

文章编号: 1001-0920(2002)06-867-04

基于多传感器数据融合的回转窑 烧结温度检测和控制方法

张小刚, 陈 华, 章 兢

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 烧结带火焰温度检测是工业回转窑控制的关键和难点, 基于图像处理的温度检测又容易受到现场粉尘和烟雾的干扰。据此提出一种利用模糊技术进行多传感器数据融合的温度趋势判别方法, 并结合现场实际归纳了进行融合的数据种类, 建立了实时专家系统控制策略。工业实践表明, 该方法鲁棒性强、准确率高, 具有很强的实用性。

关键词: 工业回转窑; 多传感器数据融合; 模糊判别; 实时专家控制器

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Rotary kiln sintering temperature measurement and control based on fuzzy multisensor data fusion

ZHANG Xiao-gang, CHEN Hua, ZHANG Jing

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The traditional aluminum sinter process based on rotary kiln is difficult to control because the sintering temperature measurement is easily to be disturbed by the dust and smog in the sintering zone and evil environment. Some sensor data types for the fusion are drawn with the practical experience. A fuzzy fusion algorithm based on the data is proposed to judge the trend of rotary kiln s inner sintering temperature. Real time expert control system is introduced with the fuzzy fusion algorithm. The application result shows that the control system with this method can achieve higher robust and better utility.

Key words: industry rotary kiln; multisensor data fusion; fuzzy judgement; real time expert controller

1 引 言

工业回转窑在冶金、建材等领域有着广泛的应用。生产中, 窑体倾斜且缓慢旋转, 生料浆因自身重力从窑尾缓慢流向窑头, 经烘干带、预热带、烧结带和冷却带后落入冷却机。煤粉从窑头吹向窑尾, 在烧结带燃烧, 产生的煤烟被窑尾排烟机排出。操作工在

窑头小车内看火, 根据当前窑况通过控制喂煤量、风门开度和窑体转速等量来调节窑内烧结带温度 T_s 。对这一传统烧结工艺过程进行自动化改造面临以下几个问题: 1) 对于这类大型回转窑烧成系统, 烧结带煤粉火焰和生料浆相遇后共同燃烧的动态物理化学过程较为复杂, 难以建立精确数学模型。2) 烧结带火焰温度很难精确检测。常用的热电偶传感器因

收稿日期: 2001-09-17; 修回日期: 2001-12-11

作者简介: 张小刚(1972—), 男, 河南汝南人, 博士生, 从事复杂过程智能控制、数据融合及遗传算法等研究; 章兢(1954—), 男, 湖南韶山人, 教授, 博士生导师, 从事复杂过程控制理论及优化控制等研究。

窑体不停转动而难以安装; 光纤比色测温仪精度高, 但只能检测烧结带火焰某一点的温度, 同时难以抵挡现场粉尘干扰和恶劣环境的破坏。3) 受工艺指标影响较大。如生料浆成份波动, 煤磨系统的煤粉细度、质量等都会对窑的操作产生较大影响。由于受到上述因素的限制, 长期以来以煤粉为燃料的氧化铝烧成回转窑一直采用人工操作。

窑内烧结带火焰温度的检测是回转窑自动控制的关键。上面的思路都是围绕着烧结带温度的精确测量而言的, 但即使一个非常有经验的看火工, 也很难正确说出窑内的真实温度。操作工对窑内的实际温度只是有种模糊的认识, 他们往往通过众多仪表盘所反映的来自窑体各个部位的传感器信息(如窑头温度、冷却机负载电流、主机负载电流等信号), 经过大脑分析形成了对当前窑内温度状况的准确判断。本文针对这种情况, 提出一种基于多传感器融合的窑温检测方法, 并在现场实践基础上, 提出了一种实时专家控制器的设计方法。

2 基于图像处理的窑温测量

本文采用的图像处理温度测量方法^[1,2]实际上是一种亮度测温方法。它是在窑头看火孔处安装一台工业电视摄像机, 随时摄取窑内烧结带火焰的图像。控制室的计算机通过图像采集卡获取火焰彩色图像数据, 并按下式计算出平均亮度, 标定后代表火焰温度值。

$$\bar{G} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (k_r G_r(i) + k_g G_g(i) + k_b G_b(i)) \quad (1a)$$

$$1 = k_r + k_g + k_b \quad (1b)$$

其中, M 为像素总数, $G_r(i)$, $G_g(i)$, $G_b(i)$ 分别为第 i 点像素的红、绿、蓝灰度值。

这种方法虽然不很精确, 但在窑内火焰图像清晰时, 能够反映窑内温度变化的实际情况。由于生产情况的不断变化, 窑内并不会一直清晰。这种测温方法存在以下问题:

1) 当窑内温度较低时, 烧结带火焰变暗, 窑内粉尘和烟雾对温度图像检测的干扰增大, 火焰检测正确率降低。如图1的A段时间内: 窑头温度和冷却机电流稍向上抬头, 窑内实际温度缓慢下降, 但火焰检测的温度变化并不明显。因此单凭火焰检测的自动控制系统比较适合于窑内状况较亮的正烧结或偏上限烧结窑况下运行。长期运行极易将窑皮耐火砖烧薄, 造成窑体温度升高, 甚至会引起重大事故。

2) 若窑尾生料浆流量突然变大, 会短时将火焰向窑头外推, 造成火焰明亮、窑内温度升高的假象。如图1的B段所示: 窑头温度和冷却机电流向上抬明显, 这时应快速加煤“顶烧”, 否则就会造成窑内温度大幅下降的现象, 如图1的C段所示。

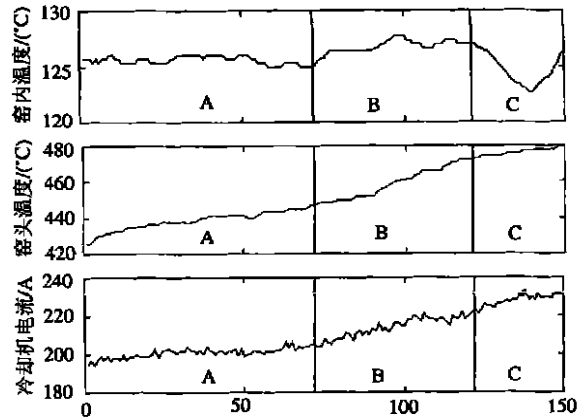


图1 回转窑现场运行曲线($T = 0.5 \text{ min}$)

3 模糊数据融合的窑温度趋势判别

由于只通过图像的分析结果不能完全反映窑内火焰燃烧的实际情况, 因此, 在复杂窑况下我们必需参考对各传感器信号的综合判断才能得出正确结果。多传感器数据融合从结构上可分为3种: 集中式融合、自主式融合和混合式融合。从方法上可分为: 贝叶斯估计、多贝叶斯估计、卡尔曼滤波、Shaft-Dempster 证据推理、神经网络和模糊判决等方法^[3]。在许多场合, 由于贝叶斯估计所需的先验概率难以获得, 因此限制了它的实际应用。

在回转窑系统中, 现场干扰使各个传感器提供的信息都具有不确定性, 对这些灰色信息的融合过程实质上是一个不确定性推理过程。隶属于广义集合论的模糊集合因其隶属关系不是一个布尔判定值, 所以较适合于这种场合。与神经网络相比, 模糊规则还具有方法简单实用、易于理解的优点。

在多次现场实验基础上, 一种基于窑头温度 T_h 、主机负载电流 I_M 、冷却机负载电流 I_L 和火焰图像处理的集中式模糊融合方法如图2所示。从现场采集的数据经过滤波后差值模糊化, 形成输入特征向量

$$\{\mu(\Delta T_h) \quad \mu(\Delta I_L) \quad \mu(\Delta I_M) \quad \mu(\Delta T_s)\} \quad (2)$$

为便于描述, 各传感器值变化趋势的论域模糊划分和隶属函数, 在简化处理后如图3所示。融合输

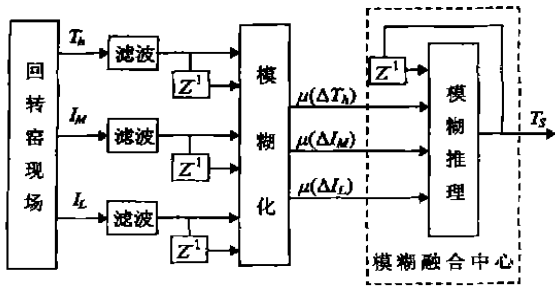


图 2 模糊融合系统框图

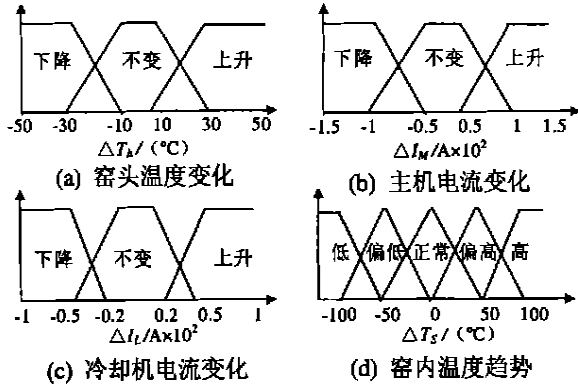


图 3 输入量和融合输出量隶属函数

出的论域空间为窑内温度趋势{低、偏低、正常、偏高、高}, 解模糊判决采用重心法。

模糊系统采用的是 IF-THEN 形式的模糊规则, 它是通过训练获取的。数据假设是在窑况较好的情况下获得的, 这样较易获得窑内实际温度。在输入和输出变量的模糊集预先设定情况下, 模糊融合中心的模糊规则由下述方法产生:

Step1 模糊规则的条件部的输入变量各取一模糊子集, 构成下列形式的条件部

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_{1r}, x_2 \text{ is } A_{2r}, \dots, x_n \text{ is } A_{nr} \quad (3)$$

其中, x_1, x_2, \dots, x_n 为系统的输入变量; $A_{1r}, A_{2r}, \dots, A_{nr}$ 为输入变量对应的模糊子集。在本文中, $n = 3, r = 3$ 模糊集划分如图 3 所示。

Step2 对所有样本, 计算

$$\mu_k(x_k) = \prod_{i=1}^n \mu A_{ir}(x_{ik}) \quad (4)$$

若 $\mu_k(x_k) = 0$, 则条件部对应的规则不存在, 转到 Step5; 否则转 Step3。

Step3 计算

$$y_0 = \sum_k \mu_k(x_k) \cdot y_{kj} / \sum_k \mu_k(x_k) \quad (5)$$

其中 y_k 为第 k 组样本对应的后件。

Step4 根据 y_0 的值决定结论部输出变量对应的 Y_k , 其为距离 y_0 最近的 B_j , 即

$$Y_k = \min |y_0 - \text{weight}(B_j)| \quad (6)$$

其中 B_j 为待选的模糊变量输出子集。

Step5 对于输入变量的模糊集组合而成的所有规则, 重复 Step1 ~ Step4。

经过数据学习和人工调整, 所得结果如表 1 所示。其中, H 为上升, M 为不变, L 为下降, G 为高, ZG 为偏高, Z 为正常, ZD 为偏低, D 为低。

由历史数据总结出的规律来看, 回转窑烧结带温度的波动与其主驱动电机负载电流、冷却驱动电机负载电流和窑头温度的变化有着密切的联系。从系统热功平衡观点看, 窑内烧结带物理化学反应的平衡被打破后, 必然会导致物料厚度不均和流速的变化, 这就导致了上述各相关参数的变化。从这些相关参数的变化规律中, 我们虽不能断定烧结带的真

表 1 模糊融合规则

窑头温度变化			冷却机电流变化			主机电流变化			上一采样周期的窑况					结果
H	M	L	H	M	L	H	M	L	G	ZG	Z	ZD	D	
*			*			*				*				ZD
*			*			*						*		D
*			*			*		*				*		D
		*			*	*							*	Z
		*			*	*		*			*			ZG
		*			*	*		*		*				G
		*			*	*		*		*				G
*			*			*		*		*				Z
		*			*	*		*			*		*	ZD

实温度,但可以很好地把握其温度的变化方向。在直接图像测温方法出现误判或窑内混浊的情况下,我们仍可以利用该方法辅助进行窑内温度判断。

4 信息融合专家控制器

上述讨论虽然为复杂环境下窑内烧结温度的检测提供了一种可靠的检测方法,但由于工业回转窑对象的复杂性,其数学模型很难建立,一般的控制方法难以奏效。为此,本文提出一个基于多层信息融合技术的氧化铝回转窑实时专家控制器(如图 4 所示)。根据氧化铝回转窑的工艺特点和实际操作要求,该控制器的设计考虑了以下 3 个方面:

- 1) 不同的窑况采用不同的控制规律;
- 2) 根据生料浆成份和设备运行状态的变化人工调节设定温度和控制参数;
- 3) 可实现自动控制与监督控制的无差切换。

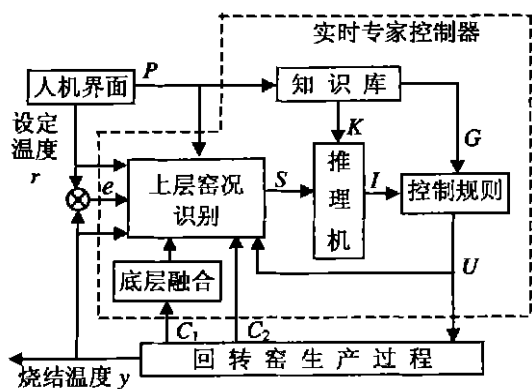


图 4 实时专家控制器结构图

图 4 中,现场传感器信号被分为两组:一组是 C_1 ,包括主机负载电流、冷却机负载电流和窑头罩温度;另一组为 C_2 ,包括窑尾温度、生料浆流量、前后风门开度等现场信号。底层融合为前面所介绍的烧结带温度趋势判定过程,它得出的结果输入到上层窑况识别模块。上层识别是一个窑况特征状态的高层识别过程,它通过抽取动态过程的特征信息,来识别回转窑的工作状态。

知识库中包括利用产生式规则建立的回转窑专家知识集 K 和数据库。数据库中存放着各控制模式的参数集 P 、实时采样数据以及各种窑况状态集合 S 。

考虑到实时性要求,推理机十分简单,采用正向推理方法,逐次判别各种规则的前件,遇到冲突

时,选取条件描述复杂性高的规则。

如果设整个专家控制器(EC)的输入集合为 $R = (r, e, y, U, P, C_1, C_2)$,其中, r 为设定温度, y 为控制输出, e 为偏差, U 为喂煤量。则该 EC 的模型可表示为

$$U = f(R, K, I) \quad (7)$$

其中 $f = g \cdot h \cdot p$ 为复合智能算子,

$$g: R \rightarrow S; \quad h: S \times K \rightarrow I; \quad p: I \rightarrow U$$

g, h 和 p 均为形如 “If A Then B” 的智能算子。

5 现场运行结果

基于上述设计的氧化铝回转窑自动控制系统已在我国某大型铝业公司现场投入运行,获得了良好的控制效果和显著的经济效益,并得出以下结论:

1) 尽管受许多因素限制(无法调节窑体转速、喂料量和前后风门开度),基于信息融合的专家控制器,在只调节喂煤量的基础上,仍能克服生产波动,在正常情况下对氧化铝回转窑实现了长时间的自动控制。从控制曲线(略)上可看出:系统在自动控制下比手动控制具有更好的稳定性。

2) 运行结果表明:利用主机负载电流、冷却机负载电流和窑头温度对烧结带火焰温度趋势进行辅助判断,有效弥补了在低温或窑况混浊情况下火焰图像处理对烧结带温度检测的不足。

3) 同时仍存在的一些问题是:底层融合输入量(窑头温度、主机电流、冷却机电流)有时相对于火焰温度变化较为滞后,易造成不能及时调整控制输出;另一方面,因现场情况复杂,在窑况异常时,仍需要人工进行干预。

6 结 语

本文根据传统的回转窑烧结工艺的现状和自动化技术改造中遇到的问题,基于多传感器融合思想,提出一种利用现场热工信号辅助进行烧结温度检测的新方法,并讨论了基于此的一种实时专家控制器的设计。现场运行结果表明,该方法很好地弥补了烧结带火焰温度检测的不足,在此基础上设计的专家控制器可以对氧化铝烧结回转窑实现长时间的自动控制,取得了良好的现场运行效果和显著的经济效益。

(下转第 875 页)

参考文献(References):

- [1] Kharatishvili G L. The maximum principle in the theory of optimal process with time-lags [J]. *Dolk Akad Nauk*, 1961, 136(1): 39-43.
- [2] Kharatishvili G L. *A Maximum Principle in External Problem with Delays, Mathematical Theory of Control* [M]. Academic Press: A V Balakrishnan, L W Neustadt, 1967.
- [3] Bender D J, Laub A J. The linear-quadratic optimal regulator for descriptor systems[J]. *IEEE Trans on Automat Contr*, 1987, 32(8): 672-688.
- [4] Cobb D. Descriptor variable systems and optimal state regulation [J]. *IEEE Trans on Automat Contr*, 1983, 28(5): 601-611.
- [5] Chen Y, Ma S, Cheng Z. Singular optimal control problem of linear singular systems with linear-quadratic cost[A]. *Proc 14th World Congress of IFAC* [C]. Beijing, 1999. F: 223-228.
- [6] Zhu J, Ma S, Cheng Z. Singular LQ problem for descriptor systems[A]. *Proc 38th IEEE Conf Decision Contr*[C]. Arizona, 1999. 4098-4099.
- [7] Ross D W, Flugge-Lotz I. An optimal control problem for systems with differential difference equation dynamics[J]. *SIAM J Control*, 1969, 7(7): 608-623.

(上接第 866 页)

- [3] Branicky M S, Mitter S K. Algorithms for optimal hybrid control[A]. *Proc IEEE Conf on Decision and Control*[C]. New Orleans, 1995. 2661-2666.
- [4] Stiver J A, Antsaklis P J, Lemmon M D. Hybrid control system design based on natural invariants[A]. *Proc of the 34th Conf on Decision and Control*[C]. New Orleans, 1995. 1445-1460.
- [5] Xu X, Antsaklis P J. Optimal control of switched systems: New results and open problems[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Chicago Illinois, 2000. 2683-2687.
- [6] Ye H, Michel A N. Stability theory for hybrid dynamical systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 461-474.
- [7] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475-482.
- [8] Pettersson S, Lennartson B. Control design of hybrid systems [A]. *Lecture Notes in Computer Science, Hybrid Systems*[C]. Grenoble, 1997. 1201: 240-254.

(上接第 870 页)

参考文献(References):

- [1] 章兢, 刘晓燕. 基于图像序列处理的回转窑煅烧区温度测量[J]. *电子测量与仪器学报*, 1999, 13(4): 67-71.
(ZHANG Jing, LIU Xiaoyan. The measurement of sintering temperature in kiln based on image processing [J]. *The Transaction of Electric Measurement and Instrument*. 1999, 13(4): 67-71.)
- [2] 谭皓, 李立源, 陈维南. 基于 BP 网络的锅炉炉膛火焰燃烧状态自动识别[J]. *自动化学报*, 1998, 24(2): 667-670.
(TAN Hao, LI Liyuan, CHEN Weinan. Burner flame recognition based on backpropagation neural network [J]. *Acta Automatic Sinica*, 1998, 24(2): 667-670.)
- [3] D L Hall. *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*[M]. Norwood: Artech House Publisher, 1992.
- [4] 赵振宇, 徐用懋. 模糊理论和神经网络的基础与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [5] 袁南儿, 王万良, 苏宏业. 计算机新型控制策略及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.