料流量

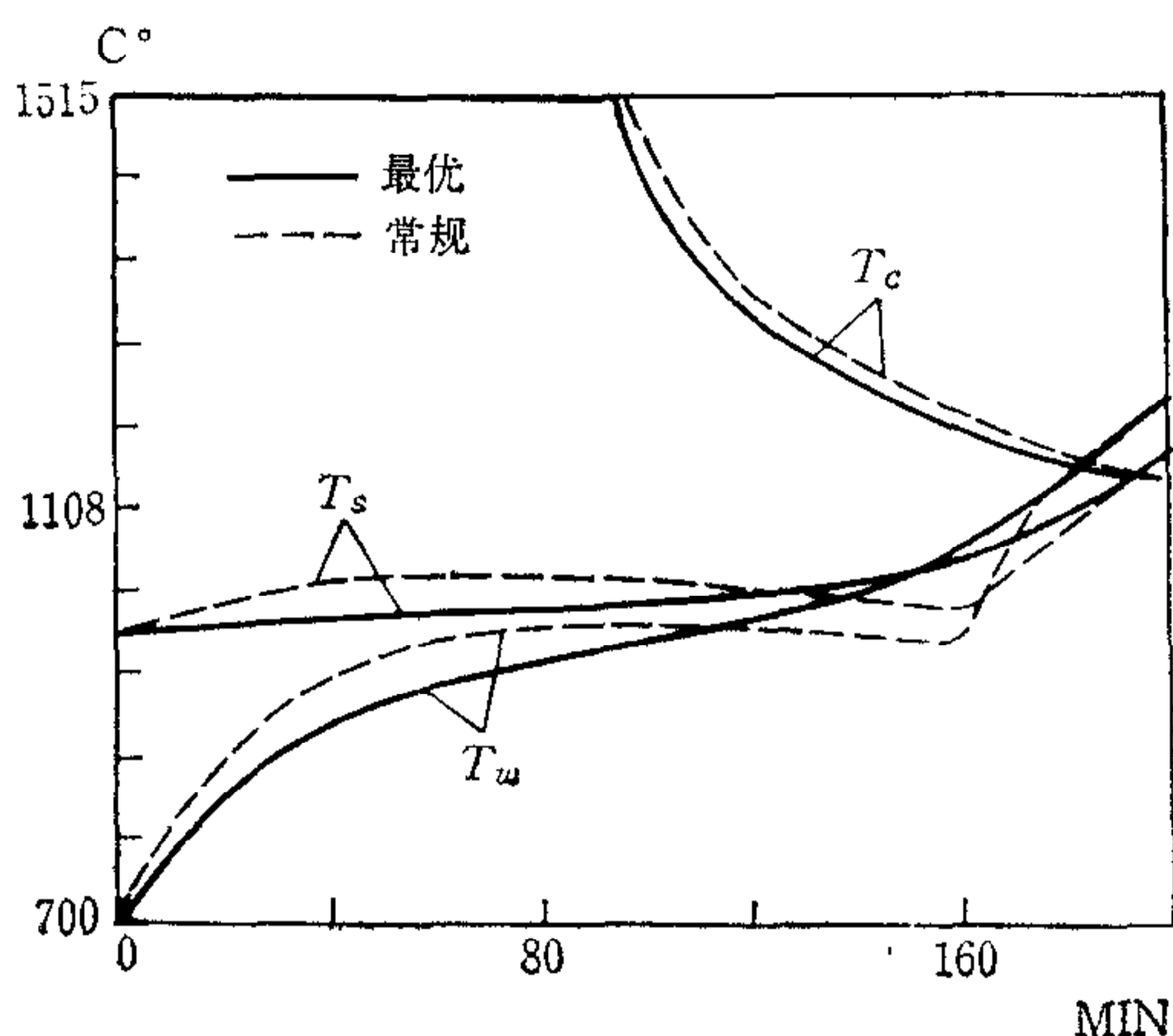


图2 两种不同加热策略时的均热炉钢锭动态温度响应曲线

T_c 为钢锭中心温度； T_s 为钢锭表面温度； T_w 为均热炉墙温度

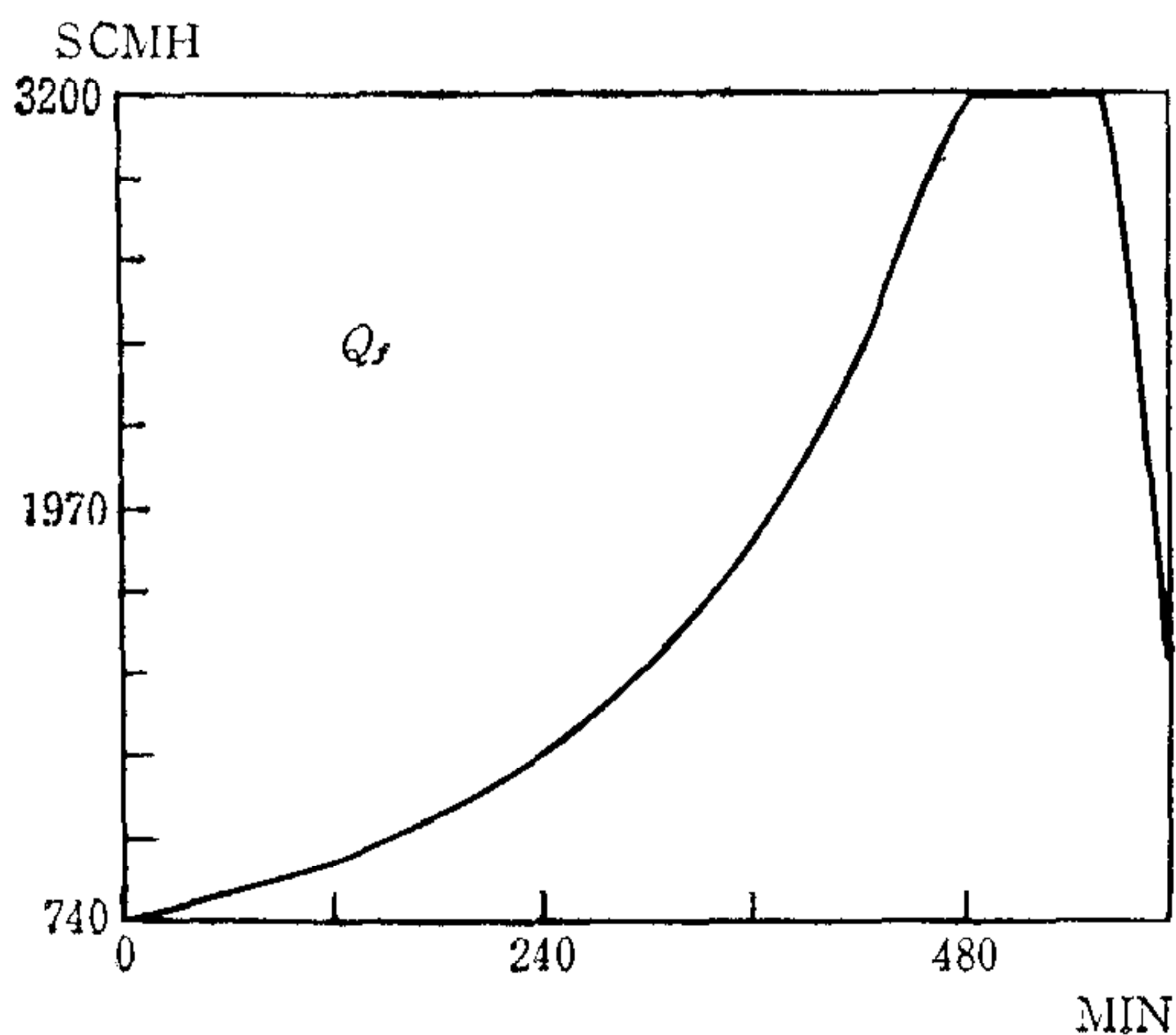


图3 冷锭装炉时的最佳燃料流量曲线
钢锭无液芯； Q_f 为燃料流量

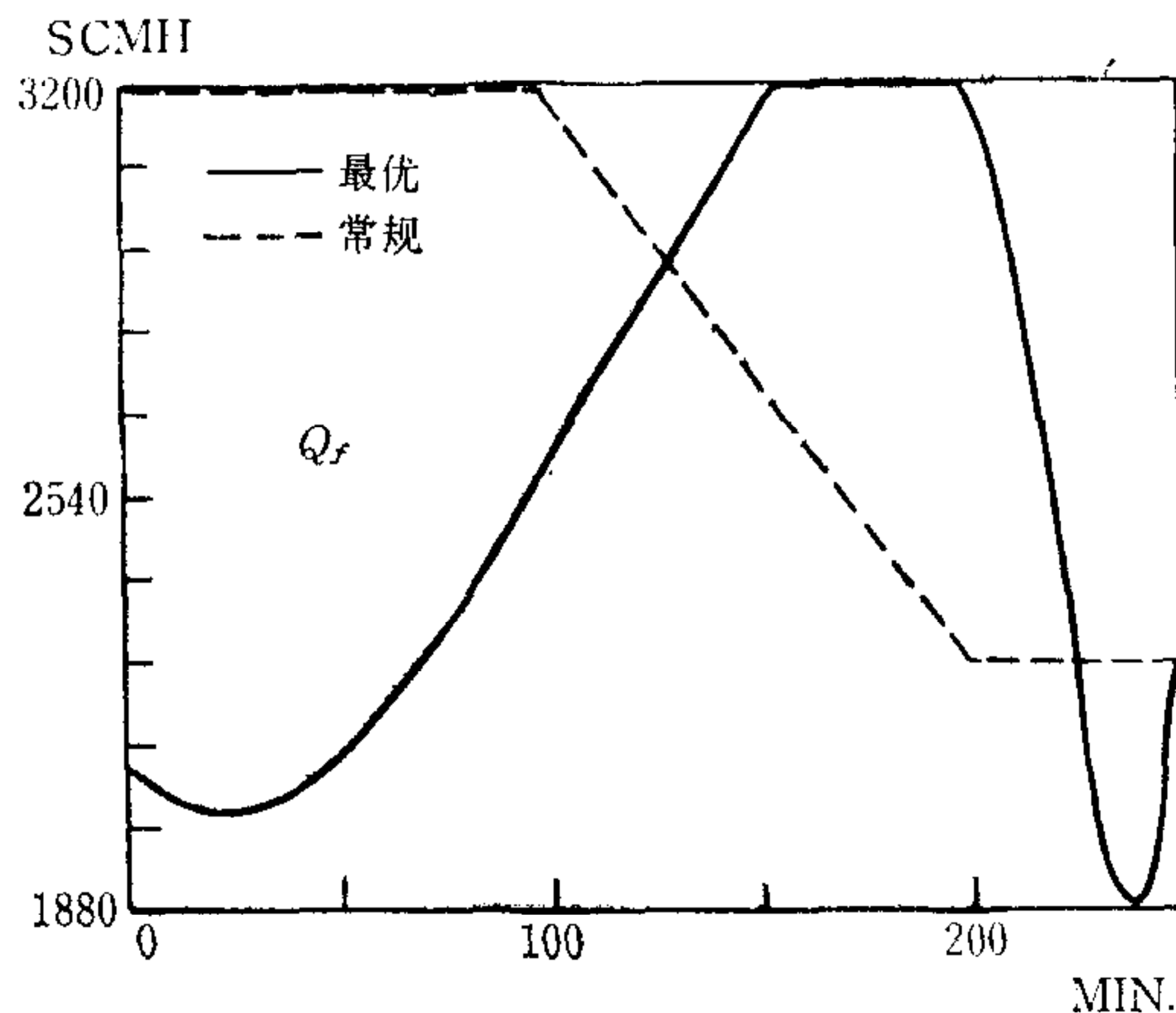


图4 热锭装炉时两种不同燃料供应策略的比较
钢锭无液芯； Q_f 为燃料流量

并转步骤 2)。

对于以上算法,在适当的假设条件下,存在着 $0 < c_i^* < +\infty$, $i = 1, 2, 3, 4$; 对于所有的 $c_i^j \geq c_i^*$, 均有

$$\{x^i(k), u^i(k)\} \rightarrow \{x^*(k), u^*(k)\} \quad (29)$$

成立^[8]。其中 $\{x^*(k), u^*(k)\}$ 为原命题式 (2) 至式 (8) 的解。且收敛速度至少是线性的。

在 Dual 83/20 微型计算机上对命题式 (2) 至式 (8) 试算的结果证明,当状态方程式 (3) 取为 10 阶时,一般迭代 10—15 次即可获得具有满意精度的解。

2. 均热炉最小能耗问题的计算机仿真研究

以数学模型式 (1) 为基础,应用以上算法对均热炉最小能耗控制策略的综合进行了大量的计算机仿真研究,并将所得结果与现有的均热炉加热制度作了比较(参见图 1 至图 4)。

1) 对于带有液芯的钢锭,最佳燃料流量曲线的形状与逆 L 型近似(图 1),温度分布如图 (2) 所示。仿真结果表明按求得的最佳燃料供应方式进行操作比采用逆 L 型加热方式可降低能耗 5% 左右。说明在未能求解均热炉最佳加热轨迹的情况下,采用逆 L 型加热方式是一种比较合理的方案,但仍需进一步降低能耗。

2) 对无液芯钢锭求得的最佳燃料流量曲线形状也与逆 L 型近似(图 3)。这种加热方式逐渐加大燃料流量,使钢锭温度缓慢上升,以避免内部应力不匀。在接近规定的出炉时间时,燃料流量达到最大,使钢锭表面温度略高于出炉温度。然后迅速减小燃料流量,依靠钢锭表面和内部的温差而造成的热量传递,使其在出炉时刻正好达到均匀的出炉温度。计算表明按这种加热方式比传统的加热方法可节约能耗 10% 左右(图 4)。

四、均热炉计算机最优控制系统

均热炉最小能耗控制问题的研究不但可以综合均热炉的最佳加热制度,而且为开发均热炉的计算机最优控制策略创造了条件。下面提出两种方案。

1. 第一种方案

在离线的情况下,对不同的钢种和规定的工艺条件,在各种钢锭装炉热状态和装炉炉温给定的条件下,按照不同的炉内均热时间,计算出大量的燃料流量最佳设定曲线或炉墙温度最佳设定曲线,然后存入数据库。在线使用时,根据实际的钢锭装炉热状态,取出相应的数据作为均热炉燃料流量或炉温的最佳设定。显然当钢种较多,均热炉的生产调度较为复杂时,数据库是很大的。

2. 第二种方案

由于钢锭从钢水浇入模内到装入均热炉内均热,一般都需要相当一段时间。同时,现已有可能在外界条件给定的情况下,在钢水浇入模内时就预报出装炉时钢锭的热状态^[9]。因此可以在浇模时就将必要的物理参数和调度给定的钢锭传搁时间、脱模时间和均热时间数据送入计算机。据此预报出钢锭装炉热状态,同时求解出最佳加热策略作为钢锭装

炉后均热炉的燃料流量或炉温设定。

均热炉计算机控制系统框图如图 5 所示。

第一种方案需要庞大的数据库，但在线控制时无需占用大量的计算机运算时间。第二种方案则正好相反。因此，具体采用哪一种方案应视实际生产的情况而定，在此不作讨论。

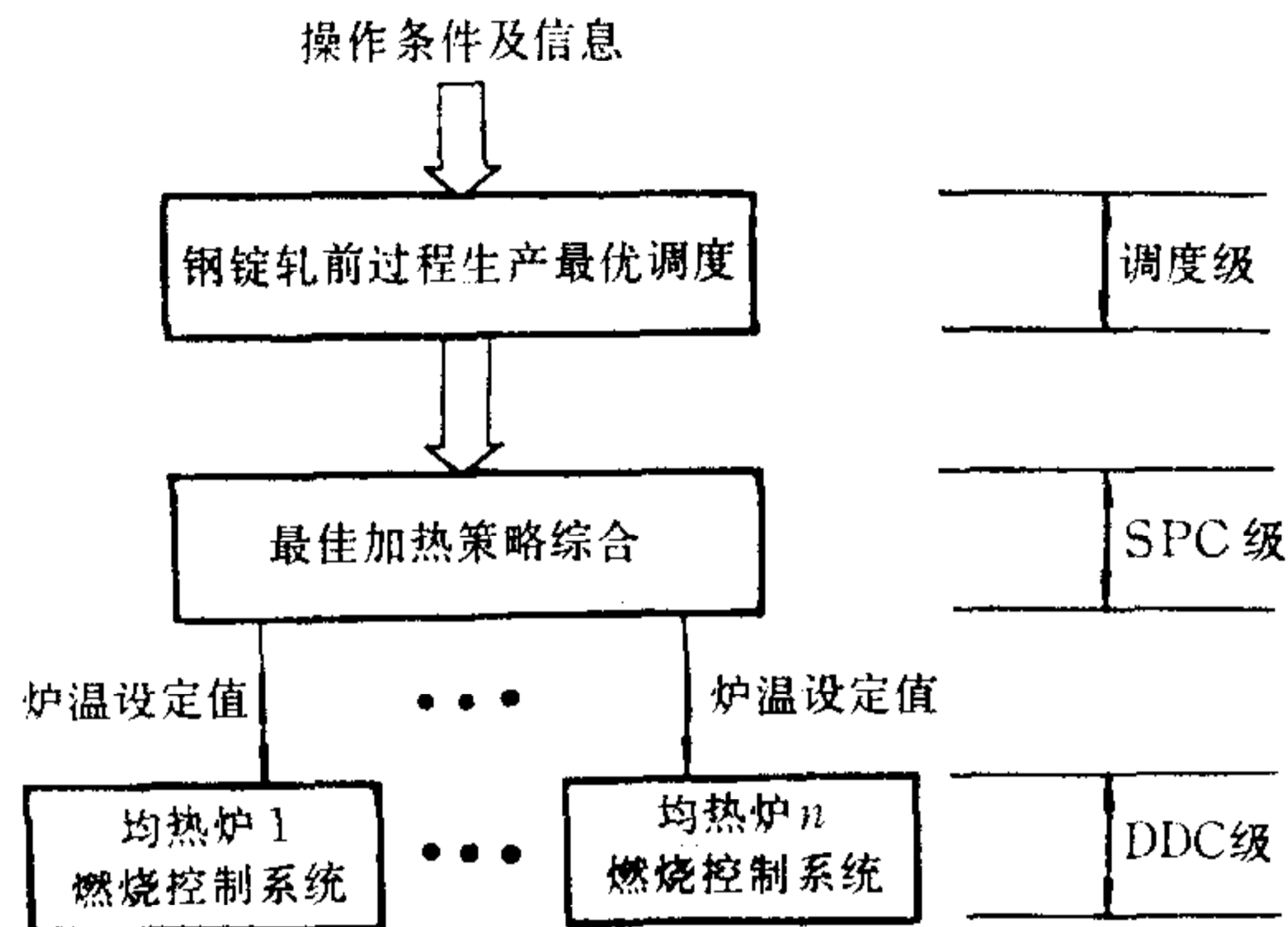


图 5 均热炉系统计算机控制系统框图

五、结 论

本文所开发的均热炉最佳加热策略经仿真试验，表明比现有的各种加热方式，包括比较先进的逆 L 型方式，降低能耗的幅度大，因此可带来较大的经济效益。同时，对这一带有复杂约束条件的高维时变非线性系统最优控制问题的求解，证明了作者提出的新算法所具有的优越性及其在工程应用上的价值。

事实上，均热炉系统生产过程的最小能耗控制，不但与单一炉坑最优控制策略的求解有关，还与整个初轧生产的最优调度有密切的关系。关于这方面的问题，可参见文献 [10]。

参 考 文 献

- [1] Anonymaus, Soaking Pit Controls, *Honeywell Application Notes*, (1978), 331—004.
- [2] Yooichi, T., Kazuo, K., and Yukio, Haga, Reducing Fuel Consumption in Soaking Pit-Inverted -L Type Heating Practice, *Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan*, 19(1979), 776.
- [3] Lu, Yongzai and Williams, T. J., Computer Control Strategies for the Use of Optimal State Feedback Methods for the Control of Steel Mill Soaking Pits, *Proceedings of the Second International Computer Engineering Conference, San Diego, California, August 15—19 (1982)*, 57—66.
- [4] Lu, Yongzai and Williams, T. J., Energy Savings and Productivity Increases with Computers—A Case Study of the Ingot Handling Process, *International Journal of Computers in Industry*, 4 (1983).
- [5] Maeda, Tomohisa and Nachtigal, Chester L., Mathematical Models for Ingot Processing and Their Applications to Control The Soaking Pit Operation, Report No. 69, PLAIC, Purdue University, Indiana, July (1975).
- [6] Cook, J. R., Ellerbrock, D. F., Dcshum, T. R. and Nenni, J. R., Minimization of Fuel Consumption in Soaking Pits Using A Cylindrical Equicalent Model for On-line Estimation of Ingot Thermal Profiles, 3rd Process Technology Conference Application of Math. and Models in Metallurgical In-

- dustry, (1983).
- [7] Longwell, E. J. and Nachtigal, C. L., The Spherical Ingot Model and Its Application to the Control of the Soaking Pit. Report No. 76, PLAIC, Purdue University, Indiana, May 1976.
- [8] Wu Tiejun and Lu Yongzai, An Algorithm for Solving Constrained Optimal Control Problems. Proceedings of International Conference on Industrial Process Modelling and Control, Hangzhou, China, (1985).
- [9] Lu, Yongzai and T. J. Williams, Modeling, Estimation and Control of the Soaking Pit. Instrument Society of America. Research Triangle Park, (1983).
- [10] Huang, Yinlun and Lu, Yongzai, Dynamic Model Based Production Scheduling for Ingot Handling Process. Proceedings of International Conference on Industrial Process Modelling and Control, Hangzhou, China, (1985).

THE DEVELOPMENT OF OPTIMAL HEATING PATTERNS FOR STEEL MILL SOAKING PITS

WU TIEJUN LU YONGZAI
(Zhejiang University)

ABSTRACT

Based on the discrete state space model of the steel mill soaking pits and the new algorithm for dealing with the constrained optimal control proposed by the authors, the optimal heating patterns, i.e., the optimal temperature trajectories, of the soaking pits have been theoretically developed for minimum fuel consumption.

The paper presents the relationship between the operational conditions and the optimal heating patterns of the soaking pits, and the potential economical benefits through using the heating patterns developed.

The proposed development method in this paper can also be applied to the synthesis of the optimal control algorithms for other batch processes as well as the high-dimensional, non-linear and time-varying systems.