

FUZZY 控制理论在水泥机立窑 煅烧过程的应用

袁铸钢 王孝红 孟庆金 景绍洪 高云深

(山东建材学院信息与控制工程系 济南 250022)

摘 要 针对水泥机立窑数学模型过于复杂且难以建立的特点,提出了以稳定底火为目标的微机模糊控制方案.对立窑底火进行了系统划分,给出了底火状态的模糊定义,并提出了一种多变量多级混合模型的识别方法.在总结人工操作经验的基础上经优化处理制定了稳定底火的模糊控制规则.为了简化计算过程,采用一种简单实用的模糊推理合成算法.计算机控制系统的实际运行表明了该控制方案的正确性和实用性.

关键词 水泥立窑, FUZZY 控制, 底火, FUZZY 子集, 推理合成.

THE APPLICATION OF FUZZY CONTROL THEORY FOR BURNING PROCESS IN MECHANIZED SHAFT CEMENT KILN

YUAN Zhugang WANG Xiaohong MENG Qingjin JING Shaohong GAO Yunshen

(Dept. of Information and Control Engineering, Shandong Institute of
Building Materials, Jinan 250022)

Abstract Since the math model of mechanized cement kiln is very complicated and difficult to establish, a fuzzy control scheme with microcomputer for a steady burning zone is proposed in this paper. The burning zone's state is systematically divided and its definition is given in terms of fuzzy concept. In order to determine the burning zone's state, an identification method of multivariable and multigrade mixed fuzzy model is presented. Based on generalization and summation of human operating experience, the fuzzy control regulations of stabilizing the burning zone's state are obtained by optimization. To simplify the calculation, a simple and practical fuzzy reasoning method is put forward. By practical operating result of the control system with microcomputer, the correctness and practicability of this fuzzy control project are testified.

Key words Shaft cement kiln, fuzzy control, burning zone, fuzzy subset, fuzzy reasoning.

1 引 言

水泥立窑生产过程的对象属于多变量、时变和具有分布参数的非线性系统,其精确的数学模型难以建立.目前窑的控制多为手动控制.由于工艺复杂、干扰大、控制动作频繁,控制方式强烈地依赖操作人员的估计、经验和责任心,使调节品质极不稳定.本文提出的水泥立窑 FUZZY 控制方案,为解决上述问题提供了一条有效的途径.

该系统通过检测窑壁温度、熟料温度、烟气温度的风压、风量等收集有关底火信息,采用 FUZZY 逻辑控制算法进行决策,同时引入腰风、底风、卸料等自动调节装置对窑的煅烧过程进行有效控制.

有关 FUZZY 控制的相关知识,请参阅文献[1—4],在此不予详述.

2 FUZZY 控制方案的建立

2.1 方案

一般把立窑内物料燃烧的高温区称为底火,它是窑内处于预热带与冷却带之间、由高温物料组成、有一定形状、边界不明确、自身向上发展又随卸料向下运动的一个对象.以传感底火为中心,以控制和稳定底火状态为目的,我们选取的检测量、控制量及其作用如表1所示.

表1 检测量、控制量及其作用

检测量及控制量		作用
检 测 量	窑壁温度	上层窑壁温度 检测底火上部温度,反映底火的上部位置
		下层窑壁温度 检测底火下部温度,反映底火的下部位置
量		熟料温度 检测出窑熟料温度,反映底火拉深程度
		废气温度 检测出窑废气温度,反映湿料层的厚度
		进风风压 反映窑内阻力大小、通风情况
		进风量 间接反映窑内阻力大小、通风情况
控 制 量		卸料速度 控制底火下移的快慢
		放风阀开度 控制底火上移的快慢
		腰风阀开度 控制底火某一区位向上移动,调整偏火

一般,立窑可控量有卸料速度、底风放风阀开度等.为了更有效地调整偏火,经实地考察和充分论证,在立窑生产中引入腰风自动调节系统.即在下层测温点对应位置上设置风嘴和调节阀,通过改变阀门的开度调整腰风风量的大小.

综上所述,水泥立窑计算机 FUZZY 控制的方案框图如图1所示.

2.2 FUZZY 论域及 FUZZY 子集的选取

根据水泥立窑操作过程及工人的经验,被控量 FUZZY 论域为 $[-10, +10]$,在 $[-10, +10]$ 之间分为21档,即 $\{-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7, +8, +9, +10\}$,其对应的 FUZZY 子集为{低,正好,高},简记为{LOW, OK, HIGH};控制量的 FUZZY 论域与被控量相同,其对应的 FUZZY 子集为{负大,负中,负小,负零,零,正零,正小,正中,正大},简记为{NL, NM, NS, NO, O, PO, PS,

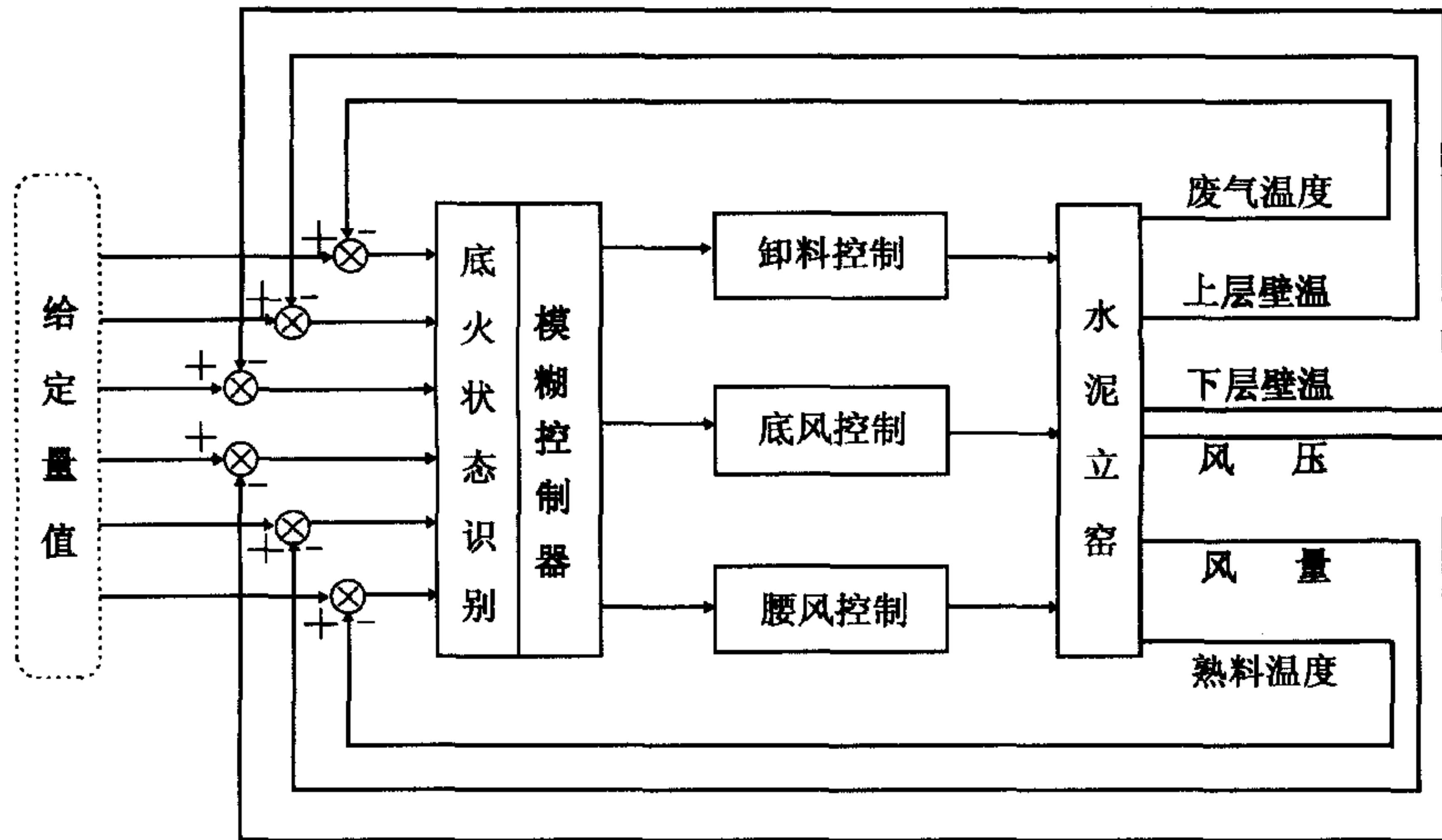


图1 水泥立窑计算机 FUZZY 控制方案框图

PM, PL}.

2.3 底火状态的 FUZZY 定义

根据工人的操作经验,结合被控量的选取情况,取上层窑壁平均温度 T_{sp} 、下层窑壁平均温度 T_{xp} 、废气温度 T_f 、熟料温度 T_s 、上层最高最低温度差 T_{sc} 、下层最高最低温度差 T_{xc} 六个量作为定义底火的因素,即

$$T = \{T_{sp}, T_{xp}, T_f, T_s, T_{sc}, T_{xc}\}.$$

结合各检测量的语言描述,参照2.2节中 FUZZY 子集的选取情况,定义这六个量的模糊子集为

$$\underline{T}_{sp}, \underline{T}_{xp}, \underline{T}_f, \underline{T}_s: \{LOW, OK, HIGH\},$$

$$\underline{T}_{sc}, \underline{T}_{xc}: \{OK, HIGH\},$$

则底火状态模型 \underline{T} 可表示为

$$\underline{T} = \{\underline{T}_{sp}, \underline{T}_{xp}, \underline{T}_f, \underline{T}_s, \underline{T}_{sc}, \underline{T}_{xc}\}.$$

由此可得典型底火状态的 FUZZY 定义如表2所示(详见文献[5]).

表2 典型底火状态的模糊定义

编号	\underline{T}	\underline{T}_{sp}	\underline{T}_{xp}	\underline{T}_f	\underline{T}_s	\underline{T}_{sc}	\underline{T}_{xc}
1	正常底火	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2	上移底火	HIGH	LOW	HIGH	LOW	OK	OK
3	下移底火	LOW	HIGH	LOW	HIGH	OK	OK
4	高温底火	HIGH	\overline{HIGH}	\overline{LOW}	LOW	OK	OK
5	底温底火	LOW	\overline{LOW}	\overline{HIGH}	HIGH	OK	OK
6	全厚底火	HIGH	HIGH	HIGH	HIGH	OK	OK
7	上厚底火	HIGH	OK	HIGH	OK	OK	OK
8	下厚底火	OK	HIGH	OK	HIGH	OK	OK
9	中薄底火	LOW	LOW	LOW	LOW	OK	OK
10	上薄底火	OK	LOW	OK	LOW	OK	OK
11	下薄底火	LOW	OK	LOW	OK	OK	OK
12	上偏底火	OK	OK	OK	OK	HIGH	OK
13	下偏底火	OK	OK	OK	OK	OK	HIGH
14	中心火柱	OK	OK	OK	HIGH	OK	OK

2.4 底火状态的 FUZZY 识别

由上可知,底火状态模型 T 是一个六元素的模型,因为 T_{sp}, T_{xp}, T_f, T_s 均取 LOW, OK, HIGH 三个模糊值,而 T_{sc}, T_{xc} 均取 OK, HIGH 两个模糊值,故称该类模型为多级多变量的混合模型. 由排列组合可知,共有 $3^4 \times 2^2$ 个状态. 但由于其中有些状态不可能出现,有些状态可以由几种状态合成,根据实践经验,经过优化处理,取以上十四种底火状态作为研究的基础.

若用 DH 代表底火状态集合, dh 代表底火的具体形态,且令 1~14 与各底火状态相对应,即

$$DH = \{dh | dh = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14\} =$$

{正常底火, 上移底火, 下移底火, 高温底火, 低温底火, 全厚底火, 上厚底火, 下厚底火, 中薄底火, 上薄底火, 下薄底火, 上偏底火, 下偏底火, 中心火柱}.

在被控量与控制量论域上建立 FUZZY 子集赋值表, 其中各 FUZZY 子集在相应基本论域上隶属度可按正态分布函数

$$\mu(x) = 1 - \text{EXP}[-(a/|c-x|)^b] \quad (1)$$

确定(其中 a, b, c 对某一 FUZZY 子集为常量). 对于任意一组检测量均可求得

$$T = X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$$

其中任一元素 $x_i (i=1\sim 6)$ 均可映射到 $[-10, +10]$ 上, 再由隶属度函数(1)求得该元素对 FUZZY 子集的隶属度. 由 2.3 节知各种底火状态均用各检测量 x_i 在其论域上的 FUZZY 术语来定义, 现以各检测量对 FUZZY 术语的隶属度来代替, 可得到一个新的向量 $Y_j (j$ 表示第 j 种底火状态). Y_j 能充分体现该组检测量对于 j 种底火的隶属特性. 其隶属度应以各种底火状态对各种检测量的重视程度而定.

若设 $\mu_j(X)$ 为向量 X 属于 j 种底火的隶属度, $Y_j = \{y_{ij}\}$ (其中 y_{ij} 表示检测量 x_i 对于 j 种底火状态中第 i 个 FUZZY 子集的隶属程度), 则

$$\mu_j(X) = \begin{cases} y_{1j} \wedge y_{2j} \wedge y_{3j} \wedge y_{4j} \wedge y_{5j} \wedge y_{6j} & (j = 1, 14), \\ \frac{\alpha_{1j} * (y_{1j} \wedge y_{2j} \wedge y_{3j}) + \alpha_{2j} * y_{4j} + \alpha_{3j} * y_{5j} + \alpha_{4j} * y_{6j}}{\alpha_{1j} + \alpha_{2j} + \alpha_{3j} + \alpha_{4j}} & (j \in [2, 13]), \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\alpha_{ij} (j=1\sim 14, i=1\sim 4)$ 为权系数.

首先要说明, $\mu_j(X)$ 的确定与实际经验密切联系不可分割. 现以山东某水泥厂为例, 得到 α_{ij} 的取值如表 3 所示(详细情况可参阅文献[5]). 得到 $\mu_j(X)$ 就确定了 X 向量所表示的底火状态, 依此就可以采取措施使立窑烧成稳定.

表3 权系数 α_{ij} 的取值

$i \backslash j$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0
2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.8	0	0.5	0.8	0.5	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1

2.5 FUZZY 控制器设计

现根据底火状态和稳定底火途径设计 FUZZY 控制器.

2.5.1 水泥立窑底火状态的 FUZZY 控制规则

结合各种底火状态的处理原则和实际操作经验经优化得到表4所示的 FUZZY 控制规则.

表4 底火状态的 FUZZY 控制规则

编号	底火状态	卸料控制	底风控制	腰风控制	人工处理 ¹⁾
1	正常底火	O	PO	O	
2	上移底火	PL	O	PS	增加喂料
3	下移底火	NS	PL	O	减少喂料
4	高温底火	O	NS	O	通知车间减煤
5	低温底火	O	PS	O	通知车间加煤
6	全厚底火	PM	PL	O	提高煤粉细度
7	上厚底火	PL	PO	O	提高煤粉细度
8	下厚底火	NM	PL	O	提高煤粉细度
9	中薄底火	PS	PM	O	降低煤粉细度
10	上薄底火	PM	PS	O	降低煤粉细度
11	下薄底火	O	PS	O	降低煤粉细度
12	上偏底火	O	O	O	引风、压料、引火
13	下偏底火	O	PS	PL ²⁾	
14	中心火柱	NL	PO	O	

1) 目前一些情况尚需人工处理。2) 下偏底火控制问题将另文给出。

2.5.2 控制量 FUZZY 值的确定

上面得到了14种底火状态的控制规则,对这14种以外的底火状态一般可以用上面14条规则为基础进行推理合成,得到相应的 FUZZY 控制量.但构造这14条规则的 FUZZY 关系是一个很大的工程,在每次控制之前的推理合成运算又是一个不小的工作量,对于实时控制不太适应.

我们知道,控制规则中的控制部分所代表的控制动作(如 PL),其隶属度函数是由一个 21×1 的矩阵来近似的,这21个元素由隶属度函数(1)求出.

对于每一个控制变量, FUZZY 控制规则的结果是一由隶属度函数来表达的控制动作.该控制规则确定的控制动作对当前状态是否充分有效,与当前状态和该规则的条件相似程度有关.据此,我们用下式来估算第 j 条规则确定的控制动作对现底火状态控制动作的贡献,即

$$\mu_{\Delta R}^{(j)} = C_j * \mu_{\Delta}^{(j)}. \quad (3)$$

上式中 C_j 为现状态对该规则条件的隶属程度; $\mu_{\Delta}^{(j)}$ 为该规则控制部分确定的基本术语的 21×1 矩阵; $\mu_{\Delta R}^{(j)}$ 为该规则确定的控制动作对现状态控制动作的贡献,也为 21×1 矩阵,它代表控制动作的隶属函数.

根据 n 个控制规则的代表隶属函数估算得出的控制动作是对每条规则的结果采用“或”运算进行综合后建立的,即

$$\mu_{\Delta R} = \mu_{\Delta R}^{(1)} \text{ OR } \mu_{\Delta R}^{(2)} \text{ OR } \dots \text{ OR } \mu_{\Delta R}^{(n)}. \quad (4)$$

在本系统中, $n=14$, $C_j = \mu_j(X)$. 例如, $\mu_1(X) = 0.9$, $\mu_2(X) = 0.2$, $\mu_j(X) = 0 (j=3 \sim 14)$, 结合表4及式(4)得到卸料控制量的隶属函数为

$$\mu_{\Delta R} = 0.9 * \mu_O \text{ OR } 0.2 * \mu_{PL} \text{ OR } 0.0 * \mu_{NS} \text{ OR } \dots \text{ OR } 0.0 * \mu_{NL};$$

底风控制量的隶属函数为

$$\mu_{\Delta R} = 0.9 * \mu_{PO} \text{ OR } 0.2 * \mu_O \text{ OR } 0.0 * \mu_{PL} \text{ OR} \dots \text{OR } 0.0 * \mu_{PO}.$$

由于现状态对底火状态1的隶属度为0.9,所以几乎全力取第一条规则对应的控制量,同时考虑了第二条规则的影响,而第三到第十四条规则根本不起作用.

2.5.3 决策

由2.5.2节得到的控制量是一个 21×1 的隶属函数矩阵.其代表的控制动作的精确量为平分 $\mu_{\Delta R}$ 曲线下面积所对应的横坐标的值.亦即采用重心法进行决策.

3 控制系统实现

水泥立窑计算机 FUZZY 控制系统实现框图如图2示,程序框图如图3所示.

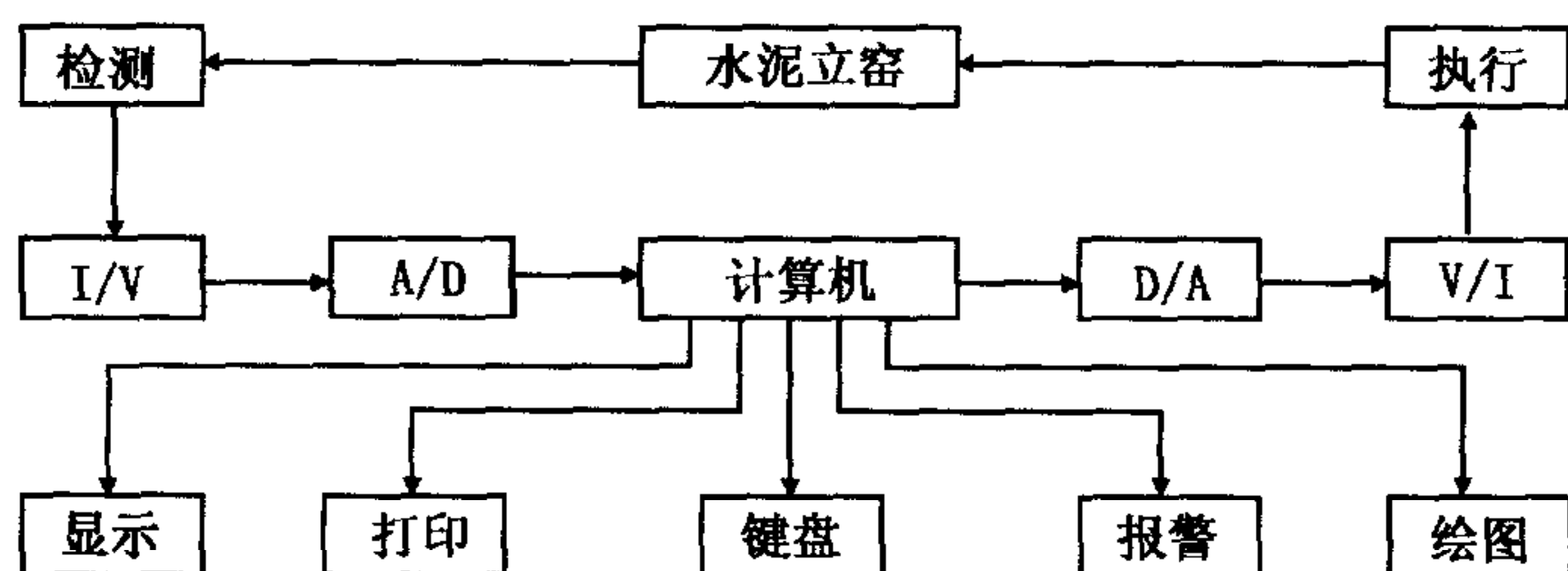


图2 水泥立窑计算机 FUZZY 控制系统框图

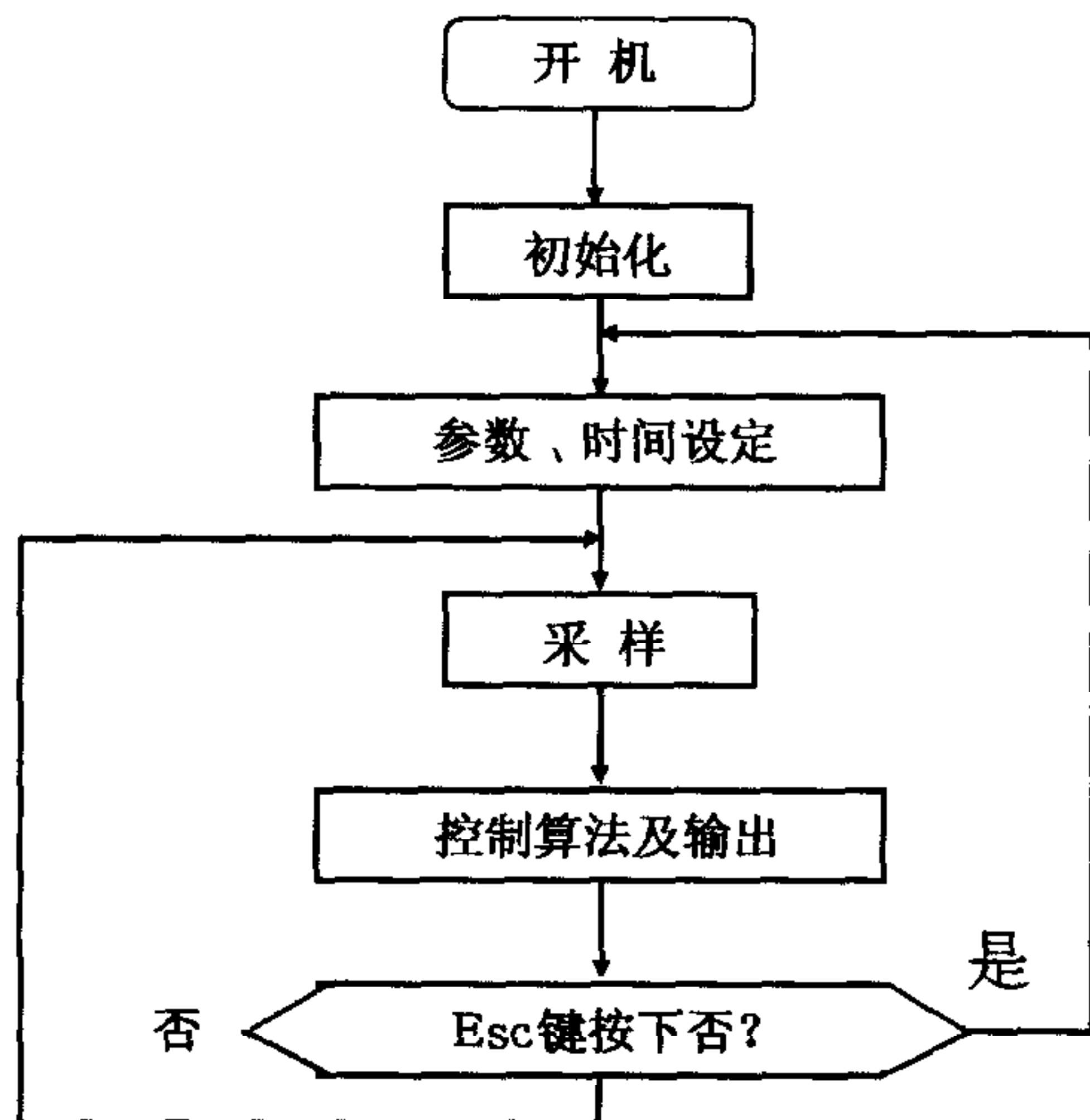


图3 水泥立窑 FUZZY 控制程序框图

本系统中各温度信号由于变化较慢,采样周期选为60s;而风压、风量变化较快,采样周期选为1s.为消除噪声影响,温度信号在每个采样周期内,以间隔1s采集60组数据,经适当处理后作为采样数据;而风压、风量信号则在每次采样时连续采集10个数据经适当处理后作为采样数据.根据采样数据监视和控制立窑生产过程并及时发出报警信号.

4 控制效果

本系统投入运行后,立窑底火在微机控制下达到了稳定,窑内各种不正常底火能及时得到调整,杜绝了恶性喷塌窑事故的发生,减轻了工人劳动强度,做到安全文明生产;熟料质量提高20~30#,游离钙下降;台时产量提高15%左右,每吨熟料可节电2.87度,每年每台可增加利润40万元左右.

5 结论

水泥立窑 FUZZY 控制系统的使用,实现了水泥立窑生产的自动化,达到了提高水泥熟料产量和质量、降低能耗的目的,取得了一定的经济效益和社会效益,证明本文提出的 FUZZY 控制方案是合理的和实用的.

参 考 文 献

- 1 龙升照,汪培庄. FUZZY 控制规则的自调整问题. 模糊数学,1982,2(3):105~112
- 2 李士勇. 模糊控制和智能控制理论与应用. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990. 12
- 3 [美]L. A. 扎德著. 模糊集合. 语言变量及模糊逻辑. 陈国权译. 北京:科学出版社,1982. 5
- 4 冯保成. 模糊数学实用集粹. 北京:中国建筑工业出版社,1991. 6
- 5 袁铸钢,江海鹰,孟庆金等. 水泥立窑底火状态的模糊识别. 河北省科学院学报,1996,13(增刊):145~148

袁铸钢 男,1964年生. 1986年毕业于河南大学物理系,获理学学士学位. 1986年就读于哈尔滨工业大学控制工程系,1989年毕业,获工学硕士学位. 现任山东建材学院信息与控制工程系副教授. 主要研究方向为自适应控制理论及应用、模糊控制理论及应用、神经网络理论及应用和计算机控制系统等. 在国内学术会议及期刊发表论文近二十篇,完成山东省科技攻关等项目十多项.

王孝红 男,1963年生. 1983年毕业于山东建材学院自动化系,获工学学士学位. 1985年就读于重庆大学自动化系,1988年毕业,获工学硕士学位. 现任山东建材学院信息与控制工程系副教授、硕士生导师. 主要研究方向为自适应控制、计算机控制系统、分布式控制系统等. 在国际及国内学术会议及期刊发表论文二十余篇,主持完成山东省科技攻关等项目十几项.