

高职高专“十三五”规划教材

过程控制 及自动化仪表

■ 武平丽 主编

第二版

GUOCHENG
KONGZHI
JI ZIDONGHUA
YIBIAO



化学工业出版社

高职高专“十三五”规划教材

过程控制及自动化仪表

第二版

武平丽 主编



化学工业出版社

·北京·

本书以控制系统为体系,将过程参数检测变送、显示记录及控制仪表作为组成系统的相应环节,力求完整体现过程控制的整体内容。在参数检测方面,深入浅出地介绍了检测原理及方法;依据其代表性及发展趋势,介绍了目前生产中广泛应用的检测仪表。在控制仪表方面,根据生产实际情况,介绍了模拟、数字控制器和电动、气动执行器。在控制系统方面,着重介绍简单控制系统和几种常用复杂控制系统的设计,以及分布式控制系统(DCS)的硬件和软件体系构成与目前国内常见的几种分布式控制系统(DCS)。此外,还简要介绍了显示记录仪表,最后介绍了典型工业过程的控制。每章后配有思考题与习题。

本书可作为高职高专自动化专业教材,也可作为相关技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制及自动化仪表/武平丽主编. —2版. —北京:
化学工业出版社, 2016. 5
高职高专“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-26824-2

I. ①过… II. ①武… III. ①过程控制-高等职业教育-
教材②自动化仪表-高等职业教育-教材 IV. ①TP273②TH86

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第080903号

责任编辑:高钰
责任校对:王素芹

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数347千字 2016年9月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

《过程控制及自动化仪表》是自动化专业的一门必修课程，本书立足高职高专教育人才培养目标，依据“必需、够用”为度的职业教育理念，基于生产实际和工程应用，以加强实践能力培养为原则，有针对性地介绍了自动控制系统的设计方法；介绍了目前生产中最常用的自动化仪表的原理、使用及维护。

本书是一本“工学结合、校企合作”的教材，全书自始至终体现了“从生产实际出发，介绍当前过程控制中最实用的知识，并兼顾发展趋势”的特点，力求通过本书的学习，能够解决相应生产实际问题。

本书的内容已制作成用于多媒体教学的课件，并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取，或登陆 www.cipedu.com.cn 免费下载。

本书由黄河水利职业技术学院武平丽任主编，负责大纲的制定以及全书的组织和定稿，并编写了第五章、第六章和第七章。参加编写的有杨箜（第二章、附录）；北京和利时科技集团高国光（第八章）；河南矛盾集团雷云永（第三章、第四章）；水利部海河水利委员会海河下游管理局曹雅昌（第一章、第九章）。

由于编者水平所限，书中存在的不足和缺点恳请读者批评指正。

编 者
2016 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 过程控制技术及仪表的发展	1
第二节 过程控制系统的组成及其分类	2
一、过程控制系统的组成	2
二、过程控制系统的分类	3
第三节 过程控制系统的过渡过程和品质指标	3
第二章 过程参数检测与变送	8
第一节 过程参数检测概述	8
一、测量误差	9
二、仪表性能指标	9
三、变送器的基本特性和构成原理	11
第二节 温度检测与变送	15
一、概述	15
二、热电偶	16
三、热电阻	20
四、温度变送器	22
五、其他温度仪表简介	22
六、测温仪表的选用与安装	23
第三节 压力测量	24
一、压力的表示方法	24
二、压力检测的主要方法	25
三、常见压力检测仪表	25
四、智能式差压变送器	29
五、压力仪表的选用和安装	30
第四节 流量测量	34
一、概述	34
二、速度式流量计	35
三、容积式流量计	41
四、质量流量计	42
五、流量仪表的选用	43
第五节 物位测量	43
一、物位仪表的分类	43
二、常用物位计	44
三、物位检测仪表的选用	47
第六节 成分和物性参数检测	47
一、热导式气体成分检测	48
二、磁导式气体成分检测	49
三、红外式气体成分检测	49
四、溶解氧的检测	50
五、色谱分析	51
六、pH值的检测	52
七、浊度的检测	52
第七节 软测量技术简介	53
思考题与习题	53
第三章 显示记录仪表	56
第一节 模拟式显示仪表	56
一、自动平衡式电子电位差计	56
二、电子自动平衡电桥	58
第二节 数字式显示仪表	59
一、数字式显示仪表的分类	60
二、数字式显示仪表的主要技术指标	60
三、数字式显示仪表的基本组成	61
第三节 新型显示仪表	62
一、无纸记录仪的特点	62
二、无纸记录仪的基本结构	62

三、无纸记录仪的安装与接线	63	一、电动执行器	74
四、显示记录仪表的发展趋势	63	二、气动执行器	77
第四章 过程控制仪表	65	思考题与习题	87
第一节 控制器	65		
一、DDZ-III型控制器	65		
二、可编程数字控制器	68		
第二节 执行器	74		
第五章 过程控制系统概述	88		
第一节 自动检测与自动控制系统	88	四、控制通道特性对控制质量的影响	95
一、过程自动检测系统	88	第四节 过程控制工程设计中常用图例	
二、过程自动控制系统	88	符号	96
第二节 传递函数与方块图变换	90	一、图形符号	96
一、传递函数	90	二、字母代号	97
二、方块图	91	三、仪表位号	99
第三节 对象特性	93	四、控制符号图表示方法示例	99
一、与对象有关的两个基本概念	93	五、简单控制系统控制符号图识图	
二、描述对象特性的三个参数	94	初步	100
三、扰动通道特性对控制质量的影响	95	思考题与习题	101
第六章 简单控制系统的分析与设计	102		
第一节 系统被控变量与操纵变量的		一、基本控制规律	107
选择	102	二、控制规律的选用	112
一、系统被控变量的选取	102	第五节 控制器的参数整定	113
二、操纵变量的选择	103	一、经验试凑法	113
第二节 测量变送在系统分析设计中的		二、临界比例度法	114
考虑	103	三、衰减曲线法	115
一、纯滞后	104	四、三种整定方法的比较	116
二、测量滞后	104	第六节 简单控制系统的投运及故障	
三、信号传输滞后	105	分析	116
四、测量信号的处理	106	一、系统的投运步骤	116
第三节 执行器的选择	106	二、系统的故障分析、判断与处理	118
第四节 控制规律的选取	106	思考题与习题	119
第七章 复杂控制系统	121		
第一节 串级控制系统	121	二、前馈控制的特点和局限性	132
一、串级控制系统的基本概念	121	三、前馈控制系统的几种结构形式	133
二、串级控制系统的特点及应用范围	123	四、前馈控制系统的选用原则和应用	
三、串级控制系统的设计	126	实例	134
四、串级控制系统的投运及参数整定	129	第三节 比值控制系统	136
第二节 前馈控制系统	131	一、概述	136
一、前馈控制的基本概念和方块图	131	二、常见的比值控制方案	136

第四节 均匀控制系统	138	第七节 新型控制系统简介	147
一、均匀控制原理	139	一、预测控制	147
二、均匀控制方案	139	二、推理控制	147
第五节 分程控制系统	140	三、解耦控制	147
一、概述	140	四、鲁棒控制	148
二、分程控制的应用场合	141	五、自适应控制	148
三、分程控制系统应用中应注意的几个 问题	143	六、智能控制	149
第六节 选择性控制系统	144	第八节 控制流程图识图	149
一、概述	144	一、常规控制流程图的识图	149
二、选择性控制系统的类型	145	二、计算机控制流程图识图初步	152
三、选择性控制系统的设计	146	思考题与习题	153
第八章 分布式控制系统 (DCS)	154		
第一节 概述	154	第四节 DCS 系统的在线调试与投运	172
一、DCS 系统的构成方式	154	一、DCS 系统的调试	172
二、DCS 的特点	155	二、系统投运	174
三、DCS 的发展概况	156	第五节 常见分布式控制系统简介	175
第二节 DCS 的硬件体系结构与功能	157	一、Honeywell 公司的 Experion PKS 系统	175
一、DCS 的数据通信系统	157	二、ABB 公司的 Industrial ^{IT} 系统	176
二、DCS 的过程控制装置	159	三、和利时公司的 HOLLiAS-MACS 系统	178
三、操作管理装置	162	四、西门子 SIMATIC PCS 7	180
第三节 DCS 的软件体系与组态方法	164	思考题与习题	182
一、DCS 的软件体系	164		
二、DCS 的组态方法	166		
第九章 典型过程的控制	183		
第一节 锅炉的过程控制	183	二、精馏塔控制的基本方案	194
一、汽包水位控制	184	第四节 流体输送设备的过程控制	195
二、过热蒸汽温度控制	185	一、泵的控制	195
三、燃烧过程的控制	186	二、离心式压缩机的控制	197
第二节 化学反应器的过程控制	188	第五节 传热设备的过程控制	200
一、化学反应器的分类方式与控制	188	一、传热设备的静态数学模型	200
二、化学反应器的典型控制方案	189	二、一般传热设备的控制	201
第三节 精馏塔的过程控制	192	三、管式加热炉的控制	203
一、概述	192	思考题与习题	205
附录	206		
附录一 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	206	附录四 铂电阻分度表	214
附录二 镍铬-铜镍热电偶分度表	210	附录五 铜电阻分度表	216
附录三 镍铬-镍硅热电偶分度表	210		
参考文献	217		

第一章 绪 论

本章主要介绍了控制系统的组成与分类、过渡过程及品质指标，通过对过程控制系统基础知识的学习与研究，为之后过程控制系统的学习打下良好的基础。

第一节 过程控制技术及仪表的发展

过程控制 (Process Control) 通常是指石油、化工、电力、冶金、轻工、建材、核能等工业生产中连续的或按一定周期程序进行的生产过程自动控制，它是自动化 (Automation) 技术的重要组成部分。在现代化工业生产过程中，过程控制技术正在为实现各种最优的技术经济指标、提高经济效益和劳动生产率、改善劳动条件、保护生态环境等起着越来越大的作用。

伴随着过程控制技术的发展，实现过程控制的工具也同样在不断地更新换代，自动化水平不断提高。20 世纪 70 年代中期的 DDZ-III 型仪表，是继集成电路之后出现的，以集成运算放大器为主要放大元件，24V DC 为能源，采用国际标准信号制的 4~20mA DC 为统一标准信号的组合型仪表。它在体积基本不变的情形下，大大增加了仪表的功能，工作在现场的 DDZ-III 型仪表均为安全火花型防爆仪表，配上安全栅，构成安全火花防爆系统，相当安全。因此在化工、炼油等行业得到了广泛的应用，并曾一度占主导地位，至今，一些中小企业及大企业的部分装置仍在使用。进入 20 世纪 80 年代后，由于微处理器的发展，又出现了 DDZ-S 型智能式单元组合仪表，它以微处理器为核心，能源、信号都同于 DDZ-III 型，其可靠性、准确性及功能等都远远优于 DDZ-III 型仪表。

自 20 世纪 80 年代开始，由于各种高新技术的飞速发展，我国开始引进和生产以微型计算机为核心，控制功能分散、显示操作集中，集控制、管理于一体的分布式控制系统 (DCS)，从而将过程控制仪表及装置推向高级阶段。同时，可编程序控制器 (PLC) 的应用也从逻辑控制领域向过程控制领域拓展，以其优良的技术性能和良好的性价比在过程控制领域中占据了一席之地。此外，现场总线 (Field Bus) 这种用于现场仪表与控制系统和控制室之间的一种开放式、全分散、全数字化、智能、双向、多变量、多点、多站的通信系统，使现场设备能完成过程的基本控制功能外，还增加了非控制信息监视的可能性，越来越受到控制人员的欢迎。

过程控制系统及其实施工具——仪表的发展用“突飞猛进”和“日新月异”来形容毫不过分，新型控制系统和新型控制工具还在不断推出，可以说，生产过程控制技术是极有挑战性的学科领域。

第二节 过程控制系统的组成及其分类

一、过程控制系统的组成

在生产过程中，对各个生产工艺参数都有一定的控制要求。有些工艺参数直接表征生产过程，对产品的产量和质量起着决定性的作用。如化学反应器的反应温度必须保持平稳，才能使效率达到最佳指标等。而有些参数虽不直接影响产品的产量和质量，然而保持它平稳却是使生产获得良好控制的先决条件。如用蒸汽加热反应器或再沸器，若蒸汽总管压力波动剧烈，要把反应温度或塔釜温度控制好是很困难的。还有些工艺参数是决定生产工厂的安全问题，如受压容器的压力等，不允许超过最大的控制指标，否则将会发生设备爆炸等严重事故。对以上各种类型的参数，在生产过程中都必须加以必要的控制。

图 1-1(a) 所示是一个锅炉汽包，生产中要求其水位保持在规定的工艺范围内，为此设置了一个锅炉汽包水位自动控制系统，如图 1-1(b) 所示。图中液位变送器的作用是检测水位高低，控制器将接收到的水位测量信号与预先规定的水位高度进行比较。如果两个信号不相等，表明实际水位与规定水位有偏差，此时控制器将根据偏差的大小向执行器输出一个控制信号。执行器即可根据控制信号来改变阀门的开度，从而使进入锅炉的水量发生变化，达到控制锅炉汽包水位的目的。

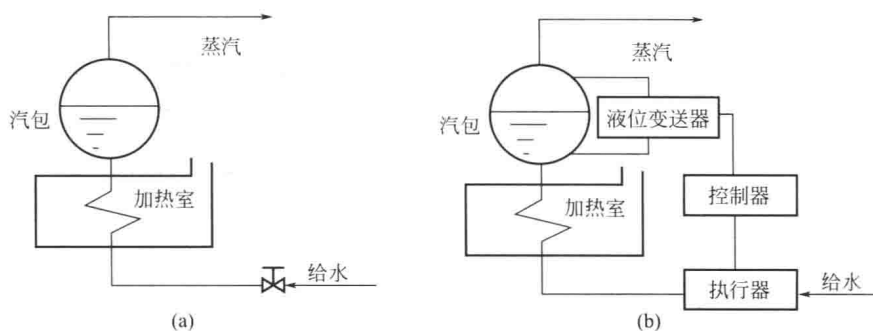


图 1-1 锅炉汽包水位控制示意图

图 1-2 所示为锅炉汽包水位自动控制系统框图。可以看出一个自动控制系统由被控对象（锅炉汽包）、检测元件（包括变送器）、控制器和执行器四部分组成。为了设计系统方便和得到预期的控制效果，根据生产工艺要求，通过选用合适的过程检测控制仪表组成过程控制系统，并通过对控制器参数的整定，使系统运行在最佳状态，实现对生产过程的控制。



图 1-2 锅炉汽包水位自动控制系统框图

二、过程控制系统的分类

过程控制系统一般分为生产过程的自动检测 (Automatic Detection)、自动控制 (Auto-control)、自动报警联锁 (Auto-alarm and Interlocking)、自动操纵 (Automatic Operation) 四大类。

① 过程自动检测系统 利用各种检测仪表自动连续地对相应的工艺变量进行检测,并能自动地对数据进行处理、指示和记录的系统,称为过程自动检测系统。

② 过程自动控制系统 用自动控制装置对生产过程中的某些重要变量进行自动控制,使受到外界干扰影响而偏离正常状态的工艺变量自动地回复到规定的数值范围的系统。

过程自动控制系统的分类方法很多,若按被控变量的名称分,有温度、压力、流量、液位、成分等控制系统;若按给定信号的特点分,有定值控制系统、随动控制系统、顺序控制系统;若按系统的结构特点分,有反馈控制系统、前馈控制系统、前馈-反馈复合控制系统;按控制器的控制规律来分类,有比例(P)控制系统、比例积分(PI)控制系统和比例积分微分(PID)控制系统等;按被控量的多少来分类,有单变量控制系统和多变量控制系统等。

③ 过程自动报警与联锁保护系统 对一些关键的生产变量,应设有自动信号报警与联锁保护系统。当变量接近临界数值时,系统会发出声、光报警,提醒操作人员注意。如果变量进一步接近临界值、工况接近危险状态时,联锁系统立即采取紧急措施,自动打开安全阀或切断某些通路,必要时紧急停车,以防事故的发生和扩大。

④ 过程自动操纵系统 按预先规定的步骤,自动地对生产设备进行周期性操作的系统。本书主要讲述过程自动控制系统。

第三节 过程控制系统的过渡过程和品质指标

一、系统的静态与动态

自动控制系统的输入有两种,其一是设定值的变化或称设定作用,另一个是扰动的变化或称扰动作用。当输入恒定不变时,整个系统若能建立平衡,系统中各个环节将暂不动作,它们的输出都处于相对静止状态,这种状态称为静态或定态。如图 1-1 锅炉汽包水位自动控制系统中,当给水量与蒸汽量相等时,水位保持不变,此时称系统达到了平衡,亦即处于静态。注意这里所说的静态并不是指静止不动,而是指各参数的变化率为零。自动控制系统在静态时,生产中的物料和能量仍然有进有出,只是平稳进行没有改变就是了。此时输入与输出之间的关系称为系统的静态特性。

假若一个系统原来处于静态,由于输入发生了变化,系统的平衡受到破坏,被控变量(即输出)发生变化,自动控制装置就要发挥它的控制作用,以克服输入变化的影响,力图使系统恢复平衡。从输入变化开始,经过控制,直到再建立静态,在这段时间中整个系统的各个环节和变量都处于变化的过程之中,这种状态称为动态。此时输入与输出之间的关系称为系统的动态特性。

在控制系统中,了解动态特性比静态特性更为重要。因为干扰引起系统变动以后,需要知道系统的动态情况,并搞清系统究竟能否建立新的平衡和怎样去建立平衡。而且平衡和静

态是暂时的、相对的、有条件的，不平衡和动态才是普遍的、绝对的、无条件的。干扰作用总是不断地产生，控制作用也就不断地去克服干扰的影响，所以自动控制系统总是一直处于运动状态之中。因此，控制系统的分析重点要放在动态特性上。

二、控制系统的过渡过程

在工业生产中，被控变量稳定是人们所希望的，但扰动却随时存在。当控制系统受到外界干扰信号或设定值信号变化时，即输入变化时，被控变量都会被离开原先的值开始变化，使系统原先的平衡状态被破坏。只有通过调整操纵变量，来平衡外界干扰或设定值干扰的作用，使被控变量回到其设定值上来，系统才会处于一个新的平衡状态。

控制系统的过渡过程就是在系统的输入发生变化后，系统在控制作用下从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的动态过程。

对于一个稳定的系统（所有正常工作的反馈系统都是稳定系统）要分析其稳定性、准确性和快速性，常以阶跃作用为输入时的被控变量的过渡过程为例。因为阶跃作用很典型，实际上也经常遇到，且这类输入变化对系统来讲是比较严重的情况。如果一个系统对这种输入有较好的响应，那么对其他形式的输入变化就更能适应。

图 1-3 所示为定值控制系统在阶跃干扰作用下的过渡过程的几种基本形式。

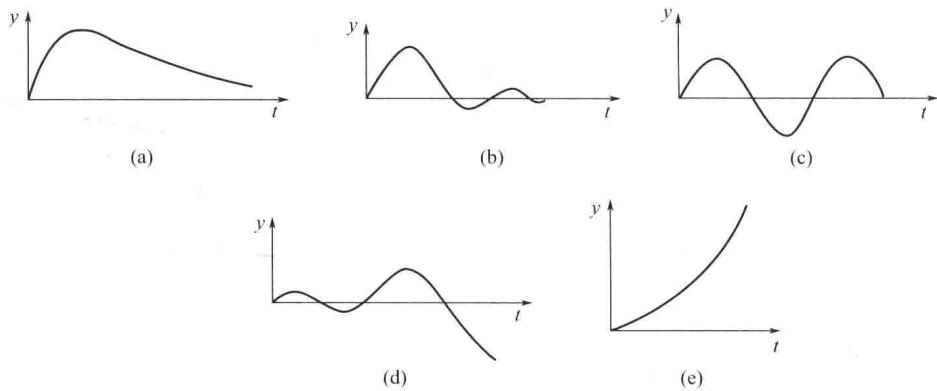


图 1-3 过渡过程的几种基本形式

图中 (a) 为非周期衰减过程，被控变量在设定值的某一侧作缓慢变化，没有来回波动，最后稳定在某一数值上。(b) 为衰减振荡过程，被控变量上下在设定值附近波动，但幅度逐渐减小，最后稳定在某一数值上。(c) 为等幅振荡过程，被控变量在设定值附近来回波动，且波动幅度保持不变。(d) 为发散振荡过程，被控变量来回波动，且波动幅度逐渐变大，即偏离设定值越来越远。(e) 为单调发散过程，被控变量虽不振荡，但偏离原来的平衡点越来越远。

以上过渡过程的五种形式可以归纳为三类。

① 衰减过程 过渡过程形式 (a) 和 (b) 都是衰减的，称为稳定过程。被控变量经过一段时间后，逐渐趋向原来的或新的平衡状态，这是所希望的。对于非周期的衰减过程，由于过渡过程变化较慢，被控变量在控制过程中长时间地偏离设定值，而不能很快恢复平衡状态，所以一般不采用，只是在生产上不允许被控变量有波动的情况下才可以采用。

② 等幅振荡过程 过渡过程形式 (c) 介于不稳定与稳定之间, 一般也认为是不稳定过程, 生产上不能采用。只是对于某些控制质量要求不高的场合, 如果被控变量允许在工艺许可的范围内振荡, 那么这种过渡过程的形式是可以采用的。

③ 发散过程 过渡过程形式 (d) 和 (e) 是发散的, 为不稳定的过渡过程, 其被控变量在控制过程中, 不但不能达到平衡状态, 而且逐渐远离设定值, 它将导致被控变量超越工艺允许范围, 严重时会引起事故, 这是生产上所不允许的, 应竭力避免。

三、描述系统过渡过程的品质指标

对于每一个控制系统来说, 在设定值发生变化或系统受到扰动作用时, 被控变量应该平稳、迅速和准确地趋近或回复到设定值。因此, 在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各种单项性能指标, 并把它们组合起来; 也可以提出各种综合性能指标。

1. 单项性能指标

① 衰减比 n (或衰减率 Ψ) 衰减比是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。它等于两个相邻的同向波峰值之比。在图 1-4 中, 若第一个波与同方向第二个波的波峰分别为 B 、 B' , 则衰减比 $n = B/B'$, 或习惯表示为 $n:1$ 。可见 n 越小, B' 越接近 B , 过渡过程越接近等幅振荡, 系统不稳定; 而 n 越大, 过渡过程越接近单调过程, 过渡过程时间太长。所以一般认为衰减比 $(4:1) \sim (10:1)$ 为宜。

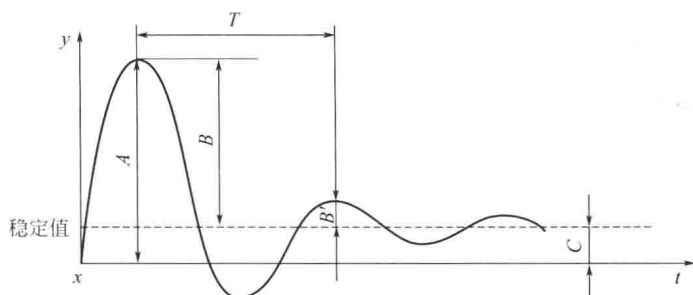


图 1-4 过渡过程控制指标示意图

也可用衰减率来衡量控制系统的稳定性。衰减率是指每经过一个周期后, 波动幅度衰减的百分数, 即衰减率 $\Psi = (B - B')/B$ 。衰减比与衰减率之间有简单的对应关系, 例如衰减比 n 为 $4:1$ 就相当于衰减率为 $\Psi = 75\%$ 。为了保证控制系统有一定的稳定裕度, 在过程控制中一般要求衰减比为 $(4:1) \sim (10:1)$, 这相当于衰减率为 $75\% \sim 90\%$ 。这样, 大约经过两个周期以后就趋于稳态, 看不出振荡了。

② 最大动态偏差 A (或超调量 B) 也是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。最大偏差是指在过渡过程中, 被控变量偏离设定值的最大数值。在衰减振荡过程中, 最大偏差就是第一个波的峰值, 在图 1-4 中以 A 表示, 最大偏差表示系统瞬间偏离设定值的最大程度。若偏离越大, 偏离的时间越长, 对稳定正常生产越不利。一般来说, 最大偏差以小为好, 特别是对于一些有约束条件的系统, 如化学反应器的化合物爆炸极限、催化剂烧结温度极限等, 都会对最大偏差的允许值有所限制。同时考虑到干扰会不断出现, 当第一个干扰还未清除时, 第二个干扰可能又出现了, 偏差有可能是叠加的, 这就更需要限制最大偏差的允许值。所以, 在决定最大偏差允许值时, 应根据工艺情况慎重选择。

有时也可以用超调量来表征被控变量偏离设定值的程度。在图 1-4 中超调量以 B 表示。从图中可以看出，超调量是第一峰值 A 与新稳定值 C 之差，即 $B=A-C$ 。如果系统的新稳态值等于设定值，那么最大偏差 A 也就与超调量 B 相等。超调量习惯上用百分数 σ 来表示： $\sigma=(B/C)\times 100\%$ 。

③ 余差 C 余差是衡量控制系统准确性的静态指标，当过渡过程终了时，被控变量的新稳态值与设定值之差称为余差。余差就是过渡过程终了时存在的残余偏差，在图 1-4 中用 C 表示。设定值是生产的技术指标，所以，被控变量越接近设定值越好，亦即余差越小越好。但实际生产中，也并不是要求任何系统的余差都很小，如一般储槽的液位控制要求就不高，这种系统往往允许液位有较大的变化范围，余差就可以大一些。又如化学反应器的温度控制，一般要求比较高，应当尽量消除余差。所以，对余差大小的要求，必须结合具体系统作具体分析，不能一概而论。有余差的控制过程称为有差控制，相应的系统称为有差系统；没有余差的控制过程称为无差控制，相应的系统称为无差系统。

④ 过渡时间和振荡周期 T 过渡过程要绝对地达到新的稳态值，需要无限长的时间，而要进入稳态值附近 $\pm 5\%$ （或 $\pm 2\%$ ）以内区域，并保持在该区域内，需要的时间是有限的。因此，把扰动开始到被控变量进入新的稳态值的 $\pm 5\%$ （或 $\pm 2\%$ ）范围内的这段时间，称为过渡时间，它是衡量控制系统快速性的指标。过渡时间短，表示过渡过程进行得比较迅速，这时即使干扰频繁出现，系统也能适应，系统控制质量就高；反之，过渡时间太长，第一个干扰引起的过渡过程尚未结束，第二个干扰就已经出现，这样，几个干扰的影响叠加起来，就可能使系统满足不了生产的要求。

过渡过程同向两波峰（或波谷）之间的时间间隔称为振荡周期或工作周期，其倒数称为振荡频率。在衰减比相同的情况下，振荡频率越高，过渡时间越短，因此，振荡频率在一定程度上也可作为衡量控制快速性的指标。

2. 综合控制指标

以上列举的都是单项性能指标，人们还时常用误差积分指标衡量控制系统性能的优良程度，它是一类综合指标，常用的有以下几种表达形式。

(1) 误差积分 (IE)

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (1-1)$$

(2) 绝对误差积分 (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-2)$$

(3) 平方误差积分 (ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-3)$$

(4) 时间与绝对误差乘积积分 (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1-4)$$

以上各式中， $e(t) = y(t) - y(\infty)$ 。

采用不同的积分公式意味着估计整个过渡过程优良程度的侧重点不同。例如，ISE 着重于抑制过渡过程中的大误差，而 ITAE 则着重惩罚过渡过程时间过长。

误差积分指标有一个缺点，即不能保证控制系统具有合格的衰减率，特别是一个等幅振荡过程，它的 IE 却等于零，显然是很不合理的。为此，通常是先规定衰减率，然后再考虑使某种误差积分为最小。

思考题与习题

1. 何谓自动控制？自动控制系统由哪几部分组成？
2. 过程控制系统分为哪几大类？简述过程自动控制系统的分类。
3. 什么是系统的静态与动态？为什么在控制系统中应主要了解动态特性？
4. 控制系统的过渡过程有哪几种基本形式？其中哪些形式属稳定过程？
5. 自动控制系统的单项控制指标有哪些？
6. 如图 1-5 所示，是某温度控制系统的记录仪上画出的曲线图（即过渡过程曲线），试写出最大偏差、衰减比、余差、振荡周期。如果工艺上要求控制温度为 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，那么该控制系统能否满足工艺要求？

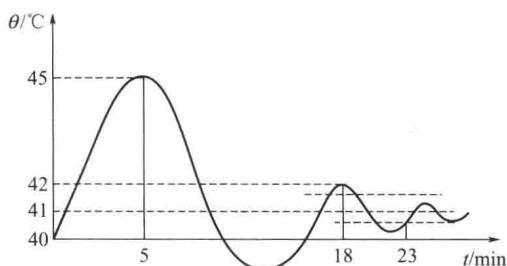


图 1-5 过渡过程曲线示意图

第二章 过程参数检测与变送

本章介绍了测量误差、仪表性能指标等基础知识，重点介绍了温度、压力、流量和物位四大参数的检测方法，以及各参数常用检测仪表的基本结构、工作原理、性能特点及其在实际生产中的应用，最后介绍了成分及物性参数检测的常用方法及仪表。

第一节 过程参数检测概述

在过程自动化中要通过检测元件 (Detector) 获取生产工艺变量 (Variable)，最常见的变量是温度 (Temperature)、压力 (Pressure)、流量 (Flow)、物位 (Level)。检测元件又称为敏感元件 (Sensor)、传感器 (Transducer)，它直接影响工艺变量，并转化成与之成对应关系的输出信号。这些输出信号包括位移、电压、电流、电阻、频率、气压等。如热电偶 (Thermocouple) 测温时，将被测温度转化成热电势信号；热电阻 (Resistance Thermometer Sensor) 测温时，将被测温度转化为电阻信号；节流装置测流量时，将被测流量的变化转化为压差信号。由于检测元件的输出信号种类繁多，且信号较弱不易觉察，一般都需要将其经过变送器 (Transmitter) 处理，转换成标准统一的电气信号 (如 4~20mA 或 0~10mA 的直流电流信号，1~5V 直流电压信号，20~100kPa 气压信号) 送往显示仪表，指示或记录工艺变量，或同时送往控制器对被控变量进行控制。有时将检测元件、变送器和显示装置通称检测仪表 (Measurement Instrument)，或将检测元件称为一次仪表，将变送器和显示装置称为二次仪表。

检测技术的发展是推动信息技术发展的基础，离开检测技术这一基本环节，就不能构成自动控制系统，再好的控制技术和信息技术也无法用于生产过程。检测技术在理论和方法上与物理、化学、生物学、材料科学、光学、电子学以及信息科学密切相关。目前生产规模不断扩大，技术日趋复杂，需要采集的过程信息越来越多。除了需要检测常见的过程变量外，还要检测物料或组分、物性、环境噪声、机械振动、火焰、颗粒尺寸及分布等。还有一些变量如转化率、催化剂活性等无法直接检测，但近年来出现了一种新型检测技术——软测量技术，专门用于解决一些难以检测的问题。

在检测技术发展的同时，各种传感器、变送器等也在不断发展，既有传统的模拟量 (Analog Variable) 检测，又有日渐流行的数字量 (Digital Variable) 检测。特别在检测仪表方面融入微型计算机技术，丰富了检测仪表的功能，提高了检测的准确性和操作的方便性。

对于检测仪表来说，检测、变送与显示可以是三个独立部分，也可以只用到其中两个部分。例如，热电偶测温所得毫伏信号可以不通过变送器，直接送到电子电位差计显示。当然检测、变送与显示可以有机地组合在一起成为一体，例如单圈弹簧管压力表。

过程控制对检测仪表有以下三条基本的要求：

- ① 测量值要正确地反映被控变量的值，误差不超过规定的范围；
- ② 在环境条件下能长期工作，保证测量值的可靠性；
- ③ 测量值必须迅速反映被控变量的变化，即动态响应比较迅速。

第一条基本要求与仪表的精确度等级和量程有关，并与使用、安装仪表正确与否有关；第二条基本要求与仪表的类型、元件的材质以及防护措施等有关；第三条基本要求与检测元件的动态特性有关。

一、测量误差

在测量过程中，由于使用的测量工具本身不够精确、观测者的主观性和周围环境的影响等，使得测量的结果不可能绝对准确。由仪表读得的被测值与真实值之间，总是存在一定的差距，这种差距就称为测量误差（Measurement Error）。在实际测量中，误差的表示方法有很多种，其含义、用途各不相同。通常分为绝对误差和相对误差。

绝对误差（Absolute Error）在理论上是指仪表指示值 x 和被测量的真实值 x_t 之间的代数差，可表示为

$$\Delta = x - x_t \quad (2-1)$$

在工程中，要知道被测量的真实值是困难的。因此，所谓测量仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差，一般是用标准表（准确度较高）和被校表（准确度较低）同时对同一参数测量所得到的两个读数之差，把式(2-1)中的真实值 x_t 用标准表读数 x_0 来代替，则绝对误差表示成

$$\Delta = x - x_0 \quad (2-2)$$

检测仪表都有各自的测量标尺范围，即仪表的量程。同一台仪表量程发生变化，也会影响测量的准确性。因此，工业上定义了一个相对误差（Relative Error）——仪表引用误差，它是绝对误差与测量标尺范围之比，即

$$\delta = \frac{\pm(x - x_0)}{\text{标尺上限} - \text{标尺下限}} \times 100\% \quad (2-3)$$

仪表的标尺上限值与下限值之差，一般称为仪表的量程（Span）。

各种测量过程都是在一定的环境条件下进行的，外界温度、湿度、电压的波动以及仪表的安装等都会造成附加的测量误差。因此，考虑仪表测量误差时不仅要考虑其自身性能，还要注意使用条件，尽量减小附加误差。

二、仪表性能指标

评价一台仪表性能的优劣通常用以下指标进行衡量。

1. 精确度（Accuracy）

仪表的精确度简称精度，是用来表示测量结果可靠程度的指标。任何测量过程都存在着测量误差。在使用仪表测量生产过程中的工艺变量时，不仅需要知道仪表的指示值，而且还应该了解仪表的精度。

考虑到整个测量标尺范围内的最大绝对误差，则可得到仪表最大引用误差为

$$\delta_{\max} = \frac{\pm(x - x_0)_{\max}}{\text{标尺上限} - \text{标尺下限}} \times 100\% \quad (2-4)$$

仪表的最大引用误差又称允许误差，它是仪表基本误差的主要形式。仪表的精度等级是将仪表允许误差的“±”及“%”去掉后的数值，以一定的符号形式表示在仪表面板上，如1.5外加一个圆圈或三角形，精度等级1.5，说明该仪表的允许误差为±1.5%。

仪表的精度是按国家统一规定的允许误差划分成若干等级。目前，我国生产的仪表常用的精度等级有0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0等。为了进一步说明如何确定仪表的精度等级，下面举一个例子。

【例 2-1】 某台测温仪表的测温范围为200~700℃，仪表的最大绝对误差为±4℃，试确定该仪表的允许误差和精度等级。

解 仪表的允许误差为

$$\delta_{\max} = \frac{\pm 4}{700 - 200} \times 100\% = \pm 0.8\% \quad (2-5)$$

如果将该仪表的允许误差去掉“±”号及“%”号，其值为0.8。由于我国规定的精度等级中没有0.8级仪表，同时，该仪表的允许误差超过了0.5级仪表允许的最大误差，所以，这台测温仪表的精度等级为1.0级。

【例 2-2】 某被测参数的测量范围要求0~1000kPa，根据工艺要求，用来测量的绝对误差不能超过±8kPa，试问选择何种精度等级的压力测量仪表才能满足要求。

解 根据工艺要求，被选仪表的允许误差是

$$\delta_{\max} = \frac{\pm 8}{1000 - 0} \times 100\% \quad (2-6)$$

如果将该仪表的允许误差去掉“±”号及“%”号其值为0.8，介于0.5和1.0之间。如果选择1.0级的仪表，其允许最大相对误差百分误差为±1.0%，超过了工艺允许的数值，因此，只有选择0.5级仪表才能满足工艺要求。

仪表精度等级是衡量仪表质量优劣的重要指标之一，一般数值越小，仪表精度等级越高，仪表的准确度也越高。科学实验用的仪表精度等级在0.05级以上；工业检测仪表多在0.1~4.0级，其中校验用的标准表多为0.1或0.2级，现场用多为0.5~4.0级。

2. 变差 (Variation)

变差是指在外界条件不变的情况下使用同一仪表对某一变量进行正反行程（即在仪表全部测量范围内逐渐从小到大和从大到小）测量时，对应于同一测量值所得的仪表读数之间的差异。造成变差的原因很多，例如传动机构的间隙、运动部件的摩擦、弹性元件的弹性滞后等。在仪表使用过程中，要求仪表的变差不能超出仪表的允许误差。

3. 线性度 (Linearity)

通常总是希望检测仪表的输入输出信号之间存在线性对应关系，并且将仪表的刻度制成

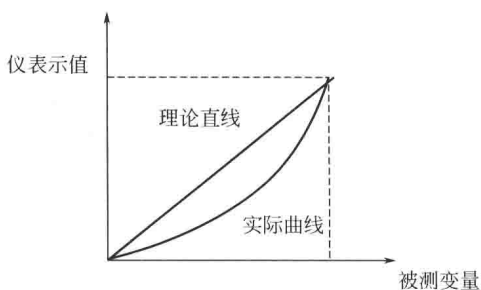


图 2-1 线性度示意图

线性刻度，但是实际测量过程中由于各种因素的影响，实际特性往往偏离线性，如图 2-1 所示。线性度就是衡量实际特性偏离线性程度的指标。

4. 灵敏度和分辨率 (Sensitivity and Resolution)

灵敏度是仪表输出变化量 ΔY 与引起此变化量的输入变化量 ΔX 之比，即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (2-7)$$