

PEIMEI GUOCHENG YOUHUA *Kongzhi Jiqi Yingyong*

配煤过程优化

控制及其应用

闫钦运 郭西进 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

配煤过程优化控制及其应用

闫钦运 郭西进 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以选煤厂建立配煤生产线为载体,对配煤过程的特性和自动配煤控制策略进行了深入分析和研究;通过改进和完善配煤过程控制技术,阐明了提高配煤自动化水平和质量控制精度的方法。

图书在版编目(CIP)数据

配煤过程优化控制及其应用/闫钦运,郭西进著. —徐州:中国矿业大学出版社,2007.7
ISBN 978-7-81107-653-0

I. 配… II. ①闫… ②郭… III. 配煤(炼焦)—过程控制—系统最优化 IV. TQ522.16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 104826 号

书 名 配煤过程优化控制及其应用

著 者 闫钦运 郭西进

责任编辑 何 戈

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮政编码 221008)

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

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 4.25 字数 110 千字

版次印次 2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 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

我国是一个以煤炭为主要能源的国家,煤炭在我国一次能源生产和消费结构中所占的比例一直在 70% 以上。近年来,能源消耗急剧增长,与此同时,能源浪费现象也十分惊人。我国能源利用效率只有 30%,比国际先进水平低 10 个百分点。有关资料表明,近年来我国每年浪费能源近四亿吨标准煤,因此,节能降耗成为最迫切、最刻不容缓的任务。

企业实现节能降耗,技术进步是关键,而配煤对煤炭用户节约能源和满足环境的要求有着现实的重要意义。以配煤为主要内容的煤炭燃前加工是目前国内能够大面积推广、有效改善煤炭利用效率的最可行的技术方案。稳定的配煤质量是提高煤炭燃烧利用效率的前提,配煤过程的自动化不仅提高了工作效率,而且使配煤质量得到了保证。

本书以在煤炭加工的源头选煤厂建立配煤生产线为载体,对配煤过程的特性和自动配煤控制策略进行了深入分析和研究;通过改进和完善配煤过程控制技术,阐明了提高配煤自动化水平和质量控制精度的方法。

全书共分五部分:第一部分对有关配煤的技术发展状况和发展趋势进行综述;第二部分是理论分析,主要针对配煤过程的工艺特点,对配煤过程实现自动控制的可行性、过程优化模型的建立及求解方法、控制系统总体结构设计、模糊控制器的设计和参数整定以及数字仿真等作全面的介绍;第三部分是控制系统的详细设计

和硬件配置,为现场实际应用打下基础;第四部分主要是现场应用;第五部分对今后该课题的研究方向进行了展望。

在本书编写过程中,得到了中国矿业大学信息与电气工程学院的老师、煤炭科技研究总院高新技术事业部的同志及兖矿集团兴隆庄煤矿同事的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2007 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的目的地意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	2
1.3 配煤技术存在的主要问题	13
1.4 主要研究内容及组织结构	15
1.5 本章小结	16
第 2 章 配煤过程优化控制策略	17
2.1 配煤理论基础及工艺原理	17
2.2 影响配煤精度的因素分析	29
2.3 配煤过程优化数学模型及求解方法	30
2.4 配煤过程控制系统总体结构设计	35
2.5 配煤过程控制策略及算法设计	51
2.6 模糊控制的数字仿真	65
2.7 本章小结	68
第 3 章 配煤过程控制系统的开发	69
3.1 配煤过程控制系统开发原则	69
3.2 选煤厂生产工艺系统简介	70
3.3 配煤过程控制系统的功能及结构	76
3.4 控制系统硬件设计	82
3.5 控制系统软件开发	97

3.6 本章小结	107
第4章 配煤过程优化控制在选煤厂的应用	108
4.1 控制系统应用现场介绍	108
4.2 自动配煤控制系统在选煤厂的应用	112
4.3 应用效果分析	116
4.4 本章小结	118
第5章 总结	119
5.1 主要结论	119
5.2 需要进一步研究的课题	120
参考文献	123

第1章 绪 论

1.1 研究的目的及意义

我国是目前世界上少数几个以煤炭为主要能源的国家之一,煤炭生产量和消费量均占世界首位。煤炭在我国不仅是燃料动力的主要来源,也是重要的化工原料和民用能源,并已成为重要的出口创汇商品。长期以来,煤炭在我国一次能源生产和消费结构中所占的比例一直在70%以上。煤多油气少的能源资源结构和煤炭的价格优势以及我国社会经济发展的现实状况,决定了我国的能源供给在一个相当长的时期内仍将以煤炭为主^[1]。从这个意义上讲,煤炭的有效供给和高效洁净利用对确保我国国民经济和社会的持续、健康发展以及能源安全具有十分重要的战略意义。

随着煤炭供需形势的变化和对环境质量要求的不断提高,用户对供煤质量的要求也越来越高,尤其是对灰分指标的要求越来越严格。煤炭的分选加工虽然可以极大地改善煤质,但是由于工艺及装备条件的限制,所生产的产品品种单一且难以实现煤质互补。配煤的最大优势是可以实现不同煤种优势互补、劣势相消,配后煤的综合性能比掺配的单一原料煤更加完备,成为适销的新品种。

综合国内的技术现状和经济基础,以配煤为主要内容的煤炭燃前加工是目前国内能够大面积推广、有效改善煤炭利用效率的最可行的技术方案。配煤不仅可以提高煤炭质量,增加煤炭品种,适应生产条件 and 市场形势的变化,满足用户的不同需要,做到保质

保量地供应,而且可以充分利用煤炭资源,做到物尽其用,提高煤炭生产企业的经济效益。这对合理利用资源,增强企业的市场竞争能力,提高煤炭资源的社会经济效益具有十分重要的现实意义。而在煤炭加工的源头——选煤厂建立配煤生产线,可以发挥自身优势,就地取材,不仅可以生产多品种,而且可以达到少投入、多产出的目的。

随着技术的进步,世界煤炭工业正加速向高效集约化方向发展,自动化已经成为提高生产效率和产品质量的必要手段。作为选煤厂生产过程的重要环节和产品质量控制的最后环节,实现装车前的配煤自动控制将大大提高煤炭产品的质量和生产效率,其重要性不言而喻。

因此,对选煤厂过程的特性和自动配煤控制策略进行深入分析和研究,进一步改进和完善配煤过程控制技术,提高配煤的自动化水平和质量控制精度,对实现煤炭的高效、洁净利用,提高煤炭企业资源利用率和市场竞争力,都具有非常重要的现实意义和推广应用价值。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

随着技术的进步和环境保护意识的提高,煤炭用户对煤炭质量提出了更高的要求。同时,为了充分利用煤炭生产企业的资源,最大限度地满足用户的需求并获得最大的经济效益,配煤成为国内外煤炭生产和加工利用企业普遍采用的洁净利用技术。

1.2.1 国内外配煤技术概况

早在 20 世纪 60 年代,工业发达国家,如美、德、英、日、加拿大、荷兰和西班牙等,迫于环境污染的压力,首先由煤炭用户,如电厂、焦化厂等,陆续开展了配煤技术的研究,研究内容涉及到配煤

原理、配方确定方法、配煤质量检测和控制技术、配煤混合系统和配煤均混方法、配煤着火性能、结渣性能对燃烧效果的影响、配煤对降低 NO_x 和 SO_2 排放量的影响等方面。随着煤质在线检测技术的发展,借助于计算机、自动控制、优化控制等先进技术和逐步完善的配煤理论,实现了基于专家经验和理论分析的自动优化配煤。美国 Gamma—Metrics 公司^[2]在 20 世纪 80 年代后期成功开发了电厂配煤最佳化系统软件 COBOSTTM,至今已在美国和加拿大的部分电厂得到应用,成为美国等国家燃煤电厂适应煤源变化,控制入炉煤品质,保证锅炉稳定运行,减轻结渣、积灰、腐蚀和磨损的重要手段。瑞士 ABB 公司也开发了应用于燃煤电厂的配煤专家系统软件 CQETM,为电厂带来了明显的效益,并在控制污染物排放中发挥了良好的作用。经过多年的研究和探索,发达国家的配煤技术已经相当成熟并得到了广泛应用,正向着工艺装备的系列化、配方的精细化、控制方式的智能化方向发展^[3]。

为提高和稳定煤质,缓解燃煤造成的环境污染及充分利用各种煤炭资源,20 世纪 70 年代末 80 年代初,国内燃料供应和使用部门开始尝试动力配煤。国内动力配煤是 1979 年初由上海燃料总公司首先开发利用的一种提高动力用煤质量稳定可靠性的方法,1982 年 4 月由原物资部在北京召开配煤座谈会后就正式命名为“动力配煤”技术。许多工业锅炉和窑炉使用动力配煤后,不仅炉况稳定,操作方便,还可使煤炭得到充分燃烧,这就极大地减少了过去由于供煤品种不对路而常需改锅炉或窑炉的资金投入和工作量。1984 年以后,该燃料系统在上海、北京、天津、沈阳、长春、南京、济南、青岛、杭州等二十多个省、市推广,至 80 年代末,建成了 200 多条配煤生产线,取得了较好的经济效益和社会效益。20 世纪 90 年代中期,煤炭行业陆续在杭州、株洲等地建起了现代化的配煤生产基地^[4]。这些配煤厂起点高,不再是过去那种粗放、简单混合的配煤工艺,而是融计算机优化配方、自动控制配比、在线

检测、过程控制反馈、现代企业管理于一体的现代化配煤厂。与此同时,煤炭科学院北京煤化所、浙江大学、西安热工所、哈尔滨发电设备成套设计研究所、华中理工大学煤燃烧国家重点实验室和部分煤炭生产企业对混煤(动力配煤)进行了一系列的研究^[5~7]。

直到 20 世纪 90 年代初,由于环境保护意识的提高和煤炭形势的变化,动力配煤技术才开始在国内煤炭行业推广应用。尽管起步晚,但由于国内经济体制改革和煤炭生产经营模式的变化,煤炭行业普遍意识到配煤是满足用户不同需求、增强市场竞争力、提高企业经济效益的有效手段。凭借在资源、生产、销售以及市场等方面的优势,煤炭生产企业相继在煤炭集散地和用户集中地区建起了配煤中心,同时针对企业自身生产条件建成了不同型式的动力煤配煤系统,对满足市场需求和提高企业的经济效益发挥了重要作用。但总体来看,国内配煤理论还不完善,配煤系统的技术水平较低,配煤工艺及装备落后,质量检测技术和手段滞后,尚难以实现真正意义上的自动优化配煤。

1.2.2 工业过程控制技术现状

配煤作为一种工业生产过程,其自动控制技术是随着过程控制理论和技术的发展而发展的。

20 世纪 40 年代开始形成的控制理论被称为“20 世纪上半叶三大伟绩之一”,在人类社会的各个方面产生了深远的影响;并发挥着至关重要的作用。建立在传递函数和频域分析技术基础上的经典控制理论,其最辉煌的成果之一要首推 PID 控制规律。PID 控制原理简单,易于实现,对无时间延迟的单回路控制系统极为有效。直到目前为止,在工业过程控制中有 80% 以上的系统还使用 PID 控制规律。经典控制理论最主要的特点是:适用于线性定常、单输入单输出系统,但不适用于人类生产和工程中大量存在的多变量、非线性系统。即便是对极简单对象的描述及控制,经典控制

理论也还不够完善。

20 世纪 60 年代,以状态空间方法为基础,以极小值原理和动态规划方法等最优控制理论为特征的现代控制理论迅猛发展。卡尔曼滤波器在随机干扰下对线性二次型系统的分析,宣告了时域分析方法的终结,在航天、航空、制导等领域获得了成功应用,从而使控制由一类工程设计方法发展成为一门新的学科。为了扩大现代控制理论的适用范围,相继产生和发展了系统辨识和参数估计、随机控制、自适应控制以及鲁棒控制等各种理论分支,使现代控制理论的内容愈来愈丰富。从 20 世纪 70 年代开始,为了解决大规模复杂系统的优化和控制问题,现代控制理论和系统理论相结合,逐步发展形成了以系统的分解和协调、多级递阶优化与控制为核心的大系统理论。现代控制理论虽然在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成就,但对于复杂的工业过程却显得无能为力。对含有大量不确定性和难于建模的复杂系统,基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、自学习控制等智能控制应运而生,并在许多领域得到了广泛的应用。

1971 年,著名学者 K. S. Fu 从发展学习控制的角度首次提出了智能控制这一概念,他在文献[8]中归纳了三种类型的智能控制系统,即人作为控制器的控制系统,人一机结合作为控制器的控制系统和无人参与的自主控制系统。之后, Saridis^[9,10]对智能控制的发展做出了重要贡献,首次提出了分层递阶的智能控制结构,即整个智能控制由组织级、协调级和执行级三个层次构成,从理论上定义了“熵”作为整个智能控制系统的性能度量,并在实践方面做了大量的工作。

1983 年, Saridis^[11]以机器人为背景提出了三元结构的智能控制理论体系,即在自动控制和人工智能二元结构中引入运筹学,有效地推动了智能控制技术的应用。K. J. Austron^[12]将人工智能中的专家系统技术引入控制系统,组成了另一种类型的智能控制系

统一——专家控制。张钟俊等^[13]在1989年提出了智能控制的四元结构体系,将智能控制概括为控制论、人工智能、运筹学、系统理论四学科的交叉,提出了递阶智能控制的概念。尽管对智能控制目前仍无统一概念,但实际上智能控制是对自动控制理论与技术发展到一个新阶段的综合^[14,16],是传统控制的高级阶段。它主要用来解决那些传统方法难以解决的复杂系统的控制,如智能机器人系统、复杂工业过程控制系统、计算机集成制造系统(CIMS)、航空航天控制系统、社会经济管理系统等。

随着控制系统智能程度的提高,人在其中的在线干预程度越来越低以至消除;从而使得生产和工作的效率及质量不断提高。国内在智能控制方面已开展了大量工作,并在许多工业领域取得了成功应用^[17~21]。相比较而言,智能控制在煤炭工业的应用还处于较低的水平。煤炭工业生产系统复杂、生产条件变化大、不确定因素众多、环境恶劣、劳动强度大、效率低,因此开发应用智能控制技术尤其是模糊控制技术具有更大的现实意义。

模糊控制作为智能控制技术的一个分支,自从1965年Zadeh^[22]创立模糊集合理论,1974年Mamdani^[23]应用模糊集合论建立了世界上第一个模糊控制器以来,模糊控制理论与技术得到了迅速发展^[24~31],并获得大量成功应用。其中比较典型的应用有水加热过程控制^[24]、机器人控制^[25]、交通控制^[26]、水泥窑控制^[27]、动力系统核反应堆控制^[28]。著名控制专家Austrom^[29]曾指出:模糊控制和神经网络控制、专家控制一样,已成为智能控制研究的重要方向。

然而,在模糊控制器的设计过程中,如何获取和调整模糊控制规则、如何定义和调整模糊子集的隶属度函数及如何选择合适的模糊推理方法等来提高模糊控制的应用水平,一直是困扰控制系统技术和研究人员的难题。围绕着这些问题,人们开展了大量的研究工作,不断改进和完善模糊控制的理论和方法^[32~51],从而推

动了模糊控制技术的发展。

模糊 PID 复合控制^[32~34]是模糊技术与常规的 PID 控制算法相结合的一种控制方法,可以增加稳态控制性能。这种控制方法常见的一种形式是模糊 PI 双模控制。

参数自整定模糊控制^[35]是根据控制系统的性能在线整定比例因子,使它们自动选择合适的数值,确保系统的控制性能达到令人满意的水平。这种控制方法较之常规固定比例因子的模糊控制方法对环境变化有较强的自适应能力,在随机环境中能对控制器进行自动校正,使得在被控制对象特性变化或受到扰动的情況下,控制系统能够保持较好的性能。

为了能根据参考模型输出与控制作用下系统输出间的偏差来修正模糊控制器的输出,推出了模型参考自适应模糊控制^[36,37]。

将参考模型和自组织机制相结合,形成了自组织模糊控制^[38,39]。它能自动地对模糊控制规则进行修正、改进和完善,以提高控制系统的性能。自组织模糊控制系统比一般的模糊控制器增加了三个环节:性能测量环节、控制量校正环节和控制规则修正环节。性能测量环节用于测量实际输出特性与希望特性的偏差,以确定输出响应的校正量。控制量校正环节将输出响应的校正量转换为对控制量的校正量。控制规则修正环节修改模糊控制器的控制规则,从而实现了对控制量的校正。

对有多种外扰影响和重复任务要求的具有自学习功能的模糊控制方法^[40]以及自寻优模糊控制器等,可以通过自学习和寻优算法的合理设计,大大提高其速度和效率。

适应多变量控制的多变量模糊控制^[41,42],存在多个输入变量和输出结果。一般采用结构分解和分层分级结构,利用多个简单的模糊控制器进行组合,并兼顾多规则集之间的相互关系。

随着人工神经网络技术的发展,模糊控制技术的研究应用再次进入一个高潮。将人工神经网络与模糊控制相结合已成为模糊

控制研究发展的重要分支^[43,44]。人工神经网络由大量功能简单的非线性处理单元(即神经元)构成,通过权值关联以及数学模型等方式来模仿人脑功能的网络^[45]。模糊逻辑模仿人脑的逻辑思维,用于处理不确定或模型未知的控制问题,数据处理能力强,所以将神经网络和模糊逻辑结合起来,实现神经模糊控制,可以利用神经网络和模糊逻辑两者之长,进一步增强模糊控制器的自适应能力。但在实际应用中,模糊神经网络控制器还存在学习训练时间过长、结构复杂等问题。模糊控制的很多问题还有待进一步解决,包括如何建立一套严格的模糊控制理论、如何建立模糊控制的系统优化设计方法以及模糊控制的鲁棒性问题、稳定性问题等。要使这一方法在工程实际中得到应用,还需要作大量的研究工作^[46]。

从控制系统的结构来看,工业过程控制已经经历了四个阶段。

20 世纪 50 年代是以基地式控制器为核心组成的控制系统,一般仅限于单回路控制。至今这类控制系统仍没有被完全淘汰,而且还有了新的发展,但所占的比重已大为减少。

20 世纪 60 年代出现了由电动、气动或液动的模拟调节单元仪表组成的控制系统,自动控制系统的分析和设计多半以经典控制理论为基础,利用传递函数和频域分析技术来解决各种控制问题。一般是具有单输入单输出或几个输入输出的线性定常控制系统。其中 PID 算法成为最有效、最普遍的控制规律。

随着工业生产向着大型现代化方面迅速发展,生产规模不断扩大、生产过程的高度连续性和设备的高强度操作,要求在各种工况下有关工艺参数都尽可能地处于最佳状态,以满足生产过程有关性能指标的最优要求。为了适应这种需求,先进的工业过程控制技术应运而生^[47]。同时计算机技术的迅猛发展,使复杂的工业过程实现自动控制成为了可能,并深刻地影响着工业控制的发展方向,现代控制技术、工业过程的数学模型与工业控制计算机成为

工业控制计算系统发展的三大要素,推动着现代控制理论向更高阶段发展。

现代控制技术、工业过程数学模型是实现计算机控制,或者说是最大限度发挥计算机功能的必要基础,而工业控制计算机的出现和发展又为现代控制技术和过程数学模型的应用提供了愈来愈简便、愈来愈强大的工具。

从 20 世纪 70 年代开始,计算机大量应用在工业过程控制系统中,从此进入了工业过程控制发展的第三阶段。期间经历了直接数字控制(DDC)的集中控制阶段、计算机与模拟仪表混合控制阶段、计算机监测控制阶段,常规的仪表控制被逐渐取代。由于集中控制系统的固有缺陷,很快被适应性非常强的集散控制系统(DCS)所替代^[48]。DCS 在硬件上将控制回路分散化,数据显示、实时监测等功能集中化,有利于安全平稳生产。尽管 20 世纪 70 年代后许多生产装置采用了 DCS 系统,但由于当时的理论和技术方面的原因以及常规仪表的限制,早期的 DCS 仍以简单的 PID 控制为主,还难以处理工业过程中存在的耦合性、非线性和时变性等,也无法适应含有大量不确定性和难于建模的复杂系统,工业控制计算机的功能和控制水平并没有得到充分发挥。随着企业对生产过程高柔性、高效益的要求日益迫切,上述控制方式已经不能适应生产发展的需要。

20 世纪 80 年代以后出现的以二级优化控制以及多变量预测控制为代表的先进控制策略的成功应用,推动了工业过程控制的进一步发展,大量工业工程都在 DCS 基础上实现了先进控制和优化控制。

先进过程控制(Advanced Process Control, APC)是指一类在动态环境中,基于模型,充分借助工业控制计算机能力,为企业获得最大利润而实施的运行和技术策略,以确保工业生产过程运行在最佳工况。主要包括以下先进控制策略:双重控制及阀位

控制、纯滞后补偿控制、解耦控制、自适应控制、差拍控制、状态反馈控制、多变量预测控制、推理控制及软测量技术,特别是对于含有大量不确定性和难于建模的复杂系统,基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、自学习控制等基于信息论的智能控制技术应运而生,并在许多领域得到了成功应用,尤其是智能控制已成为当前工业过程控制开发和应用的热点。

先进过程控制一出现就受到了过程工业界的普遍关注,并逐渐成为工业生产过程控制的主流技术。目前国内许多大型企业纷纷斥巨资对企业自动化生产过程实施先进控制。国外许多控制软件公司和 DCS 生产商都在竞相开发先进控制和优化控制的商品化工程软件包。西方发达国家有一定规模的先进控制软件公司大约有 45 家,已推出 312 种 APC 软件。在世界范围内已有数千项工程应用 APC,且以每年 30% 左右的速度增长。

在硬件配置上,先进过程控制一般采用上位机和 DCS 或电动单元组合仪表相结合的形式,构成二级计算机优化控制系统。随着计算机及网络技术的发展,DCS 进一步发展成为开放式系统,实现了多层次计算机网络构成的管控一体化系统。同时,随着现场总线技术和智能化仪表的开发应用^[49],以现场总线为标准、以微处理器为基础的现场智能仪表与各控制单元之间进行全数字化、双向和多站通讯的现场总线网络控制系统被公认为是具有时代特点的新一代分布式计算机控制系统,必将对工业过程控制系统带来革命性的变革,人类必将迎来工业过程控制的新纪元。

现场总线控制系统的突出特点是:

(1) 开放性。现场总线采用同一种国际标准的通讯协议,不同厂家的产品可方便地互联,并可与各种网络相联。

(2) 智能化。大量智能化现场仪表的应用,除了可以实现一般的现场控制、实时监测仪表等功能外,还具有自诊断、自补偿、现场组态、现场校验等功能。