

回转窑煅烧过程运用软测量的建模方法及应用

Soft Measurement Modeling Method & Application of Rotary Kiln's Calcination Process

蔡永昶

(顺德职业技术学院电子与信息工程系, 广东 佛山 528300)

摘要: 为了解决工业回转窑的生产过程中存在工艺复杂、建模困难和控制目标只能离线检测等控制难点的问题,在分析锌钡白回转窑煅烧过程运行机理和工艺流程的基础上,运用软测量的方法建立煅烧过程的控制模型。结合熟练工人的操作经验,采用模糊控制的方法对控制模型的 PID 参数进行自动整定,详细介绍了控制模型的建立过程和模糊参数自整定控制器的设计方法。现场运行取得了满意的效果。

关键词: 模糊参数自整定 软测量 PID 控制模型 非线性 智能控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Abstract: In order to solve the problem exists in the industrial rotary kiln production, e. g. the process is complex, hard to build the model, the control object can be detected offline only and et al, on the basis of analyzing the calcination operational mechanism and process flow of lithopone rotary kiln, the soft measurement method is used to establish the calcination control model. Combining with the operating experience of specialized workers, and adopting the fuzzy control to self-tuning the PID parameter of control model, the process of building the control model and the design method of fuzzy parameter self-tuning controller are introduced in detail. The results of the site operation are satisfactory.

Keywords: Fuzzy parameters self-tuning Soft measurement PID Control model Nonlinear Intelligent control

0 引言

工业回转窑是石油化工等各类基础行业关键的生产设备,物料经过回转窑进行干燥煅烧,吸收足够的热量,从而发生物理和化学反应,达到其性能指标改变的目的。窑体传热机理复杂,关键控制目标难以在线检测,干燥煅烧过程为典型的慢过程工艺,往往具有多变量、强耦合、大滞后、非线性、不确定性等特点。

目前,国内外大多数对工业回转窑控制的研究主要是对某一工况参数(如窑头温度)的智能控制^[1-4]和基于经验公式对干燥煅烧过程的开环控制^[5-6]。这些研究不能对控制目标进行及时反馈,且受环境干扰和生产因素变化等的影响,被控指标往往不稳定,甚至出现大的波动。

本文以锌钡白回转窑为具体对象,在分析其结构和工艺流程的基础上,运用软测量的方法建立了关键生产过程——煅烧过程的控制模型,并运用模糊参数自整定 PID 的方法实施控制。

1 工艺流程介绍

锌钡白又称立德粉,是一种化工颜料,其性能指标为消色力,只能运用化学的方法离线检验^[7]。锌钡白的干燥煅烧过程在一个两段结构的大型回转窑完成,物料通过窑体的转动从进料口到出料口,完成干燥煅烧的过程,工艺流程如图 1 所示。

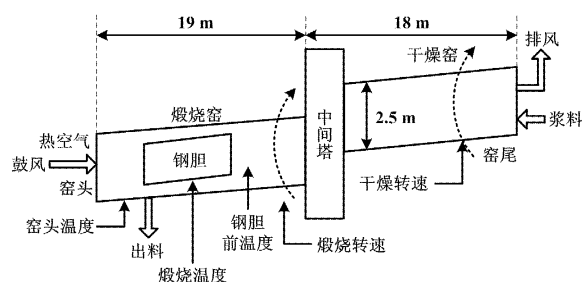


图 1 工艺流程

Fig. 1 Process flow

燃油在窑头燃烧产生热量,鼓风机和抽风机使热空气从窑头流向窑尾,给物料提供干燥煅烧所需要的能量。从前序工艺过来的浆料,由于含水量多,先通过进料泵进入干燥窑进行烘干,干燥时间约为 2 h;经过干燥后的物料进入煅烧窑,煅烧温度为 690 ~ 750 °C,煅烧时间约为 1 h。连接两段窑体的中间塔,便于物料定期抽取进行水分含量的离线检验。传统控制方法为

广东省科技厅工业攻关基金资助项目(编号:C10909)。

修改稿收到日期:2011-03-29。

作者蔡永昶,男,1979年生,2004年毕业于华南理工大学控制理论与控制工程专业,获硕士学位,讲师;主要从事工业过程控制、计算机分布控制等方面的研究。

人工控制,即工人根据经验每 10 min 观察一次出料,若觉得过烧则调快煅烧转速和干燥转速,以减少煅烧时间,反之亦然。同时,每隔 1.5 h 从出料口取样送离线检验,消色力检验结果约 30 min 返回给调节现场。在传统的人工控制中,转窑 24 h 连续生产,三个工人交替操控,由于不同的工人操作方法和经验不同,同一工人在不同的时间注意力和判断力也不一样,易造成产品质量不稳定,波动较大,废料较多。

2 控制方案

由上述工艺过程可知,影响干燥煅烧过程的因素众多,有窑头温度、煅烧温度、煅烧窑转速、干燥窑转速、进料量、水分含量等因素,而且各因素相互耦合。消色力和物料的含水量等控制目标和因素只能离线测量,且采样时刻存在不确定性。物料流动慢,生产周期长,整个生产过程物料在窑体内的流动特性和温度变化无法知道。这给系统的建模和控制带来很大的困难。

本文采取的解决方案为根据窑体的结构和传动机理,初步建立关键过程——煅烧过程的控制模型;为克服外界干扰和不确定因素对模型参数的影响,结合熟练工人的经验,采用模糊自整定的控制方法对模型的关键参数进行在线自动校正。

2.1 煅烧过程控制模型建立

建立控制模型需要解决的关键问题是控制目标消色力的实时反馈。由于物料煅烧过程主要在钢胆中完成,这一过程实质上是物料吸收能量的过程。根据煅烧机理,在物流均匀的情况下,流经钢胆的物料若吸收的能量 q 相同,则物料的消色力指标也相同^[5-6]。钢胆结构如图 2 所示。

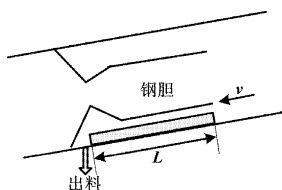


图 2 钢胆结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of iron container

由于物料吸收的能量可推算,因此,可采用软测量的方法间接测量消色力的数值,构成消色力反馈控制系统。此外,由于物料存在热惯性,可以认为能量的变化过程是加热过程对时间的积累,因此有:

$$q = k \int_0^t T_{ds}(t) dt \quad (1)$$

式中: q 为钢胆内物料加热所吸收的能量, J; $T_{ds}(t)$ 为加热过程的煅烧温度, $^{\circ}\text{C}$, 通过钢胆内温度传感器可实

时测量得到; t 为物料加热时间, s, 物料进入钢胆时为计时起点,当 $t = t_g$ 时,物料从出料口流出钢胆; k 为转换系数,其大小不影响控制效果,可取 1; t_g 为物料在钢胆加热的总时间,是计算 q 的关键参数,其大小须根据钢胆的长度 L 以及物料移动转速 $v(t)$ 进行计算。

由于 $v(t)$ 是变化的,这给 t_g 的计算带来很大的困难。考虑到在同一采样周期内,窑体转速变化不大, $v(t)$ 近似为恒定。因此,采用从出料口向前递推的方法,计算物料前进的距离累计为 L 时所经历的采样时间数量 j ,即可得到 t_g 。

$$L = \sum_{i=0}^j v(p-i) \Delta T \quad (2)$$

式中: $v(p)$ 为当前出料口物料移动速度, m/min; p 为当前采样时间数; ΔT 为采样时间, min, 本控制系统中, $\Delta T = 1 \text{ min}$; i 为递推算子, $i = 0, 1, \dots, j$; j 为物料流经钢胆所经历的采样时间数量,为被求量。因物料移动速度与窑体转速成正比,即 $v(t) = Kf_{ds}(t)$, 由式(2)可得:

$$L = K\Delta T \sum_{i=0}^j f_{ds}(p-i) \quad (3)$$

式中: L 在停窑检修时实地测得, m; $f_{ds}(t)$ 为驱动窑体转动的变频器频率, Hz, 与窑体转速成正比, $f_{ds}(t)$ 通过现场变频器的频率反馈实时测量得到; K 为速度转换系数,在停窑检修后试投料阶段实地测得。

由上述分析可得,物料在钢胆内吸收的能量的测量和计算过程为根据窑体参数和实时测得的窑体转动频率,通过式(3),按照递推的方法计算出物料流经钢胆的采样时间数目 j ,得到 $t = j\Delta T$,进而代入式(1)的离散化形式即可计算得到 q 。理论上,因窑头温度和进料量等工况参数影响着物料能量的吸收,因此,当工况参数变化较大时,需对能量公式进行适当的修正。此外,由于本控制系统还对窑头温度和进料量等关键工况参数进行控制,实际运行效果表明,系统工况大部分时间都是稳定的,上述能量计算过程完全满足控制要求。通过对物料吸收能量的实时计算,运用该软测量结果构成反馈控制系统,得到煅烧过程控制模型如图 3 所示。图 3 中, XSL 为物料的消色力指标。

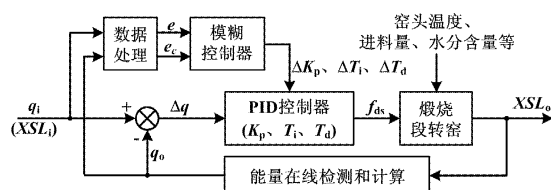


图 3 消色力控制系统结构图

Fig. 3 Diagram of decoloring capacity control system

2.2 模糊参数自整定控制器设计

在实际运行中,由于被控对象具有非线性以及存

在环境变化等其他不确定因素,为增强系统的鲁棒性,需要结合熟练工人的操作经验对控制模型的参数进行在线调整。为此,设计了PID参数自整定模糊控制器。PID的传递函数为:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4)$$

式中: s 为传递函数的复变量; K_p 为比例参数; T_i 、 T_d 分别为积分、微分参数, s 。PID参数的自动校正过程如下。

$$K_p^{(j+1)} = K_p^j + \gamma^{(j)} \Delta K_p \quad (5)$$

$$T_i^{(j+1)} = T_i^j + \gamma^{(j)} \Delta T_i \quad (6)$$

$$T_d^{(j+1)} = T_d^j + \gamma^{(j)} \Delta T_d \quad (7)$$

式中: j 为校正次数; γ 为校正的速度变量,随校正次数逐渐变小,结合运行情况,取 $\gamma = e^{-j/10}$; ΔK_p 、 ΔT_i 、 ΔT_d 为PID控制器三个参数的修正量。

实际运行中,PID控制器输出 f_{ds} 的变化范围为 $[-10, 10]$ (单位:Hz),PID参数的初始值按临界比例度法整定得到^[8]。

能量给定 Q_i 和能量反馈 Q_o 首先经过滤波、异常值剔除,能量偏差以给定能量作为参考进行相对化处理,得到相对能量偏差 e 及其变化率 e_c 作为模糊控制器的输入,模糊控制器的输出为PID控制器的三个修正值 ΔK_p 、 ΔT_i 、 ΔT_d 。

根据工艺流程特点和控制经验, e 和 e_c 的范围分

别取为 $[-0.5, 0.5]$ 、 $[-0.1, 0.1]$, ΔK_p 、 ΔT_i 、 ΔT_d 的变化范围分别取为 $[-5, 5]$ 、 $[-100, 100]$ (单位:s)、 $[-40, 40]$ (单位:s)。各输入输出量经尺度变换后论域均为 $[-3, 3]$,经模糊分割后,其定义为NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大),共七个模糊集合。

为提高系统的响应初始阶段的鲁棒性和接近稳态阶段的响应灵敏度,隶属度函数采用高斯隶属度函数和三角形隶属度函数相结合^[9-10],如图4所示。

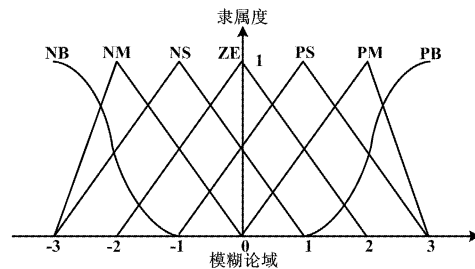


图4 隶属度函数

Fig. 4 Diagram of membership function

根据熟练工人的技术知识和操作经验,结合现场调试结果,总结出49条根据 e 和 e_c 的不同调整 ΔK_p 、 ΔT_i 、 ΔT_d 的控制规则。由于对称性,实际只须制定31条规则,如表1所示。

表1 PID参数的模糊控制规则表

Tab. 1 Rule table of fuzzy control for PID parameters

e	e_c						
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	PB/PB/PS	PB/PB/ZO	PM/PM/NM	PM/PM/NB	PS/PS/NB	ZE/ZE/NM	ZE/ZE/PS
PM	PB/PB/PS	PB/PB/NS	PM/PM/NB	PS/PS/NM	PS/PS/NM	ZE/ZE/NS	NS/ZE/ZE
PS	PB/PB/ZE	PM/PM/NS	PM/PS/NM	PS/PS/NM	PS/PS/PM	ZE/ZE/PS	NS/NS/ZE
ZE	PM/PM/ZE	PM/PM/NS	PS/PS/NS	ZE/ZE/NS	PS/PS/NS	PM/PM/NS	PM/PM/ZE
NS	NS/NS/ZE	ZE/ZE/PS	PS/PS/PM	PS/PS/NM	PM/PS/NM	PM/PM/NS	PB/PB/ZE
NM	NS/ZE/ZE	ZE/ZE/NS	PS/PS/NM	PS/PS/NM	PM/PM/NB	PB/PB/NS	PB/PB/PS
NB	ZE/ZE/PS	ZE/ZE/NM	PS/PS/NB	PM/PM/NB	PM/PM/NM	PB/PB/ZO	PB/PB/PS

制订规则的原则如下^[11]。

当误差 e 为正(负)的较大、 e_c 为负(正)的较大时,输出与给定之间的偏差较大,并开始减少。此时,为减少反向过调,比例和积分作用要适中(ΔK_p 和 ΔT_i 取适当的大小),微分作用应根据 e_c 来定,一般当 e_c 较小(大)时, ΔT_d 取大(小)些。

当误差 e 、 e_c 为正(负)的较大时,输出与给定之间的偏差较大,并有继续增大的趋势。此时,应提高系统响应速度,减少惯性储备,因此增大比例作用(取较大的 ΔK_p),减少积分作用(取较大 ΔT_i),微分作用适当(ΔT_d 根据 e_c 的大小而定)。

当误差 e 接近零、输出处于稳态值附近时,为提高稳定性,减少外界噪声和干扰的影响和增强系统鲁棒性,应适当增大比例作用,减少积分作用和微分作用,即取较大的 ΔK_p 和 ΔT_i 、较小的 ΔT_d 。

当误差 e_c 接近零时,输出变化平缓,为使提高系统的跟踪性能较差,此时应增大比例作用和减少微分作用,积分作用适当,即取较大的 ΔK_p 和较小的 ΔT_d 、 ΔT_i 取适当值。

具体控制过程为某一采样时刻获得的 e 和 e_c ,经模糊化后送入模糊控制器,按式(8)计算得到PID参数的模糊输出量,再经去模糊化得到确切的输出值。

$$\begin{cases} \Delta K'_p = (e \times e_c) \circ R_p \\ \Delta K'_i = (e \times e_c) \circ R_i \\ \Delta K'_d = (e \times e_c) \circ R_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: \circ 表示合成运算; $\Delta K'_p$ 、 $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$ 分别为比例、积分、微分参数的模糊输出量; R_p 、 R_i 、 R_d 分别为对表 1 每条规则的蕴含关系进行并集运算得到的三个参数的模糊关系矩阵。

在模糊推理中,模糊蕴含采用最小运算法,模糊合成采用最大-积合成规则。其中,输入量模糊化运算采用模糊单点集合,输出量非模糊化运算采用重心法^[12-13],其计算方法如式(9)所示。

$$\Delta K_u = \frac{\int_{-3}^3 u \mu(u) du}{\int_{-3}^3 \mu(u) du} \quad (9)$$

式中: u 为论域 $[-3, 3]$ 上的元素; $\mu(u)$ 为输出 ΔK_u 的隶属度; ΔK_u 分别代表三个 PID 参数的输出量。

3 应用效果

为比较 PID 和模糊参数自整定 PID 的控制效果和选择较优的参数应用于现场,首先运用 Matlab 对两种控制方法进行仿真研究。因煅烧过程主要在钢胆中完成,物料流经钢胆需要一定的时间,同时由于物料存在热惯性,煅烧过程存在纯滞后环节和惯性环节。结合对现场大量数据的分析,通过系统辨识的方法得到煅烧过程的数学模型近似为具有滞后环节的一阶惯性系统,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.2}{360s + 1} e^{-180s} \quad (10)$$

常规 PID 控制的参数选择按临界比例度原则优化得到,分别为 $K_p^0 = 12$ 、 $T_i^0 = 360$ s、 $T_d^0 = 90$ s;模糊参数自整定 PID 控制的参数按式(5)~式(8)进行模糊自整定优化得到,分别为 $K_p = 8$ 、 $T_i = 38$ s、 $T_d = 60$ s。应用两种控制方法得到的阶跃曲线如图 5 所示。

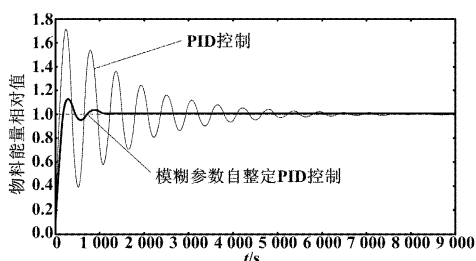


图 5 仿真对比图

Fig. 5 Comparative diagram of simulation

由图 5 可知,模糊参数自整定 PID 控制的超调量 $\sigma = 13\%$,响应时间 $t_s = 591$ s,它比 PID 控制具有更好

的快速性和稳定性。

运用上述两种控制方法对某粉料煅烧过程进行控制,控制参数的初始值根据现场调试情况和熟练工人的操作经验进行适当的微调,得到生产现场连续生产 10 d 的消色力指标曲线如图 6 所示。

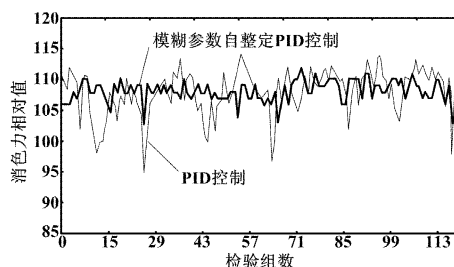


图 6 产品消色力指标对比图

Fig. 6 Comparative diagram of product performance index of decoloring capacity

图 6 中,横坐标为检验组数,每 2 h 检验 1 次,共 120 组数;纵坐标为消色力数值,它是通过离线运用化学方法检验得到的相对值,消色力数值越大,表明性能指标越好,大于 102 为及格。由图 6 可知,运用 PID 控制和模糊参数自整定 PID 控制得到的产品消色力平均值分别为 108.1 和 107.8,及格率分别为 100% 和 88.3%,最大误差分别为 4.7% 和 11.9%。由此可见应用模糊参数自整定 PID 的控制得到的产品质量更高,系统趋于更加平稳,具有较好的鲁棒性。

4 结束语

由于具有多变量、强耦合、大滞后、非线性、不确定、缺少有效的检测手段等缺陷,工业回转窑的自动控制改造难度很大。

本文结合锌钡白生产转窑控制系统的建模和应用实例,从分析关键生产过程——煅烧过程的传热机理和工艺流程入手,运用软测量的方法建立产品性能指标的反馈控制系统,在此基础上采用模糊参数自整定的方法对控制模型的关键参数的参数进行自动校正。该方法在现场取得良好的应用效果,产品及格率为 100%,性能指标较优并稳定性较好。

本文提出的基于软测量的思想的建模和模糊参数自整定的方法,为解决缺乏检验手段的工业控制问题提供了一种新的方法,对化工、石油等传统工业的自动控制改造具有很好的参考价值。

参考文献

- [1] Jarvensivu M, Saari K, Jamsa-Jounela S L. Intelligent control system of an industrial lime kiln process[J]. Control Engineering Prac-

(下转第 51 页)

极板升降模糊PID控制器相关参数为 $k_e = 800$ 、 $k_c = 12.10$ 、 $k_u = 35.00$ ，采样时间 $T_s = 1$ s、 $\alpha = 0.702$ 、 $T_1 = 0.037$ ；水位模糊PID控制器相关参数为 $k_e = 16$ 、 $k_c = 11.54$ 、 $k_u = 133.21$ ，采样时间为 $T_s = 1$ s、 $\alpha = 0.435$ 、 $T_1 = 0.021$ ；池内水温最大温差控制在 ± 4 K以内。

在机车第16手柄位，利用本文控制器进行了牵引发电机外特性调整试验，不同工况下部分电流的控制数据如表1所示。

表1 部分电流控制数据表
Tab.1 Partial current control data

参数	工 况 点					
	1	2	3	4	5	6
给定电流	3 000.0	3 200.0	3 600.0	4 000.0	4 400.0	4 800.0
实际电流	3 002.5	3 198.2	3 601.7	4 002.9	4 399.6	4 802.1
控制误差	-2.5	+1.8	-1.7	-2.9	+0.4	-2.1

为验证文中方案的有效性，在机车第16手柄位分别与常规模糊控制器、PID控制器进行了对比。电流为3 kA时，实际输出结果如图5所示。

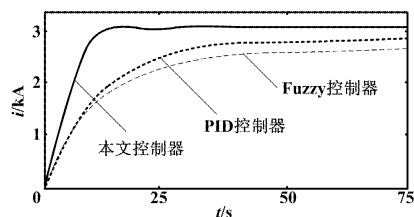


图5 输出曲线

Fig.5 Output curves

从图5及表1看出，与其他控制器相比，文中设计的控制器在控制初期虽然有一定量超调，但后续调整

速度快且过程平稳，整个调整时间较原来平均缩短35%，电流控制精度也由过去的 ± 50 A提高到 ± 3 A。

5 结束语

本文阐述方案已应用在国内某机务段DF₄型内燃机车检修试验中。结果表明，采用基于恒定水温的电流Petri网协调级混杂递阶模糊PID控制方案是可行的，且控制快速稳定，具有较强鲁棒性，真正实现了负载电流高精度大范围控制。该方案的运用为解决机车试验中电流精确控制问题提供了一个新的方案。

参考文献

- [1] 李力,蔡林松,赵爱菊.水阻极板自动控制算法探讨[J].北方交通大学学报:自然科学版,1996,20(4):508-512.
- [2] 路永坤,薛征宇,刘成臣.水电阻负荷试验站中稳流的模糊控制设计[J].计算机工程,2007,33(8):244-246.
- [3] 马洪.东风₄型机车水电阻测功装置的计算[J].内燃机车,1987(6):22-27.
- [4] 王冠英.水阻箱设计中的几个问题[J].机车车辆工艺,1989(4):23-27.
- [5] 王春奎,方慧英,傅裕寿.水电阻性质的实验研究[J].激光杂志,1985,6(5):253-255.
- [6] Lemmon M D, He K X, Markovsky I. Supervisory hybrid systems[J]. Control Systems Magazine, 1999, 19(4): 42-55.
- [7] 黎浩荣,李立勤,李东海,等.对一种高精度模糊控制方案的研究与改进[J].清华大学学报:自然科学版,2000,40(2):114-117.
- [8] 王天颖,项昌乐,李明喜,等.负荷车试验系统的模糊自适应PID控制[J].哈尔滨工业大学学报:自然科学版,2007,39(6):997-1000.
- [9] 赵辉.对机车水阻试验采用冷却水循环的探讨[J].内燃机车,1992(9):16-18.
- [10] 赵庆龙,黄英,伍锦,等.发动机-发电机组水电阻吸能装置电阻计算研究[J].兵工学报,2005,26(6):721-724.

(上接第47页)

- tice, 2001(9):589-606.
- [2] Akalp M, Dominguez A L, Longchamp R. Supervisory fuzzy control of a rotary cement kiln[C]//Proceedings of the 7th Mediterranean of Electrotechnical Conference, Antalya, Turkey, 1994(2):754-757.
 - [3] Devedzic V. Knowledge-based control of rotary kiln [C]//International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, Taipei, Taiwan, 1995:452-458.
 - [4] 张小刚,陈华,章斌,等.基于图像反馈的回转窑烧结温度智能预测控制[J].控制理论与应用,2007,24(6):995-998.
 - [5] 黄然婷,刘咏平,毛宗源,等.锌钡白生产转窑控制系统的实现[J].华南理工大学学报:自然科学版,2003,31(12):42-45.
 - [6] 蔡永昶,朱燕飞,李中华,等.“等质量等能量”控制在锌钡白回转窑的应用[J].化工自动化及仪表,2004,31(2):24-27.

- [7] 陈朝华,丘康奎,陈广,等.硫酸锌生产与应用技术问答[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [8] 邵裕森,巴筱云.过程控制系统及仪表[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [9] 吴振顺,姚建均,岳东海.模糊自整定PID控制器的设计及其应用[J].哈尔滨工业大学学报:自然科学版,2004,36(11):1577-1580.
- [10] 程跃,程文明,郑严.基于自适应模糊PID的中药提取温度控制[J].控制工程,2009,16(5):527-530.
- [11] 黄志芳,付曙光,傅连东.自整定模糊PID控制在脱硫搅拌速度控制系统中的应[J].机床与液压,2010,38(12):84-86.
- [12] 葛宝明,林飞,李国国.先进控制理论及其应用[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [13] 汤兵勇.模糊控制理论与应用技术[M].北京:清华大学出版社,2002.