

Zhongjie Xuanfuye Zidong Kongzhi Xitong Yingyong Yanjiu

重介悬浮液 自动控制系统应用研究

李国辉 孙经平 赵 峻 著



中国矿业大学出版社

重介悬浮液自动控制系统应用研究

李国辉 孙经平 赵峻 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书在对重介选煤工艺流程以及工艺参数分析研究的基础上,从硬件及软件方面详细介绍了采用神经网络、传统 PID 控制策略及容错控制结构实现重介悬浮液密度智能给定及液位自动控制的原理及方法,并介绍了重介悬浮液密度及液位的解耦控制策略。

本书可供从事选煤厂控制的相关工程技术人员参考,也可供选煤、自动控制专业的学生课外阅读。

图书在版编目(CIP)数据

重介悬浮液自动控制系统应用研究 / 李国辉,孙经平,赵峻著. —
徐州:中国矿业大学出版社,2016.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3167 - 3

I. ①重… II. ①李…②孙…③赵… III. ①悬浮剂—应用—自动
控制系统—研究 IV. ①TQ047.1②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第156473号

书 名 重介悬浮液自动控制系统应用研究

著 者 李国辉 孙经平 赵 峻

责任编辑 何 戈

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 4.375 字数 112 千字

版次印次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 15.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国经济发展正进入“新常态”，经济增速放缓，经济结构调整持续推进，能源消费总量实施控制，环境保护要求不断提高，国际煤炭行业竞争不断加剧，我国煤炭工业发展面临的形势十分严峻。为此，洁净煤技术日趋重要。选煤是洁净煤技术的基础，而重介选煤是我国选煤生产中的主要分选方式。

重介选煤技术是一种能够在重介悬浮液中实现原煤分选的技术，原煤分选是基于阿基米德原理进行的。重介选煤技术不仅能够处理大量原煤，而且能够对原煤颗粒进行较大范围的分选，对洁净煤技术的发展以及煤炭结构的优化具有重大的意义。目前，大多数选煤厂对重介悬浮液密度的控制仍采用手动控制，悬浮液密度的给定值也是由有经验的操作员进行给定。这样不仅增加劳动成本，而且耗费了大量的时间和资源。

本书以郭屯选煤厂重介选煤工艺为背景，针对其结构特点，介绍了重介选煤的自动控制问题。全书突出理论结合实际的原则，首先，提出了重介悬浮液密度总体自动控制方案，对悬浮液密度采用经典 PID 自动控制方式，密度给定值则应用神经网络进行预测给定，考虑到密度传感器或电动执行器可能发生故障情况，更进一步采用容错 PID 控制结构。然后，设计实现重介悬浮液密度自动

控制系统。根据重介悬浮液密度自动控制策略,在原有硬件的基础上对传感器、执行器、PLC 硬件等进行重新配置。利用 Citect 组态软件进行监控画面的设计、控制算法的设计以及 PLC 方面的软件设计。最后,对合介桶液位与其悬浮液密度进行解耦控制研究。在实际现场中,合介桶的液位不是很稳定。为了让液位尽量保持稳定,对液位与密度之间的关系进行了分析,发现两者之间存在一定的耦合关系,设计并加入解耦控制器,对密度和液位同时进行解耦控制。仿真结果表明,加入解耦后,密度和液位控制效果比未解耦好,且能保持稳定并满足了正常生产的要求,该研究为重介选煤智能控制系统提供了一种新的思路。

全书共分 7 章,包括:概述,对课题的背景及重介选煤工艺参数自动控制的国内外研究情况做了简要介绍;重介选煤工艺简介,介绍重介选煤分选的基本原理以及工艺流程和主要设备,分析了影响重介旋流器的分选因素,提出了总体控制要求并给出总体控制方案设计和总体控制结构;重介悬浮液密度自动控制系统硬件实现,包括 PLC 硬件设计、I/O 地址分配和 PLC 编程,以及电气原理图及接线图等设计;重介悬浮液密度自动控制策略,首先设计了传统 PID 控制器,接着考虑传感器及执行机构故障可能性设计了容错 PID 控制器,最后给出应用 BP 神经网络解决密度智能给定的方法;重介悬浮液密度自动控制系统软件实现,包括 PLC 程序和上位机人机界面程序的设计与实现;重介悬浮液密度与液位解耦控制策略,对合介桶进行建模,分析液位与密度的耦合关系,设计解耦控制策略并进行仿真研究;结论与展望,对全书内容进行

总结,为更深入地研究此类课题提出展望。

李国辉主持了全书的撰写工作,孙经平参与了第2、第3、第5章的资料整理、方案设计以及实施等方面的工作,赵峻参与了第4章控制策略的设计与实现以及第6章对重介悬浮液密度与液位解耦控制策略的研究工作。

在本书的撰写过程中,中国矿业大学郭西进教授给予著者多方面的指导并提出了许多宝贵的意见和建议,硕士生孔令烨、徐进霞等也为书稿的整理、出版做了出色的工作,在此表示衷心的感谢!

由于作者的学术水平和实践经验有限,查阅的资料也不够全面,书中难免有错误或欠妥之处,恳请专家和读者批评指正。

作 者

2015年12月

目 录

1 概述	1
1.1 课题来源	1
1.2 课题背景	1
1.3 重介选煤自动控制发展历史及其国内外研究现状	3
1.4 本课题研究的主要内容	6
1.5 内容安排	7
2 重介选煤工艺简介	9
2.1 重介选煤工艺基本原理	9
2.2 重介旋流器	12
2.3 无压三产品重介选煤工艺流程	20
2.4 重介悬浮液密度自动控制总体要求	26
2.5 重介悬浮液密度自动控制总体方案设计	27
2.6 郭屯选煤厂重介选煤控制系统总体结构	28
2.7 本章小结	29
3 重介悬浮液密度自动控制系统硬件实现	31
3.1 重介悬浮液密度控制系统硬件简介	31
3.2 PLC 硬件	41
3.3 I/O 地址	45
3.4 Unity Pro 编程	47
3.5 选煤系统电气设计	54

3.6	I/O 模块的接线图	56
3.7	本章小结	56
4	重介悬浮液密度自动控制策略	58
4.1	重介悬浮液密度 PID 控制器的设计	59
4.2	重介悬浮液密度 PID 容错控制	66
4.3	重介悬浮液密度 BP 神经网络智能给定	73
4.4	本章小结	84
5	重介悬浮液密度自动控制系统软件实现	85
5.1	PLC 程序设计	85
5.2	上位机软件设计	90
5.3	本章小结	102
6	重介悬浮液密度与液位解耦控制策略	103
6.1	合介桶控制系统整体结构	103
6.2	合介桶控制系统数学模型的建立	104
6.3	解耦控制原理	111
6.4	解耦控制策略	113
6.5	本章小结	120
7	结论与展望	121
7.1	主要工作与结论	121
7.2	展望	122
	参考文献	124

1 概述

1.1 课题来源

本课题来源于山东鲁能菏泽煤电开发有限公司支持的郭屯选煤厂“重介悬浮液密度调节自适应系统”课题,本书主要介绍重介悬浮液密度自动控制系统的设计与实现。

1.2 课题背景

我国是产煤大国,根据第三次煤炭资源预测与评价,我国的煤炭资源总量已是排名世界第一,达到 5 157 万亿 t。据调查显示,在 2010 年,煤炭占我国一次性能源生产和消费的 60% 左右。而预测到 2050 年,所占比例也不会低于 50%。虽然近几年国家也提倡使用太阳能、风能、水能等绿色能源^[1],但是煤炭资源在我国经济生产中仍占主导地位。

最近几年,由于全球变暖、极端恶劣天气时常发生,全球开始注重节能减排,尤其是对碳排放量的重视程度与日俱增。节约能源,保护环境,可持续发展观念也已深入人心。我国作为一个能源耗费大国,也顺应全球趋势,大力发展低碳经济,提高煤炭利用率。

2009 年 12 月 7 日在哥本哈根召开且被称为“改变地球命运”的联合国气候大会上,中国政府也跟其他各国一样提出了自己的减排措施和目标:在 2020 年到来之前,中国单位 GDP 二氧化碳排

放量将比 2005 减少 40%~45%，而可再生能源结构中的比例将争取达到 16%。为了实现这个目标，我国也开始注重选煤技术的研究，加大对原煤的洗选力度，提高原煤的转化率，努力实现低碳、绿色经济。煤炭经过洗选能显著减少有害物质如二氧化硫、烟尘等的排放，从而减少对环境的破坏。中国政府知道我国是一个以煤炭为主要能源的国家，因此从现实出发，一边发展新能源，一边加大洁净煤开发力度，限制高硫高灰煤的开发和利用，鼓励支持选煤行业发展新技术，提高煤炭转化率。为此，洁净煤技术还被纳入《新型能源产业振兴计划》，国务院还为此印发了《能源发展“十二五”规划》，将煤炭洗选和加工作为能源高效清洁的重要措施^[2]。

几十年来，我国煤炭行业发展迅速，我国的选煤技术也得到了飞速发展，选煤厂的分选效率和质量比之前有了不小的提高。具有代表性的是山西成庄选煤厂，该选煤厂的自动控制系统是以工业计算机控制为核心，对重介选煤过程进行集中控制，并且能对悬浮液密度、液位等工艺参数进行自动控制。但是在选煤设备、选煤工艺以及自动化水平方面和国外相比，我国选煤技术仍然比较落后。在选煤设备上，我国机械制造水平比较有限，所以其处理能力和可靠性还是低于国外水平^[3]。我国在入选原煤比例方面自 20 世纪 90 年代以来，已经有了显著的提高，不过跟国外原煤入选比例相比，我国还有好长一段距离。国外原煤入选比例已经超过 50%，甚至有些发达国家已经超过了 90%，而我国，入选原煤还不到 40%。由此可见，我国选煤行业发展空间还是很大的^[4]。

目前，我国在选煤工艺方面，主要是以跳汰—浮选、重介—浮选、跳汰—重介—浮选等混合洗选工艺为主。其中跳汰选煤已有一百多年的历史，是一种成熟的选煤方法。跳汰选煤是在垂直脉动的介质中按颗粒密度差别进行的选煤技术，跳汰选煤的介质是水或空气，个别的也用悬浮液^[5]。浮选设备一般成本都比较高，且其主要针对的是煤泥分选，不适用于粒度较大的原煤分选。重介

选煤法适宜分选难选和极难选煤,它的分选粒度宽^[6]。目前,利用重介选煤对块煤进行分选时,其粒度上限一般为 300 mm,下限为 3~6 mm。如果在重介旋流器内分选,分选粒度下限为 0.15~0.2 mm,甚至更小些,很多新建的选煤厂大多采用重介选煤流程^[7]。但是跟国外相比,国内的选煤技术还是比较落后的。国外一般都是依据原煤性质来进行分级入选,并且基本都大型化了,其产品率和质量都比较高。而我国的工艺导致参数难以控制,并且不同粒度级别会产生不一样的分选效果,因此较国外的质量差一些。

1.3 重介选煤自动控制发展历史及其国内外研究现状

1.3.1 重介选煤自动控制发展历史

20 世纪 50 年代初,随着科学技术的发展,国内外对重介选煤的自动控制技术也进行了研究,让选煤工艺的自动控制技术得到了提高。一些澳大利亚的选煤厂和法国的选煤厂以原煤特性为依据,优化重介质密度的给定值并进行控制,从而来保证精煤产品的质量^[8]。

20 世纪八九十年代,国内开滦马家沟选煤厂研究出了一种能够通过输入原煤性质、精煤灰分以及分选密度等先验知识,自动修改重介质分选密度给定值的系统,为了检验该系统能不能用于现场生产中,该选煤厂做了大量的中间试验工作,最后才用于该厂生产中,大大提高了该厂的经济效益。在这一阶段,国内外多名专家为重介选煤自动控制做出了重要贡献^[9]。譬如 B. A. Firth 在分析旋流器参数和介质密度之间的关系的基础上,来控制重介选煤系统。代艳玲等多位专家通过对介质流的计算提出了根据煤泥含量来确定分流量。还有孟凡芹等专家在研究重介选煤工艺动态特性

的基础上,利用介质流量平衡,对密度和液位同时采用模糊控制的方法进行控制,并且取得了不错的效果^[10]。

21 世纪初,随着计算机、电子、传感器技术的飞速发展,重介选煤自动控制系统也得到了一定的提升,尤其是重介选煤集中控制系统以及密度自动给定系统。国内很多学者在重介选煤自动控制领域做了大量的研究,并取得了一定的成果^[11]。例如通过对重介选煤中各个参数的动态平衡关系的研究,从而得出了重介选煤中多参数的数学模型。煤炭科学院唐山分院赵春祥等人在研究重介选煤工艺的过程中,通过各个参数之间的动态变化关系,建立了数学模型,提出了运用自校正控制方法,并对其进行了仿真,实验表明比 PID 效果要好。值得一提的是,我国在“九五”国家科技攻关课题中探索出了一种“IZK 型重介选煤自动控制系统”,它是采用自校正控制方法并且通过模仿人工智能预测精煤灰分来实现悬浮液密度的自动控制,它的精度绝对值能达到 0.006 g/cm^3 ,比当时国外的精度高出 40%^[12]。而且,国内外许多研究学者都在积极地探索运用一些较先进的智能控制算法,比如模式识别、模糊控制、自适应控制等来对控制方式进行一定的改进,从而保证精度的稳定与提高^[13]。

1.3.2 重介选煤自动控制国内外现状

重介选煤工艺中,悬浮液的密度、合介桶的液位等工艺参数控制的好坏将直接影响到煤质分选效果的好坏。但重介选煤系统又是一个多输入多输出的复杂系统,它具有大惯性、大滞后、强耦合等非线性特性,因此对悬浮液密度及合介桶液位难以建立精确的数学模型,也因此对系统中工艺参数的控制就变得很困难。而密度与煤质的质量有直接关系,密度升高,说明精煤中灰分比较多,从而导致产品不合格。反之,密度下降,产品能保证合格,但是产率就会下降,企业经济效益就会下降^[14]。合介桶液位等工艺参数

也跟密度一样,都会多多少少对分选效果造成一定的影响,严重的时候甚至会使选煤设备损坏。综上所述,对密度和液位的控制就显得极为重要,因此,国内外学者对其做出了一系列研究^[15]。

就目前而言,大多数国内外学者对其研究仍然选用单独变量进行控制,该方法虽然可以满足一些现场要求,但是动态性能和稳定性还是不能达到预期的目标。为此,许多研究人员尝试在重介质选煤工艺参数自动控制系统中加入 Smith 预估控制算法,但是此算法需要建立在精确的数学模型基础上,因此,该方法仍然处在研究阶段,没能用于实际生产^[16]。

目前我国重介选煤工艺参数自动控制大多仍然选用 PID 控制,但是还有些工艺参数仍然需要靠人工来完成控制,且控制算法一直以来没有得到改进,也常常不能达到预定的控制效果^[17]。就像山东菏泽的郭屯选煤厂,其悬浮液密度等重要参数调节仍需要人工时时刻刻去干预调节,这样就造成了劳动力成本的增加,还会经常出现调节不及时,造成资源浪费等情况。针对此情况,国内外许多学者尝试着对其工艺流程进行改进,降低参数之间的耦合关联程度,建立较好的数学模型,并且对控制算法进行改进,例如将原来的 PID 控制改进为复合模糊 PID 控制,尝试应用自适应、神经网络等先进智能控制算法,并取得了一定的进展^[18]。但是理论与实践还有一定的差距,真正用于实际生产的智能控制算法还是少之又少的。

不过,目前国内外许多研究人员对重介悬浮液密度和液位的研究较多,但对悬浮液黏度以及密度给定的研究则少之又少,所以现在大多数选煤厂的密度给定值还是靠人工根据对精煤产品的采样化验结果进行修改设定^[19]。选煤工艺专家赵春祥对密度给定值的研究取得了一定的进展,他以历史数据开发出了密度给定专家系统。国内外学者对悬浮液黏度的控制仍然是以控制煤泥含量为主,但是实际生产中,黏度不仅与煤泥含量有关,还与磁性物含

量密切相关^[20]。

就从我国现在各个选煤厂的生产实际情况来看,一些新建的大的选煤厂采用了比较先进的集中控制系统,就比如赵楼煤矿选煤厂选用的西门子 DCS 控制系统,但是很多老的选煤厂自动化程度很低,许多参数仍然需要依靠经验来进行人工调节^[21]。而国外部分发达国家,比如澳大利亚等国家的研究人员已经研究出了一套根据原煤性质来自动给定悬浮液的密度设定值的系统,从而保证密度给定值能自动保持在最佳值,减少了很多劳动力^[22]。比如美国的 Beiley 选煤厂,它一个班组就只需要 2~3 人,而其处理能力可达到 800~1 500 t/h。相比之下,我国的选煤厂自动化水平与国外还有很大差距^[23]。

1.4 本课题研究的主要内容

目前,在实际生产中,对选煤工艺参数的控制仍采用手动控制,为此,本书对密度的控制将结合郭屯选煤厂的实际情况,进行自动控制并对其值进行智能给定。在原有软硬件的基础上进行重新设计,对所需要用到的阀门进行选型,并利用其原有的上位机软件对监控页面进行重新设计。通过监控测得的数据,发现密度得到了有效控制,然而液位却控制得不太理想,为此,又以合介桶为研究对象,将液位与密度看成被控量,将补水阀调节的补水量以及分流箱的分流量作为控制量,建立数学模型,发现液位与密度耦合现象比较严重,最后结合解耦控制来对它们解耦并进行建模仿真。

本课题研究内容主要包括以下几个部分:

(1) 郭屯选煤厂重介选煤工艺简介

简述重介选煤的原理以及郭屯选煤厂工艺流程,根据现场实际情况,对产品流程以及选煤流程进行介绍,最后,对郭屯选煤厂的自动控制整体结构进行了介绍。

(2) 密度自动控制设计并对其给定值进行智能给定

针对郭屯选煤厂现有工艺情况,对其密度系统进行自动化改造,实现密度自动控制;通过现场记录的数据,对其密度给定值进行预测并实现智能给定。

(3) 密度控制系统的软硬件设计

根据密度控制系统控制要求对阀门进行选型,由于原系统已有密度传感器,确定其信号范围,统计输入输出点数,确认原 PLC 系统是否有足够备用点数可以应用。在不改变原有控制界面的基础上开发密度控制系统监控界面,重新设计悉雅特组态软件应用程序,实现智能算法;设计下位机控制程序。

(4) 合介桶控制系统数学建模

对建模途径进行简述,联系现场实际情况,分析多输入、多输出的合介桶控制系统,确定控制量和被控量,分析干扰量,通过合理假设建立简化模型。

(5) 重介悬浮液密度和液位解耦控制策略

以合介桶为研究对象,简单介绍其输入输出量,将悬浮液密度及合介桶液位当作主控量,说明它们之间存在的耦合关系。接着给出解耦策略,设计解耦器,并进行解耦仿真研究。

1.5 内容安排

根据所要研究的主要内容,安排 7 个章节,首先对重介选煤工艺背景以及国内外现状进行描述,然后简介郭屯选煤厂工艺流程,对其目前的控制系统整体结构进行说明;结合先进控制理论对密度控制系统进行智能控制设计,联系郭屯重介选煤生产实际情况,在其原有的软硬件基础上,进行重新规划配置,比如执行器的选型以及上位机监控画面的设计等。设计完成后,经调试正常后将其投入生产,根据记录的数据发现现场中液位的控制并不理想,进而

猜想可能是密度与液位耦合所致。根据合介桶控制过程进行数学建模,发现密度与液位的耦合现象严重,由此对密度与液位在引入解耦环节的情况下进行仿真研究。最后对本书进行总结及展望。

第1章:概述,主要介绍重介选煤工艺参数自动控制的背景及其国内外研究情况。

第2章:重介选煤工艺简介,简述重介选煤工艺基本原理及发展前景,联系郭屯选煤厂的实际生产工艺情况,简要介绍其三产品流程以及目前的控制系统整体结构。

第3章:重介悬浮液密度自动控制硬件系统实现,简述悬浮液密度控制系统的整个硬件结构以及对密度控制系统所用的传感器、执行器进行选型,最后简要介绍与密度控制系统有关的 PLC 硬件部分。

第4章:重介悬浮液密度自动控制策略,对悬浮液密度控制进行算法设计,对其给定值进行智能自动给定,在现场进行调试,分析数据,根据其变化情况进行参数修正。

第5章:重介悬浮液密度自动控制系统软件实现,利用 UNITY 设计重介悬浮液密度自动控制 PLC 程序,利用悉雅特组态软件设计上位机监控程序。

第6章:重介悬浮液密度与液位解耦控制策略,根据现场所记录的数据,发现实际合介桶液位波动比较大,猜测液位与密度之间存在耦合,深入分析合介桶对象,在合理假设的情况下进行数学建模,通过对模型的研究发现密度与液位之间耦合现象严重,从而进行解耦分析并进行仿真研究。

第7章:总结与展望,对全书内容进行总结,并指出其中的不足,为更深入地研究此课题提出展望。

2 重介选煤工艺简介

煤炭资源在我国有着至关重要的地位,因为它关系着社会和经济的发展。近年来,全球越来越重视环境保护,我国也提出了可持续发展的策略,但是煤炭资源是一次性能源,它不可再生,而且再生周期又比较长,为此,煤炭资源的开发就成了一个迫切要解决的问题。重介旋流器选煤技术的发展促进了煤炭资源的有效利用,从而在一定程度上缓解了煤炭资源的问题,并且满足了人们对洁净煤的需要。因而,重介旋流器选煤技术以其自动化、操作简单等优势而被选煤厂广泛应用^[24]。目前,入选原煤比例变得越来越大,但是原煤的可选性变得越来越差,因而对重介选煤的技术要求也就越来越高。在重介选煤硬件性能不断提升的情况下,研究人员也在加快对选煤工艺参数自动控制的研究,从而来满足越来越高的分选要求。本章将讲述重介选煤工艺的基本原理及其发展前景和重介旋流器的工作原理及其特点,并且展示几种选煤厂常用的重介旋流器,然后再结合郭屯选煤厂的实际情况,讲述重介选煤工艺的流程,从而让读者大致了解重介选煤的一般情况,并对其重要工艺参数在整个流程中的变化也作简单说明,最后简述下郭屯选煤厂目前的控制系统情况^[25]。

2.1 重介选煤工艺基本原理

一般将密度范围为 $1.6 \sim 2.6 \text{ g/L}$ 且是煤、夹矸煤、矸石等的混合物称为原煤。原煤输入旋流器中,通过旋流器中产生的离心