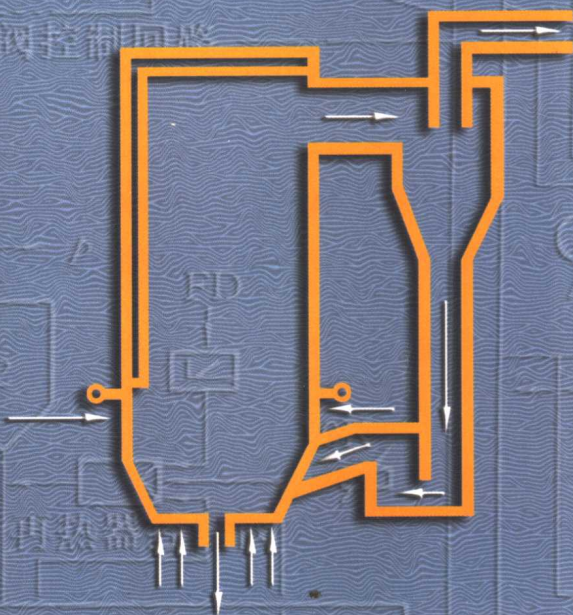


循环流化床锅炉过程控制

孙 伟 著



9.5

中国矿业大学出版社

循环流化床锅炉过程控制

孙 伟 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了过程控制系统的有关技术及其工程设计方法,分析了循环流化床锅炉的过程运行与控制特性,全面叙述了循环流化床锅炉的汽包水位、过热汽温、燃烧系统等过程控制方法。本书内容丰富、新颖,基础理论和工程应用紧密结合,反映了国内外最新研究成果。

本书可供锅炉、过程控制等专业的运行和工程技术人员参考,也可作为高等院校有关专业研究生、本科生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉过程控制/孙伟著. —徐州:中国矿业大学出版社,2002.11

ISBN 7 - 81070 - 609 - 8

I. 循... I. 孙... III. 流化床—循环锅炉—过程控制 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 084601 号

书 名 循环流化床锅炉过程控制

著 者 孙 伟

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 邮编 221008)

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 中国矿业大学印刷厂

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 6.5 字数 167 千字

版次印次 2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月第 1 次印刷

印 数 1~1000 册

定 价 20.00 元

前 言

过程控制工程是对过程控制系统进行分析与综合的一门自动化分支学科,它结合了控制理论、生产工艺过程与仪表计算机等方面的知识。过程控制技术的发展,给过程工业带来十分明显的效益。

在热力发电的生产过程中,需要采用自动控制技术。随着单机容量的不断扩大,要求发电机组具有更高的可靠性和自动化水平。工业锅炉是工业生产的主要动力设备,锅炉生产过程控制,是操作锅炉运行在最佳状态、稳定蒸汽(热水)的压力和温度、保证安全生产、最大限度地提高锅炉效率、降低燃料消耗的主要手段,也是保证经济运行、满足负荷要求、减少烟尘与噪声对环境的污染、改善劳动条件、减轻工人劳动强度的主要途径。

循环流化床锅炉技术是近十几年来迅速发展起来的一项高效低污染清洁燃烧技术。循环流化床锅炉燃料适应性广、负荷调节范围宽、负荷调节快,较常规燃煤锅炉的层燃和悬浮燃烧在燃烧方式上发生了很大变化,炉内流态化工况燃烧过程复杂,其运行调节是一个复杂的动态过程。设计完备的控制系统是流化床锅炉充分发挥作用的关键技术之一。

本书主要结合循环流化床锅炉的过程运行与控制特性,叙述了循环流化床锅炉的汽包水位、过热汽温、燃烧系统等典型过程控制方法,并对相关的技术与发展进行了介绍。

过程控制工程涉及到过程控制技术、控制系统和工程设计等方面。本书第一章对过程控制的现有常规、先进与智能等控制技术进行了简介。第二章的第一部分介绍了 DCS、现场总线、CIMS 等

控制系统的特点与发展;第二部分介绍了过程控制系统工程设计的有关知识与方法。第三章对循环流化床锅炉的原理、特点和发展现状进行了介绍,并叙述了相关的启动和运行特性。第四章对循环流化床锅炉的有关控制问题进行了总体概述。第五章分析了循环流化床锅炉汽包水位的控制要求与过程特性,介绍了常规控制方法,重点叙述了一种自适应神经元控制算法。第六章分析了循环流化床锅炉过热汽温的控制要求与过程特性,介绍了常规控制方法,并重点叙述了两种智能控制策略:模糊控制系统和基于神经元辨识的预估控制系统。第七章分析了循环流化床锅炉燃烧系统的控制要求与过程特性,介绍了燃烧系统的递阶控制系统结构,并重点叙述了燃烧过程的专家控制系统技术。本书涉及内容较广泛,重点在第三章到第七章,限于篇幅,其他内容只能作简单介绍。

本书引用了作者早年博士论文、有关工程项目及基金课题的部分内容以及兖州矿业集团电铝公司热电厂的相关应用资料。在此,要特别感谢许世范导师、谭得健教授、徐希康教授、王信研究员、刘杰高级工程师、丁恩杰副教授、姜川高级工程师等,没有他们的帮助,本书是不可能完成的。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

孙伟

2001年10月于中国矿业大学

目 录

第一章 过程控制技术	1
第一节 常规控制系统.....	1
第二节 先进控制系统.....	8
第三节 智能控制系统	14
第四节 过程优化	20
第五节 故障诊断与工况监测	24
第二章 过程控制系统与工程设计	29
第一节 过程控制系统	29
第二节 过程控制工程设计	47
第三章 循环流化床锅炉特性	64
第一节 流化床技术原理与特点	64
第二节 循环流化床锅炉的发展现状	68
第三节 循环流化床锅炉的运行特性	74
第四章 循环流化床锅炉过程控制有关问题	85
第一节 循环流化床锅炉控制要求	85
第二节 循环流化床锅炉控制应用情况	91
第三节 循环流化床热工自动控制举例.....	104

第五章 汽包水位过程控制系统	115
第一节 控制要求与过程特性.....	115
第二节 常规控制方法.....	119
第三节 自适应神经元控制算法.....	123
第四节 给水全程控制系统.....	134
第六章 循环流化床锅炉过热汽温过程控制	137
第一节 过热汽温控制特性与要求.....	137
第二节 过热汽温模糊控制系统.....	142
第三节 基于神经元 AN 辨识的汽温预估控制	151
第四节 过热汽温全程控制系统.....	156
第七章 循环流化床锅炉燃烧系统专家控制	158
第一节 燃烧过程有关参数的影响.....	158
第二节 燃烧控制系统基本内容.....	166
第三节 循环流化床炉燃烧专家控制系统.....	178
参考文献	193

第一章 过程控制技术

过程控制工程是以过程控制系统为主体,以控制理论为基础,并把过程工艺分析、自动化仪表和计算机方面的知识结合起来,构成的一门综合性的工程学科。它是控制理论在过程控制系统中的应用,包括理论的移植与改造、系统结构的研究、控制算法的确定以及控制系统的实现。其研究任务是对过程控制系统进行分析与综合,解决如图 1-1 所示系统的方案设计问题。

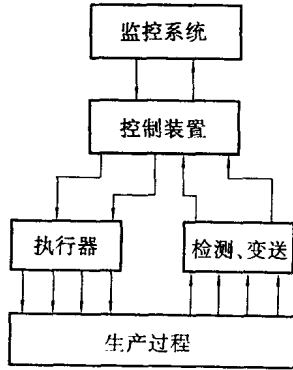


图 1-1 过程控制系统

控制工程是综合性的应用学科,本章对有关内容进行简单介绍。

第一节 常规控制系统

该类系统是经典控制理论的产物,以前是用常规仪表来实现的,现在也可以用现代控制理论来分析,但更多的是用计算机来实现。在 DCS 中,一般都备有多种常规控制算法模块。

一、单回路控制系统

单回路控制系统主要指单输入—单输出(SISO)的线性控制系统,是控制系统的基本形式。即使在高水平的自动控制方案中,这类系统仍占控制回路的绝大多数。

对每一个控制回路来说,在设定值发生变化或系统受到扰动作用后,被控变量应该平稳、迅速和准确地趋近或恢复到设定值。因此,通常在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各种单项控制指标。把它们适当地组合起来,也可提出综合性指标。

对设定值变动的随动系统与设定值不变的定值系统,控制要求有相同的一面,也有不同的一面。例如,系统都必须稳定,但定值系统的衰减比可以低一些,随动系统的衰减比应该更高一些。随动系统的重点在于跟踪,要跟得稳,跟得快,跟得准;定值系统的关键在于一个定字,要定得又稳又快又准。

整个控制系统的品质取决于各个环节。过程的数学模型,如从其内在规律来考虑,往往相当复杂,例如,有非线性、分布参数和时变等情况。然而,在输入的变化量不大时,过程特性可以线性化,同时也可以集总化;对应于一段特定的时刻,考虑到过程的时变一般很缓慢,可以认为是定常的。这样,输入输出关系往往可用传递函数来描述。多数工业过程的特性分属下列四种类型:

(1) 自衡的非振荡过程。在过程控制中,这类过程是最常见的。在阶跃作用下,被控变量 $c(t)$ 不经振荡,逐步地向新的稳态值 $c(\infty)$ 靠拢。过程能够自发地趋于新的稳态值的性质称为自衡性。

(2) 无自衡的非振荡过程。这类过程在阶跃作用下, $c(t)$ 会一直上升或下降,直到极限值。这类过程比前一类过程难控制一些,它们缺乏自发趋向平衡的能力。

(3) 有自衡的振荡过程。在阶跃作用下, $c(t)$ 会上下振荡。有自衡的振荡过程,指的是衰减振荡,最后能趋近新的稳态。这类过程不多见,它们的控制也比第一类过程困难一些。

(4) 具有反向特性的过程。在阶跃作用下, $c(t)$ 先降后升,或是先升后降。具有反向特性的过程锅炉液位在负荷变化时的响应是最典型的例子。

在方案和工程设计中,在被控变量与操作变量的选择上,一方

面要考虑工艺,如被控变量要能反映工艺指标,操作变量要在工艺上合理,包括符合节能原则等,另一方面必须考虑控制通道的特性参数,要有较好的受控性能。在系统结构上是否能采用简单控制系统,取决于控制的精度要求、对象的易控程度、扰动的大小和频繁程度等因素。对于具有反向特性等的过程,往往需要用较复杂的系统结构或采用特殊控制规律。

对于该类控制系统,最常用的控制算法是采用 PID 控制算法或其变形算法。在用 DCS 或其他计算机装置进行直接数字控制 (DDC) 时,为数字控制或采样控制方式,采用离散 PID 控制算法。在工程应用中要注意针对过程特性,采用不同的改进 PID 算法及其相关的算法,如多维 PID 控制、时间比例控制、Dahlin 控制算法等。

实际应用中必须掌握和合理应用算法参数的多种工程整定方法。另外,自整定 PID 控制器的研究多年来受到关注。现有方法本质上是设法辨识过程特性,主要有适应控制系统方法、极限环方法、波形识别法、反应曲线法等几类。

二、串级控制系统

采用不止一个控制器,而且控制器之间相串联,一个控制器的输出作为下一个控制器的设定值的系统,称为串级控制系统。在锅炉汽温调节中,常采用这种系统。其典型系统框图如图 1-2 所示。

其中, c_1 为主被控量,使其保持平稳是控制的主要目标; c_2 为副被控变量,副控制器 G_{c2} 的设定值为主控制器 G_{c1} 的输出 U_1 。在设计时对副回路的构成应考虑:包含主要扰动;包含整个对象内次大的时间常数(有自衡对象)或包含最大时间常数(非自衡对象)。与单回路控制系统相比,串级控制系统复杂程度有所增加,但有如下优点:

(1) 迅速克服进入副回路的扰动。串级控制系统应用中,大多

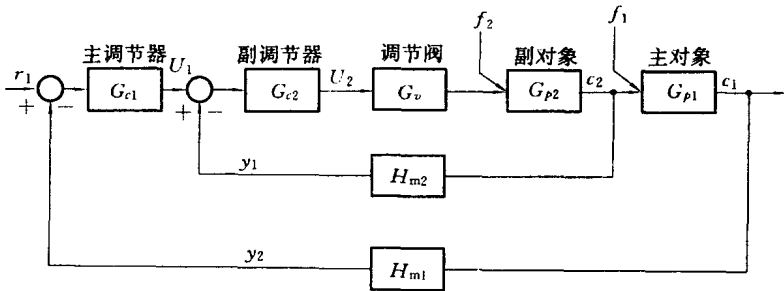


图 1-2 串级控制系统框图

属于该目的。副回路起迅速的“粗调”作用，主回路起进一步的“细调”作用。

(2) 改善主控制器的广义对象的特性。副回路把整个广义对象的一部分分割开来，构成一个随动的反馈控制系统，其调整后的特性影响广义对象的特性。

(3) 容许副回路各环节的特性在一定范围内变动而不影响整个系统的控制品质。也可减少控制阀流量特性不合适带来的影响。

(4) 可以实现更灵活的控制方式，主控制器在必要时可以切除。

三、比值控制系统

在比值控制系统中，要控制的是两个变量的比值，通常指的是两个流量的比值。例如在锅炉燃烧系统中，空气与燃料的流量间应保持一定的比值，当燃料流量增加或减少时，空气流量应随之增加或减少。前一变量称为主动量，后一变量称为从动量。

比值控制系统是按功能命名的系统。在比较简单的情况下，它在结构上与简单控制系统一样。常用的控制方案有两种形式：一种是把主动量的测量值乘以某一系数后作为从动量控制器的设定

值,这是一种典型的随动系统,如图 1-3(a)所示;另一种是把流量的比值作为被控变量,这是一种典型的定值系统,只不过从动量控制器的测量值是由两个流量值相除得出的,如图 1-3(b)所示。两者都属基本形式,这一大类的系统都只有一个控制回路,故通常称为单闭环比值控制系统。

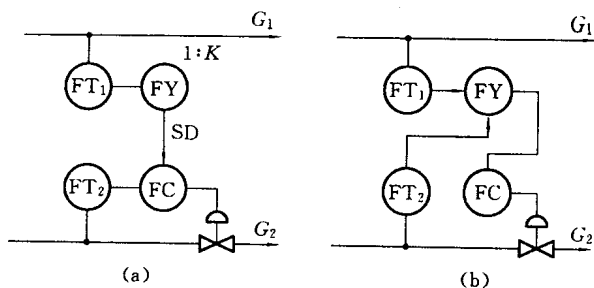


图 1-3 比值控制系统基本框图

第二大类是主动量也同时设有流量控制回路的系统,通常称为双闭环比值控制系统。如果分隔开来看,结构上仍是两个简单控制系统。

第三大类是比值的设定值由另一个控制器给出的系统。例如在燃烧控制中,最终的(也就是真正的)被控变量是烟道气的氧含量,而空气与燃料的流量比值实质上是控制手段,因此,比值的设定值由氧含量控制器给出。这一大类的系统称为变比值控制系统,结构上是以比值控制系统为副回路的串级控制系统。

四、前馈控制系统

一般控制系统是基于反馈原理,采用闭环结构,按偏差而调节的,属于被动性控制,对于大扰动或时滞大的过程,控制品质往往不能令人满意。

前馈控制系统基于补偿原理,采用开环结构,控制作用则是外作用(设定值或扰动量)的函数。

考虑到过程特性和扰动的复杂性,要实现完全的前馈和补偿,是难以做到的。为保证更大的适应性,在很多场合下把前馈控制与反馈控制结合起来,构成前馈—反馈控制系统。这种系统即使在大而频繁的扰动下,依旧可以获得优良的控制品质。依据反馈、前馈控制相结合的方式,常用的前馈控制系统可分为两类:前馈控制作用与反馈控制作用相乘;前馈控制作用与反馈控制作用相加,这是前馈—反馈控制系统中最典型的结构。当负荷(处理量)是主要扰动,且设定值又恒定不变时,这两种类型的功能和适用场合是相近的;从设计的灵活性和方便性看,相加型似稍胜一筹。

前馈控制是按扰动而控制的,要使这种控制方式得以实现并发挥作用,一是扰动必须直接或间接可测,否则无法实施;二是必须经常有比较显著和比较频繁的扰动,否则无此必要。过程的扰动往往不止一个。在有些场合,主次关系很清楚,只要抓住最主要的扰动,就解决了问题。但在另一些场合,重要的扰动不止一个,此时可采用多变量前馈。

五、时滞补偿控制系统

广义对象的时滞与时间常数之比 τ/T 越大,系统越不易控制。当 τ/T 超过 0.5,甚或超过 1 时,可称为具有大时滞的系统。这种系统中,为使闭环系统稳定,控制器增益必须减小。总的后果是最大偏差很大,调节过程变慢。对这类对象用 PID 控制规律,如果控制要求不高,则尚差强人意,如果希望有良好的调节品质,就难以满足要求。

一条更多采用的可行途径是引入适当的反馈环节,设法使系统闭环传递函数的分母项中(亦即特征方程中)不含时滞项。这种形式的补偿器称为 Smith 预估器。现在用计算机技术来实施时滞

算法已变得十分方便,这样就摆脱了技术工具的制约,大大方便了该种补偿器的开发与应用。这种补偿器不仅可用于单输入单输出情况,也可用于多输入多输出系统。

Smith 预估控制有一个问题,就是对象的模型必须准确。为了解决模型失配时 Smith 预估控制效果不够满意的问题,现在已有多种改进方案,但似乎仍无一种通用的方法。

六、选择性控制系统

一般地说,凡是在控制回路中引入选择器的系统都称为选择性控制系统。常用的选择器是低选器和高选器,它们各有两个(或更多个)输入,低选器把低信号作为输出,高选器把高信号作为输出,即选择器实现的是逻辑运算。把逻辑规律引入控制算法,丰富了自动化的内容和范围,使更多生产中的实际控制问题得以很好解决。选择性控制系统在单元组合仪表时代即已发展,到采用数字计算机控制时得到了推广应用,成为控制系统中的一类基本结构。

选择性控制系统依据选择器所在的位置不同,可分为三种基本类型:

(1) 选择器装在几个检测元件(或变送器)与控制器之间。这主要实现被控变量的选点。当被控变量的测量值应该是几个点之间的最高或最低值时,可通过选择器来自动进行选点,当有高可靠性要求时,有时采用冗余技术。

(2) 选择器位于两个控制器与一个执行器之间。超驰(override)控制系统是选择性控制系统中很常用的类型。由正常控制器、超驰控制器与选择器代替单一的控制,以保证某些工艺变量不超过安全软限,保证生产安全,是超驰控制系统的特点与主要职能。类似的系统结构也可用于实现自动开、停车,或实现其他需要引入逻辑规律的控制方式。

在超驰控制系统中,选择器位于两个控制器的输出端与控制

阀之间,一般宜选用低选器,原因是安全方面的考虑。即使在失电或其他故障情况下,输出值为零也能满足安全需要。超驰控制系统中有两个控制器,它们应选正作用或反作用,应分别按工艺规律和阀门的气开、气关情况而定。正常控制器的选型与简单控制系统完全一样。超驰控制器则需考虑其一达到安全软限即能迅速切换的能力,为此应选择狭比例度的P或PI控制器。在超驰控制系统中,当进入或超出安全软限时,控制器应立即进行切换。这就是说,当偏差为零时,两个控制器应该同步,即应该有相同的输出,这样才能保证及时切换。

(3) 利用选择器实现非线性控制,限幅器(或选择器)装在从动控制器的设定通道上。选择性控制系统为系统构成提供了新的思想,可以与其他复杂控制系统结合在一起,实现各式各样的控制要求。当然,选择性控制增加了系统的复杂性,也不是越多越好,更不可滥用,力求简单始终是设计的基本原则之一。

第二节 先进控制系统

随着计算机技术、现代控制理论的迅猛发展,以及过程本身的复杂性的增加,过程工业向大型化和精细化两个方向发展,对自动化提出了更高的要求。于是各种形式的先进控制系统应运而生,它们大多是20世纪70或80年代诞生的,并以现代控制理论和人工智能作为理论基础。

一、多变量控制系统

以现代控制理论为基础,包括状态反馈控制、动态最优控制等。

多变量系统指的是输入或输出变量数大于1的系统,主要是多输入多输出(MIMO)系统。最常用的系统描述形式有:

- (1) 状态空间表述式;
- (2) 传递函数矩阵;
- (3) 输入输出差分方程。

改进控制过程品质,追求动态品质的优化,无疑是提高经济效益的一条重要途径。到20世纪70年代初期,现代控制理论已经有了巨大的进步,在航天航空等领域的应用也获得辉煌成果,但在过程控制方面却并不很成功。主要原因在于:这些方法需要精确的对象动态数学模型,但事实上却往往难以获得,而且过程常常具有不确定性。

二、预测控制系统

过程工业迫切需要新的优化控制方法。从20世纪70年代中期开始,预测控制从工业界发展起来了。动态矩阵控制(DMC)以阶跃响应这样一种非参数模型作为预测模型。模型预测启发控制(MPHC),亦称模型算法控制(MAC),采用另一种非参数模型——脉冲响应作为预测模型。预测控制也可以采用参数模型,广义预测控制(GPC)用输入输出差分方程作为预测模型,可被认为是采用参数模型的代表。至今各类预测控制算法不下数十种。

工业上应用的成功,使预测控制的研究不断发展,直到现在,它一直是控制界关注的热点,理论、算法和应用技术日趋完善。在工业上,有约束的多变量预测控制已成为生产厂家很感兴趣的一种模式,得到普遍推广,工业化应用软件在国际上已成为热门的商品,在国内也已开发成功。

各类预测控制的共性体现在以下三个方面:

(1) 预测模型。它们都是基于模型的控制算法,因而需要预测模型。

(2) 滚动优化。控制的优化是滚动进行的。在任一时刻 k ,依据目标、模型和现状可以计算出在今后一段时期应该施加的控制

作用量。在预测控制中,只把应采取的即时控制作用量 $\Delta U(k)$ 施加于对象,到进行一步以后,又重新计算,顺次进行。滚动优化是人们在处理具有不确定性事物时的一种有效策略。

(3) 反馈校正。考虑到预测模型不完全准确,并有未考虑到的扰动存在,需要进行反馈校正,修正预测值,以使优化不仅基于模型,而且依据反馈的实际信息,构成闭环优化。

各类预测控制的共性也表现在它们都可以等价于一种统一的内模控制模式。

三、解耦控制系统

在一个装置或设备上,设置了多个控制系统,关联现象就可能出现。关联情况可以通过传递函数矩阵来分析。下面先以双输入双输出系统(见图 1-4)作为例子。

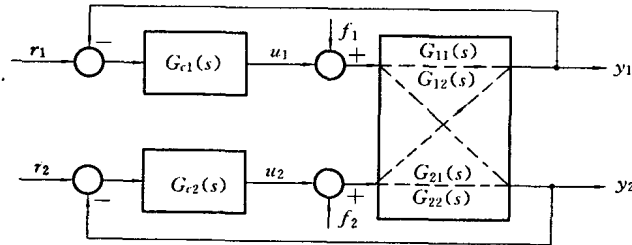


图 1-4 双输入双输出系统

如果传递函数 $G_{12}(s)$ 和 $G_{21}(s)$ 都等于零,两条调节通道各自独立,不存在关联,系统间无耦合;如果有一个等于零,则称系统是半耦合;如果都不等于零,两条调节通道相互关联,则称系统是耦合的。

可以找到各种减少与解除耦合的途径。

(1) 通过被控变量与操作变量间的正确匹配来解决:这是最