

水泥回转窑的计算机控制¹⁾

高玉琦 李友善 马家辰

(哈尔滨工业大学)

摘 要

本文针对我国水泥回转窑的现状,提出了一套可行的模糊控制方案。文中给出了辨识水泥回转窑模糊模型以及量测数据模糊滤波的方法。经两个月的运行实践表明,该控制方案明显地提高了水泥熟料的产量与质量。

关键词: 水泥回转窑,模糊控制,模糊子集,推理合成,模糊滤波。

一、引 言

水泥回转窑是一典型的热工过程,自本世纪六十年代起人们便开始注意它的控制问题,并进行了大量研究工作。这些工作概括起来可分三大类:一是从分析水泥回转窑的生产工艺入手建立理论模型;二是应用系统辨识技术根据水泥回转窑的输入输出数据建立辨识模型;三是基于人工控制经验的总结,建立模糊模型实现模糊控制。由于水泥回转窑的热工过程复杂,具有时变、分布参数和非线性特性,很难精确描述,故理论模型很少得到实际应用。1986年12月,笔者应用动态系统辨识技术为黑龙江省桦南县水泥厂的干法水泥回转窑建立了窑内气流温度的非线性 Hamerstein 辨识模型^[1]。模型输入是喂煤机转速和窑速,输出是烧成带温度和窑尾废气温度。然而,基于辨识模型设计的控制器虽取得了优于人工控制的效果,但也因为辨识模型只能描述部分工况而不具有通用性,因此在实用上受到一定限制。1978年,丹麦学者 Larsen^[2]首次为一条湿法水泥回转窑设计了模糊控制器,并取得成功,从而开辟了水泥回转窑控制的新途径。本文基于模糊数学理论,针对我国水泥回转窑现状,为干法水泥回转窑设计出一套切实可行的模糊控制方案。

二、模糊控制方案的建立

1. 方案

方案是针对规格为 $\phi 2.5 \times 40$ 米,窑尾采用烟道挡板实现自然排风的干法水泥回转窑制定的。基于水泥煅烧工艺和桦南县水泥厂的生产实践,笔者了解到烧成带温度(BZ)

本文于 1989 年 1 月 16 日收到。

1) 本文曾于 1988 年 8 月在中国自动化学会控制理论与应用年会上宣读。

和窑尾废气温度 (BE) 的稳定是保证水泥回转窑热工过程稳定, 生产高质量水泥熟料的重要标志(窑尾废气中的氧含量是反映窑内燃料燃烧状况的重要参数之一, 而目前国内尚无适合分析水泥窑废气的高可靠气体分析仪), 因此笔者采取 BZ 和 BE 为被控制量, 用对 BZ 和 BE 影响显著的窑速 (KS)、喂煤电机转速 (CS) (与喂煤量成比例) 及对窑内通风及温度场影响颇大的窑尾排风挡板位置 (ID) 为控制量的控制方案, 其中水泥生料下料量与窑速、一次风量与喂煤量在水泥煅烧过程中均保持一定比例关系。图 1 为控制方案框图。

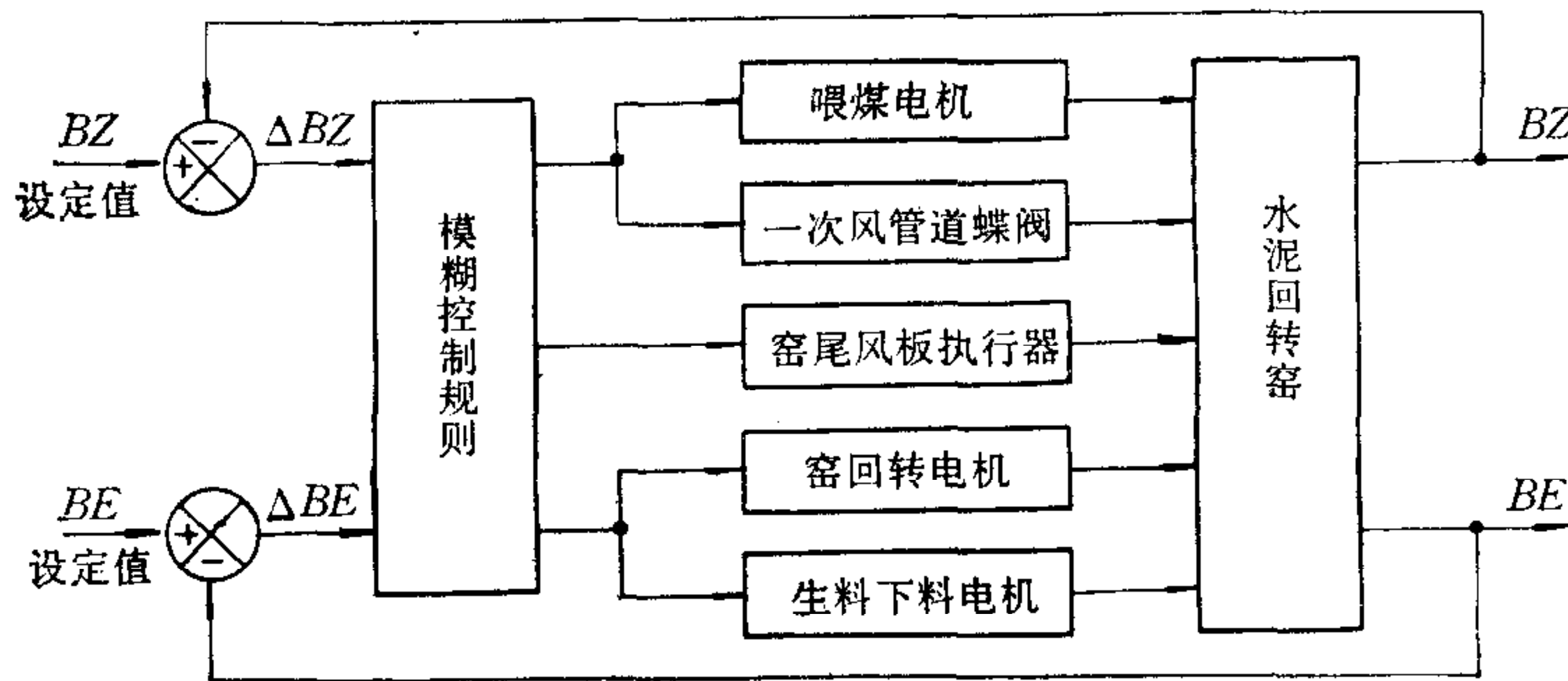


图 1 水泥回转窑控制方案框图

2. 模糊子集的选取

基于文献 [3] 给出的水泥回转窑操作与桦南县水泥厂的具体情况, 分别选取水泥回转窑控制系统被控制量与控制量的模糊子集如下:

BZ : {太低 低 较低 稍低 正常 稍高 较高 高 太高}, 简记 $\{X_1^1 \ X_1^2 \ X_1^3 \ X_1^4 \ X_1^5 \ X_1^6 \ X_1^7 \ X_1^8 \ X_1^9\}$;

BE : {太低 低 正常 高 太高}, 简记 $\{X_2^1 \ X_2^2 \ X_2^3 \ X_2^4 \ X_2^5\}$;

CS : {多减 中减 稍减 保持 稍加 中加 多加}, 简记 $\{y_1^1 \ y_1^2 \ y_1^3 \ y_1^4 \ y_1^5 \ y_1^6 \ y_1^7\}$;

KS : {大慢车 中慢车 小慢车 正常 小快车 中快车 大快车}, 简记 $\{y_2^1 \ y_2^2 \ y_2^3 \ y_2^4 \ y_2^5 \ y_2^6 \ y_2^7\}$;

ID : {降低 不变 提高}, 简记 $\{y_3^1 \ y_3^2 \ y_3^3\}$ 。

3. 模糊模型(控制规则)的辨识

文献 [4] 提出的根据系统输入输出数据应用相关分析法辨识模糊控制的规则, 对于水泥回转窑这种多输入多输出系统, 该法比较复杂。本文应用推理合成法^[5]根据水泥回转窑的实测输入输出数据辨识其模糊控制规则。

设由采集到的 n 组输入输出数据对 $(X_1 \ X_2 \ y_1 \ y_2 \ y_3)$ 中经滤波处理取得 m 组输入输出数据对 ($m < n$)。应用推理合成法, 根据这 m 组实测输入输出数据对为多输入 ($X_1 X_2$) 多输出 ($y_1 \ y_2 \ y_3$) 系统建立模糊控制规则的步骤是:

1) 在被控制量 X_1, X_2 与控制量 y_1, y_2, y_3 论域上建立模糊子集赋值表, 其中各模糊子集在相应基本论域上的隶属度可按正态型分布 $\mu(u) = e^{-\left(\frac{u-a}{b}\right)^2}$ ($b > 0$) 确定。这

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{y_1, y_1^2, i} &= 0.2 \wedge \tilde{R}_{x_2 \times x_1, i} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{y_1, y_1^j, i} &= 0 \wedge \tilde{R}_{x_2 \times x_1, i} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ &\quad (j = 3, 4, \dots, 7), \end{aligned}$$

其次,通过“并”运算求取包括全部 m 组数据对的模糊关系

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{y_1, y_1^1} &= \bigcup_{i=1}^m \tilde{R}_{y_1, y_1^1, i}, \\ &\vdots \\ \tilde{R}_{y_1, y_1^7} &= \bigcup_{i=1}^m \tilde{R}_{y_1, y_1^7, i}. \end{aligned}$$

最后,在选取适当阈值 λ 的情况下 ($\lambda \in [0, 1]$, 本文选 $\lambda = 0.6$), 通过 λ 截集处理¹⁾求得双输入单输出 (X_1, X_2, y_1) 的控制规则 $\tilde{R}_{x_2 \times x_1 \times y_1}$, 如表 1 所示. 同理, 根据 m 组实测输入输出数据对, 可分别求得与表 1 相似的控制规则 $\tilde{R}_{x_2 \times x_1 \times y_2}$ 及 $\tilde{R}_{x_2 \times x_1 \times y_3}$.

表 1 (X_1, X_2, y_1) 控制规则

CS ~		BZ ~								
		X_1^1	X_1^2	X_1^3	X_1^4	X_1^5	X_1^6	X_1^7	X_1^8	X_1^9
BE ~	X_2^1	y_1^6	y_1^6	y_1^6	y_1^6	y_1^5	y_1^5	y_1^4	y_1^3	y_1^3
	X_2^2	y_1^7	y_1^6	y_1^6	y_1^5	y_1^5	y_1^4	y_1^4	y_1^3	y_1^3
	X_2^3	y_1^6	y_1^6	y_1^5	y_1^5	y_1^4	y_1^3	y_1^3	y_1^2	y_1^2
	X_2^4	y_1^6	y_1^6	y_1^5	y_1^4	y_1^4	y_1^3	y_1^3	y_1^2	y_1^2
	X_2^5	y_1^5	y_1^5	y_1^4	y_1^4	y_1^3	y_1^2	y_1^2	y_1^2	y_1^1

3) 综合双输入单输出控制规则 $\tilde{R}_{x_2 \times x_1 \times y_1}$, $\tilde{R}_{x_2 \times x_1 \times y_2}$ 及 $\tilde{R}_{x_2 \times x_1 \times y_3}$, 最终获得基于 m 组实测输入输出数据对建立的水泥回转窑模糊模型, 如表 2 所示.

1) 赵福顺, Fuzzy 控制理论在工业过程控制中的应用研究, 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 1987.

表 2 水泥回转窑模糊模型

CS ~ KS ~ ID ~		BZ ~								
		X ₁ ¹	X ₁ ²	X ₁ ³	X ₁ ⁴	X ₁ ⁵	X ₁ ⁶	X ₁ ⁷	X ₁ ⁸	X ₁ ⁹
BE ~	X ₂ ¹	y ₁ ⁶ y ₂ ¹ y ₃ ³	y ₁ ⁶ y ₂ ¹ y ₃ ³	y ₁ ⁶ y ₂ ² y ₃ ³	y ₁ ⁶ y ₂ ² y ₃ ³	y ₁ ⁵ y ₂ ² y ₃ ³	y ₁ ⁵ y ₂ ³ y ₃ ³	y ₁ ⁴ y ₂ ³ y ₃ ³	y ₁ ³ y ₂ ³ y ₃ ³	y ₁ ³ y ₂ ³ y ₃ ⁸
	X ₂ ²	y ₁ ⁷ y ₂ ² y ₃ ³	y ₁ ⁶ y ₂ ² y ₃ ²	y ₁ ⁶ y ₂ ² y ₃ ³	y ₁ ⁵ y ₂ ³ y ₃ ³	y ₁ ⁵ y ₂ ³ y ₃ ³	y ₁ ⁴ y ₂ ³ y ₃ ³	y ₁ ⁴ y ₂ ⁴ y ₃ ⁸	y ₁ ³ y ₂ ⁴ y ₃ ³	y ₁ ⁸ y ₂ ⁵ y ₃ ³
	X ₂ ³	y ₁ ⁶ y ₂ ³ y ₃ ³	y ₁ ⁶ y ₂ ³ y ₃ ²	y ₁ ⁵ y ₂ ³ y ₃ ²	y ₁ ⁵ y ₂ ⁴ y ₃ ²	y ₁ ⁴ y ₂ ⁴ y ₃ ²	y ₁ ³ y ₂ ⁴ y ₃ ²	y ₁ ³ y ₂ ⁵ y ₃ ²	y ₁ ² y ₂ ⁵ y ₃ ²	y ₁ ² y ₂ ⁵ y ₃ ⁸
	X ₂ ⁴	y ₁ ⁶ y ₂ ³ y ₃ ¹	y ₁ ⁶ y ₂ ⁴ y ₃ ¹	y ₁ ⁵ y ₂ ⁴ y ₃ ²	y ₁ ⁴ y ₂ ⁴ y ₃ ²	y ₁ ⁴ y ₂ ⁵ y ₃ ²	y ₁ ³ y ₂ ⁵ y ₃ ²	y ₁ ³ y ₂ ⁶ y ₃ ²	y ₁ ² y ₂ ⁶ y ₃ ²	y ₁ ² y ₂ ⁷ y ₃ ²
	X ₂ ⁵	y ₁ ⁵ y ₂ ⁴ y ₃ ¹	y ₁ ⁵ y ₂ ⁵ y ₃ ¹	y ₁ ⁴ y ₂ ⁵ y ₃ ¹	y ₁ ⁴ y ₂ ⁵ y ₃ ¹	y ₁ ³ y ₂ ⁶ y ₃ ¹	y ₁ ² y ₂ ⁶ y ₃ ¹	y ₁ ² y ₂ ⁶ y ₃ ⁸	y ₁ ² y ₂ ⁷ y ₃ ²	y ₁ ¹ y ₂ ⁷ y ₃ ²

4. 模糊滤波

如果采集的输入输出数据对受到噪声(包括过程噪声及量测噪声)污染,则会使其部分输入输出模糊量内含的模糊关系与系统的真实模糊模型不一致.例如,真实模糊关系应是 if 输入 \underline{X}_1 为(太低)和输入 \underline{X}_2 为(高), then 输出 \underline{y}_1 为(稍加);受噪声污染的模糊关系可能是 if \underline{X}_1 为(太低)和 \underline{X}_2 为(高), then \underline{y}_1 为(稍减),从而影响辨识模型的精度.但如将属于或接近于(视其隶属度大小) \underline{X}_1 为(太低)和 \underline{X}_2 为(高)的所有输入输出模糊量数据对归为一类,并按一定方式构成新模糊集去辨识模糊模型,则可滤掉噪声影响.这便是模糊滤波的基本思想.

模糊聚类分析是实现模糊滤波的一种有效方法,其步骤是(参阅赵福顺硕士论文)

1) 构造分类样本集

将采集的系统精确量输入输出数据对 $(X_1 X_2 y_1)_k$ 转化为模糊量输入输出数据对 $(\underline{X}_1 \underline{X}_2 \underline{y}_1)_k$, 记为 $\underline{z}_k = [X_{1k}^1 \cdots X_{1k}^9 X_{2k}^1 \cdots X_{2k}^5 y_{1k}^1 \cdots y_{1k}^7]_{1 \times 21}$ ($k = 1, 2, \dots, n$). 于是,构造出分类样本集 $\underline{z} = [\underline{z}_1 \underline{z}_2 \cdots \underline{z}_n]^T$, 其中 n 为采集的输入输出数据对数目. 本文中的 $n = 288$.

2) 选取初始分类个数

设 \underline{X}_1 与 \underline{X}_2 的模糊子集个数分别为 p 与 q , 则初始分类个数 $c = p \times q$. 本文中的 $c = 9 \times 5 = 45$.

3) 选取初始分类阵 $U^{(0)}$

利用观察法选取 $c \times n$ 阶初始分类阵 $U^{(0)}$, 它应满足下列条件:

(i) $u_{ij}^{(0)} \in \{0, 1\}$, $\forall i, j, i = 1, 2, \dots, c; j = 1, 2, \dots, n$;

(ii) $\sum_{i=1}^c u_{ij}^{(0)} = 1, \forall j$, 保证每一样本只属于某一类,而且一定属于其中的一类;

(iii) $\sum_{j=1}^n u_{ij}^{(0)} > 0, \forall i$, 保证每一类不空.

4) 计算初始聚类中心 $v_i^{(0)}$

基于重心法,求得 1×21 阶行向量

$$v_i^{(0)} = \sum_{k=1}^n u_{ik}^{(0)} \underline{z}_k / \sum_{k=1}^n u_{ik}^{(0)}, i = 1, 2, \dots, c.$$

5) 计算分类阵 U

$$u_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{if } \|\tilde{z}_k - u_i^{(0)}\| = \min_{j \in [1,c]} \|\tilde{z}_k - u_j^{(0)}\|, \\ 0, & \text{其它,} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, c; k = 1, 2, \dots, n.$$

6) 判断分类结果

选取分类准则 $L = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n |u_{ij} - u_{ij}^{(0)}|$ 。如果 $L \leq \varepsilon$ ，则 U 阵便是最终分类结果；

否则，用所得之 U 阵代替 $U^{(0)}$ 阵转向第 4 步进行又一次迭代过程， ε 为代表分类精度的预先指定的微小正数。

7) 噪声处理

根据最终分类阵 U ，将属于同一类的模糊量输入输出数据对 $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{y}_1)$ 通过相应隶属度求和进行线性叠加并取平均，便得出经噪声处理的模糊量输入输出数据对 $(\tilde{x}'_1, \tilde{x}'_2, \tilde{y}'_1)_i, i = 1, 2, \dots, c$ 。

至此，模糊滤波过程结束。

三、控制系统实现

水泥回转窑计算机控制系统框图如图 2 所示。其中主机选用以 Intel 8086 为 CPU 并配有 iRMX 86 实时多任务操作系统的 Intel 86/360 微型计算机。iRMX 86 操作系统具有利用多任务简化和处理实时事件的功能，通过主模块建立起若干子任务，当子任务建立起来之后，它总是处于五种状态，即就绪状态、运行状态、睡眠状态、挂起状态和睡眠挂起状态当中的一种。本系统也正是利用各子任务处于不同状态来实现实时过程控制的，其程序框图示于图 3。其中任务 1 为采

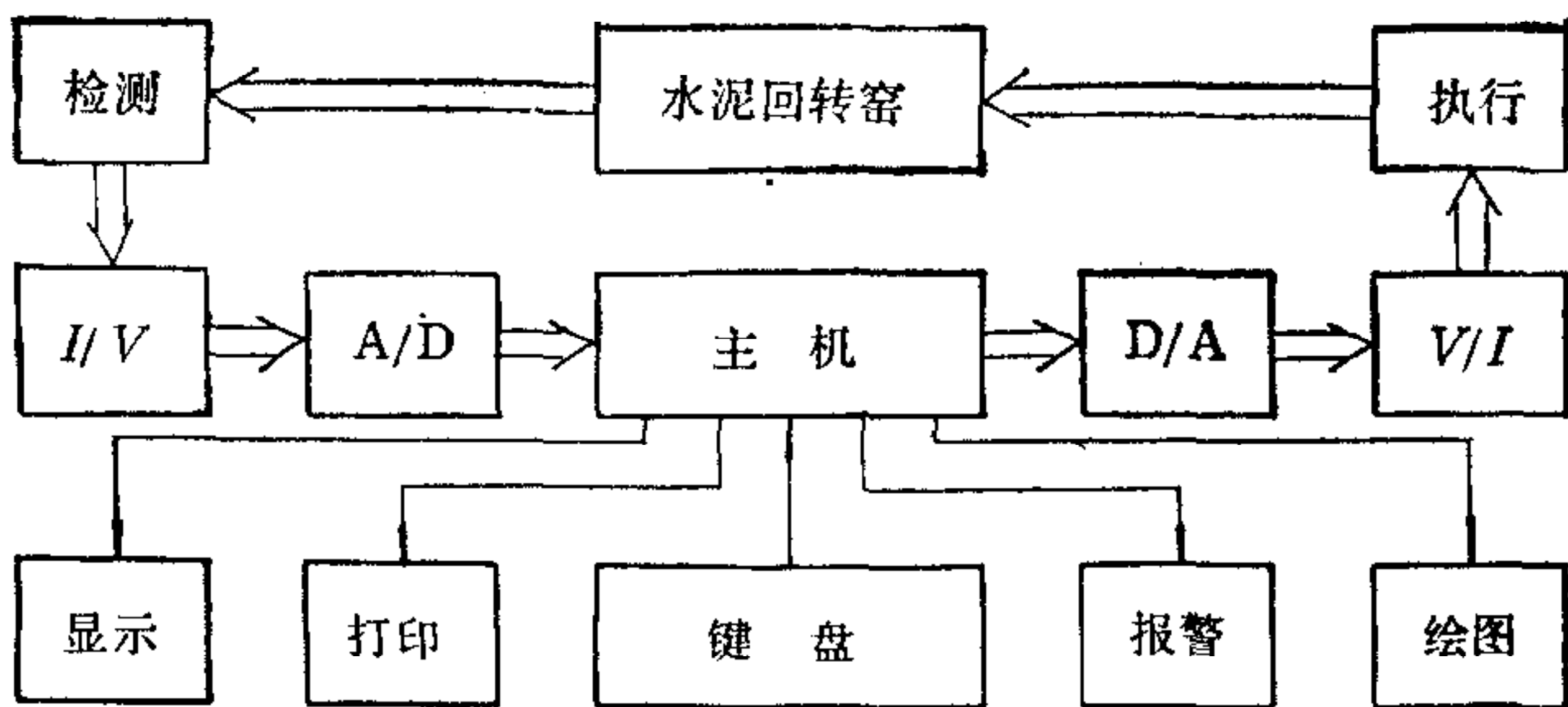


图 2 水泥回转窑计算机控制系统框图

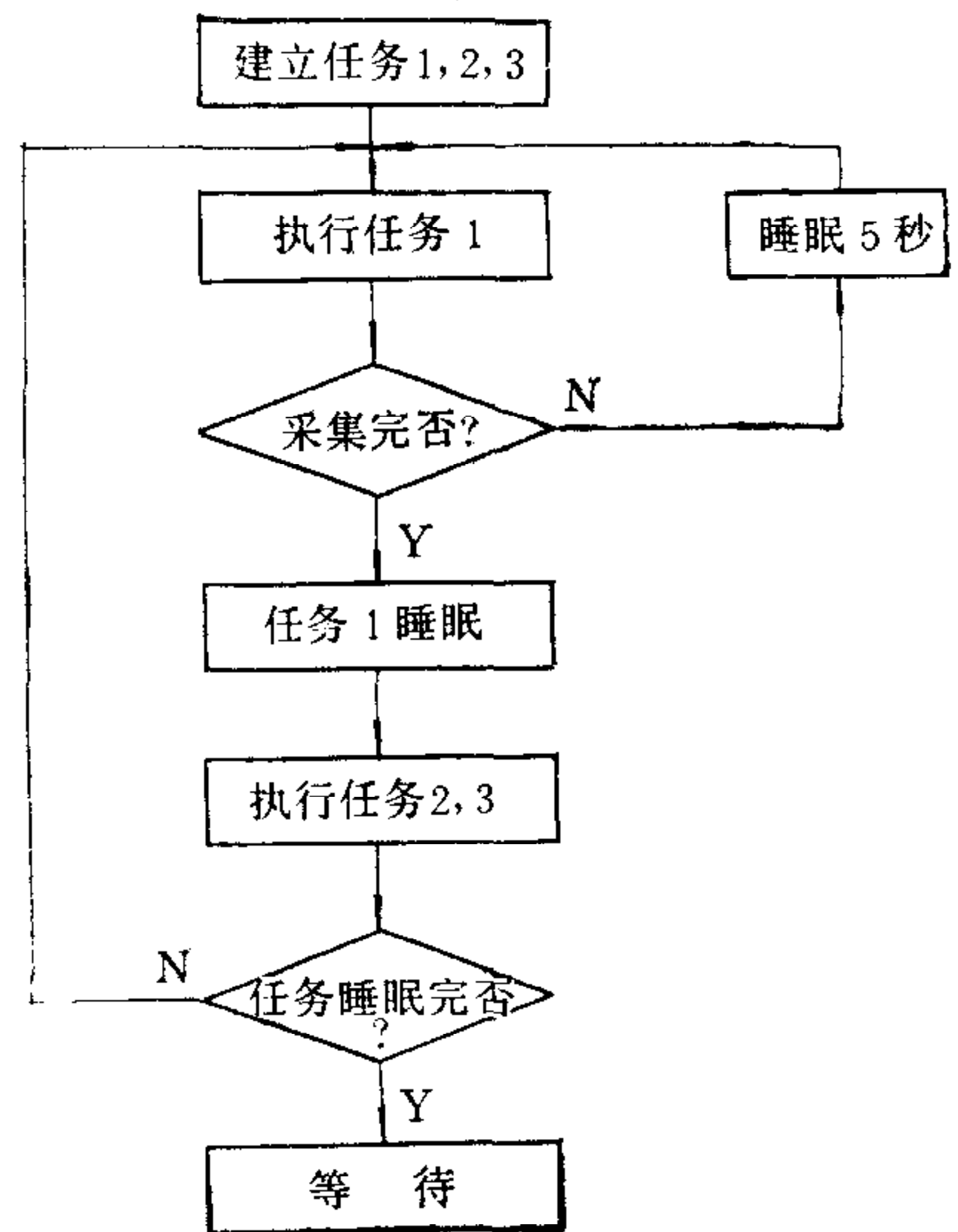


图 3 水泥回转窑计算机控制程序框图

集数据，任务 2 为显示、处理数据，任务 3 为执行控制算法并输出。

本系统的采样周期选为 150 秒。为消除噪声影响，在每个采样周期开始时，以间隔 5 秒连续采集 32 组数据，并经适当数据处理后输出采样数据。本系统所采集的数据除烧成带温度及窑尾废气温度外，还包括窑头温度，窑尾负压，一次风温度、压力、流量与二次风

温。根据采集到的上述信息可以方便地修改模糊量化因子，监视窑内工况与及时发出报警信号。

四、控制效果

本系统于 1987 年 7 月在黑龙江省桦南县水泥厂干法水泥回转窑投入运行。根据当年 7 月 1 日至 8 月 20 日期间取得的计算机控制运行数据与 1986 年同期人工控制相比，整理出该厂水泥回转窑实现计算机控制后取得的效果如表 3 所示。

表 3 水泥回转窑计算机控制与人工控制效果对照表

	总产量 (吨)	平均日产量 (吨/日)	平均台时产量 (吨/小时)	fCaO (%)	平均三天耐压强度 (kg/cm ²)	平均三天抗折强度 (kg/cm ²)
1987.7.1 —8.20	7932.03	155.53	7.05	1.93	293.92	60.54
1986.7.1 —8.20	7158.00	140.35	6.30	2.08	271.23	56.38
增量或 %	774.03	15.18 (11%)	0.75 (11.9%)	-7.2%	8.4%	7.4%

从表 3 可见，水泥回转窑计算机控制的效果在提高产量和质量方面是明显的。此外，运行结果还表明，水泥回转窑实现计算机控制后其稳定性显著提高，熟料立升重的控制也比较理想，煤耗有所下降，每吨熟料平均降低煤耗近 34 kg，约 15%。

图 4 所示为 1987 年 8 月 16 日零点至八点班记录的典型控制曲线。

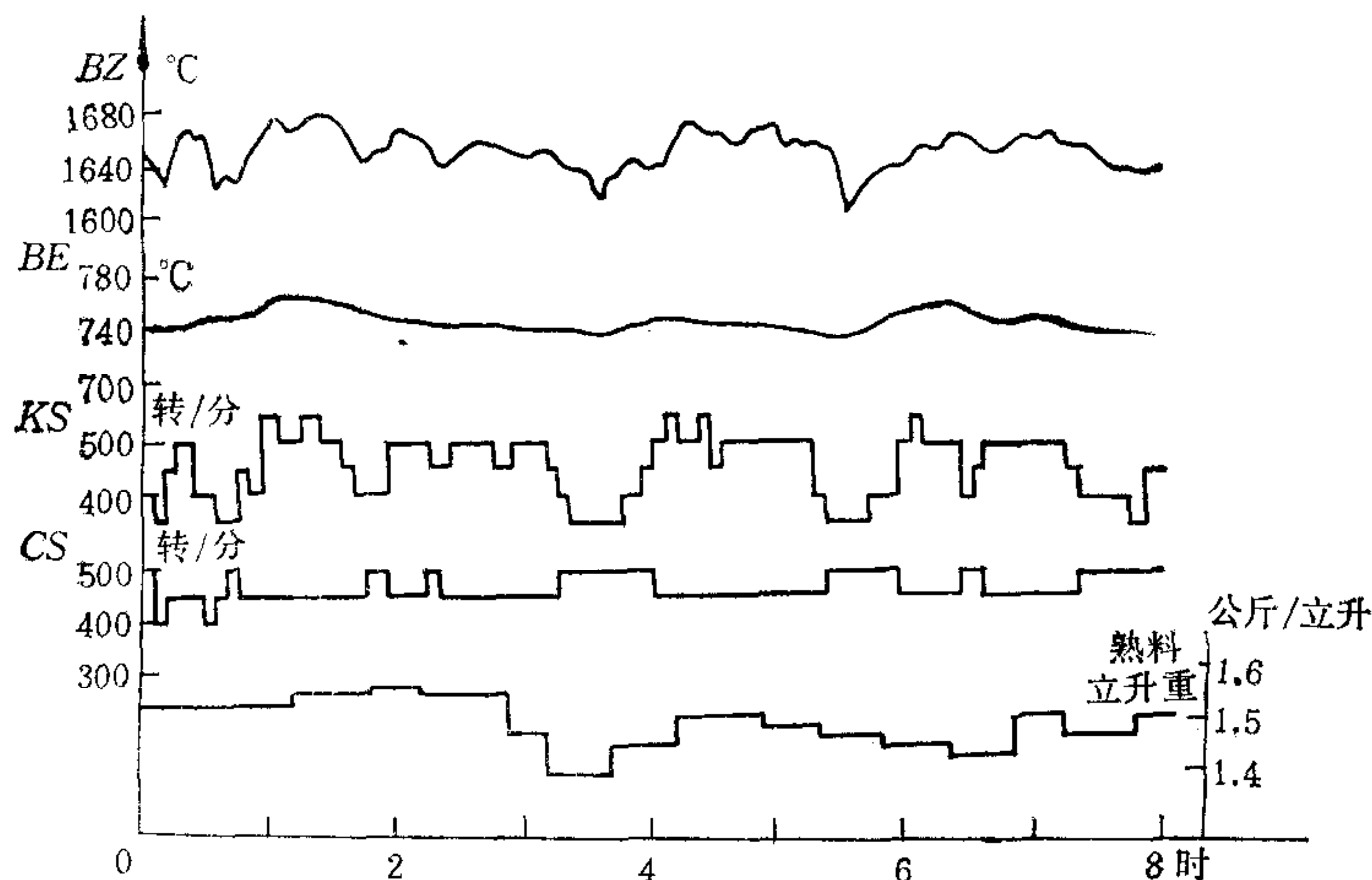


图 4 水泥回转窑的典型控制曲线

五、结 论

通过黑龙江省桦南县水泥厂干法水泥回转窑实现计算机模糊控制取得提高水泥熟料产量与质量、降低煤耗、提高经济效益的事实，证明本文提出的模糊控制方案是合理的、可

行的。本系统的设计完全立足于目前国内现状,投资少,效益大,当年即可收回全部投资。但也必须说明,因受当前国内传感器发展的限制,本系统与国外同类系统相比,取得的信息较少,以及控制算法还有待于从理论上和实践上进一步完善与扩展,因此它对周围环境条件(包括料与煤)大幅度变化的适应能力还不够强,尚需继续研究。

参 考 文 献

- [1] Li Youshan, Chen Shanben, Identification of Models for a Cement Rotary Kiln, Proceedings of the 8th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation, 2(1988), 711—716.
- [2] Larsen, P., Industrial Application of Fuzzy Logic Control, *Int. J. Man-Mach. Stud.*, 12(1980), 3—10.
- [3] 华新水泥厂编译组,水泥回转窑的操作,中国建筑工业出版社(1977).
- [4] 李宝绶、刘志俊,用模糊理论测辨系统的模型,信息与控制, (1980),3,32—38.

COMPUTER CONTROL OF ROTARY CEMENT KILN

Gao Yuqi Li Youshan Ma Jiachen

(Harbin Institute of Technology)

ABSTRACT

This paper reports a fuzzy controller for a rotary cement kiln. Identification of the fuzzy model and filtering of the measured data will be described. Two months' test running has shown that the controller is beneficial to both quality control and productivity improvement.

Key words: Fuzzy control; fuzzy sets; reasoning and composition; fuzzy filtering; rotary cement kiln.