



高职高专“十一·五”规划教材

GUOCHENG KONGZHI JI ZIDONGHUA YIBIAO

过程控制及自动化仪表

武平丽 主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

过程控制及自动化仪表

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. —北京:化学工业出版社,2007.5
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-00249-5

I. 过… II. 武… III. ①过程控制-高等学校:技术学院-教材②自动化仪表-高等学校:技术学院-教材
IV. TP273 TH86

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第054689号

责任编辑:高钰

文字编辑:李玉峰

责任校对:战河红

装帧设计:韩飞

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)

印装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张13 $\frac{3}{4}$ 字数356千字 2007年6月北京第1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:22.00元

版权所有 违者必究

序

随着科学技术的飞速发展和自动化程度的不断提高，自动化仪表技术在向数字化、智能化、网络化、微型化方向发展；数控技术向智能化、开放性、网络化、信息化发展；工业控制网络将向有线和无线相结合方向发展；工业控制软件正向先进控制方向发展。自动化仪表和控制系统广泛应用于各种装备、流程工业的测量和控制，是现代化大型重点成套装备的重要组成部分，通过对工业生产过程的检测、控制、优化、调度、管理和决策，达到增加产量、提高质量、降低消耗、确保安全的目的。因此，自动化技术越来越受到人们的重视。

我国传统工业技术改造、工厂自动化、企业信息化需要大量的工业自动化仪表和控制系统，利用信息化改造、优化和提高传统产业生产过程自动化、控制智能化和管理信息化水平，提高经济增长的质量。工业自动化技术随着工艺和装备技术的不断发展而发展，从初期简单的手工操作到连续工艺及负荷不断加大，对生产稳定性要求越来越高，对控制的要求及自动化水平也越来越高，自动化仪表使用越来越普遍，从简单回路的闭环控制到单元装置的全面自动化，使用的控制工具也从气动单元组合仪表、电动单元组合仪表到 DCS、PLC、FCS 的广泛应用；控制水平也从单参数简单控制回路到多变量复杂控制回路，先进控制系统、优化控制系统在各种场合都有成功应用的典范。

自动化专业是一个发展迅速的专业，新的控制手段与参数检测方法不断出现，自动化仪表更新换代也比较快，其发展的主要特点如下。

(1) 以流程工业和制造业为服务对象，基于现代计算机、网络、通信和现代控制技术而形成的一种新型工业自动化网络系统技术，在进一步完善信息采集功能的基础上，强化了信息的加工处理，尤其是工业生产过程测量和控制信息的网络传输技术更加开放，并得到飞速发展。

(2) 传统的自动化仪表走向数字化、智能化，具有开放的网络通信接口，而成为网络化控制系统的一个节点。分布式工业控制网络将成为未来控制系统的主导技术。

(3) 以现场总线、工业以太网等工业控制网络为平台，利用现场设备的软、硬件资源（如功能模块），实现全分散控制，同时对现场仪表还可实现远程访问、监视、调校、诊断、维护等管理功能。

(4) 控制系统与信息系统实现平滑联接和多网合一，工业以太网技术在控制领域将得到更为广泛的推广，实时控制信息可以通过 Intranet/Internet 实现共享和在线检测、控制和管理。

(5) 工业控制系统软件及各种应用软件开发、系统集成技术成为核心技术，取代系统硬件而成为高附加值的载体。通过先进控制和优化软件，可以实现预测控制、模糊控制、神经元网络控制、专家系统控制等高级智能控制，以及数据校正、过程模拟、质量监控、计划排产与调度以及故障诊断、安全管理等生产过程的优化管理。

(6) 企业的经营管理以企业资源计划管理系统软件（ERP, Enterprise Resource Planning）和企业供应链管理系统软件（Supply Chain Management）为平台，实现物料清单、

工艺路线、库存管理、生产计划、物料需求计划、能力需求计划、成本管理、财务管理、销售管理、产品数据管理、质量管理、设备维修管理、实验室管理、运输管理、配方管理、人力资源管理、战略管理、客户服务管理、开发与研究管理等的一体化管理。

(7) 专用 IC 芯片、各种工业控制网络的通信模块、网桥、中继器、网关、远程 I/O 节点、功能模块成为新一代分布式网络控制系统中的重点产品，并与网络信息技术同步发展。

自动化技术是一门综合学科，在工业生产中起着举足轻重的作用，是流程工业生产操作和控制的神经中枢与大脑，因此《过程控制及自动化仪表》是自动化专业人士的一门必修课程。本书从实用角度出发，基于生产实际和工程应用，内容丰富，言简意赅，着重以加强实践能力学习为原则，有针对性地介绍了自动化仪表和控制系统技术与设计方法，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，介绍了当前最典型的国内外主流控制系统的构成、原理和应用。本书适合于工业企业热工仪表人员、工艺人员、技术人员参考使用，适合于大专院校师生、科研工作者参考使用，也适合于自动化类工程公司项目工程人员参考使用。相信此书会给广大的读者带来学习、工作上的方便和帮助。

北京和利时系统工程股份有限公司

张洪根

2007 年 1 月 24 日

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。

本书与企业联合编写，有高级工程师和工程师亲自执笔有关章节，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。参加编写的有黄河水利职业技术学院万书栋（第一章、第九章）；杨箏（第二章、附录）；北京和利时系统工程股份有限公司高国光（第八章）；河南矛盾集团雷云永（第三章、第四章）。全书由北京和利时系统工程股份有限公司副总工程师张洪垠主审，并欣然为本书作序。在此向关心和支持本书出版的所有单位和个人，以及参考文献的作者表示衷心的感谢。

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

2007年4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	1
一、过程控制系统的组成	1
二、过程控制系统的分类	2
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	21
五、其他温度仪表简介	22
六、测温仪表的选用与安装	22
第三节 压力测量	23
一、压力的表示方法	24
二、压力检测的主要方法	24
三、常见压力检测仪表	24
四、智能式差压变送器	28
五、压力仪表的选用和安装	29
第四节 流量测量	33
一、概述	33
二、速度式流量计	34
三、容积式流量计	40
四、质量流量计	40
五、流量仪表的选用	42
第五节 物位测量	42
一、物位仪表的分类	42
二、常用物位计	42
三、物位检测仪表的选用	45
第六节 成分和物性参数检测	46
一、热导式气体成分检测	46
二、磁导式气体成分检测	47
三、红外式气体成分检测	47
四、溶解氧的检测	48
五、色谱分析	49
六、pH值的检测	50
七、浊度的检测	50
第七节 软测量技术简介	51
思考题与习题	51
第三章 显示记录仪表	54
第一节 模拟式显示仪表	54
一、自动平衡式电子电位差计	54
二、电子自动平衡电桥	56
第二节 数字式显示仪表	57
一、数字式显示仪表的分类	58
二、数字式显示仪表的主要技术指标	58
三、数字式显示仪表的基本组成	58
第三节 无纸记录仪	59
一、无纸记录仪的特点	59
二、无纸记录仪的基本结构	60
三、无纸记录仪的安装与接线	60
四、显示记录仪表的发展趋势	61
思考题与习题	61

第四章 过程控制仪表	62
第一节 控制器	62
一、DDZ-Ⅲ型控制器	62
二、可编程数字控制器	65
第二节 执行器	70
一、电动执行器	71
二、气动执行器	73
思考题与习题	83
第五章 过程控制系统概述	85
第一节 自动检测与自动控制系统	85
一、过程自动检测系统	85
二、过程自动控制系统	85
第二节 传递函数与方块图变换	87
一、传递函数	87
二、方块图	88
第三节 对象特性	90
一、与对象有关的两个基本概念	90
二、描述对象特性的三个参数	90
三、扰动通道特性对控制质量的影响	92
四、控制通道特性对控制质量的影响	92
第四节 过程控制工程设计中常用图例符号	92
一、图形符号	92
二、字母代号	94
三、仪表位号	94
四、控制符号图表示方法示例	96
五、简单控制系统控制符号图识图初步	97
思考题与习题	97
第六章 简单控制系统的分析与设计	98
第一节 系统被控变量与操纵变量的选择	98
一、系统被控变量的选取	98
二、操纵变量的选择	99
第二节 测量变送在系统分析设计中的考虑	99
一、纯滞后	100
二、测量滞后	100
三、信号传输滞后	101
四、测量信号的处理	101
第三节 执行器的选择	102
第四节 控制规律的选取	102
一、基本控制规律	102
二、控制规律的选用	108
第五节 控制器的参数整定	109
一、经验试凑法	109
二、临界比例度法	110
三、衰减曲线法	110
四、三种整定方法的比较	111
第六节 简单控制系统的投运及故障分析	111
一、系统的投运步骤	111
二、系统的故障分析、判断与处理	113
思考题与习题	115
第七章 复杂控制系统	116
第一节 串级控制系统	116
一、串级控制系统的基本概念	116
二、串级控制系统的特点及应用范围	118
三、串级控制系统的设计	120
四、串级控制系统的投运及参数整定	123
第二节 前馈控制系统	126
一、前馈控制的基本概念和方块图	126
二、前馈控制的特点和局限性	127
三、前馈控制系统的几种结构形式	127
四、前馈控制系统的选用原则和应用实例	129
第三节 比值控制系统	130
一、概述	130
二、常见的比值控制方案	131
第四节 均匀控制系统	132
一、均匀控制原理	133
二、均匀控制方案	133
第五节 分程控制系统	134
一、概述	134
二、分程控制的应用场合	135
三、分程控制系统应用中应注意的几个问题	137

第六节 选择性控制系统	138	四、鲁棒控制	141
一、概述	138	五、自适应控制	142
二、选择性控制系统的类型	138	六、智能控制	142
三、选择性控制系统的设计	140	第八节 控制流程图识图	142
第七节 新型控制系统简介	140	一、常规控制流程图的识图	143
一、预测控制	140	二、计算机控制流程图识图初步	146
二、推理控制	141	思考题与习题	146
三、解耦控制	141		
第八章 分布式控制系统 (DCS)	148		
第一节 概述	148	第四节 DCS 系统的在线调试与投运	165
一、DCS 系统的构成方式	148	一、DCS 系统的调试	165
二、DCS 的特点	149	二、系统投运	168
三、DCS 的发展概况	150	第五节 常见分布式控制系统简介	168
第二节 DCS 的硬件体系结构与功能	151	一、Honeywell 公司的 TPS 系统	168
一、DCS 的数据通信系统	151	二、横河公司的 CENTUM-CS 系统	171
二、DCS 的过程控制装置	153	三、和利时公司的 HOLLiAS-MACS	
三、操作管理装置	156	系统	173
第三节 DCS 的软件体系与组态方法	158	四、浙大中控的 SUPCON JX-300X	
一、DCS 的软件体系	158	系统	175
二、DCS 的组态方法	159	思考题与习题	176
第九章 典型过程的控制	178		
第一节 锅炉的过程控制	178	二、精馏塔控制的基本方案	188
一、汽包水位控制	179	第四节 流体输送设备的过程控制	189
二、过热蒸汽温度控制	180	一、泵的控制	189
三、燃烧过程的控制	181	二、离心式压缩机的控制	192
第二节 化学反应器的过程控制	182	第五节 传热设备的过程控制	194
一、化学反应器的分类方式与控制	182	一、传热设备的静态数学模型	194
二、化学反应器的典型控制方案	184	二、一般传热设备的控制	195
第三节 精馏塔的过程控制	186	三、管式加热炉的控制	197
一、概述	186	思考题与习题	199
附录	200		
附录一 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	200	附录四 铂电阻分度表	208
附录二 镍铬-铜镍热电偶分度表	204	附录五 铜电阻分度表	210
附录三 镍铬-镍硅热电偶分度表	204		
参考文献	211		

第一章 绪 论

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能/价格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。

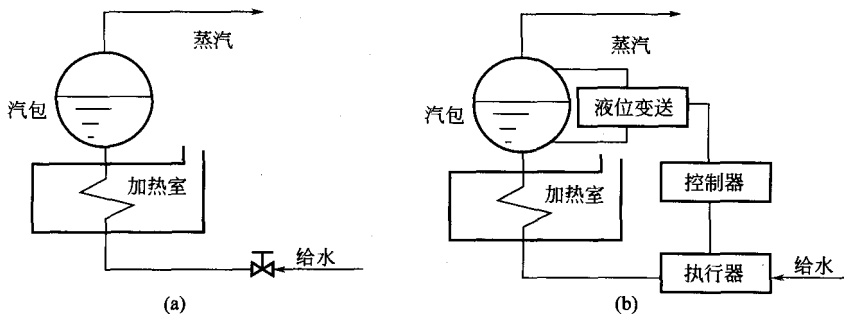


图 1-1 锅炉汽包水位控制示意图

图 1-2 所示为锅炉汽包水位自动控制系统方框图。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。

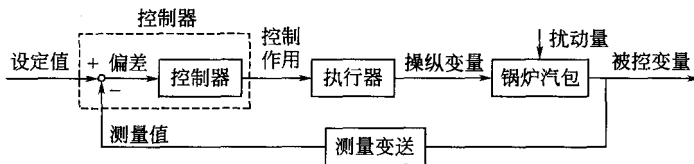


图 1-2 锅炉汽包水位自动控制系统方框图

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 Monitoring)、自动控制 (Autocontrol)、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,被控变量都会被迫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。

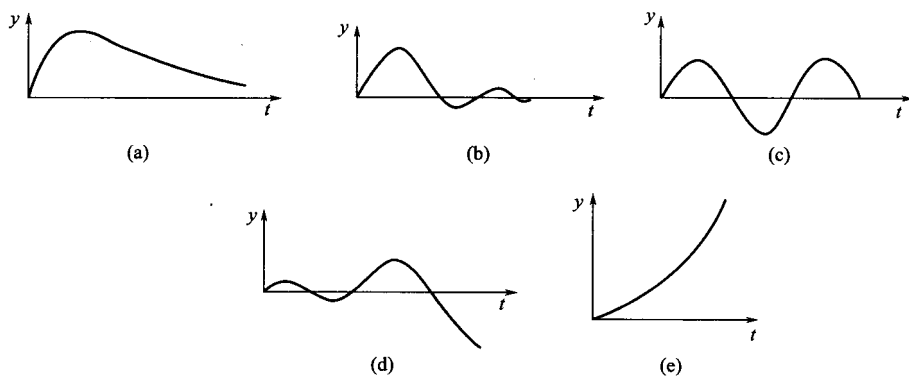


图 1-3 过渡过程的几种基本形式

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。

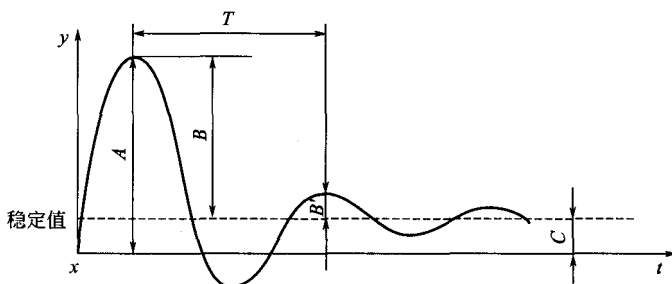


图 1-4 过渡过程控制指标示意图

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 $75\%\sim90\%$ 。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 与新稳态值 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稳定性的静态指标,当过渡过程終了时,被控变量的新稳态值与设定值之差称为余差。余差就是过渡过程終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？

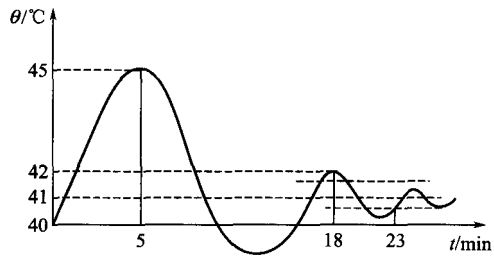


图 1-5 过渡过程曲线示意图

第二章 过程参数检测与变送

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, 并转化成一个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