

金属矿山选矿厂磨矿分级自动控制研究现状

石立, 张国旺, 肖 骁

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘 要: 自动控制技术在国内选矿厂磨矿分级流程中应用已有将近40年, 为促进磨矿分级控制系统的工业化应用和深入研究, 对磨矿分级控制系统的发展进行了综述。目前磨矿分级检测仪表主要分为给矿量、矿浆流量、矿浆浓度、矿浆粒度、矿仓料位、磨机负荷量等六个方面; 检测手段分为直接测量和间接测量。磨矿分级控制策略从传统控制策略发展为现代控制技术和人工智能控制技术相结合的控制策略。

关键词: 磨矿分级; 仪表检测; 现代控制; 人工智能控制

中图分类号: TD921 文献标识码: A 文章编号: 2095-5014 (2014) 01-0043-06

Research on Automatic Control of Grinding and Classification in Concentration Plants of Metal Mines

SHI Li, ZHANG GUO-wang, XIAO Xiao

(Changsha Research Institute Of Mining And Metallurgy Co. Ltd., Changsha 410012, China)

ABSTRACT: Automatic control technology has been used in grinding-classification process in domestic concentration plants for nearly 40 years. In order to promote the industrial application and further study of the grinding-classification control system, this paper reviewed the development of the grinding-classification control system. At present, the grinding-classification detection instruments mainly relate to six aspects such as ore pulp flow, slurry concentration, slurry particle size, material level of ore bin, mill load. The detection methods include direct measurement and indirect measurement. The grinding and classification control strategy changes from traditional control to modern control and artificial intelligence control. The current development trend of the control strategy is the combination of modern control technology and artificial intelligence technology.

KEY WORDS: grinding classification; instrumentation; modern control; artificial intelligence control

1 前 言

我国的选矿工业是传统的基础产业, 已具备相当规模, 从业人员众多。突出的问题是能

耗高、效率低、自动化水平低, 劳动强度大, 选矿技术经济指标低, 而且随矿石性质及操作条件的变化很不稳定。选矿厂靠人工操作很难使生产维持在最优状态。解决这些问题的重要途径之一就是开发研究选矿工业生产过程的关

收稿日期: 2013-04-20

作者简介: 石立 (1988-), 男, 长沙人, 硕士研究生, 从事细磨装备及其自动控制研究。

键技术、装备、仪器仪表,实现选矿工业生产过程的自动化。实现自动控制可以使产品质量提高而且稳定,达到节能减排降本增效的作用^[1,2]。在选矿厂生产工艺流程中磨矿分级回路是一个关键环节。磨矿分级作业在选矿厂的基建投资和生产费用(电耗、钢耗)中占有很大比例。同时磨矿分级回路是的处理能力制约着整个选矿厂的处理能力;而磨矿产品质量(包括产品粒度、产品浓度、单体解离度)对后续浮选,磁选等选别流程的分选效果有着直接关系。磨矿分级回路的效果影响着选矿厂的经济技术指标。

磨矿分级控制系统的引入是使磨矿分级过程在稳定或最佳状态下工作,充分发挥和提高磨矿和分级效率,使有用矿物与脉石达到充分单体解离,保证溢流产品质量,以便获得更高的经济效益。磨矿分级是选厂耗能最多、成本最高的环节,也是直接关系到产品质量和产量的重要环节。磨矿分级自动化控制系统是采用先进的控制方式,通过对磨机负荷和给矿性质等因素的综合分析判断,实现对磨机给矿、磨矿浓度、分级溢流浓度和粒度的优化控制,磨机球荷球比的分析和调整,磨机油路润滑系统的安全保护等。同时,系统还实现磨矿分级作业参数的自动检测、显示和各种故障报警,最终使磨矿分级作业始终在最优的状态下运行。

2 磨矿分级控制系统组成

磨矿分级控制系统是非线性的、大滞后、随机因素干扰大的系统。影响磨矿分级的因素有很多,属于物料性质的有矿石黏度、矿石可磨度、给矿粒度、溢流粒度;属于设备参数的有磨机结构参数、分级设备种类及结构参数,还包括给矿泵的处理量。磨矿分级过程控制系统一般由三个基本控制环节组成即:给矿量控制、磨矿浓度控制、分级溢流浓度(粒度)控制。基本控制系统由系统输入量、系统输出量和核心控制单元三个部分组成,磨矿分级控制系统的系统输入量和输出量框图如图1。

系统输入量主要依靠磨矿分级过程仪表进行检测,目前在选厂应用的有给矿量、矿浆流

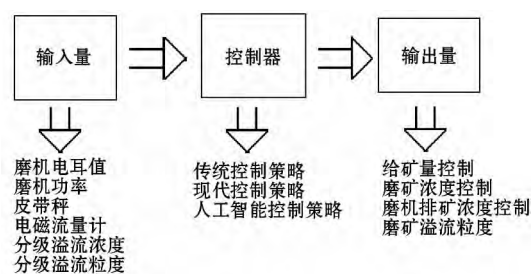


图1 磨矿分级控制系统输入输出框图

量、矿浆浓度、矿浆粒度、矿仓料位、磨机负荷量等6个种类的仪表。

系统输出量控制主要集中在给矿量控制、磨矿浓度控制、磨机溢流浓度控制等方面。主要通过调节给矿皮带速度、磨矿给水阀门开度、给矿泵转速等手段来进行控制。

3 磨矿分级过程检测仪表

近些年来,矿物检测仪表从分立元件到大规模集成电路,从模拟仪表到数字化、智能化仪表,经历了不同的发展阶段,实现了一次又一次质的飞跃。在选矿领域中,不断涌现出一批性能先进、质量可靠的矿物测控设备和检测仪表。这些选矿测控设备、仪表在选矿厂的推广使用,大大地推动了选矿过程自动化的进程,也显著降低了工人劳动强度,提高了劳动生产率和选矿技术指标,改善了工作环境,对提高选厂经济效益和促进企业技术进步起到了不可估量的作用。本文将对给矿量、矿浆流量、矿浆浓度、矿浆粒度、矿仓料位、磨机负荷量等6个方面的工业应用检测仪表进行综述。

3.1 给矿量检测

我国20世纪50~60年代,散装物料连续计量基本上多采用机械式皮带秤,没有电输出信号,且准确度低。20世纪70年代,我国开发出单托辊的电子皮带秤,压力传感器直接将重量信号转换为电信号,为磨矿控制提供了较为先进的计量控制手段,但是受皮带机架和皮带输送机工作环境和变化条件影响较大,准确度最好也只能达到 $\pm 2.0\%$,且秤的电路部分大多数采用分立元件,故障率高,功能单一,维护工作量大。到20世纪80年代,国内外开发出多

托辊、微机电子皮带秤，克服了上述各种缺点，多托辊基本解决了机械因素的干扰和影响，微机为秤提供了多种功能，实现了自动调零、自动去皮、自动校正等功能，大大提高了计量准确度。与此同时，国外在20世纪70年代末研制出核子皮带秤，我国在20世纪80年代中期也开始研制核子秤，它的最大特点是非接触式计量，传感器不与皮带机及机架接触，也不与物料接触，最大限度地克服了各种机械干扰因素的影响，加之它采用了微机作信号处理，具有电子皮带秤的各种功能，可靠性高，基本没有维护量，最大动态累计误差在新安装时可达±0.5%~1.0%，而且可做到一机多秤。目前，无论是电子皮带秤还是核子皮带秤都在我国各领域的散装物料的连续计量中扮演着越来越重要的角色。

3.2 矿浆流量检测

目前工业上所用的流量计大致可分为2大类：1) 速度式流量计。以测量流体在管道内的流速作为测量的依据来计算流量，例如电磁流量计、漩涡流量计、涡轮流量计、激光流量计、冲击式流量计等。2) 容积式流量计。以单位时间内所排出的流体固定容积的数量作为测量的依据。例如椭圆齿轮流量计、腰轮流量计、盘式流量计、刮板式流量计、活塞式流量计等。

在选矿生产过程中，矿浆负荷的分配、精矿计量、矿浆管道输送等方面都要用到矿浆流量检测，但真正能用并用好的矿浆流量检测设备并不多见。下面就电磁流量计用于矿浆流量检测作一介绍。电磁流量计可以用来测量矿浆这类液固两相流体介质流量，而铁磁性矿浆和非磁性矿浆以流体介质中是否含有铁、钴、镍等磁性物质来区分。电磁流量计通过测量管道中磁通量的变化来测定矿浆流量的大小。

3.3 矿浆浓度检测

选矿厂湿式选矿作业是在一定矿浆浓度的条件下进行的，所以选矿过程中矿浆浓度是必须检测和控制在重要工艺参数之一。矿浆浓度测试方法有手工测试和仪器自动测试2种。其中手工测试有烘干法和浓度壶法，其优点是简单、准确、便宜，所以目前许多选矿厂仍使用这种方法测量浓度，但不能实现在线实时检测

和工艺过程自动控制。而用浓度计的优点是可以实时、自动、连续地监测矿浆浓度并对浓度实行自动控制。矿浆浓度计根据测量原理的不同分为 γ 射线式、超声波式、静压力式、重力式、浮子式、振动式、电磁感应式等。其中 γ 射线式又分为电离室式和闪烁计数器式；超声波浓度计又分为声强式、声速式和声阻式；静压力式浓度计又分为水柱平衡式、双管气泡差压式和隔膜侧压密封式；浮子式浓度计又分为漂浮浮子式和浸液浮子式；振动式浓度计又分为单管振动式和双管音叉振动式等。

早在20世纪80年代，辽宁八家子铅锌矿就研制出差压浓度计，并在生产中应用。由于这种浓度计具有测量反应速度快、结构简单、成本低、无射线防护问题，因此，它在矿浆浓度的在线检测方面仍具有一定的生命力。该仪器的特点是结构简单、成本较低，一般选矿厂依靠自己的力量就可以加工制造。但体积大、比较笨重、安装不便。

3.4 矿浆粒度检测

粒度测量和分析一直是选矿领域中最重要研究课题，矿浆的粒度分布是最重要的矿浆物料性质之一。因此，无论是在实验室内的单次的物料粒度分析，还是工业现场的在线实时粒度测试，都是矿物加工的试验研究及生产过程的检查控制所注重的。

矿用在线粒度分析仪是选矿生产过程中矿浆关键参数的自动检测装置，在有色、黑色、黄金等选矿工业得到广泛应用。目前，有代表性的粒度分析仪器是美国丹佛(DENVER)自动化公司的PSM400超声波粒度分析仪、芬兰奥托昆普公司PSI200粒度分析仪、马鞍山矿山研究院研制的CLY-2000型在线粒度分析仪、北京矿冶研究总院研制的BPSM系列在线粒度分析仪等，其中PSM400与CLY-2000都是基于超声波原理的产品，而PSI200与BPSM-型都是基于线性检测原理、直接测量粒度分布的仪器。近几年，芬兰奥托昆普公司新研制了一种基于矿物颗粒散射光的浓度分布测量机理的PSI500新型粒度分析仪，我国永平铜矿选矿厂已在应用^[3]。

3.5 矿仓料位检测

料位测量控制的在选矿生产作用中日益突

出。在实际生产中,料位测量装置有极限料位检测和连续料位检测2种方式,前者方式简单,容易实现,后者控制精度高。因此为了更好地满足生产要求,可以将连续测量料位计和高度固定的料位开关同时应用在同一料仓控制系统中。

超声波料位计的工作原理是利用在一定条件下超声波在空气中的传播速度是一定的,所以通过测量超声波从探头传播至料位表面并返回到探头所用的时间来计算出探头到料位的距离,再用料仓的总高减去这个距离即可得实际料位。其中超声波在空气中的传播速度(C参数)是最关键的数据,它的准确与否直接关系到测量结果的精确度。超声波料位计出厂时内设的C参数只适用于通常的空气介质,但是否适用于实际的工况条件、温度补偿是否准确都是需要考虑的。

目前江西德兴铜矿泗洲选矿厂第三段破碎工段、中钢集团马鞍山矿山研究院先后在上海梅山集团(南京)矿业有限公司选矿厂细碎车间、马钢南山铁矿凹山选矿车间碎矿工段与超细碎工段等矿仓料位检测中采用了超声波料位计,并实现了破碎机有效监控。

在梅山铁矿选厂原矿输出系统中,应用超声波物位计测量矿仓中矿石料位。生产运行效果表明:超声波料位测量值能较好地反映矿仓内的实际料位。定量布料准确,杜绝了矿仓空砸,溢仓损坏布料车的设备事故;同时改善了操作人员的工作环境,提高了设备运转率,经济和社会效益显著。

3.6 磨机负荷量检测

球磨机负荷是磨矿过程一个重要参数,在实际生产过程中会由于矿石物料性质的波动以及外界因素的干扰和人工操作水平的差异等,使球磨机的负荷难以维持在最佳水平,不能充分发挥球磨机的功效而直接影响到磨矿的效果。因此,在磨矿过程自动控制中需要对球磨机负荷进行负荷检测与控制,而球磨机的负荷检测则是球磨机优化控制关键因素。

负荷检测方法从传统的单因素检测向多因素检测方法发展,单因素检测包括声响法、有用功率法、振动法、压力传感法;双因素检测

方法包括功率—声响双信号检测、声响—振动双信号检测。另外,还有功率—振动双信号检测球磨机负荷等方法(如昆钢罗茨铁矿、山东焦家金矿、金川公司选矿厂等)。虽然双信号检测球磨机负荷较单因素检测效果有所提升,但仍然不能确定球磨机的内部工作状态(即介质充填率、料球比和磨矿浓度)。而磨机负荷量检测方法目前另一个发展方向是非仪表检测方法,包括基于磨机外部响应信号的测量方法以及融合多源信号的软测量方法等,非仪表检测方法目前在实验室离线检测中效果良好,如何将实验室结果应用于工业控制,仍需进一步检验^[4]。

4 磨矿分级控制策略

磨矿分级控制系统能够起到好的控制作用,除了使用先进的过程检测仪表,还需要使用一个正确的,并且适合于这个过程的控制策略。随着控制技术与手段从传统的PID控制发展到现在的现代人工智能控制,控制策略有了极大的进步,越来越多的控制策略被应用在工业现场。下面我们将对磨矿分级控制系统目前应用的控制策略进行评述。其中部分控制策略已在工业生产过程中应用,而部分控制策略目前仍停留在实验室或者半工业试验设备上,还有一些先进的控制策略经过计算机进行仿真分析,也取得了一定的成果。

4.1 传统控制策略

传统控制策略主要是闭环PID控制、Smith控制、解耦控制。其中,PID算法的最大缺点是不适用于大时间滞后的控制对象及参数变化较大的场合,因此PID控制不能使磨矿分级过程处于最理想的状态。Smith预估控制能够在理论上使控制对象的时间滞后得到完全补偿。解耦控制是多变量控制的核心,其基本思想是设计一个解耦补偿器来消除多变量系统中各有关输入-输出变量间的关联作用,使一个控制输入只对其相应的输出有影响,以便把多变量系统分解成几个单变量系统。然后在已解耦的控制回路中,认为各控制器只对其相应的被控变量施加控制作用,从而可采用相应的单变量控制策略。传统控制策略由于其自身控制理念的局限

性，不能完全满足磨矿分级控制系统非线性的、大滞后、随机因素干扰大的要求，因此现代控制策略和人工智能控制策略的引入，将改善这些缺点^[5]。

4.2 现代智能控制策略

随着现代控制理论、系统理论的形成与发展，过程模拟与仿真技术的应用，尤其是微机性能的提高和新型功能齐全软件的开发，一系列新型控制策略应运而生，并迅速在实际中得到应用、改进和发展。人工智能（Artificial Intelligence），英文缩写为 AI。它是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能包括模糊控制、专家控制、神经网络以及混沌控制 4 个方面。目前在模糊 PID 技术已在选矿厂有多个应用实例，而专家控制、神经网络控制在选厂应用较少，目前多停留在实验室在线模拟和实验机型的控制。

4.2.1 预测函数控制

20 世纪 70 年代中期预测控制已经出现，这是一种基于模型又不过分依赖模型的控制策略。预测控制的算法很多，但不论形式如何，都是建立在预测模型、滚动优化和反馈校正 3 项基本原理的基础上。其基本思想类似于人的思维和决策，即根据头脑中对外部世界的了解，通过快速思维不断比较各种方案可能造成的后果，从中择优予以实施。

青岛建筑工程学院顾善发等^[6]主要针对磨矿分级系统的溢流浓度进行了研究。尝试引入动态矩阵控制算法模型，通过合适的参数选定，成功地将动态矩阵控制应用于磨矿分级过程。同时进行仿真试验，从试验结果来看，动态矩阵控制与传统 PID 控制响应曲线相比，快速性、稳定性、抗干扰性以及综合指标均明显优于 PID 控制。仿真结果也表明预测控制模型具有适应性强、响应速度快、超调小、调节时间短、鲁棒性强等特点。

董飞^[7]等针对单模型预测动态矩阵控制中由于干扰因素的存在而模型会出现与实际对象失配的情况。引入多模型动态矩阵控制算法，根据干扰因素—矿石性质的变化来建立模型集，生产过程中根据矿石性质变化切换到相应的模

型进行控制。仿真试验中根据矿石性质高硬度、普通硬度、低硬度三种模型，仿真结果表明，多模型动态矩阵控制由于采用了与矿石硬度相匹配的模型，系统响应比单模型的得到明显改善，控制效果大大提高，系统的鲁棒性也更好。

4.2.2 模糊 PID 控制

模糊控制是用语言归纳操作人员的控制策略，运用语言变量和模糊集合理论形成控制算法的一种控制。1974 年 Mamdani 首次用模糊逻辑和模糊推理实现了控制，开始了模糊控制在工业中的应用。模糊控制不需要建立控制对象精确的数学模型，只要求把现场操作人员的经验和数据总结成较完善的语言规则，因此它能绕过对象的不确定性、噪音以及非线性、时变性、时滞等影响，系统性强，尤其适用于非线性、时变、滞后系统的控制。

江西理工大学的罗小燕^[8]根据模糊控制理论，建立了模糊控制算法模型，在模型中分别设计了给料及主轴转速的模糊控制器，并采用并行连接的方法组成了一个两输入两输出的模糊控制系统。以江西理工大学研制的 RM500 预磨机为样机进行 Matlab 仿真，仿真结果表明，与常规的 PID 控制相比，模糊 PID 控制系统明显改善了预磨机的静态和动态性能，并且具有更强的自适应能力和鲁棒性。在进一步的钨矿石预磨试验中，在模糊 PID 控制系统控制下，预磨机工作电流稳定，产品质量优异。

南华大学的唐耀庚^[9]针对某铀矿石磨矿回路中引入自磨机拖动功率模糊控制系统，采用一种改进型控制规则自调整算法的模糊控制方案来改善控制系统性能。在某水冶厂铀矿石湿法自磨过程应用结果表明扰动作用时控制系统响应快，超调量小，调节平稳，对系统的变化具有较好的适应能力。与传统 PID 控制比较，采用模糊控制磨机产量得到了提高，粒度得到了控制，功耗有所降低，取得了较好的控制效果，满足了生产需要。

4.2.3 专家系统

专家系统是一个基于知识的智能推理系统，通过记录磨矿分级领域内专家的知识经验和运用专家的知识经验，通过推理做出智能决策，去控制磨矿过程，使磨矿生产获得好的

指标,这是人工操作和其它计算机控制方法所不能比拟的。这种新型的控制方法改变了过去传统的控制系统设计中单纯依靠数学模型的局面,解决了在磨矿分级过程控制中,难以用精确数学模型表达的、模糊的、时变的、非线性和多干扰因素的复杂控制系统的问题。

周平^[10]发现难以用常规控制方法有效控制磨矿分级过程的磨矿粒度,因此将智能设定方法与常规控制相结合,提出了基于案例推理的磨矿分级系统智能设定控制方法。以粒度指标的区间控制为目标,依据边界条件和运行工况等信息,由智能设定模型自动更新各基础控制回路的设定值,避免了人工设定的主观性及随意性,各控制回路跟踪更新的设定值,从而将粒度控制在目标范围内。该方法已成功应用于某赤铁矿选厂的磨矿分级过程,应用效果表明提出的方法是有效的。向波^[11]针对磨矿分级过程中磨矿粒度难以在线检测和直接闭环控制的难题,采用案例推理技术建立了磨矿粒度的在线软测量模型,并在此基础上设计了对磨矿粒度进行闭环控制的先进推断控制系统。该先进控制系统能够根据磨矿分级作业的运行工况对底层PID控制器的设定值进行自动调节,然后通过PID控制回路对调整后的设定值进行跟踪,从而实现对磨矿粒度的闭环控制。在某选矿厂的工业应用表明,该先进控制系统能够对磨矿粒度进行较好的在线估计和控制。

4.2.4 神经网络

神经网络是用来模拟脑神经的结构和思维、判断等脑功能的一种信息处理系统。上世纪80年代以来,神经网络理论取得了突破性进展,并以它的一系列优异性能而迅速成为智能控制的一支新的生力军。90年代开始在矿业工程中应用,采用的神经网络一般为多层前馈的BP神经网络,而RBF神经网络改进了BP网络训练效率低的缺点。

近年来,许多学者已经研究其在磨矿分级过程控制中的应用,取得了满意的结果。为提高控制性能,江西理工大学的任金霞^[12]在模糊控制方法的基础上引入神经网络对磨矿分级溢流浓度进行控制。神经网络具有强鲁棒性、自学习、逼近非线性关系等特点,在解决非线性

和不确定系统控制方面有很大的潜力,很好的弥补了模糊控制在提取完整的、合适的控制规则困难;稳态精度差,难以消除稳态误差等问题。

4.3 多种控制策略联合控制

由于单一控制策略不能完全解决控制系统初始参数设定准确等问题,2种及其以上控制策略联合控制的磨矿分级控制系统成了研究趋势。

中南大学的张守元等^[13]在模糊控制中引入动态矩阵控制中的预测及反馈校正功能。他们对河北铜矿使用的1.2m高堰式双螺旋分级机溢流浓度控制为实例进行研究,仿真过程中加入随机干扰。在开始阶段预测模糊控制和模糊控制二者的响应曲线重合,在其后的过程中,预测模糊控制显示出较好的控制效果。整体仿真结果表明预测模糊控制上升时间较短,稳态误差小,超调量小,能有效消除干扰,并且克服外来干扰迅速,控制效果良好。对于大滞后,随机干扰多的磨矿分级过程,预测模糊控制可使控制过程鲁棒性好,抗干扰能力强,控制效果优于模糊控制。

5 发展趋势和结论

对磨矿分级控制系统检测仪表及控制策略的发展历史进行了回顾,介绍了目前工业应用中常用的过程检测仪表,对金属矿山的磨矿分级控制策略进行了评述。磨矿分级控制系统有如下几个发展方向:

- 1) 磨矿过程检测仪表将朝着更高精度,更高灵敏度的方向发展,由于在线粒度测试仪的昂贵,利用浓度等参数间接表征粒度的粒度软测量技术是重点发展方向。

- 2) 磨矿分级控制系统朝着更集中的方向发展,DCS、Profibus控制总线将取代传统的电气控制系统,终端设备与中央集控室的联系更紧密,反应更迅速。

- 3) 随着触摸屏等电子设备的迅速发展,控制系统的操作将更加便捷,更加人性化;良好的人机交互系统使得系统对于矿石性质的改变能够做出最迅速的调整。

- 4) 现代控制技术与人工智能技术的联合控

(下转第56页)



图 10 视频全图

4 结 语

1) 金山店铁矿锡冶山尾矿库在线安全监测系统通过 1 年的运行结果表明, 系统运行稳定

可靠, 能够适应长时间实时监测; 测值数据稳定, 误差处于允许范围内, 各参量的监测精度满足了生产和防洪防汛的需要。

2) 该系统使用先进成熟的技术设备, 建立了网络化的监控架构, 实现了远程监控。系统操作简单, 集成度高, 界面友好, 满足实时采集、监控预警的需求, 能适应高速的数据传输。

3) 尾矿库在线安全监测系统的技术先进, 运行可靠; 同时系统配置具有良好的可扩展性, 能满足未来监控网络发展和技术升级的需要。

4) 在线安全监测预警系统融合了自动化监测技术和数据处理分析技术, 有效地提高了监测数据的质量和时效性, 可以及时了解尾矿库安全特征的变化情况, 并可依据其变化做出预测预警, 提高尾矿库安全应急处置能力, 全面提升尾矿库安全管理水平和尾矿库本质化安全水平。

参考文献:

[1] AQ2030-2010. 尾矿库安全监测技术规范[S].

(上接第 48 页)

制策略从实验室的在线模拟向工业现场应用, 缩小工业现场控制效果与实验室在线模拟的差距。

参考文献:

- [1] 王丰雨, 张覃, 黄宋魏. 我国选矿自动化评述[J]. 国外金属矿选矿, 2006 (8): 18-22.
- [2] 肖睿, 孟宪慧, 范素月, 等. 简述自动控制在选矿中的应用与研究[J]. 科技资讯, 2012(11): 93.
- [3] 曾云南. 现代选矿过程粒度在线分析仪的研究进展[J]. 有色设备, 2008 (4): 5-10.
- [4] 汤健, 赵立杰, 岳恒, 等. 磨机负荷检测方法研究综述[J]. 控制工程, 2010 (9): 565-570
- [5] 王泽红, 陈炳辰. 磨矿分级过程控制策略的研究及进展[J]. 金属矿山, 2000 (9): 28-31.
- [6] 顾善发, 徐萍. 预测控制算法在磨矿分级中的应用[J]. 工矿自动化, 2003 (5): 21-23.

- [7] 董飞, 陈夕松, 金郑华. 一种实用的磨矿多模型预测控制策略研究[J]. 工业控制计算机, 2008 (2): 16-17.
- [8] 罗小燕, 林和荣. 预磨机模糊控制系统的设计与试验[J]. 金属矿山, 2012 (8): 118-122.
- [9] 唐耀庚, 胡蓉. 一种铀矿石自磨机拖动功率模糊控制系统[J]. 矿山机械, 2002 (4): 25-26.
- [10] 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 (5): 613-616
- [11] 向波. 基于案例推理软测量的磨矿分级过程先进控制[J]. 金属矿山, 2009 (12): 110-113.
- [12] 任金霞. 改进型单神经元自适应 PID 控制在磨矿分级控制中的应用 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2005 (2): 32-34.
- [13] 王会青, 张守元. 预测模糊控制在磨矿分级过程的应用研究[J]. 矿冶工程, 2002 (9): 60-62.