

文章编号: 1001-0920(2008)06-0685-04

磨矿过程的多变量模糊监督控制

周平^a, 岳恒^{a,b}, 郑秀萍^a, 柴天佑^{a,b}

(东北大学 a. 自动化研究中心, b. 教育部流程工业综合自动化重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 针对磨矿过程的关键工艺指标——磨矿粒度难以用现有控制方法进行有效控制的难题, 提出一种由模糊监督器、磨矿控制回路预设模型和磨矿粒度预报器组成的磨矿过程多变量模糊监督控制(MFSC)方法. MFSC 方法用于对磨矿过程进行监督, 根据工况变化对回路控制器设定值进行调整. 通过控制回路跟踪调整后的设定值, 可将磨矿粒度控制在期望目标范围内. 工业试验表明了所提出方法的有效性.

关键词: 多变量模糊监督控制; 磨矿过程; 磨矿粒度

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Multivariable fuzzy supervisory control for mineral grinding process

ZHOU Ping^a, YUE Heng^{a,b}, ZHENG Xiuping^a, CHAI Tianyou^{a,b}

(a. Research Center of Automation, b. Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: ZHOU Ping, E-mail: zhoup1980@126.com)

Abstract: Grinding particle size is a key technical index in mineral grinding process, which is so difficult to control effectively with existing conventional control strategies. A multivariable fuzzy supervisory control (MFSC) approach for grinding circuit is proposed. This approach consists of a fuzzy supervisor, a grinding control loop pre-setting model and a particle size predictor, which is used to supervise the grinding system and then auto-adjust the setpoints of lower level controllers in response to the changes in operational conditions. The outputs of lower level control system track their renewed setpoints, which makes the grinding particle size within the desired range. Industrial experiments show the effectiveness of the proposed MFSC approach.

Key words: Multivariable fuzzy supervisory control (MFSC); Mineral grinding process; Grinding particle size

1 引言

磨矿过程是选矿生产的关键操作单元,其作用是将大颗粒矿石磨碎到一定粒度,以便于后续选矿作业.磨矿粒度是该过程中最重要的工艺指标,直接制约着选矿产品质量和金属回收率,影响着全厂的经济技术指标.因此,将粒度控制在工艺要求的范围内具有重要意义,这也是提高磨机处理量、降低能耗等控制目标的前提条件.磨矿粒度与新给矿量、磨矿浓度、分级机溢流浓度等关键过程变量有密切联系,但它们之间的关系表现为强非线性和时变等综合复杂动态关系,难以用精确数学模型描述.另外,磨矿粒度难以在线连续检测,因而难以采用诸如多回路 PI/PID,自适应控制,ANN 控制及 MPC 等现有过

程控制策略^[1-4]实现磨矿粒度的反馈控制,只能靠人工凭借其自身的操作经验以及人工观察磨矿系统运行状态来确定新给矿量、磨矿浓度和分级机溢流浓度等过程控制回路的设定值.由于操作人员自身经验限制以及工况和边界条件的多变性,这种基于人工操作给出关键过程变量设定值的半手工操作模式,难以找到与期望生产指标相对应的回路控制器的合适设定值^[5],因而不能保证获得期望所需的磨矿粒度指标.

本文针对选矿过程中一个典型湿式磨矿回路,采用模糊推理^[6,7]等智能技术,提出一种由模糊监督器、回路预设模型和粒度预报器等构成的多变量模糊监督控制(MFSC)方法.该方法以将磨矿粒

收稿日期: 2006-12-25; 修回日期: 2007-12-24.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60534010); 国家创新研究群体科学基金项目(60521003); 国家 973 计划项目(2002CB312201); 国家 863 计划项目(2006AA04Z179, 2007AA041405); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0294).

作者简介: 周平(1980—),男,湖南邵阳人,博士生,从事复杂工业过程智能优化控制等研究; 柴天佑(1947—),男,兰州人,教授,博士生导师,中国工程院院士,从事自适应控制、多变量智能解耦控制等研究.

度控制在期望范围内为控制目标,对生产过程进行监督,对底层回路的设定值进行调整.

2 磨矿系统介绍

由球磨机和螺旋分级机构成的典型湿式磨矿回路如图1所示.其工艺流程如下:将处理过的原矿石和一定比例的水送入磨机进行研磨,研磨后的矿浆排入分级机,矿浆在分级机螺旋搅拌下进行分级,粗粒级矿浆(即返砂)进入磨机再磨,细粒级矿浆(即溢流)由分级机溢流堰排出,进入下道工序.

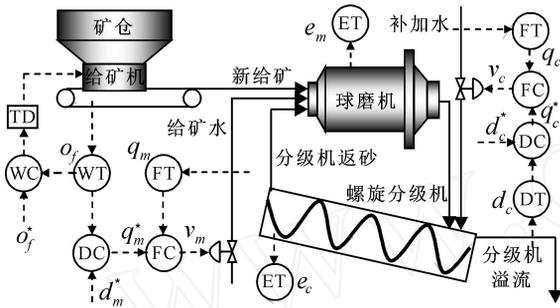


图1 磨矿系统示意图

该过程的控制目标可描述为:将关键工艺指标分级机溢流矿浆粒度即磨矿粒度控制在工艺要求的目标区间内,并在此基础上尽量提高磨机产量.从控制的角度看,影响粒度的最重要因素是磨机新给矿量 o_f ,磨矿浓度 d_m 及分级机溢流矿浆浓度(分溢浓度) d_c ,因此将 o_f , d_m 和 d_c 进行回路控制.具体回路设置、检测仪表和执行机构配置如图1所示.图中:-T,-C表示检测仪表和控制器;W-,F-,D-,E分别表示称重、流量、浓度、电流;上标*表示回路控制器设定值; q_m 和 q_c 分别为给矿水量和补加水量; v_m 和 v_c 分别为给矿水阀位开度和补加水阀位开度; e_m 和 e_c 分别为磨机电流和分级机电流.

影响磨矿系统性能的主要干扰因素为矿石可磨性参数 k_m 及原矿块粉比参数 k_r .由于 k_m 和 k_r 难以检测和用精确量确定,通常用有序数对 $\{1, 1.5, 2, 2.5, 3\}$ 标定用语言变量表示的 k_m 的 $\{$ 坏,较坏,中,较好,好 $\}$ 及 k_r 的 $\{$ 大,较大,中,较小,小 $\}$.

3 磨矿过程多变量模糊监督控制

3.1 多变量模糊监督控制策略

本文提出的磨矿过程多变量模糊监督控制(MFSC)方法如图2所示,主要由模糊监督器、回路预设模型及粒度预报器组成.图2中: s_d, s_p, s_a 分别为粒度期望设定值、预报值和实际化验值; s_{pd} 为 s_p 与 s_d 的偏差; I_o 为预设模型的相关工况和边界信息; θ^* 为回路控制器预设设定值; $\theta = (o_f, d_m, d_c)$ 为回路设定值调整量; θ^* 为模糊调整后的回路设定值.

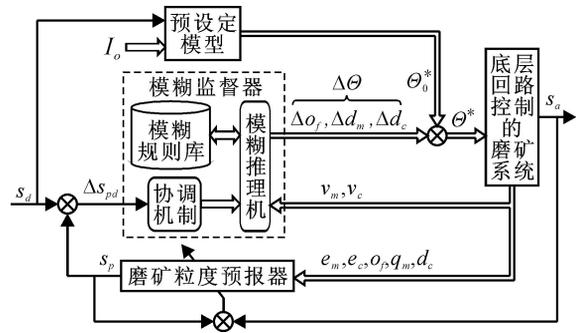


图2 磨矿过程的多变量模糊监督控制策略图

回路预设模型根据 s_d 及相关工况和边界条件信息 I_o 等,采用案例推理技术给出 o_f, d_m 以及 d_c 等控制回路的预设设定值 $\theta^* = (o_f^*, d_m^*, d_c^*)$ ^[8].基于软测量技术^[9, 10]的粒度预报器,根据 d_c, e_m, e_c, o_f, q_m 等辅助变量的实时检测值,采用案例推理技术给出磨矿粒度的实时预报值 s_p ^[10].粒度预报器克服了采用常规检测手段难以对磨矿粒度进行连续在线检测的难题.

模糊监督器根据粒度偏差 s_{pd} 及当前给矿水阀位开度 v_m 和补加水阀位开度 v_c 等信息,采用模糊推理技术,以一种有效提高磨机处理量的调整方式给出回路设定值调整量 $\theta = (o_f, d_m, d_c)$,具体实现算法见3.2节.

3.2 模糊监督器的实现

由3.1节所述的多变量模糊监督控制策略可知,模糊监督器的作用就是实现如下的多变量非线性映射:

$$\theta = (o_f, d_m, d_c) = (s_{pd}, v_m, v_c). \quad (1)$$

3.2.1 回路设定值调整协调算法

为实现上述功能,模糊监督器设有一协调模型,它根据 s_{pd} 的数值特性,采用基于专家知识的规则推理技术,给出一种在保证粒度指标的前提下,有效提高磨机处理量的回路设定值调整方案,而具体调整量度由后续的多变量模糊推理算法给出.协调模型的回路设定值协调规则如表1所示.其中: s 为专家制定的粒度合格标准,与具体工艺有关; o_f^* 为当前 o_f 回路设定值; o_f^{\max}, o_f^{\min} 为 o_f 的上、下限值; $\uparrow, \downarrow, \cdot$ 分别表示上调、下调和不调.

表1 回路设定值协调规则

Rules	If	Then
R1	$s_{pd} > s$ and $o_f^* > o_f^{\max} - 5$	$o_f^* \uparrow, d_m^*, d_c^*$
R2	$s_{pd} > s$ and $o_f^* < o_f^{\max} - 5$	$o_f^* \uparrow, d_m^* \downarrow, d_c^* \uparrow$
R3	$s_{pd} < -s$ and $o_f^* < o_f^{\min} + 5$	$o_f^* \downarrow, d_m^* \uparrow, d_c^* \downarrow$
R4	$s_{pd} < -s$ and $o_f^* > o_f^{\min} + 5$	$o_f^*, d_m^* \uparrow, d_c^* \downarrow$
R5	$s_{pd} \approx s$ and $s_{pd} \approx -s$	o_f^*, d_m^*, d_c^*

3.2.2 多变量模糊推理算法

首先,将 s_{pd}, v_m, v_c 及 Δs_{pd} 等清晰量在各自定义的论域上进行模糊化处理:在 s_{pd} 的论域上定义 7 个模糊集,在 v_m, v_c 的论域上定义 3 个模糊集,在 Δs_{pd} 的论域上定义 9 个单值模糊集,各自的隶属度函数如图 3 所示.另外, o_f, d_m 和 d_c 的具体表示如表 2 所示.考虑到 o_f 和 d_m 对矿石性质波动的敏感性,引入 k_m 和 k_r 因子,其中 k_r 为相关系数.

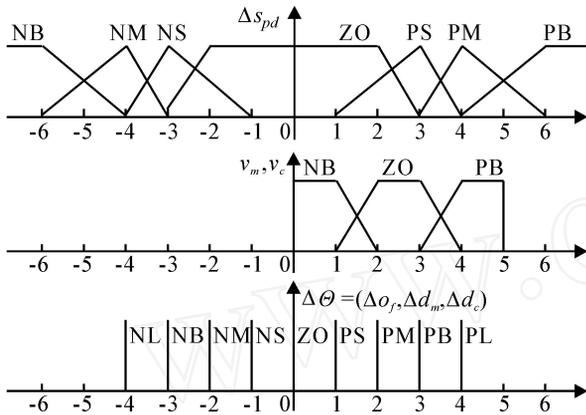


图 3 隶属度函数的具体表示

变量	o_f	d_m	d_c
表示	$1.1k_m + 1.2k_r$	$2.1k_m + 2.2k_r$	3

其次,根据领域专家知识和 s_{pd}, v_m, v_c 及 Δs_{pd} 的模糊集划分,确定用于回路设定值调整的模糊规则库如表 3 所示.模糊规则库中的规则可表示成如下 3 类模糊 If-Then 规则形式:

- R_{1-j} If s_{pd} is $1-j(s_{pd})$ and v_m is $1-j(v_m)$,
Then o_f is $1-j(o_f)$;
- R_{2-j} If s_{pd} is $2-j(s_{pd})$,
Then d_m is $2-j(d_m)$;
- R_{3-j} If s_{pd} is $3-j(s_{pd})$ and v_c is $3-j(v_c)$,
Then d_c is $3-j(d_c)$.

其中: R_{i-j} 表示第 $i(i = 1, 2, 3)$ 类规则的第 j 条模糊 If-Then 规则, $1-j(\cdot) \in \{NL, NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB, PL\}$, N- 表示负, P- 表示正, -L, -B, -M,

表 3 模糊调节规则库

v_m/v_c	s_{pd}		
$o_f/d_m/d_c$	NB	ZP	PB
NB	NB/PB/NL	NL/PB/NL	NL/PB/NB
NM	NM/PM/NB	NB/PM/NB	NB/PM/NM
NS	NS/PS/NM	NM/PS/NM	NM/PS/NS
ZO	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO
PS	PM/NS/PS	PM/NS/PM	PS/NS/PM
PM	PB/NM/PM	PB/NM/PB	PM/NM/PB
PB	PL/NB/PB	PL/NB/PL	PB/NB/PL

-S,ZO 分别表示语言变量中的大大,大,中,小和零.另外,规则库中 R_{1-j} 和 R_{3-j} 两类规则各有 19 条,而 R_{2-j} 类规则数为 7 条.

最后,采用乘积运算求取各规则的适用度 $h(R_{i-j})$,采用重心法进行解模糊化运算,即可得到精确加权解.其中权重为规则的适用度 $h(R_{i-j})$,具体如下:

$$\begin{cases} o_f = \frac{h(R_{1-j}) \cdot 1-j(o_f)}{h(R_{1-j})}, \\ d_m = \frac{h(R_{2-j}) \cdot 2-j(d_m)}{h(R_{2-j})}, \\ d_c = \frac{h(R_{3-j}) \cdot 3-j(d_c)}{h(R_{3-j})}. \end{cases} \quad (2)$$

回路控制器原设定值加上调整量即为调整后的设定值.各控制回路跟踪更新的设定值,从而实现期望所需的生产指标.

4 工业试验

为了验证所提出的 MFSC 方法的有效性,将本文方法在某选厂图 1 所示磨矿过程进行工业试验.试验中,主要过程参数的上下限值确定为: $o_f:65 \pm 10/(t/h)$, $d_m:80 \pm 2/\%$, $d_c:48 \pm 10/\%$, $q_m:12 \pm 5/(m^3/h)$, $q_c:50 \pm 10/(m^3/h)$;根据试验矿石的特性,确定 $k_m = 1.5, k_r = 2$;模糊监督器中, s_{pd} 的论域取其真实值, v_m, v_c 的论域取值如表 4 所示, $\text{sgn } x(i)$ 为符号函数.另外,回路预设模型和粒度预报器的相关待定参数值分别与文献[8]和文献[10]取值相同.

表 4 v_m, v_c 的论域取值(括号中数字为系数 取值)

变 量	论 域
$o_f/(t/h)$	$(0.4i, 0.2i), i = -4, \dots, 4$
$d_m/\%$	$(0.1i, 0.05i), i = -3, \dots, 3$
$d_c/\%$	$i - 0.5 \text{sgn } x(i), i = -4, \dots, 4$
$v_m, v_c/\%$	$15i(i = 0, 1, 2) \text{ or } 15i + 25(i = 3, 4, 5)$

图 4 为磨矿过程 MFSC 下与人工监视给出设定值时的粒度控制效果比较,图中点划线 UCL 和 LCL 分别为粒度的期望目标上、下限值, LCL 与 UCL 之

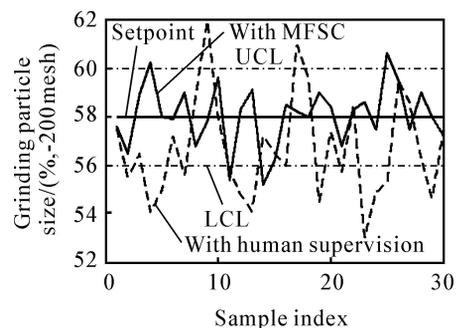


图 4 磨矿过程 MFSC 和人工设定的实际粒度控制效果比较

间的区域即为粒度控制的期望区间.可以看出,人工设定下的磨矿粒度达不到期望的要求,波动范围较大且普遍偏粗,而 MFSC 下的粒度指标基本在目标区间内波动,虽然某些时刻,粒度超出了控制目标区间,但经模糊监督器的调整,粒度又逐渐进入期望区间内,且运行趋于稳定,较好地实现了粒度指标的控制.运行数据还表明,磨机台时处理量可提高约 2.5 t/h,而合格的磨矿产品质量和高的磨矿产量意味着最有效的能耗利用^[2].

5 结 论

本文提出的磨矿过程多变量模糊监督控制方法,可根据磨矿工况的变化,在线自动修改回路控制器的设定值.随着回路控制系统的输出跟踪调整后的设定值,将磨矿粒度控制在期望目标范围内,并有效地提高了磨机处理量.工业试验表明,所提出的方法是有效的,可推广应用于具有类似特性的工业过程控制.

参考文献(References)

- [1] Pomerleau A, Hodouin D, Desbiens A, et al. A survey of grinding circuit control methods: From decentralized PID controllers to multivariable predictive controller[J]. Powder Technology, 2000, 108(2/3): 103-115.
- [2] Ramasamy M, Narayanan S S, Rao C D P. Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme[J]. J of Process Control, 2005, 15(3): 273-283.
- [3] Najim K, Hodouin D, Desbiens A. Adaptive control: State of the art and application to a grinding process[J]. Powder Technology, 1995, 82(1): 59-68.
- [4] Stange W. Using artificial neural networks for the control of grinding circuits[J]. Minerals Engineering, 1993, 6(5): 479-489.
- [5] Li H X, Guan S. Hybrid intelligent control strategy: Supervising a DCS-controlled batch process[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(3): 36-48.
- [6] 张钊, 吴爱国, 裴燕玲. 模糊控制的模糊推理分析[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 905-908.
(Zhang Z, Wu A G, Pei Y L. The fuzzy reasoning analysis of fuzzy control [J]. Control and Decision, 2005, 20(8): 905-908.)
- [7] 王永富, 柴天佑. 自适应模糊控制理论的研究综述[J]. 控制工程, 2006, 13(3): 193-198.
(Wang Y F, Chai T Y. Present status and future developments of adaptive fuzzy control [J]. Control Engineering of China, 2006, 13(3): 193-198.)
- [8] 周平, 柴天佑. 基于案例推理的磨矿分级系统智能设定控制[J]. 东北大学学报, 2007, 28(5): 613-616.
(Zhou P, Chai T Y. Intelligent control setting with CBR for ore grinding classification system [J]. J of Northeastern University, 2007, 28(5): 613-616.)
- [9] Del V R G, Thibault J, Del V R. Development of a soft-sensor for particle size monitoring [J]. Minerals Engineering, 1996, 9(1): 55-72.
- [10] 周平, 柴天佑. 基于案例推理的磨矿粒度软测量方法及其软件实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5397-5400.
(Zhou P, Chai T Y. A case-based reasoning soft-sensor for particle size of grinding process and its software development [J]. J of System Simulation, 2007, 19(23): 5397-5400.)
- [6] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]. Proc of the 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science. New York: IEEE, 1995: 39-43.
- [7] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]. Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks. New York: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [8] Shi Y, Eberhart R. Parameter selection in particle swarm optimization [C]. Proc of the 7th Annual Conf on Evolutionary Programming. New York, 1998: 591-600.
- [9] Zhang Hong, Li Heng, Tam C M. Particle swarm optimization for resource constrained project scheduling [J]. Int J of Project Management, 2006, 24(1): 83-92.
- [10] Zhang Hong, Li Xiao-dong, Li Heng. Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling [J]. Automation in Construction, 2005, 14(3): 393-404.
- [11] Maurice Clerc. Discrete particle swarm optimization illustrated by the traveling salesman problem [DB/OL]. 2000. <http://www.mauriceclerc.net>.
- [12] Sysarda G. Handbook of genetic algorithms[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [13] Kolisch R. Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation [J]. European J of Operation Research, 1996, 90(2): 320-333.
- [14] Patterson J H. Comparison of exact approaches for solving the multiple constrained resource project scheduling problem [J]. Management Science, 1984, 30(7): 854-867.

(上接第 684 页)