



普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

过程控制系统 及仪表

张勇 王玉昆 主编 · · · · ·



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

过程控制系统及仪表

主 编 张 勇 王玉昆
参 编 姜克君 刘希民

ISBN 978-7-111-28111-1

定价：35.00元

设计

机械工业出版社

机械工业出版社

地址：北京市西城区百万庄大街24号
邮编：100037
电话：(010) 68993921
网址：<http://www.cmpbook.com>
电子邮箱：zq@cmpbook.com

本书全面讲解了过程控制及仪表系统的基本概念、基本理论、系统分析设计方法、生产实践中典型的系统集成实例以及本学科最新的发展趋势。本书共 11 章,包括绪论,信号的联络、传输及转换,控制系统防爆措施,变送器,控制器,执行器,被控对象,单回路控制系统,串级控制系统,其他控制系统及过程控制在冶金工程中的应用案例。

本书系统性强,内容上简单易懂,重点突出,注重理论与实践的结合,着重培养读者的理论分析能力和工程实践能力。

本书可作为高等院校自动化、测控、电气工程等专业本、专科生的教材,也可以作为相关领域的研究人员和工程技术人员的参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制系统及仪表/张勇,王玉昆主编. —北京:机械工业出版社,2013.7

普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-43138-1

I. ①过… II. ①张…②王… III. ①过程控制-高等学校-教材②自动化仪表-高等学校-教材 IV. ①TP273②TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 145858 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 张利萍 王雅新

版式设计:常天培 责任校对:张媛

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 435 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43138-1

定价:37.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

过程控制系统在钢铁冶金、石油化工、水泥、轻工、医药等各个生产领域都有着广泛的应用，过程控制技术及其仪表系统的研究内容也十分广泛。近年来，过程控制学科发展异常迅速，为了让读者掌握过程控制及仪表系统的基本概念、基本理论、系统分析设计方法、生产实践中典型的系统集成实例以及本学科最新的发展趋势，我们编写了《过程控制系统及仪表》一书。

本书可作为自动化、检测技术与仪器、电气工程及其自动化等专业的本、专科学生的教材，也可作为从事自动化专业的工程技术人员参考书。本书在内容上有如下特点：首先对于过程控制及仪表的基本概念、基本理论的讲解做到简单易懂，重点突出。在一些重点知识的讲解上力求简单明了，循序渐进，把知识点一一点明，以便于学生学习和理解。其次书中所举案例都是从实际工程背景中提炼出来的，且应用基本理论从工程实践的角度去分析问题和解决问题。仪表的选型、控制规律的选择、控制器参数的整定等工程实际问题在书中都有详细讲解。能够使学生在学习本书后建立起完整的过程控制系统的知识构架，为以后从事自动化专业工作打下良好基础。此外，在本书每个章节的后面都附有习题、思考题，以加深和巩固学习效果。

本书部分内容参考了兄弟院校有关过程控制、控制仪表等方面的教材，编者在此致以谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言		
第一章 绪论	1	
第一节 过程控制系统的定义及组成	1	
第二节 过程控制的特点	3	
第三节 过程控制系统的性能指标	4	
第四节 过程控制系统的类别	7	
第五节 过程控制系统发展概况	8	
思考题与习题	11	
第二章 信号的联络、传输及转换	12	
第一节 联络信号	12	
第二节 电信号传输方式	13	
第三节 信号的转换	15	
思考题与习题	17	
第三章 控制系统防爆措施	18	
第一节 安全防爆的基本知识	18	
第二节 防爆型控制仪表	20	
第三节 安全栅	21	
第四节 安全火花防爆系统	27	
思考题与习题	29	
第四章 变送器	30	
第一节 变送器原理与构成	30	
第二节 差压变送器	32	
第三节 温度变送器	39	
思考题与习题	51	
第五章 控制器	52	
第一节 基型控制器	52	
第二节 数字 PID 控制器	60	
思考题与习题	63	
第六章 执行器	64	
第一节 概述	64	
第二节 电动执行机构	66	
第三节 气动执行机构	71	
第四节 电—气转换及阀门定位器	73	
第五节 调节机构	79	
思考题与习题	96	
第七章 被控对象	97	
第一节 过程模型概述	97	
第二节 过程控制系统建模方法	99	
第三节 机理法建立过程数学模型	101	
第四节 实验法建立过程控制的数学模型	111	
第五节 模型参数对控制性能的影响	120	
第六节 常见工业过程模型特性	122	
思考题与习题	125	
第八章 单回路控制系统	127	
第一节 概述	127	
第二节 单回路控制系统的设计	128	
第三节 单回路控制系统的整定	155	
第四节 单回路控制系统的投运	168	
思考题与习题	170	
第九章 串级控制系统	173	
第一节 串级控制系统概述	173	
第二节 串级控制系统的特点与分析	176	
第三节 串级控制系统设计	181	
第四节 串级控制系统的参数整定	184	
第五节 串级控制系统的工业应用	187	
思考题与习题	190	
第十章 其他控制系统	191	
第一节 比值控制系统	191	
第二节 前馈控制	203	
第三节 分程与选择性控制系统	219	
第四节 纯滞后控制系统	226	
第五节 多变量解耦控制系统	235	
思考题与习题	257	
第十一章 过程控制在冶金工程中的应用案例	259	
第一节 简单控制系统应用案例	259	
第二节 复杂控制系统应用案例	262	
附录 控制阀选择实例	274	
参考文献	277	

第一章 绪 论

第一节 过程控制系统的定义及组成

一、过程控制系统的定义

生产过程自动化，一般是指石油、化工、冶金、炼焦、建材、陶瓷以及热力发电等工业生产中连续的或按一定程序周期进行的生产过程的自动控制。电力拖动及电机运转等过程的自动控制一般不包括在内。凡是采用模拟或数字控制方式对生产过程的某些物理参数进行的自动控制通称为过程控制。

过程控制系统一般指工业生产过程中自动控制系统的被控变量是温度、压力、流量、液位、成分等这样一些变量的系统。

过程控制系统可以分为常规仪表过程控制系统与计算机过程控制系统两大类。前者在生产过程自动化中应用最早，已有七十余年的发展历史。后者是 20 世纪六七十年代后发展起来的以计算机为核心的控制系统。

二、过程控制系统的组成

在冶金、机械、石油、化工、电力、轻工等工业部门中，锅炉是一种不可缺少的动力设备。下面以锅炉过热蒸汽温度控制系统为例，介绍过程控制系统的组成。

由图 1-1-1 所示，从锅炉锅筒出来的饱和蒸汽经过过热器继续加热成为过热蒸汽。通常过热蒸汽温度达到 460℃ 左右时再去推动汽轮机工作。每种锅炉与汽轮机组都有一个规定的运行温度，在这个温度下运行机组的效率最高。如果过热蒸汽温度过高，会使汽轮机的寿命大大缩短；如果温度过低，当蒸汽带动汽轮机做功时，会使部分蒸汽变成小水滴，冲击汽轮机叶片，易造成生产事故。因此过热蒸汽温度是其生产过程中的一个重要的工艺参数，

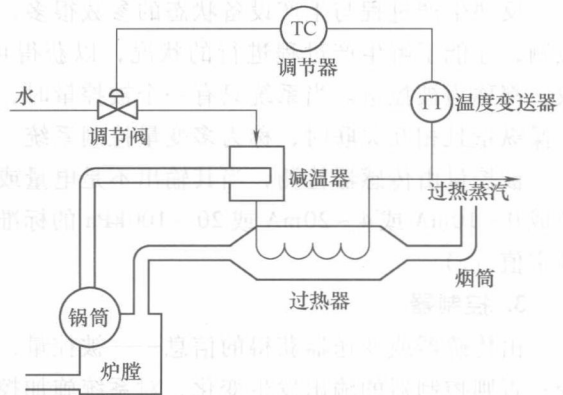


图 1-1-1 锅炉过热蒸汽温度控制系统

是保证汽轮机组正常运行的一个重要条件，必须对其进行控制。通常是在过热器之前或中间部分串接一个减温器，通过控制减温水流量的大小来改变过热蒸汽的温度，故设计了图示温度控制系统。本系统采用 DDZ-III 型电动单元组合仪表，即用热电阻温度计检测过热蒸汽的温度，经温度变送器将测量信号送至调节器的输入端，并与代表过热蒸汽温度的给定值进行比较得到偏差，调节器按此偏差以某种控制规律进行运算后输出控制信号，来控制调节阀的

开度，从而改变减温水的流量，以达到控制过热蒸汽温度的目的。

为了便于应用控制理论分析过程控制系统，需将图 1-1-1 所示的控制系统图画成图 1-1-2。图中每个方框表示组成该系统的一个环节，两个方框之间的一条带有箭头的连线表示信号传递方向。

由图 1-1-2 所示的系统原理框图可知，比较蒸汽温度变化并进行控制运算的控制器，设定温度的定值器，实现控制命令的执行器，改变给水量的控制阀，用这些装置加上其他一些必要的装置对被控过程进行控制就构成一个过程控制系统。由此可见，过程控制系统应包括以下几部分。

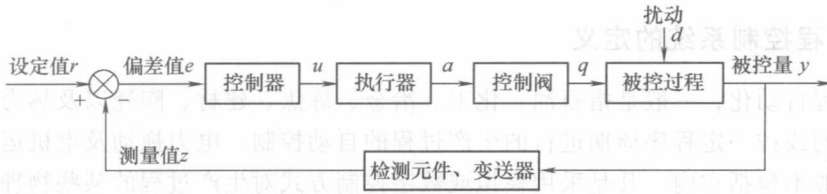


图 1-1-2 过程控制系统原理框图

1. 被控过程（简称过程）

被控过程（又称被控对象）是指生产过程被控制的工艺设备或装置。被控过程通常有锅炉、加热炉、分馏塔、反应釜等生产设备以及储存物料的槽、罐或传输物料的管段等。若工艺设备中需要控制的参数只有一个，例如电阻加热炉的炉温控制，被控量就是炉温，则工艺设备与被控过程的特性是一致的。若工艺设备中被控参数不止一个，其特性互不相同，则应各有一套可能是互相关联的控制系统，这样的工艺设备作为被控过程，应对其中不同的过程作不同的分析。

2. 检测元件和变送器

反映生产过程与生产设备状态的参数很多，按生产工艺要求，有关的参数都应通过自动检测，才能了解生产过程进行的状况，以获得可靠的控制信息。凡需要进行自动控制的参数，都称为被控量。当系统只有一个被控量时，称为单变量控制系统；具有两个以上被控量和操纵量且相互关联时，称为多变量控制系统。被控量往往就是过程的输出量。

被控量由传感器检测，当其输出不是电量或虽是电量而非标准信号时，应通过变送器转换成 $0 \sim 10\text{mA}$ 或 $4 \sim 20\text{mA}$ 或 $20 \sim 100\text{kPa}$ 的标准信号。传感器或变送器的输出就是被控量的测定值（ z ）。

3. 控制器

由传感器或变送器获得的信息——被控量，当其符合生产工艺要求时，控制器的输出不变；否则控制器的输出发生变化，对系统施加控制作用，以使被控量保持在工艺要求的范围之内。使被控量发生变化的任何作用称为扰动。在控制通道内，在控制阀未动的情况下，由于通道内质量或能量等因素变化造成的扰动称为内扰。其他来自外部的影响统称为外扰。无论内扰或外扰，一经产生，控制器即发出控制命令对系统进行自动控制。

4. 执行器

被控量的测量值与设定值在控制器内进行比较得到的偏差大小，由控制器按规定的控制规律（如 PID 等）进行运算，发出相应的控制信号去推动执行器，该控制信号称为控制器

的输出量 u 。目前采用的执行器多为气动薄膜调节阀。如控制器是电动的,则在控制器与执行器之间应加入电气转换器。如采用电动执行器,则控制器的输出信号须经伺服放大器后才能驱动电动执行器以启闭控制阀。

5. 控制阀

由控制器发出的控制信号,通过电或气动执行器驱动控制阀门,以改变输入过程的操纵量 q ,使被控量受到控制。控制阀是控制系统的终端部件,阀门的输出特性决定于阀门本身的结构,有的与输入信号呈线性关系,有的则呈对数或其他曲线关系。

气动阀门有气开式和气关式两种,前者是当控制器的输出增大时阀门开大,后者刚好相反,选择气开式或气关式的原则是从安全角度考虑的。即万一气源断路时,生产过程仍能安全运行。由于控制阀有气开和气关两种方式,故控制器也有正反两种调节作用。所谓控制器的正作用是指被控量增大时,控制器的输出增大;反作用则相反。控制器的正反作用,视实际情况选用。

最后应当指出,控制器是根据被控量测量值的变化,与设定值进行比较得出的偏差值对被控过程进行控制的。过程的输出信号即控制系统的输出,通过传感器和变送器的作用,将输出信号反馈到系统输入端,构成一个闭环控制回路,称为闭环控制系统,简称闭环。如果系统的输出信号只被检测和显示,并不被反馈到系统的输入端,它是一个未闭合的回路,称为开环控制系统,简称开环。开环系统只按过程的输入量变化进行控制,即使系统是稳定的,其控制质量也较低。而闭环系统能密切监控过程输出量的变化,抗干扰能力强,能有效克服过程特性变化的影响,有一定的自适应能力,因而控制质量较高,应用也最广。

第二节 过程控制的特点

生产过程的自动控制,一般是要求保持过程进行中的有关参数为一定值或按一定规律变化,显然过程参数的变化,不但受外界条件的影响,它们相互之间往往也存在着影响,这就增加了某些参数自动控制的复杂性和困难。过程控制有如下一些特点:

1. 系统由过程检测控制仪表组成

由上节所述,过程控制系统是由被控过程和过程检测控制仪表组成的。过程控制主要是利用气动仪表、电动仪表、组装式仪表、智能仪表和计算机等自动化技术工具来实现生产过程的自动化。包括计算机(把计算机看成一台仪表)在内的这些仪表都是工业上系列生产的。在现代工业生产过程中,其被控过程十分复杂,特性各异。为了设计系统方便并能达到预期的控制效果,必须根据生产工艺要求,应用控制理论和控制技术,通过选用过程检测控制仪构成过程控制系统。同时通过对系统调节器参数的整定,使其运行在最佳状态,实现对生产过程的最佳控制。

2. 被控对象的多样性

工业生产各不相同,生产过程本身大多比较复杂,生产规模也可能差异很大,这就增加了对过程(又称被控对象或简称对象)认识的困难,不同生产过程要求控制的参数各异,且被控参数一般不止一个,这些参数的变化规律不同,引起参数变化的因素也不止一个,并且往往相互影响,所以传递函数千变万化。

例如,石油化工过程中的精馏塔、化学反应器、流体传输设备;热工过程中的锅炉、热

交换器、动力核反应堆；机械工业中的热处理炉；冶金过程中的平炉、转炉等。这些过程的工作机理比较复杂，很难用解析方法求得其精确的动态数学模型。虽然理论上适应不同情况的控制方法，由于过程特性辨识的困难，要设计能适应各种不同过程的控制系统的比较困难的。

3. 过程存在滞后

由于热工生产过程大多在比较庞大的设备内进行，过程的储存能力大，惯性也较大，内部介质的流动和热量转移都存在一定的阻力，并且往往具有自动转向平衡的趋势。因此当流入或流出过程的物质或能量发生变化时，由于存在能量、惯性和阻力，被控参数不可能立即被反映出来，需经历一段时间之后才能反映出来。滞后的大小决定于生产设备的结构和规模，并同研究它的流入量和流出量的特性有关。

显然，生产规模越大，物质传递的距离越长，热量传递的阻力越大，造成的滞后越大。一般说来，热工过程大都具有较大滞后，对自动控制极为不利。

4. 过程特性非线性

过程特性往往是随负荷而变的，即当负荷不同时，其动态特性有明显的差别。如果只以较理想的线性过程的动态特性作为控制系统的设计依据，难以达到控制目的。

5. 控制系统比较复杂

由于生产安全上的考虑，生产设备的设计制造都力求使各种参数稳定，不会产生振荡，作为被控过程就具有非振荡环节的特性。热工过程往往具有自平衡的能力，即被控量发生变化后，过程本身能使被控量逐渐稳定下来。这就是惯性环节的特性。也有无自动趋向平衡能力的工业过程，被控量会一直变化而不能稳定下来，这种过程就具有积分特性。

6. 定值控制是过程控制的一种主要控制形式

在石油、化工、冶金、环保、轻工等工业部门中，控制的主要目的在于如何减小或消除外界扰动对被控量的影响，使生产稳定。定值控制是一种主要的过程控制形式。

由于过程的特性不同，其输入与输出量可能不止一个，控制系统的设计在于适应这些不同的特点，以确定控制方案和控制器的设计或选型，以及控制器特性参数的计算与设定，这些都要以过程的特性为依据，而过程的特性复杂且难于充分认识，要完全通过理论计算进行系统设计与整定至今仍不可能。目前已设计出各式各样的控制系统如简单的位式控制系统、单回路及多回路控制系统、前馈系统、计算机控制系统等，都是通过必要的理论计算，采用现场调整的方法，才能达到过程控制的目的。

第三节 过程控制系统的性能指标

一、过程控制系统的过渡过程

在过程控制中，由于控制器的自动控制作用而使被控量不再随时间变化的平衡状态称为稳态或静态。被控量随时间而变化，系统未处于平衡状态时则称为动态或瞬态。

在给定值发生变化或系统受到干扰作用后，系统将从原来的平衡状态经历一个过程进入另一个新的平衡状态。过程控制系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程称为过程控制系统的过渡过程。

一般来说,研究控制系统的静态是重要的。但研究控制系统的动态更为重要。系统在过渡过程中,会不断受到干扰的频繁作用,系统自身通过控制装置不断地调整控制作用去克服干扰的影响,使被控变量保持在工艺生产所规定的技术指标上。因此,对系统研究的重点应放在控制系统的动态过程。

系统的过渡过程与输入信号的形式有关,输入信号的形式不同,过渡过程的形式也不同。在分析和设计控制系统时,为了安全和方便起见,在多种干扰中,往往只考虑一个最不利的干扰。阶跃干扰通常是最不利的。系统在阶跃信号(f)作用下,被控变量随时间(t)的变化有下述几种形式,如图 1-3-1 所示,图中 y 表示被控变量。

1. 非振荡衰减过程曲线

如图 1-3-1 中曲线①所示。它表明被控变量受到干扰作用后,产生单调变化,经过一段时间最终能稳定下来。

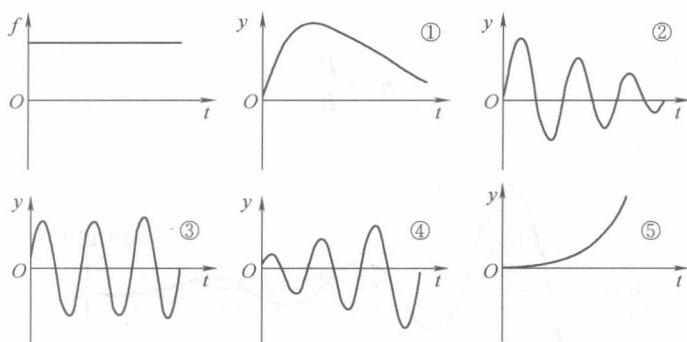


图 1-3-1 几种不同的过渡过程

2. 衰减振荡过程

如图 1-3-1 中曲线②所示。它表明系统受到干扰作用后,被控变量上下波动,且波动的幅度逐渐减小,经过一段时间最终能稳定下来。

3. 等幅振荡过程

如图 1-3-1 中曲线③所示。它表明系统受到干扰作用后,被控变量作振幅稳定的上下振荡,即被控变量在给定值的某一范围内来回波动。

4. 发散振荡过程

如图 1-3-1 中曲线④所示,它表明系统受到干扰作用后,被控变量上下波动,且幅度越来越大,即被控变量偏离给定值越来越远,以致超越工艺允许的范围。

5. 非振荡发散过程

如图 1-3-1 中曲线⑤所示。它表明系统受到干扰作用后,被控变量单调变化偏离给定值越来越远,以致超出工艺设计的范围。

显然,上述五种过程形式中,等幅振荡过程曲线③、发散振荡过程曲线④和非振荡发散过程曲线⑤是不稳定过程,不能采用;非振荡衰减过程曲线①和衰减振荡过程曲线②是稳定过程,是可以接受的,一般都希望是衰减振荡的控制过程。非振荡衰减过程虽然能稳定下来,但偏离设定值的时间较长,过渡过程进行缓慢,除特殊情况外,一般难以满足要求。

二、过程控制系统的性能指标

工业过程对控制的要求，可以概括为准确性、稳定性和快速性。另外，定值控制系统和随动控制系统对控制的要求既有共同点，也有不同点。定值控制系统在于恒定，要求将被控量保持在规定的范围附近不变；而随动控制系统的主要目标是跟踪，要使被控量相当准确而及时地跟随设定值变化。下面主要讨论定值控制系统的性能指标。

控制过程就是克服和消除干扰的过程。一个控制系统的优劣，就在于它受到扰动后能否在控制器的控制作用下再稳定下来，克服扰动回到设定值的准确性和快慢程度如何。控制系统是否稳定、快速而准确达到平衡状态（稳态或静态），通常采用以下几个指标来衡量。

1. 衰减比 n 和衰减率 ψ

衰减振荡过程是最一般的过渡过程，振荡衰减的快慢对过程控制的品质影响极大。由图 1-3-2 可见，第一、二两个周期的振幅 B_1 与 B_2 的比值充分反映了振荡衰减的程度，称之为衰减比 n ，即

$$n = \frac{B_1}{B_2} \tag{1-3-1}$$

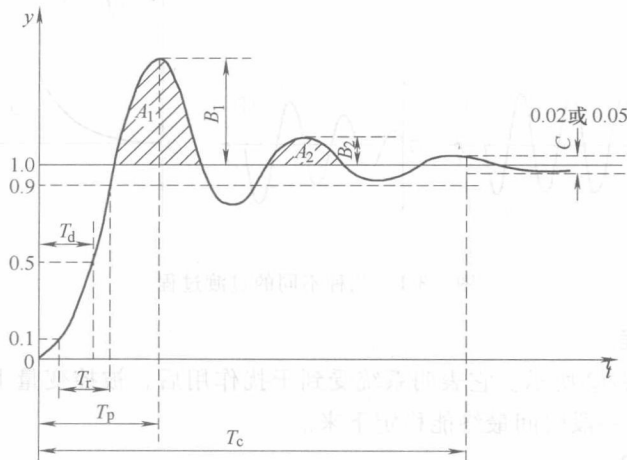


图 1-3-2 过渡过程品质指标

衰减比 n 表示曲线变化一个周期后的衰减快慢，一般用 $n:1$ 表示。

衡量振荡过程衰减程度的另一种指标是衰减率，它是指每经过一个周期以后，波动振幅衰减的百分数，即

$$\psi = \frac{B_1 - B_2}{B_1} \tag{1-3-2}$$

在实际工作中，控制系统的递减比习惯于采用 4:1，即振荡一周后衰减了 3/4，即被控量经上下两次波动后，被控量的幅值降到最大值的 1/4，这样的控制系统就认为稳定性好。递减比也有用面积比表示的，如图中阴影线面积 A_1 与 A_2 之比，指标仍然是 4:1。

虽然公认递减比为 4:1 较好，但并非唯一的，特别是对一些变化比较缓慢的过程如温度过程，采用 4:1 递减比，可能还嫌过程振荡过甚，显得很不适用。如采用 10:1 递减比，效果会好得多。因此递减比须视具体过程不同选取。

2. 动态偏差

扰动发生后, 被控量偏离稳定值或设定值的最大偏差值称为动态偏差, 也称为最大过调量, 如图 1-3-2 中的第一波峰 B_1 。对于有差控制系统, 超调量习惯上用百分数 σ 来表示, 即

$$\sigma = \frac{B_1 - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-3-3)$$

过渡过程达到此峰值的时刻称为峰值时间 T_p 。动态偏差大, 持续时间又长, 是不允许的。如化学反应器, 反应温度有严格的规定范围, 超过此范围就会发生事故。有的生产过程, 即使是短暂超过也不允许, 如生产炸药的温度限值极严, 控制系统的动态偏差必须控制在温度限值以下, 才能保证安全生产。

3. 静态偏差

过渡过程终了时, 被控量的变化在规定的小范围内波动, 被控变量新的稳态值 $y(\infty)$ 与给定值 r 之差值称为静态偏差或残余偏差, 简称余差, 如图 1-3-2 中用 C 表示。即

$$C = y(\infty) - r \quad (1-3-4)$$

余差的大小是按生产工艺过程的实际需要制定的, 它是系统的静态指标。这个指标定高了, 要求系统特别完善; 定低了又难以满足生产需要, 也失去了自动控制的意义。当然从控制品质着眼, 自然是余差越小越好。应根据过程的特性与被控量允许的波动范围, 综合考虑决定, 不能一概而论。

4. 调整时间 T_s

平衡状态下的控制系统, 受到扰动作用后平衡状态被破坏, 经系统的控制作用, 过渡到被控量返回允许的波动范围以内, 即被控量在稳定值的 5% (或 2%) 以内, 达到新的平衡状态所经历的时间, 称为调整时间 T_s , 也称为过渡过程时间或稳定时间。

对于过阻尼系统, 一般以响应曲线由稳定值变化 10% 算起上升到稳定值的 90% 所经历的时间称为上升时间 T_r , 也有规定为由 5% 上升到 95% 为上升时间的。对于欠阻尼系统, 一般由 0 算起, 上升到 100% 所经历的时间为上升时间。

响应曲线第一次达到稳定值的 50% 的时间称为延迟时间 T_d 。这些都是反映过渡过程缓慢的指标。

第四节 过程控制系统的类别

一、按划分过程控制类别的方式

由于划分过程控制类别的方式不同, 过程控制系统有种种不同的名称。

1) 按所控制的参数来分, 有温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统及液位控制系统等。

2) 按控制系统的任务来分, 有定值控制系统 (反馈控制系统)、前馈控制系统、比值控制系统、均匀控制系统、分程控制系统及自适应控制系统。

3) 按控制器的动作规律来分, 有比例控制系统、比例积分控制系统、比例积分微分控制系统及位式控制系统等。

4) 按控制系统是否构成闭合回路来分, 有开环控制系统及闭环控制系统。

- 5) 按控制装置处理的信号不同来分, 有模拟控制系统及数字控制系统。
- 6) 按是否采用计算机来分, 有常规仪表控制系统及计算机控制系统等。

以上这些分类都只反映了不同控制系统的某一方面的特点, 人们视具体情况可采用不同的分类, 并无严格的规定。

二、按设定值的形式

过程控制主要是分析反馈控制的特性, 按设定值的形式不同, 可将过程控制系统分为如下三类。

1. 定值控制系统

工业生产大多要求将被控量保持在规定的范围附近不变, 此规定值就是控制器的设定值。前述锅炉过热蒸汽温度控制就是要使蒸汽温度保持在规定值不变, 只要被控量在设定值范围内波动, 控制系统的工作就是正常的。在定值控制系统中, 设定值是固定不变的, 引起系统变化的只是扰动信号, 可以认为以扰动量为输入的系统是定值控制系统。

2. 随动控制系统

生产过程中对被控量的要求是变化的, 不可能规定一个固定的设定值。换句话说, 控制系统的设定值是无规律变化的, 自动控制的目的就是要使被控量相当准确而及时地跟随设定值变化。例如加热炉燃料与空气的混合比例控制, 燃料量是按工艺过程的需要而手动或自动地不断改变, 控制系统就要使空气量跟着燃料量的变化自动按规定的比例增减空气量, 保证燃料经济地燃烧, 这就是随动控制系统。自动平衡记录仪的平衡机构是跟随被测信号的变化而自动达到平衡位置, 也是一种随动控制系统。

3. 程序控制系统

控制系统的设定值是按生产工艺要求有规律变化的, 自动控制的目的就是要使被控量按规定的程序自动进行, 以保证生产过程顺利完成, 如工业炉及干燥窑等周期作业的加热设备, 一般包含加热升温、保温后逐次降温等程序, 设定值按此程序而自动地变化, 控制系统就按设定程序自动进行下去, 达到程序控制的目的。

上述各种反馈控制系统中, 信号的传送都是连续变化的, 故称为连续控制系统或模拟控制系统, 统称为常规过程控制系统。在石油、化工、冶金、建材、陶瓷及电力等工业生产中, 定值控制是主要的控制系统, 其次是程序控制系统与随动控制系统。

第五节 过程控制系统发展概况

生产过程自动化是保持生产稳定、降低消耗、降低成本、改善劳动条件、促进文明生产、保证生产安全和提高劳动生产率的重要手段, 是工业现代化的重要标志之一。

一、过程控制系统按发展阶段来分

1. 初期阶段

20 世纪 40 年代前后, 生产过程自动化主要是凭生产实践经验, 局限于一般的控制元件及机电式控制仪器, 采用比较笨重的基地式仪表实现生产设备就地分散的局部自动控制。在设备与设备之间或同一设备中的不同控制系统之间, 没有或很少有联系。

过程控制的目的是几种热工参数如温度、压力、流量及液位的定值控制，以保证产品质量和产量的稳定。

2. 仪表化阶段

20世纪50年代起及以后10年间，先后出现了气动与电动单元组合仪表和巡回检测装置，因而实现了集中监控与集中操纵的控制系统，对提高设备效率和强化生产过程有所促进，适应了工业生产设备日益大型化与连续化发展的需要。随着仪表工业的迅速发展，对过程特性的认识，对仪表及控制系统的设计计算方法都有了较快的发展。但从过程控制设计构思来看，仍处于各控制系统互不关联或关联甚少的定值控制范畴，只是控制的品质有较大的提高。

3. 综合自动化阶段

20世纪60年代至今，由于集成电路及计算机技术的飞速发展，由分散的机组或车间控制，向全车间、全厂甚至全企业的综合自动化发展，实现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的分散计算机控制系统。近年来，世界各工业发达国家全力进行工厂综合自动化技术的研究，力求在自动化技术、信息技术、计算机控制和各种生产加工技术的基础上，从生产过程全局出发，通过生产活动所需要的各种信息集成，把控制、优化、调度、管理、经营、决策融为一体，形成一个能适应各种生产环境和市场需求的、多变性的、总体最优的高质量、高效益、高柔性的管理生产系统。这是过程控制发展的一个新阶段。

二、按过程控制装置与系统的发展过程来分

过程控制的发展历程，就是过程控制装置（自动化仪表）与系统的发展历程，按照过程控制装置与系统的发展过程也可以将过程控制系统的发展过程分为三个阶段：

1. 局部自动化阶段（20世纪50~60年代）

这一阶段的主要特点是：采用的过程检测控制仪表为基地式仪表和部分单元组合式仪表，而且多数是气动仪表。过程控制系统的结构方案绝大多数是单输入、单输出的单回路定值控制系统，逐步开发应用串级控制系统。过程控制的主要工艺参数为温度、压力、流量、液位等热工参数。过程控制的主要目的是保持工业生产过程的稳定，减少或消除生产过程中的主要扰动。过程控制系统设计、分析的理论基础是经典控制理论中的根轨迹法和频域法。

2. 模拟单元仪表控制阶段（20世纪60~70年代）

在这一阶段中，工业生产过程出现了一个车间甚至于一个工厂的综合自动化，其主要特点：自动化仪表划分成各种标准功能单元，按需要可以组合成各种控制系统；控制仪表集中在控制室，生产现场各处的参数通过统一的模拟信号，送往控制室。操作人员可以在控制室监控生产流程各处的状况；适用于生产规模较大的多回路控制系统。

在过程控制系统结构方案的开发和应用方面，相继出现了各种复杂的常规控制系统和计算机控制系统，如均匀控制、比值控制、前馈控制、分程控制、选择性控制、多变量控制等。过程控制系统设计的理论基础，由经典控制理论发展到现代控制理论。

3. 集散控制阶段（20世纪70年代中期至今）

计算机的出现，大大简化了控制功能的实现。最初，人们设想用一台计算机取代所有回路的控制仪表，实现直接数字控制（Direct Digital Control, DDC）。但DDC系统的故障危险

高度集中，一旦计算机出现故障，就会造成所有控制回路瘫痪，使生产过程风险加大。因此，DDC 系统并未得到广泛应用。

80 年代初，随着计算机性能提高、体积缩小，出现了内装 CPU 的数字控制仪表。基于“集中管理，分散控制”的理念，在数字控制仪表和计算机与网络技术基础上，开发了集中、分散相结合的集散型控制系统（Distributed Control System, DCS）。DCS 实行分层结构，将控制故障风险分散、管理功能集中，得到广泛应用。

随着 CPU 进入检测仪表和执行器，自动化仪表彻底实现了数字化、智能化。控制系统也出现了由智能仪表构成的现场总线控制系统（Fieldbus Control System, FCS）。FCS 系统把控制功能彻底下放到现场，依靠现场智能仪表便可实现生产过程的检测、控制。而用开放的、标准化的通信网络——现场总线，将分散在现场的控制系统的通信连接起来，实现信息集中管理。

在这个阶段里，现代工业生产过程自动化的程度很高，实现了全车间、全厂、甚至全企业无人或很少人参与操作管理，实现了过程控制最优化与现代化的集中调度管理相结合的方式。

三、我国的过程控制系统发展概况

我国化工生产部门早在 20 世纪 60 年代初就开始采用计算机作自动检测和数据处理，后来又在石油分馏装置上采用计算机自动而合理地调整模拟控制器的设定值，开始进行闭环计算机监控（Supervisory Computer Control, SCC），继而，又实现了某电站的电子计算机闭环控制。随后出现了采用数字计算机代替常规仪表的直接数字控制（DDC），并向最优化控制方向发展。20 世纪 80 年代中期，提出了现场总线的概念，至今现场总线控制系统（FCS）在我国已得到广泛的应用。在 20 世纪 70 年代，石油、化工、冶金及电站等重要的生产部门陆续采用计算机实现了 SCC 或 DDC，但是，采用大型计算机对全厂或主要车间进行全面最优控制并不成功，原因是当时的计算机硬件可靠性还不能完全满足要求，加上综合控制系统十分复杂，难以建立适合的数字模型。特别是反映生产过程运行状态的一些参数至今还不能获得可靠的信息，对以上这些问题已经并且正进行着不少研究，但尚未得到完全满意的结果。

微型计算机与微处理器的迅速发展对实现分级计算机控制起到了决定性的作用。微型计算机小巧灵活，控制的范围较小，数学模型容易建立，不同的算式也容易利用软件实现，用来实现机组一级的分散控制颇为方便。即使微型计算机（单板机或单片机）出了故障，影响面小，容易从上一级的分散控制系统中脱出，既易于检查修复，也不至于影响全局。另外，冗余技术的采用也使得计算机故障的影响降到最低。

总之，由于计算机硬件可靠性提高，成本降低，有直观 CRT 显示，便于人机联系，它既没有模拟常规仪表那样数量多、仪表庞大的缺点，也不会出现采用大型计算机控制过于集中而一出故障就影响全局那样令人生畏的问题。可见，采用分散集中的计算机控制，引起人们的重视是不奇怪的，目前已广泛应用于生产过程控制中，并进行着大量的技术研究，对其不断更新和完善。

过程控制系统采用微处理器与计算机控制虽然发展较快，应用也日渐广泛，但常规仪表控制系统仍然大量应用于工业生产中。

思考题与习题

- 1-1 什么是过程控制系统?
- 1-2 典型的过程控制系统由哪几部分组成? 请举例说明。
- 1-3 与其他自动控制系统相比, 过程控制有哪些主要特点?
- 1-4 试说明定值控制系统稳态与动态的含义。为什么在分析过程控制系统的性能时更关注其动态特性?
- 1-5 评价过程控制系统的常用性能指标有哪些? 其中哪些是动态指标, 哪些是静态指标?
- 1-6 试说明过程控制系统的分类方法, 按设定值的形式不同可将过程控制系统分成哪几类?
- 1-7 简述过程控制系统的发展简史及各个阶段的主要特点。

第二章 信号的联络、传输及转换

信号制即信号标准，是指仪表之间采用的传输信号的类型和数值。控制仪表与装置在设计时，应力求做到通用性和相互兼容性，以便不同系列或不同厂家生产的仪表能够共同使用在同一控制系统中，彼此相互配合，共同实现系统的功能。要做到通用性和相互兼容性，首先必须统一仪表的信号制式。现场总线控制系统中，现场仪表与控制室仪表或装置之间采用双向数字通信方式。

第一节 联络信号

仪表之间应由统一的联络信号来进行信号传输，以便使同一系列或不同系列的各类仪表连接起来，组成系统，共同实现控制功能。

一、联络信号的类型

控制仪表和装置常使用以下几种联络信号。

对于气动控制仪表，国际上已统一使用 $20 \sim 100\text{kPa}$ 气压信号，作为仪表之间的联络信号。

对于电动控制仪表，其联络信号常见的有模拟信号、数字信号、频率信号等。

模拟信号和数字信号是自动化仪表及装置所采用的主要联络信号。本书着重讨论电模拟信号。

二、电模拟信号制的确定

电模拟信号有交流和直流两种。由于直流信号具有不受线路中电感、电容及负载性质的影响，不存在相移问题等优点，故世界各国都以直流电流或直流电压作为统一联络信号。

从信号取值范围看，下限值可以从零开始，也可以从某一确定的数值开始；上限值可以较低，也可以较高。取值范围的确定，应从仪表的性能和经济性作全面考虑。

不同的仪表系列，所取信号的上、下限值是不同的。例如 DDZ-II 型仪表采用 $0 \sim 10\text{mA}$ 直流电流和 $0 \sim 2\text{V}$ 直流电压作为统一联络信号；DDZ-III 型仪表采用 $4 \sim 20\text{mA}$ 直流电流和 $1 \sim 5\text{V}$ 直流电压作为统一联络信号；有些仪表则采用 $0 \sim 5\text{V}$ 或 $0 \sim 10\text{V}$ 直流电压作为联络信号，并在装置中考虑了电压信号与电流信号的相互转换问题。

信号下限从零开始，便于模拟量的加、减、乘、除、开方等数学运算和使用通用刻度的指示、记录仪表；信号下限从某一确定值开始，即有一个活零点，电气零点与机械零点分开，便于检验信号传输线是否断线及仪表是否断电，并为现场变送器实现两线制提供了可能性。

电流信号上限大，产生的电磁平衡力大，有利于力平衡式变送器的设计制造。但从减小直流电流信号在传输线中的功率损耗和缩小仪表体积，以及提高仪表的防爆性能来看，希望