

# 一种新的超细研磨机负荷实时控制方法

高 嵩, 唐耀庚

(南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘 要:** 提出了一种新的研磨机负荷实时控制方法, 该算法借鉴预测控制思想, 根据当前输出偏差、偏差变化和参考轨迹确定下一时刻的控制增量, 应用模糊逻辑对控制增量加权系数在线进行动态调整。仿真研究与应用实验表明, 所提出的控制策略算法简单, 易于工程实现; 用于磨机负荷实际控制, 取得了满意的效果。

**关键词:** 磨机负荷; 控制增量; 权重系数; 模糊逻辑; 自适应

**中图分类号:** TP13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2008)06-0055-04

## Real-Time Control Method for A Novel Grinding Mill Load

Gao song, Tang Yaogeng

(School of Electrical Engineering, South China University, Hengyang, Hunan421001,China)

**Abstract:** In view of making use of predictive control approach as reference, the control increment for next step time is determined according to output error, error change and desired trajectory of the output variable at present. Using the weight by modified online with a fuzzy controller, a new mill load of real-time control method is proposed. The simulation research and practical application show that the proposed control strategy is simple and easy to be used in real control process and can obtain the perfect control results.

**Key words:** mill load; control increment; weight; fuzzy logic; self-adaptation

## 0 引言

研磨机是生产超细粉体材料的主要设备, 生产过程中, 在保证产品质量的前提下最大限度地提高磨机处理量, 使研磨机保持在最佳负荷下运行(使磨机负荷保持稳定, 保持较高的研磨效率)是一个关键的因素, 因此, 研磨机负荷是超细粉碎生产过程的重要控制参数<sup>[1,2]</sup>。

研磨机的负荷通过调节給料速率来控制。但物料研磨生产过程复杂, 研磨机的负荷还与许多因素如粗料返料量、被磨物料的粒径大小及其分布等有关<sup>[3,4]</sup>, 而粗料返料量和研磨机中被磨物料的粒径大小与分布随时都在变化。被磨物料的形状和易磨性等因素也会影响研磨机的负荷状态。研磨机的负荷不但与许多参数有关, 还存在许多不确定因素, 很难用解析的方法定量描述研磨过程<sup>[5]</sup>。采用常规的控制方式, 如PID调

节, 难以适应超细粉碎设备生产工况变化, 不能及时克服系统中的扰动, 保持研磨机负荷稳定。针对超细粉碎设备生产过程特点, 提出一种新的研磨机负荷控制算法, 该算法借鉴预测控制思想, 根据参考轨迹和系统当前输出偏差和偏差的变化, 确定下一时刻的控制作用, 利用模糊推理动态调整算法参数, 从而提高控制系统的适应能力。

## 1 控制算法

超细粉碎设备研磨机负荷难以直接测量, 一般采用间接测量法。研磨机负荷与研磨机电机功率之间的关系如图1所示<sup>[6]</sup>。随着研磨机负荷增大, 电动机输出功率相应增大, 但到达某一极值后(图1中A点), 随着磨机负荷的增加, 有用功率值反而下降, 此极值是磨机负荷的最佳点, 也是研磨机过负荷点。由于电

收稿日期: 2008-07-19

作者简介: 高 嵩(1958-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 南华大学高级工程师, 主要研究方向为智能控制。

动机输出功率直接与研磨机负荷有关，所以以研磨机电机功率作为被控参数。功率检测法受环境影响小，测量精度较高，通过检测电动机功率可以较好地监测研磨机负荷。但由于存在极值点，这在设计控制系统时需加以考虑。

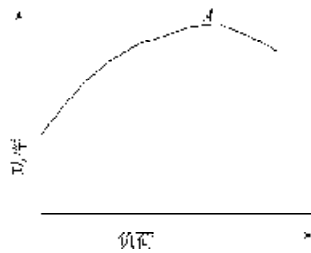


图1 研磨机负荷与功率关系  
Fig. 1 The relationship between mill load and motor power

设在时刻  $nT$ ，系统给料机的控制电压是  $u(nT)$ ，对应的研磨机电机功率输出是  $P(nT)$ ，如果控制电压  $u$  有改变量  $\Delta u$ ，相应地功率输出  $P$  有改变量  $\Delta P$ ，当  $\Delta P$  和  $\Delta \dot{P}$  都很小时，考虑增量模型，给料机控制电压改变量和研磨机电机功率改变量之间的关系可以近似地表示为：

$$\Delta P \approx K \Delta u, \tag{1}$$

给料机控制电压改变量和研磨机电机功率改变量变化之间的关系是：

$$\Delta \dot{P} \approx \frac{K}{T} \Delta \dot{u}, \tag{2}$$

式(1)、(2)中： $K$ 是负荷控制系统前向通道增益； $T$ 是采样周期。

设系统在时刻  $nT$  时的功率输出偏差和偏差的变化分别是  $\Delta P$  和  $\Delta \dot{P}$ ，要消除偏差，理论上控制电压修正量  $\Delta u_e$  应取  $\Delta u_e = -\Delta P / K$ ，

相应地，控制电压修正量的变化  $\Delta u_{ce}$  是：

$$\Delta u_{ce} = T \Delta \dot{P} / K. \tag{4}$$

为了限制控制增量的剧烈变化，减小对系统过大的冲击，引入控制增量权重因子  $\alpha$ ，同时考虑控制增量的变化速率，实际控制增量  $\Delta u$  取如下形式：

$$\Delta u = (1 - \alpha) \Delta u_e - \alpha \Delta u_{ce}, (0 \leq \alpha \leq 1). \tag{5}$$

控制目标是使系统输出沿一条事先规定的曲线到达设定值，且在设定值变化、存在扰动或过程动态特性改变的情况下，系统输出仍然能跟踪设定值。对于研磨机，为防止磨机负荷波动过大，希望从当前时刻输出  $P(nT)$  尽可能平稳的趋近设定值  $P_{sp}$ ，因此采用如下—阶滤波方程：

$$P(nT+T) = \beta P(nT) + (1 - \beta) P_{sp}, \tag{6}$$

式(6)中： $P(nT+T)$ 是时刻  $nT+T$  的功率输出； $\beta$ 称柔化系数，且  $0 \leq \beta < 1$ 。

可得功率输出改变量及改变量的变化为：

$$\Delta P = P(nT+T) - P(nT) = \beta(P_{sp} - P(nT)) = \beta e(nT), \tag{7}$$

$$\Delta \dot{P} = \beta \dot{e}(nT) = \beta c_e(nT) / T, \tag{8}$$

式(8)中， $c_e(nT) = e(nT+T) - e(nT)$  是偏差变化量。

综合式(2)~(8)，有：

$$\Delta u = \beta[(1 - \alpha)e(nT) + \alpha c_e(nT)] / K, \tag{9}$$

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u = u(k) +$$

$$\beta[(1 - \alpha)e(nT) + \alpha c_e(nT)] / K. \tag{10}$$

上式中，在工作点附近，增益  $K$  可视为常数，其值由实验求出。 $\beta$  取值会影响跟踪速度， $\beta$  越小，系统趋于期望值越快，即系统的跟踪快速性好，但系统的鲁棒性变差。反之，系统的柔性越好，鲁棒性越强，但跟踪速度慢。显然， $\beta$  只影响过渡过程，不影响稳态性能。因此，可以根据对闭环系统期望的响应速度和过渡过程时间要求确定  $\beta$  值。这里取  $\beta = \exp(-T/T_c)$ ， $T$  为采样周期， $T_c$  是期望的闭环系统的时间常数，它取决于系统特性及对控制性能的要求。

及时抑制扰动是设定值控制的重要要求。由式(9)可见， $\alpha$  取值反映了对偏差  $e$  和偏差变化  $\Delta e$  的加权程度，偏差和偏差的变化在不同的控制阶段对控制器性能有不同的影响。在系统偏差大时，希望系统尽快消除偏差， $\alpha$  应选大些；而偏差小时，希望系统尽快趋于稳定，则应加大偏差变化的权重。显然，要取得满意的控制效果， $\alpha$  应该随着调节过程而变化，以适应系统的动态过程。模糊逻辑不需建立系统的动态模型，为自动调整  $\alpha$  值提供了方便可行的方法<sup>[7,8]</sup>。

## 2 模糊控制器设计

采用模糊自适应控制的研磨机负荷控制系统组成原理如图2所示<sup>[9]</sup>。

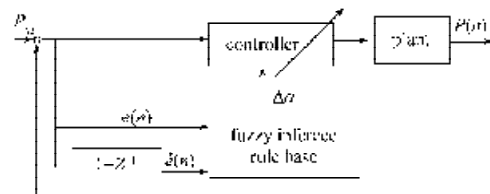


图2 研磨机负荷模糊控制系统原理图

Fig. 2 The principle diagram of mill load fuzzy control system

功率偏差和偏差的变化作为模糊控制器输入信号，模糊控制器的输出是权重系数  $\alpha$  的修正量  $\Delta \alpha$  通过对输入信号进行模糊推理，确定修正量  $\Delta \alpha$  的大小。

对模糊输入输出信号均进行规一化处理，这样，磨机工作在不同负荷点时，各模糊变量均变换到论域  $[-1, 1]$  内。

功率偏差取5个语言子集：偏差负大，偏差负小，零，偏差正小，偏差正大。隶属函数如图3所示。功率偏差变化也取5个语言子集：负变化快，负变化慢，平稳，正变化慢，正变化快。隶属函数取三角形函数。 $\alpha$  的修正量  $\Delta \alpha$  均取5个语言子集：负大，负小，零，正小，正大。隶属函数也均取三角形函数。

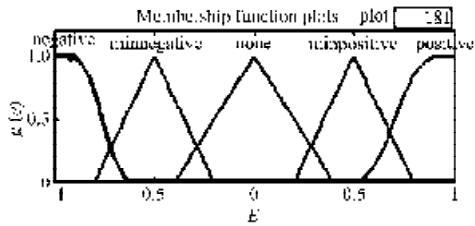


图3 模糊变量隶属函数

Fig. 3 Membership functions of fuzzy variable

建立模糊推理规则库, 对 $\alpha$ 进行调整。即根据功率偏差和偏差的变化确定 $\alpha$ 的修正量, 模糊控制规则可表示为如下的一组模糊条件语句:

$$\text{if } v_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } v_2 \text{ is } A_2^j \text{ then } \Delta\alpha \text{ is } C_{ij}, \quad (11)$$

式(11)中:

$i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$ , 规则总数为 $M \times N$ ;

$v_1, v_2$  为输入信号;

$A_1^i, A_2^j$  为输入信号的模糊集合;

$\Delta\alpha$  为 $\alpha$ 的修正量;

$C_{ij}$  为对应输入组合( $A_1^i, A_2^j$ )的输出变量的模糊集合。

模糊规则通过分析磨机的动态特性、偏差和偏差的变化确定。模糊推理基于最大最小推理法, 模糊决策采用重心法, 即:

$$\Delta\alpha_c = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(z_i)}, \quad (12)$$

式(12)中:

$z_i$  为输出变量模糊集合中的元素;

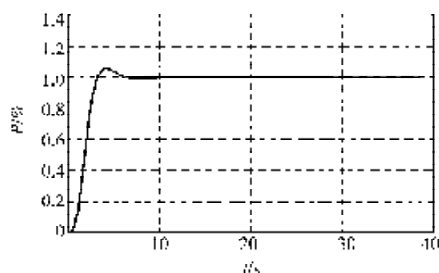
$n$  为输出变量模糊集合中的元素数。

可求得时刻 $nT$ 时的 $\alpha$ 值,  $\alpha_n = \alpha_{n-1} + \Delta\alpha_n$ , (13)

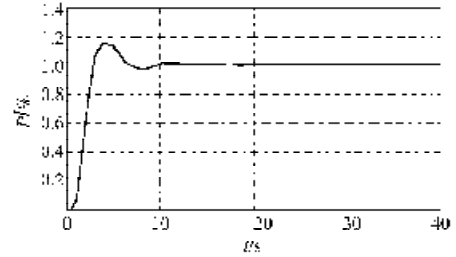
式(13)中, $\alpha_{n-1}$ 是 $(n-1)T$ 时刻的 $\alpha$ 值。

### 3 仿真与实验情况

对图2所示模糊控制系统, 进行了仿真试验, 图4a)是系统的阶跃响应特性。作为比较, 图4b)给出了采用常规PID控制时的系统响应。从图4中可看出, 采用模糊自适应控制时, 系统阶跃响应的最大超调量为5.5%, 而采用常规PID控制时最大超调量为16.2%。这表明采用所提出的控制策略, 能更好地满足研磨机启动平稳的要求。



a) 模糊自适应控制

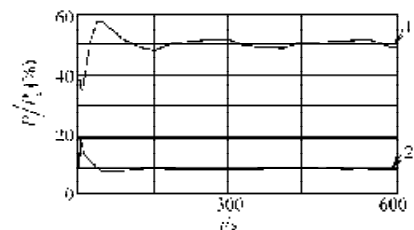


b) 常规PID控制

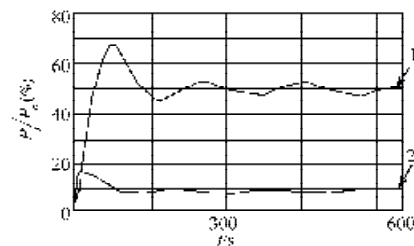
图4 控制系统的阶跃响应

Fig. 4 Step response of the control system

本文所讨论的研磨机负荷控制策略在某小型超微研磨设备中进行了控制实验, 所控制的超细粉碎设备研磨机电机型号Y315M, 额定功率7.5 kW。研磨机由旋转给料器给料, 旋转给料器电机功率0.75 kW, 采用变频器调节给料量。模糊控制系统由工业控制计算机实现, 功率测量采用WB功率变送器, 测量信号通过A/D转换模块输入, 控制系统的控制电压通过D/A转换模块输出到旋转给料器电机变频器。在设定点附近, 可认为放大系数 $K$ 基本不变, 其值通过实验测定。被研磨物料是经过粉碎后的某种碳酸钙矿石, 给料粒度无法实时测量, 粒径分布范围很宽, 因此进入研磨机中的原料粒径变化较大, 而且粒径的改变是随机的。实验中先测试确定图1中的过负荷点, 控制器对负荷变化过程进行跟踪和判断, 使研磨机工作状态不会越过过负荷点。突加阶跃给定时研磨机电机功率响应如图5a)所示, 图中 $P_c$ 是电动机额定功率。功率波动最大幅度小于4%。作为对照, 图5b)给出了采用常规PID控制时的阶跃响应, 这种情况下, 不但系统输出的最大超调量较大, 而且系统存在较大时滞性, PID调节不及时, 负荷波动较大。



a) 模糊自适应控制



1-功率; 2-控制器输出

b) 常规PID控制

图5 实验中控制系统的阶跃响应

Fig. 5 Step response of the control system in test

### 4 结语

本文根据超细粉碎设备生产过程的特点,设计了一种新的研磨机负荷控制算法,算法参数采用模糊逻辑动态调整。与常规控制方法相比较,所设计的研磨机负荷控制系统,对过程的动态变化具有更强的适应能力,控制系统性能满足生产工艺的要求。由于研磨机负荷稳定,保证了产品的粒度分布符合要求。文中所提出的控制策略,控制算法结构简单,计算工作量少,也可用于其它复杂非线性过程的控制,具有较强的实用价值。

#### 参考文献:

[1] 王东风,李利平. 球磨机制粉系统控制的现状和前景[J]. 东北电力技术, 2002, 23(5): 5-9.

[2] Herbst J S, Pate W T, Oblad A E. Model-Based Control of Mineral Processing Operations[J]. Power Technology, 1992, 69: 21-32

[3] VAN NIEROP MA, MOYS M H. Exploration of mill power modelled as function of load behaviour[J]. Minerals engineering, 2001, 14(5), 1267-1276.

[4] Morrell S, Valery W. Influence of Feed Size on AG/SAG mill Performance[R]. Canada: University of British Columbia Vancouver, BC, 2001.

[5] 殷兴武. 振动研磨机介质运动状态及入料粒径分析[J]. 矿山机械, 1999 (4): 20-21.

[6] 王泽红,陈炳辰. 球磨机负荷检测的现状与发展趋势[J]. 中国粉体技术, 2001, 7(1): 19-23.

[7] Cai Jun, WANG Yong-hao. Fuzzy Control of Ball Mill for Pulverizing System of Thermal Power Plant[J]. EAST CHINA ELECTRIC POWER, 2006, 34(7): 23-27.

[8] 卓泽强. 模糊控制在球磨机中的应用[J]. 北京石油化工学院学报, 2003, 11(4): 53-57.

[9] King P J, Mamdani E H. The application of fuzzy control system to industrial processes[J]. Automatic, 1977, 13: 235-242.

(责任编辑: 廖友媛)

.....

## 我校又一产学研基地与地方共建签约仪式隆重举行

我校与广东省东莞市道滘镇产学研基地共建签约仪式暨东莞实习基地揭牌仪式在道滘镇隆重举行。

仪式上, 东莞市副市长吴道闻在致辞中表示东莞市市政府将继续关注和支持湖南工业大学东莞实习基地的发展, 同时希望道滘镇政府与湖南工业大学不断扩大合作成效, 办好实习基地, 他还希望湖南工业大学东莞实习基地为道滘镇乃至东莞市培养更多的优秀专业人才, 为东莞市产业结构调整升级提供人才保障。

王汉青校长在讲话中对东莞市委、市政府和道滘镇镇委、镇政府大力支持东莞实习基地的建设表示感谢。

仪式上, 王汉青校长与道滘镇副镇长贾贵斌签署了《湖南工业大学与东莞市道滘镇产学研基地共建协议》, 并与嘉宾一起为我校东莞实习基地揭牌。

据悉, 道滘镇位于东莞市西部, 地处穗深经济走廊间, 是广东省经济较发达地区之一, 根据协议, 道滘镇政府将每年为实习基地提供一定的科研经费、学生实习等方面的支持。此次, 产学研基地共建仪式的签署与实习基地的建立将拓宽我校大学生社会实践的范围, 为学生实习创造良好的条件。