

·人工智能技术应用·

原矿浆制备过程的智能优化设定方法及应用

曾 宇¹,李 强²,陈 建³

(1. 北京华深科技发展有限公司 工程部,北京 100086; 2. 鞍钢股份有限公司; 3. 罗克韦尔自动化公司)

摘要:针对中国铝业山西分公司氧化铝分厂原矿浆制备过程机理复杂、关键被控变量的优化设定值不易获得从而使生产指标难以控制在期望目标值范围内的问题,将案例推理和专家系统技术相结合,提出一种多变量智能优化设定方法。预设模型根据生产指标的目标值和工况的变化给出控制回路的预设值,基于专家规则的修正模型根据实际工况的变化对预设值进行校正,从而实现了控制回路设定值的在线自动调整。研发了基于分布式控制系统的原矿浆制备过程设定软件,此系统应用于原矿浆制备过程的生产实际,能够适应工况的频繁变化,自动更新回路设定值,从而实现了生产指标的优化控制,取得了明显成效。

关键词:优化设定;案例推理;专家规则;原矿浆;生产指标

中图分类号: TF821; TP311.52 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059(2009)04-0005-04

Intelligent optimizing setting method for preparation process of ore pulp and its application

ZENG Yu¹, LI Qiang², CHEN Jian³

(1. Project Department, Beijing Huashen Science & Technology Development Co., Ltd., Beijing 100086, China;

2. Anshan Iron and Steel Co., Ltd.; 3. Rockwell Automation Co., Ltd.)

Abstract: Because optimizing setting values of key controlled variables were difficult to find in preparation process of ore pulp, and production indices were difficult to be controlled within target ranges, a multivariable intelligent optimizing setting method is presented combining case-based reasoning (CBR) with expert system. Presetting values of control loops are given by presetting model according to production target and change of working conditions, and corrected by revising model based on expert rules according to change of working conditions, so online automatic adjustment of control loop setting values was realized. Setting software of pulp preparation process based on distributed control system was developed. Industrial application has proved that it can adapt frequently changed working conditions and update automatically loop setting values. Optimizing control of production index was achieved and obvious effect was obtained.

Key words: optimizing setting; case-based reasoning; expert rule; ore pulp; production index

0 引言

原矿浆制备过程主要由磨矿系统、旋流器分级系统等组成,关键被控变量众多,有各物料的配比、旋流器入口压力等重要参数需要控制,这些变量对生产指标影响显著,具有强耦合性、强非线性等复杂特性,其间存在许多难以定量和模型化的

因素,给生产指标的控制带来很大难题。

为了实现生产指标的优化控制,必须寻求针对性的解决方法,需要考虑诸多内因及外因。当已知或可以通过过程机理分析获得设定模型时,可以采用机理设定方法^[1];如果难以获得对象的精确数学模型,就必须寻求其他方法。近年来,案

收稿日期: 2009-02-23;修改稿收到日期: 2009-04-27

作者简介:曾宇(1970-),男,辽宁抚顺人,工程师,主要从事自动控制系统工程设计与研发、自动化系统集成及实施等工作。

例推理^[2]和专家系统^[3]等智能方法得到了关注,被广泛应用于工业过程的建模与控制中,例如,文献[4]针对加热炉内的温度设定问题,利用专家规则,建立了每段炉温的设定模型,应用后使指标得到了优化;文献[5]针对某厂冷连轧机轧制规程的优化设定问题,以板厚、板形为目标函数,采用智能方法和免疫遗传算法对冷连轧机的轧制参数进行优化分析,达到了满意的效果;文献[6]则是针对竖炉焙烧过程的优化设定问题,提出了智能优化设定模型,应用后提高了竖炉焙烧生产过程的生产指标。诸如此类的文献虽然很多,但迄今为止,对原矿浆制备过程关键被控变量进行优化设定方法的研究及应用情况还未见报道。

北京华深科技发展有限公司针对中国铝业山西分公司氧化铝分厂原矿浆制备过程中的关键被控参数的设定问题,采用智能方法,对其关键被控变量建立设定模型,在分布式控制系统(DCS)中开发出实现算法,并对系统的软、硬件系统进行了研发。研究项目于2007年在氧化铝分厂原矿浆制备过程中正式投入使用后,生产指标得到了提高,达到了期望的目标。

1 生产工艺

原矿浆制备的工艺流程如图1所示。高铝矿、石灰通过电子皮带秤进入格子磨研磨,调配好的碱液通过碱液泵打入饲料槽,然后和旋流器的底流一起进入格子磨研磨。从格子磨出来的料浆经过饲料槽和饲料泵进入旋流器,旋流器的溢流(原矿浆)进入下道工序,底流返回格子磨重新研磨。在整个流程中,高铝矿、石灰、碱液流量是三个关键的被控变量,它们的配比是制备过程中的重点。

原矿浆制备主要的质量指标有:细度、固含、

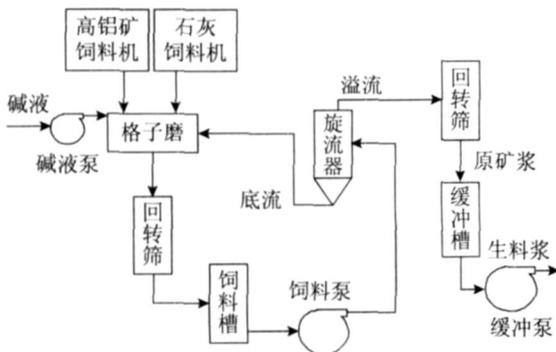


图 1 原矿浆制备工艺流程

Fig 1 Preparation process of the ore pulp

配钙。在这三项指标中,细度指标是最难控制的指标,主要影响因素有旋流器的给矿压力。为了保证旋流器运行的稳定与产品质量的稳定,必须控制旋流器的给矿压力,保证旋流器的工作状况最佳,防止产品质量的波动,同时也要兼顾缓冲槽液位,避免被打空或打冒。因而,旋流器的压力、缓冲槽液位也是关键的被控变量。

根据上面的分析,必须从工艺要求的角度出发,根据生产实际,对影响原矿浆质量、产量的一些主要环节寻求先进、合理的优化技术与方法,以达到工艺要求的各项经济技术指标。具体来说,在原矿浆制备过程中,三种原料的流量、旋流器的压力、缓冲槽液位的合理设定是影响原矿浆产量、质量的重要因素,由程序自动给出合适的操作值是实现原矿浆制备过程全自动的关键。

2 智能优化设定方法

2.1 系统结构与功能

根据前述,从稳定原矿浆细度、提高磨矿效率的总体控制目标出发,结合专家系统、案例推理等人工智能技术,可确定五个关键被控变量的设定方案,模型的结构原理参见图2。

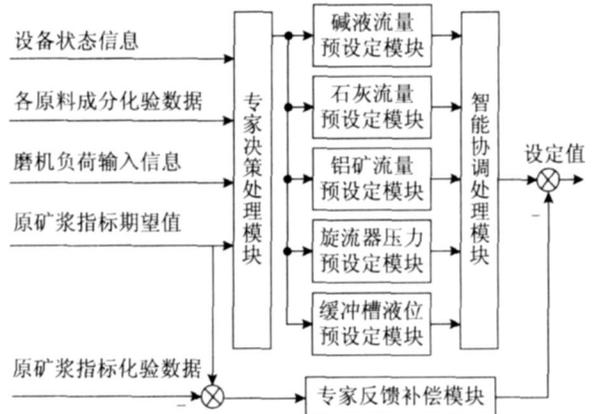


图 2 原矿浆制备过程智能优化设定模型原理

Fig. 2 Frame of intelligent optimizing setting model to the preparation process of the ore pulp

模型由专家决策处理模块、各参数预设模块、智能协调处理模块、专家反馈补偿模块组成。主要功能是从实际过程来的各种数据,包括设备状态信息、各原料成分化验数据、磨机负荷输入信息、原矿浆指标的期望值,通过专家决策处理模块对当前的生产状态进行判断,若处于正常工作状态,则启动后面的五个预设模块,预设值进入到智能协调处理模块,采用专家规则,对各设定值进行分析,以协调这些变量之间的矛盾,防止产生

误设定,最后,专家反馈补偿模块根据原矿浆指标的期望值与化验值的偏差,对设定值进行补偿校正,得到的最终设定值送至各控制回路,底层的回路控制将稳定跟踪这些设定值,以保证生产指标的优化实现。

2.2 实现方法

2.2.1 预设定模块

预设定功能采用案例推理方法实现。得到各过程参量后,当前的工况描述就由这些参量表示,再根据原矿浆制备过程以往人工操作时的经验案例来实现预设定。设定案例以数据库的形式存储于计算机中,每条案例记录 $C_k (k = 1, 2, \dots, p)$,包括工况描述 X_k 和相应的解 Y_k ,可表示为:

$$C_k = (X_k, Y_k) \quad (1)$$

历史案例的工况描述 X_k 和相应的设定解 Y_k 可分别表示为:

$$X_k = (x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}) \quad (2)$$

$$Y_k = (y_{1,k}, y_{2,k}, \dots, y_{m,k}) \quad (3)$$

设当前的工况描述是 $X = \{x_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$,它与每一条案例记录 C_k 的相似度是:

$$\text{Sim}(X, C_k) = \prod_{i=1}^n \left[1 - \frac{|x_i - x_{i,k}|}{\text{Max}(x_i, x_{i,k})} \right] \quad (4)$$

式中, α_i 为加权系数,满足:

$$\prod_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (5)$$

设相似度的阈值是 $V_{\text{Sim}} [0, 1]$,经过案例检索,设检索出的匹配案例个数为 q ,这些匹配案例的相似度为:

$$k = \text{Sim}(X, C_k), k = 1, 2, \dots, q \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \text{Sim}(X, C_k) \geq V_{\text{Sim}}$$

经过案例重用,预设定值的解 $Y = \{y_j\} (j = 1, 2, \dots, m)$ 可表示为:

$$y_j = \prod_{k=1}^q (\alpha_k \times y_{j,k}) / \prod_{k=1}^q \alpha_k \quad (7)$$

式中, $y_{j,k}$ 为相应匹配案例的解。这样,就得到了预设定值 y_j 。

2.2.2 专家规则

图 2 中,专家决策处理模块、智能协调处理模块、专家反馈补偿模块均采用基于专家规则的推理方法来实现。以专家反馈补偿模块为例,介绍具体算法。

原料浆指标的期望值 J 与化验值 I 之差为:

$$E = J - I \quad (8)$$

以原料浆指标的期望值 J 为基准,设各种具

体生产指标的容许控制增幅 B 是大于 0 的一个数,采用专家规则对智能协调处理模块的输出值进行反馈校正,用如下的产生式规则:

$$\text{IF } E > B \text{ THEN } SP_j = y_j + \alpha_j \quad \text{ELSE } SP_j = y_j \quad (9)$$

式中, SP_j 为 j 点设定值; α_j 为专家给出的校正系数。式 (9) 的含义是,如果指标的控制误差大于预设的误差阈值,则根据拟定好的校正规则 (限于篇幅,此处不一一列举具体的规则数据) 对预设定值进行补偿;否则,对预设定值不做修改。求出的最后设定值 SP_1, SP_2, \dots, SP_m 输出到基础控制回路,由各控制回路实现各变量的稳定跟踪控制。

3 系统开发及应用

3.1 硬件结构

目前,DCS 已广泛应用于工业过程控制中^[7]。本文采用如图 3 所示的硬件结构,模型机和操作站的级别同等,均位于节点总线上,可对生产过程进行操作及系统的维护和管理。不同的是,操作站直接对生产过程进行控制,而模型机是对操作站进行管理和控制,包括对各关键被控变量的设定值进行计算、分析和处理。

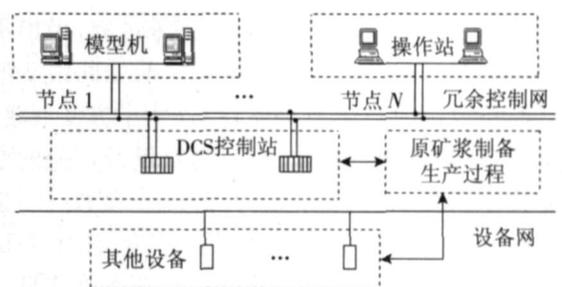


图 3 硬件结构

Fig. 3 Hardware structure

3.2 软件结构

图 4 给出了设定模型软件运行所必须的支撑软件结构,除了设定模型软件以外,其他支撑软件和控制软件由 DCS 设备供货商统一提供。该软件结构具有 OPC 功能,支持设定模型软件与控制软件间的数据通信和信息共享,并保证将模型设定值送至图 3 中的 DCS 控制站中的基础控制回路。

3.3 工业应用

中国铝业山西分公司氧化铝分厂拜耳法原矿浆磨制配备的主要工艺设备有格子磨五台,规格为:3.6 m × 4.5 m,产能设计为 55 t/h,分级设备为衬胶旋流器 (550 mm),配套有饲料槽四台、缓冲

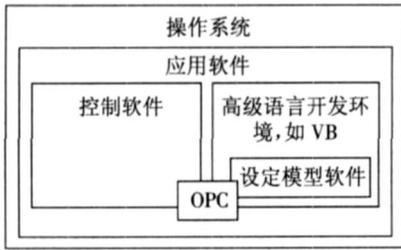


图 4 软件结构

Fig. 4 Software structure

槽五台、饲料泵六台、缓冲泵八台。以往的原矿浆制备过程控制完全由操作人员凭经验进行频繁的操作,劳动强度很大,而且一旦操作不当将会严重影响生产指标,造成较大的经济损失。采用本文提出的智能优化设定方法及开发出的相应软件,在 DCS 中进行了调试并投入运行。

为了考察图 2 所示设定方法的效果,将设定模型与基础控制回路断开进行实验。实验过程中,磨机负荷的变化情况如图 5 中的曲线 1 所示,设定模型的工作周期是 10 s,在 10 s 间隔内,计算出的磨机负荷呈明显的下降趋势(其他参量处于动态稳定状态之中,故未在图中标示),此时若不采取措施,会影响产量,甚至出现空磨现象。在这种情况下,经过预设、处理、校正等过程,得出更新后的铝矿、碱液、石灰的总量设定值如曲线 2 所示。总量设定值增加了 25% 左右(为了方便观察,将磨机负荷与铝矿、碱液、石灰的总量设定值的变化率作了折算;而另外两个关键被控参数——旋流器压力和缓冲槽液位基本维持不变,图中未标示),这种调整与原矿浆制备过程的操作机理是一致的。从图 5 中可以看到,随着铝矿、碱液、石灰的总量设定值的增加,磨机负荷得以增加,防止了产量的继续下降。图中的曲线响应表明设定模型能自动根据工况条件的变化给出更新后的设定值,实现了设定模型工作的预期功能,说明了图 2 所示各模型的有效性。

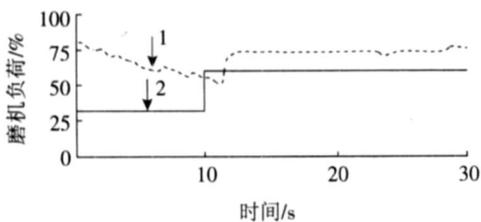


图 5 参量变化趋势图

Fig. 5 Trending of variables

1—磨机负荷; 2—总量设定值

在实验成功的基础上,将设定模型与基础控制回路投入到生产实际中,用设定模型代替操作员根据工况的变化对设定值进行在线自动调整,并通过基础控制回路实现关键被控变量的稳定控制。经过运行,基于智能方法的设定模型在工况变化频繁的情况下仍能如图 5 所示的实验一样自动更新回路设定值,从而保证了产品质量及产量的优化实现。项目应用以后,和以往同期的统计数据相比,产量提高了约 5%,细度合格率提高了约 3%,设备运转率提高了 3%,操作人员减少了 10%,真正实现了生产指标的优化控制,取得了显著效益。

4 结束语

作者将智能方法应用于原矿浆制备过程关键被控变量的优化设定中,对影响生产指标的关键被控变量实现了预设、分析处理、自动校正的智能化处理。该系统在机理复杂、工况变化频繁等复杂环境中,只要根据长期积累的操作经验和掌握的领域知识采用一定的方法,就能够适应外部条件的变化和生产的复杂性。目前由于指标化验过程的大滞后,给专家补偿校正的实时性带来不利影响,如何克服这种影响则是以后要研究并加以解决的问题。实际应用表明,对类似的工业过程建立智能化的设定方法完全可以代替人的手动操作,不但降低了劳动强度,而且为实现生产指标的优化控制打下了良好的基础。

参考文献:

- [1] 柴天佑,王中杰,张莉. 加热炉的炉温优化设定模型[J]. 自动化学报, 2000, 26(4): 537-541.
CHA I Tian-you, WANG Zhong-jie, ZHANG Li. Optimal setting model of reheat furnace temperature[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(4): 537-541.
- [2] W aheed A, Adeli H. Case-based reasoning in steel bridge engineering [J]. Knowledge-Based System, 2005, 18(1): 37-46
- [3] XU Dong-ling, LIU Jun, YANG Jian-bo, et al. Inference and learning methodology of belief-rule-based expert system for pipeline leak detection [J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(1): 103-113.
- [4] WANG Wei, LI Han-xiong, ZHANG Jing-tao. A hybrid approach for supervisory control of furnace temperature [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(11): 1325-1334.

(下转第 34 页)

单位取样响应、输出和输入响应的 z 变换; M, N 分别为输出和输入的阶数; b_k, a_k 分别为输出和输入对应阶数的系数。

二阶数字陷波器可以用下面的差分方程表示:

$$Y(t) = a_1 Y(t-1) + a_2 Y(t-2) + b_0 X(t) + b_1 X(t-1) + b_2 X(t-2) \quad (14)$$

式中, $X(t)$ 为 t 时刻伺服阀输出; $Y(t)$ 为 t 时刻伺服阀经数字陷波器滤波后的输出; b_0, b_1, b_2, a_1, a_2 分别为伺服阀经滤波前后输出对应阶数的系数。

(2) 蝶形输出增益。活套液压缸是单杆结构, 活塞腔和活塞杆腔的压力作用面积相差较大, 因此对于相同的伺服阀开度 (正反两个方向开度相同), 活塞杆伸出和收回的速度相差也比较大, 为达到活套调节时活塞杆伸出和收回的动态响应一致的要求, 必须调节伺服阀输出增益, 算法如下:

设 $F_m = P_s \cdot S_p - P_t \cdot S_r$

$$F_n = P_t \cdot S_p - P_s \cdot S_r$$

$$\text{则 } K_1 = \frac{F_m - F_n}{\sqrt{2} \cdot (F_m - F_a)} \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{F_m - F_n}{\sqrt{2} \cdot (F_a - F_n)} \quad (16)$$

式中, P_s 为系统压力; P_t 为回油压力; K_1 为活塞杆伸出时的伺服阀开度增益; K_2 为活塞杆收回时的伺服阀开度增益。经过增益修正后, 实际应用中活套液压缸活塞杆伸出和收回时对应的压力 P 和流量 Q 曲线如图 6 所示, 可以看到两条曲线呈蝴蝶形对称。

(3) 伺服阀漂移补偿。由于活套伺服阀在调节张力时常在零位区域附近工作, 而伺服阀零点漂移又是由工作条件或环境变化引起的, 很难完全消除, 因此, 伺服阀输出加漂移补偿就很有必要。伺服阀漂移补偿其实就是对伺服阀输出加一个时间常数很大的积分补偿, 在伺服阀长期工作

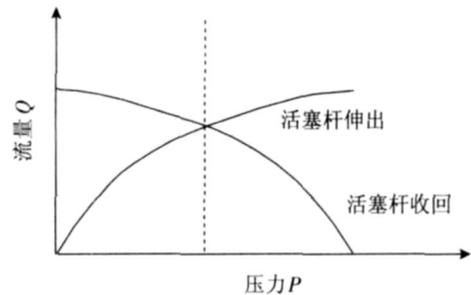


图 6 增益修正曲线

Fig 6 Gain correction curve

在零位附近某个范围内该积分器工作。实践证明该方法可有效补偿伺服阀零位漂移带来的稳态误差。

3 结论

武钢 1 580mm 热连轧精轧机活套控制系统于 2007 年 12 月投入应用以来, 机架间带钢套量、张力控制稳定良好, 降低了精轧机堆钢和拉钢事故的发生, 得到了用户的好评。

参考文献:

- [1] 刘 玠, 杨卫东, 刘文仲. 热轧生产自动化技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 120-121.
- [2] 王庭宽, 李绍阳, 吴家昌, 等. 热轧带钢生产中电动活套的控制 [J]. 电气传动, 2005, 35 (1): 53-55. WANG Ting-kuan, LI Shao-yang, WU Jia-chang, et al. Electric looper control system of hot strip mill [J]. Electric Transmission, 2005, 35 (1): 53-55.
- [3] 傅 剑, 杨卫东, 刘 彤, 等. 活套张力矩实时计算的多项式逼近算法 [J]. 控制工程, 2004, 11 (3): 226-228. FU Jian, YANG Wei-dong, LIU Tong, et al. Polynomial approach algorithm in real time calculation of looper tension moment [J]. Control Engineering of China, 2004, 11 (3): 226-228.
- [4] 姚天任, 江太辉. 数字信号处理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 107-108. [编辑: 沈黎颖]

(上接第 8 页)

[5] 王 焱, 孙一康. 基于板厚板形综合目标函数的冷连轧机轧制参数智能优化新方法 [J]. 冶金自动化, 2002, 26 (3): 11-14.

WANG Yan, SUN Yi-kang. New intelligent optimization means for rolling parameters of cold strip tandem mill based on strip gauge and shape objective function [J]. Metallurgical Industry Automation, 2002, 26 (3): 11-14.

[6] 严爱军, 柴天佑, 岳 恒. 竖炉焙烧过程的多变量智

能优化控制 [J]. 自动化学报, 2006, 32 (4): 636-640. YAN Ai-jun, CHAI Tian-you, YUE Heng. Multivariable intelligent optimizing control approach for shaft furnace roasting process [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32 (4): 636-640.

[7] Dieterle W, Kochs H D, Dittmar E. Communication architectures for distributed computer control systems [J]. Control Engineering Practice, 1995, 3 (8): 1 171-1 176.

[编辑: 魏 方]