

文章编号: 1001-0920(2004)11-1271-04

专家控制方法在浮选过程中的应用

张 勇^{1,2}, 王介生¹, 王 伟¹

(1. 大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116023; 2 鞍山科技大学 电子信息与工程学院, 辽宁 鞍山 114002)

摘 要: 针对浮选过程被控对象复杂、数学模型不确定以及控制要求高等特点, 提出一种用于阳离子浮选过程的专家控制方法, 使系统具备一定的自学习和自组织的能力。所采用的规则表示法能自然、完整地表示浮选过程的知识, 又便于知识库的维护。实际应用结果表明, 所提出的专家控制方法能够满足浮选过程控制的要求。

关键词: 浮选过程; 专家系统; 自学习; 知识获取

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Application of expert control method to flotation process

ZHANG Yong^{1,2}, WANG Jie-sheng¹, WANG Wei¹

(1. Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2 School of Electronic Information and Engineering, Anshan University of Science and Technology, Anshan 114002, China
Correspondent: WANG Wei, E-mail: wangwei@dlut.edu.cn)

Abstract An expert optimization control method on cation flotation process is suggested for the process complexity, the mathematical modal uncertainty and the high requirements of control quality. The expert system possesses certain ability of self-learning and self-organization. The proposed rule representation can naturally and completely denote the knowledge of flotation process. It is easy to maintain the knowledge database by this method. The industrial application indicates that the proposed expert control method can satisfy the request of flotation process control.

Key words: flotation process; expert system; self-learning; knowledge acquisition

1 引 言

近年来, 计算机辅助选矿技术^[1]在提高选矿经济效益和增强企业竞争力方面发挥了重要的作用。国内外选矿厂^[2~6]对于选矿新技术、新工艺、新药剂和新设备等做了大量的研究探索, 提出了分散控制、自动添加药剂控制、粗糙控制和神经网络等智能控制方法, 提高了加药控制的准确性和可靠性, 从而提高回收率并且使药剂消耗量最小。但目前国内选矿厂的浮选控制回路仍主要侧重于以模型为基础, 以在线分析为主体进行控制, 它要求能够建立准确描述过程的动态模型和精确的数据采集仪表, 但这不

能保证有效地利用浮选过程中一些有用的现象信息和大量不确定性的知识及经验。

专家系统(ES)是人工智能最重要的应用领域之一。目前, 专家系统应用于选矿生产方面已有一些研究^[7~10], 如矿石可选性预测专家系统、磨矿回路自动控制专家系统等。但将专家系统用于浮选过程的控制, 还未见报道。本文针对浮选过程控制指标的多样性、被控对象的复杂性和控制过程的经验性等特点, 提出一种采用定性和定量相结合的实时专家系统, 并将其应用于阳离子浮选过程的药剂控制, 取得满意的控制效果。

收稿日期: 2004-02-06; 修回日期: 2004-05-15

基金项目: 教育部科学技术研究资助项目(01053); 辽宁省教育厅科研基金资助项目(202193396)。

作者简介: 张勇(1963—), 男, 辽宁鞍山人, 博士生, 从事工业生产过程控制、智能控制等研究; 王伟(1955—), 男(满族), 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、模型预测控制和计算机控制等研究。

2 浮选过程分析

浮选是依据各种矿物表面性质的差异,从矿浆中借助气泡的浮力来选、分矿物的方法。浮选过程具有时变、强耦合、非线性和不确定性等特征,是一个物理化学的综合反应过程。整个浮选过程受到矿浆体积流量、矿浆浓度、矿浆温度、目标输出品位、设备运行状况以及浮选药剂成分状况等诸多因素直接或间接的影响,因而很难建立精确的数学模型。浮选药剂流量与给矿矿浆的干矿流量(t/h)成正比,但由于矿浆以固液混合物状态存在,只能测得其体积流量(m^3/h)。体积流量与干矿流量的换算需要准确测量出矿浆的密度,因为矿石成分的不确定性,矿浆的密度很难测量,所以浮选过程没有精确的数学模型描述。浮选过程可测边界条件的不确定性主要在于人工参与造成的检测误差和矿浆搅拌的均匀程度偏差;不可测边界条件的不确定性主要来自浮选药剂成份的波动。

浮选过程的操作是根据工艺指定的目标要求,确定药剂用量、给矿流量、矿浆温度等参数,使输出精矿品位和精矿产率接近或等于工艺指定的目标值。浮选过程的过程模型可描述如下:

$$Y = f(U, Q, T, R, X, \Omega). \quad (1)$$

其中: $Y = (Y_1, Y_2)^T$, Y_1 为输出精矿品位, Y_2 为精矿产率; U 为浮选药剂用量; Q 为给矿流量; T 为矿浆温度; $R = (R_1, R_2)^T$, R 为工艺目标值, R_1 为目标品位, R_2 为目标产率; $X = (X_1, X_2)^T$, X 为可测边界条件, X_1 为矿浆流量, X_2 为矿浆浓度; $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4)^T$, Ω 为不可测边界条件, Ω_1 为浮选药剂纯度, Ω_2 为系统设备状况及仪表检测精度, Ω_3 为矿浆成分扰动, Ω_4 为人工误操作影响。

3 浮选过程的专家控制方法

建立专家系统的首要问题是分析领域知识的结构特征,以便确定知识表示方法。在浮选作业中,若要获得合格的精矿品位,提高有用金属的回收率,降低浮选药剂等原材料的消耗,则必须保证浮选作业的稳定,实现浮选过程最优化。而按需要准确地添加各种药剂是控制工艺过程的重要手段,问题在于反应过程中存在的不确定性使不同的工艺和工况直接影响浮选效果。解决的方法是领域专家定性分析抽取经验规则,结合生产中积累的结果数据进行参数整定,并在此基础上建立浮选控制专家设定模型。

3.1 浮选控制专家系统模型

专家系统的核心是知识库和推理机。将浮选过

程的经验整理、分类、条理化和形式化是建立知识的第一步。目前经常使用的知识表达方法有:谓词逻辑、语义网络、框架、单元和产生式规则等。本文的浮选专家控制系统是基于规则的推理系统,即产生式系统。一个典型的产生式系统包括综合数据库、知识库(规则库)和推理机3个主要部分,浮选控制专家模型框图如图1所示。浮选控制专家设定模型的功能是根据生产工艺要求指标(用户给定)和系统测量所得到的给矿的粒度、浓度、流量和品位(浮选过程)等特征参数经过推理(推理机)得到待处理矿浆的干矿量,计算出浮选药剂用量设定值。

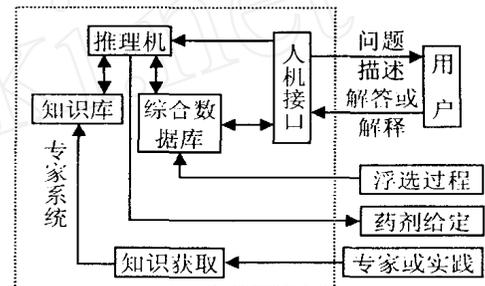


图1 浮选控制专家系统模型

3.2 知识库的构建

知识库是以适当形式存贮或记忆各种知识的集合,是组成专家系统的核心部分。它的建立一般要经过知识的收集整理、知识库的设计和建立知识库3个阶段。设计以产生式规则为知识单元的知识库,首先要确定影响决策的各种因素和可能得出的各种决策结果。就浮选过程而言,经过详细调研,与现场专家充分交流经验,得出如何通过流量计、粒度计、浓度计、温度计以及在线品位分析仪等检测、控制仪表确定浮选过程各控制变量设定值的方法。最终确定由以下几个现场过程变量组成条件属性,即给矿品位、精矿品位、给矿浓度、给矿流量和给矿粒度,由浮选过程的药剂流量值作为决策结果。并针对各种不确定性干扰或突发情况,了解应采取怎样的处理或补救措施,最后根据这些专家经验合理构建专家知识库。产生式规则是一种蕴涵表达式,其形式为

$$\text{Rule}_\# : \text{if Pre}_1 \text{ and Pre}_2 \text{ and } \dots \text{ and Pre}_n \\ \text{then Con}_1, \text{Con}_2, \dots, \text{Con}_m. \quad (2)$$

式中: Pre_n 为条件,也称前提、前项、前件、原因或产生式左边; Con_m 为结论,也称操作、后项、后件、结论或产生式右边; $\text{Rule}_\#$ 为规则号,即该条产生式规则的编号。如浮选加药专家系统中的某条规则可表示如下:

if 给矿品位 = ‘过低’ and 给矿粒度 = ‘偏

细'and 给矿浓度 = '适中'and 给矿流量 = '适中' then 药剂流量 = '较高'.

将知识整理后表示成式(2)的多条规则,这些规则的集合构成了规则库.它与数据库和推理机构一起构成了产生式专家系统.当规则库中某条产生式规则的前提可与数据库中某些事实匹配时,该规则就被激活,并将结论放入数据库中.执行产生式规则的操作会引起数据库的变化,从而使其他产生式规则的条件可能得到满足.

3.3 推理机构

推理机构是以一定的推理策略,有效地选择知识库中的知识,根据过程条件和过程出现的问题进行推理,得出合理的控制策略.浮选过程因初始状态和目标状态都较为明确,所以理论上可采用任意一种推理策略.当知识库以产生式规则建立时,对于产生式专家系统,推理机的推理是基于“匹配—竞争消解—操作”周期循环方式进行的,即采用前向推理方法.根据测量到的给矿品位、给矿浓度、给矿流量、给矿粒度和要求的精矿目标品位得到药剂用量.

专家系统的条件属性在进入推理机前先进行模糊预处理.如给矿粒度(-200目)的取值范围为[85, 95],将给矿粒度分为5段:‘过细’=[给矿粒度 < 85];‘偏细’=[给矿粒度 [85, 88]];‘适中’=[给矿粒度 [88, 92]];‘偏粗’=[给矿粒度 [92, 95]];‘过粗’=[给矿粒度 > 95].得到采样给矿粒度数据后,与存入数据库的标准相比较,得出相应的字符事实.如给矿粒度(-200目)的值在88~92时,则得出磨矿细度合适;给矿品位、给矿浓度和给矿流量也类似依次进行处理,推理结果经反向处理后送给加药控制机构.属性区间的模糊划分,对条件属性可在一定程度上减小因数据检测误差引起的不确定性;对决策属性可避免过程控制的频繁调整,稳定生产加药过程.

3.4 综合数据库

综合数据库包括动态数据库和静态数据库.静态数据库主要用于存储系统的已知事实(如对象的特征参数、工艺参数范围、工人操作的经验数据、控制参数的可调范围及实验所得的经验数据等)、性能指标目标(也可以是动态目标)和实时采集数据(仪器仪表的测试结果等);动态数据库用于存放系统推理过程中用到的数据和中间结果,采用动态数据库不仅可提高系统的工作效率,而且能很好地保持工作过程中数据的一致性和完善性.

3.5 自学习机制

知识获取是专家系统的关键,而系统学习是知识获取的一种重要手段.这里的自学习机制主要采用了规则排序法.规则排序的次序表明了启用的优先级.通过学习,参照规则的有效性程度,适当改变规则排序,使有效性大的规则有较高的优先级.在系统中定义

$$V = (S_n - F_n) / F_n, \quad (3)$$

$$S = S_n (W_1 + W_2 V). \quad (4)$$

式中:V为规则的有效性; S_n 为规则的启用次数; F_n 为规则启用失败次数; $W_1 + W_2 = 1$ 且 $W_1, W_2 \geq 0$;每条规则均有自己的S值,S值越大,规则在知识库中的排序越靠前.采用这种排序方法,将在某种程度上加快推理速度.

4 应用结果对比

浮选指标命中率是指给矿矿浆经过浮选过程的物化反应后,输出精矿品位达到工艺指定的目标值(68.5% 精矿品位 69.5%).将实时专家系统投入浮选系统中运行,通过考察浮选输出精矿品位来判断浮选生产的命中率,从而检验专家系统的准确度和可靠性.

对同一批铁矿石分别实行人工加药控制和实时专家控制.从生产记录中抽取500个记录数据,两种控制方法的浮选命中率如表1所示.

表1 命中率统计表

命 中 指 标	专家系统控制		人工控制	
	记录数	百分比	记录数	百分比
精矿品位	68	21.4%	93	18.6%
68 < 精矿品位	68.5	32.6%	125	25%
68.5 < 精矿品位	69	21.8%	121	24%
69 < 精矿品位	69.5	18.2%	86	17.2%
精矿品位 > 69.5	47	9.4%	75	15%

图2和图3分别为两种控制方式下的精矿品位数据分布,两条直线间区间为精矿指标;图4和图5分别为两种控制方式下的药剂添加流量,其设定调控范围为8~12 l/min.表1、图2和图3清楚地表明,实时专家控制优于人工加药控制.通过专家控制系统对浮选过程进行实时控制,可使浮选作业在无人操作的情况下,根据分析结果和原矿性质的变化,自动地及时调整药剂用量,保证了药剂添加的正确性和合理性,不但使输出精矿品位满足生产工艺要求,而且降低了选矿药剂成本,稳定了浮选作业,达到对整个浮选流程的综合优化控制.

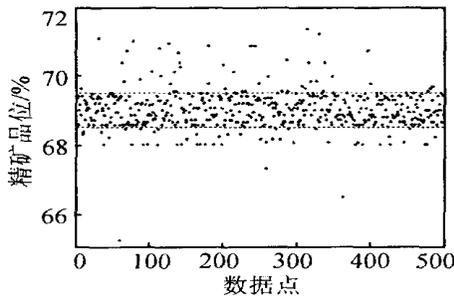


图2 专家控制的精矿品位

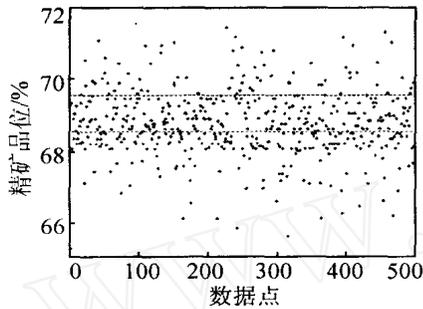


图3 人工控制的精矿品位

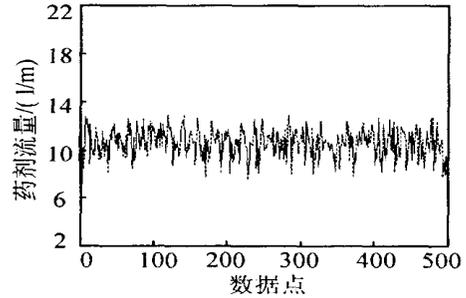


图4 专家控制的药剂流量

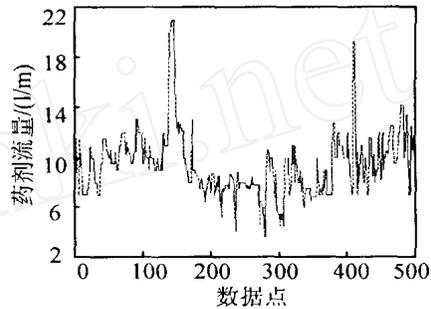


图5 人工控制的药剂流量

5 结 语

本文提出了一种用于阳离子浮选过程的实时专家控制方法, 仿真研究和现场运行实验表明, 该方法完全能够满足浮选过程控制的要求, 不但使输出精矿品位满足生产工艺要求, 而且降低了选矿药剂成本, 稳定了浮选作业, 达到了对浮选流程综合优化控制的目的

参考文献(References):

- [1] 张金山. 计算机技术在采矿工业中应用现状与展望[J]. 中国矿业, 2000, 9(1): 67-69.
(Zhang J S. Current situation and prospect of computer application in mining industry[J]. *China Mining Magazine*, 2000, 9(1): 67-69.)
- [2] 澳大利亚Am del实验室. 选矿厂浮选过程的控制[J]. 国外金属矿选矿, 1995, 32(1): 45-54.
(Australia Am del Lab. The control of flotation process in mineral processing plants[J]. *Metallurgical Ore Dressing Abroad*, 1995, 32(1): 45-54.)
- [3] 扬会志, 于春田. 一种浮选过程控制的新策略——粗糙控制[J]. 矿业研究与开发, 1999, 19(5): 20-23.
(Yang H Z, Yu C T. Rough control—A new control strategy of flotation technological process[J]. *Mining R & D*, 1999, 19(5): 20-23.)
- [4] 朱内拉 S L J, 郭惠兰, 李忠义, 等. 浮选过程神经网络数据分析和在线监控[J]. 国外金属矿选矿, 2000, 37(6):

38-43

(Zhu N L S L J, Guo H L, Li Z Y, et al. Data analysis and on-line supervision of flotation process based on neural network [J]. *Metallurgical Ore Dressing Abroad*, 2000, 37(6): 38-43.)

- [5] Cilek E C. Application of neural networks to predict locked cycle flotation test results [J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(12): 1095-1104.
- [6] Muñoz C, Cipriano A. An integrated system for supervision and economic optimal control of mineral processing plants [J]. *Minerals Engineering*, 1999, 12(6): 627-643.
- [7] Beamán R A, Milne R W. Expert systems: Opportunities in the minerals industry [J]. *Minerals Engineering*, 1992, 5: 1307-1323.
- [8] Zhang Farong, Chen Jin. A study of layout design expert system for mineral concentrator [A]. *Proc of the 18th IMPC[C]*, 1993: 545-548.
- [9] Ketata C, Rockwell M C. Development of expert systems for stream sampling in mineral processing plants [J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 2000, 14(2): 191-197.
- [10] Yianatos J B, Lisoa M A. Grinding capacity enhancement by solid concentration control of hydrocyclone underflow [J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(5): 317-323.