

高等学校“十三五”规划教材
本书荣获中国石油和化学工业优秀教材奖一等奖

化工自动化及仪表

(工艺类专业适用)

—— 第二版 ——

张光新 杨丽明 王会芹 编著



化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

化工自动化及仪表

(工艺类专业适用)

第二版

张光新 杨丽明 王会芹 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工自动化及仪表》以控制系统、检测技术、控制装置为主体,并辅以计算机控制系统的应用实例,全书共分11章。第1、2章介绍自动控制基础知识,第3章介绍检测技术与检测仪表,第4、5章介绍控制器与计算机控制装置,第6章介绍执行器,第7~9章介绍简单控制系统、复杂控制系统、新型控制系统,第10、11章介绍典型化工单元的控制与计算机控制系统的应用。

《化工自动化及仪表》丰富了自控系统理论基础方面的知识,对新概念、新技术、新系统、新装置、新方法作了全面的阐述。

《化工自动化及仪表》适用于化工、炼油、轻工、冶金、制药、林化工等工艺类专业本科生、专科生及相关专业工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

化工自动化及仪表/张光新,杨丽明,王会芹编著.—2版.—北京:
化学工业出版社,2016.3
高等学校“十三五”规划教材.工艺类专业适用
ISBN 978-7-122-26152-6

I. ①化… II. ①张…②杨…③王… III. ①化工仪表-高等学校-教材
②化工过程-自动控制-高等学校-教材 IV. ①TQ056

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 015068 号

责任编辑:唐旭华
责任校对:王素芹

装帧设计:张辉

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18 $\frac{1}{4}$ 字数500千字 2016年4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:36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

伴随着科学技术的迅速发展,自动化技术已成为当今举世瞩目的高技术之一,涉及人类生产、生活、国防、科研等领域的各个层面,是信息时代的一大标志。

自动化技术的进步极大地推动了工业生产的飞速发展,随着生产过程的大型化、复杂化,各种类型的自动控制系统已经成了现代工业生产实现安全、高效、优质、低耗的基本条件和重要保证。因此,对工艺类专业的工程技术人员来说,学习和掌握必要的自动化知识,对于管理与开发现代化生产过程是十分重要的。

《化工自动化及仪表》是一本适用于化工、炼油、轻工、冶金等工艺类专业本、专科学生的自动化教材。本书的指导思想是结合信息时代的特点,在介绍传统自动控制基础知识的同时,对新概念、新技术、新系统、新装置、新方法作了全面的阐述,以适应自动化理论、自动化技术、计算机技术、检测技术的新发展。

《化工自动化及仪表》是国家级教改项目(世行贷款)《化工类专业创新人才培养模式、教学内容、教学方法和教学技术改革的研究与实施》的研究成果之一。全书以控制系统、检测技术、控制装置为主线,并辅以计算机控制系统的应用实例,共分为11章。第1章对系统组成、系统分类、系统的过渡过程以及传递函数等一些基本概念进行介绍,为后面章节的学习做准备。与同类教材相比,本章引入了传递函数和方块图这一基本概念,并对为什么要引入传递函数及方块图这一基本概念进行了说明。第2章介绍系统各组成环节的特性及其对控制质量的影响。在这一章中,除了对被控对象数学模型的建立、对象特性及其对过渡过程的影响进行介绍外,还引入了测量变送、执行器、控制器等其他三个环节特性的分析,使读者对系统特性有一个完整的了解。第3章在简要介绍测量与测量仪表共性的基础上,介绍了常用被测参数的检测方法、检测原理、仪表外特性、仪表选型方法等,并引入了软测量技术和安全仪表系统的介绍。第4章着重介绍数字式控制器及可编程调节器的工作原理、特点及外特性,删除了DDZ-Ⅲ型调节器方面的内容。第5章介绍工业控制计算机、可编程序控制器、集散控制系统、现场总线控制系统、工业以太网等计算机控制装置方面的内容,本章强调的是原理性的、具有共性的内容,避免在某种控制系统或某组态软件上花大量篇幅进行介绍的编写方法。第6章介绍执行器的作用、分类、工作原理、选择与安装等方面的内容,与其他同类教材相比,本章除加重对电动执行器机构的介绍外,还引入了智能式电动执行机构的介绍。第7章介绍简单控制系统的组成、设计、投运与整定,本章引入了一种新的控制器正、反作用的选择方法。第8章介绍串级、均匀、比值、选择、分程、前馈、多冲量等复杂控制系统的组成、特点与应用场合。第9章介绍了解耦、推断、自适应、预测、模糊、神经网络、智能控制与专家系统等先进控制系统的基本概念。第10章介绍典型化工操作单元的控制方案。第11章介绍计算机控制系统的应用,对计算机控制系统的设计原则、设计程序、设计方法进行阐述,并对PLC、DCS、FCS等系统的应用进行举例,本章系统地介绍了计算机控制系统的工程设计与实施方面内容,力求使读者掌握计算机控制系统的应用方法。书后附有部分习题的参考答案。

为方便教学,《化工自动化及仪表》配套的电子教案可免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用。如有需要,请发电子邮件至 cipedu@163.com。

由浙江大学、北京化工大学、华东理工大学等联合编写的《化工仪表及自动化例题习题集》(第三版)内容基本上覆盖了目前化学工业出版社已经出版的同类教材的所有习题与思考题,除了对主要的习题给出了详细的题解外,还列举了部分例题进行了深入的分析,以使该课程的任课教师与学生能更好地理解教材的内容与要点,欢迎广大师生及读者选用。

本书的编写得到了浙江大学周泽魁、黄志尧、张宏建三位教授以及浙江工程设计有限公司徐立伟高级工程师的大力支持和热情帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编著者

2015 年 12 月

目 录

1 自动控制系统概述	1
1.1 自动控制系统的组成	1
1.2 自动控制系统的分类	2
1.2.1 定值控制系统	2
1.2.2 随动控制系统	3
1.2.3 程序控制系统	3
1.3 自动控制系统的过渡过程和品质指标	3
1.3.1 系统的稳态和动态	3
1.3.2 系统的过渡过程	3
1.3.3 描述系统过渡过程的品质指标	4
1.4 传递函数和方块图	6
1.4.1 问题的引入	6
1.4.2 拉普拉斯变换	7
1.4.3 传递函数	9
1.4.4 方块图	9
1.5 管道及仪表流程图	13
1.5.1 图形符号	14
1.5.2 字母代号	15
1.5.3 仪表位号	16
思考题与习题	16
2 控制系统基本组成环节特性分析	18
2.1 被控对象特性及其对过渡过程的影响	18
2.1.1 被控对象的数学描述方法	18
2.1.2 对象数学模型的建立方法	19
2.1.3 对象机理数学模型的建立	19
2.1.4 描述对象特性的参数及其对过渡过程的影响	23
2.1.5 被控对象特性参数的实验测定方法	26
2.2 测量、变送环节特性及其对过渡过程的影响	27
2.2.1 测量元件	28
2.2.2 变送器	29
2.3 执行器特性及其对过渡过程的影响	29
2.4 控制规律及其对过渡过程的影响	31
2.4.1 双位控制	31
2.4.2 比例控制 (P)	33
2.4.3 比例积分控制 (PI)	36
2.4.4 比例微分控制 (PD)	38
2.4.5 比例积分微分控制 (PID)	40
思考题与习题	41
3 过程参数的检测	43
3.1 概述	43
3.1.1 检测过程与测量误差	43
3.1.2 过程参数的一般检测原理	47
3.1.3 变送器的基本特性和构成原理	48
3.1.4 变送器的若干共性问题	50
3.2 压力检测	52
3.2.1 压力的表示方法	52
3.2.2 压力检测概述	53
3.2.3 弹性式压力检测	53
3.2.4 电气式压力检测	58
3.2.5 智能式压力/差压变送器	60
3.2.6 压力检测仪表的选用和安装	61
3.3 温度检测	65
3.3.1 温度检测概述	65
3.3.2 热电偶及其测温原理	66
3.3.3 热电阻及其测温原理	72
3.3.4 温度变送器简介	73
3.3.5 其他温度检测仪表简介	78
3.3.6 温度检测仪表的选用和安装	78
3.4 流量检测	79
3.4.1 流量检测概述	80
3.4.2 节流式流量计	80
3.4.3 转子流量计	83
3.4.4 电磁流量计	85
3.4.5 涡轮流量计	85
3.4.6 旋涡流量计	86
3.4.7 容积式流量计	87
3.4.8 其他流量检测方法	87
3.4.9 流量检测仪表的选用和安装	89
3.5 物位检测	90
3.5.1 物位检测概述	90
3.5.2 差压式液位计	91
3.5.3 浮筒式液位计	91

3.5.4	电容式物位计	92	5.4.2	基金会现场总线	143
3.5.5	核辐射式物位计	93	5.4.3	Profibus 现场总线	146
3.5.6	物位检测仪表的选用和安装	93	5.4.4	几个具体问题的分析	150
3.6	成分和物性参数的检测	94	5.5	工业以太网	151
3.6.1	热导式气体成分检测	94	5.5.1	以太网的介质访问控制协议	151
3.6.2	红外式气体成分检测	95	5.5.2	以太网应用于工业现场的关键 技术	152
3.6.3	溶解氧的检测	95	5.5.3	工业以太网的应用	153
3.6.4	pH 值的检测	97	思考题与习题	154	
3.6.5	浊度的检测	97			
3.7	软测量技术简介	97			
3.8	安全仪表系统	100	6	执行器	157
3.8.1	安全仪表系统的基本概念	100	6.1	概述	157
3.8.2	安全仪表系统的结构	101	6.1.1	执行器在自动控制系统中的 作用	157
3.8.3	安全仪表系统 (SIS) 集成设计	101	6.1.2	执行器的构成	157
3.8.4	安全仪表系统中传感器设计 原则	102	6.1.3	执行器的分类	157
思考题与习题	103		6.1.4	执行器的作用方式	158
4	控制器	106	6.2	执行机构	158
4.1	控制器概述	106	6.2.1	气动执行机构	158
4.2	数字式控制器	106	6.2.2	电动执行机构	159
4.2.1	数字式控制器的主要特点	106	6.2.3	智能式电动执行机构	159
4.2.2	数字式控制器的构成原理	107	6.3	调节机构	160
4.2.3	SLPC 可编程调节器	110	6.4	调节阀的流量系数和流量特性	162
思考题与习题	116		6.4.1	流量系数	162
			6.4.2	流量特性	163
			6.4.3	调节阀的可调比	165
5	计算机控制系统	117	6.5	阀门定位器	166
5.1	概述	117	6.5.1	电/气阀门定位器	166
5.1.1	计算机控制系统的基本组成	117	6.5.2	气动阀门定位器	167
5.1.2	计算机控制系统的发展过程	118	6.5.3	智能式阀门定位器	167
5.1.3	计算机控制系统的发展特征	120	6.6	执行器的选择、计算和安装	168
5.1.4	离散化 PID 控制和数字滤波 算法	121	6.6.1	执行器结构形式的选择	168
5.2	可编程序控制器	123	6.6.2	调节阀流量特性的选择	169
5.2.1	概述	123	6.6.3	调节阀的口径选择	170
5.2.2	PLC 基本组成	124	6.6.4	气动调节阀的安装	171
5.2.3	PLC 的基本工作原理	125	思考题与习题	172	
5.2.4	PLC 的程序设计简介	126			
5.3	集散控制系统	131	7	简单控制系统	173
5.3.1	概述	131	7.1	简单控制系统的结构与组成	173
5.3.2	DCS 的硬件体系结构	132	7.2	自动控制的目的及被控变量的选择	174
5.3.3	DCS 的软件系统	136	7.3	对象特性对控制质量的影响及控制 变量的选择	176
5.3.4	DCS 的组态 (开发与生成)	137	7.3.1	控制变量与干扰变量	176
5.4	现场总线控制系统	140	7.3.2	对象特性对控制质量的影响	176
5.4.1	现场总线的概述	140	7.3.3	控制变量的选择原则与选择	

方法	178	8.6.3 前馈控制系统的应用场合	216
7.4 测量滞后对控制质量的影响及测量信号的处理	181	8.7 多冲量控制系统	217
7.4.1 测量滞后对控制质量的影响	181	思考题与习题	219
7.4.2 克服测量滞后的几种方法	182	9 新型控制系统	222
7.4.3 测量信号的处理	182	9.1 解耦控制	222
7.5 负荷变化对控制质量的影响及调节阀的选择	183	9.1.1 系统间的相互关联	222
7.6 控制规律的选择	184	9.1.2 解耦控制	224
7.6.1 控制规律的选择	184	9.2 推断控制	226
7.6.2 控制器正、反作用的选择	184	9.3 自适应控制	227
7.7 控制系统的投运与参数整定	186	9.3.1 自适应控制系统的特点与功能	227
7.7.1 控制系统的投运	186	9.3.2 自适应控制系统的类型	227
7.7.2 控制器参数的工程整定	186	9.4 预测控制	228
思考题与习题	190	9.4.1 预测控制的基本特征	228
8 复杂控制系统	192	9.4.2 预测控制算法的类型	229
8.1 串级控制系统	192	9.5 模糊控制	232
8.1.1 概述	192	9.5.1 模糊控制的基本原理	232
8.1.2 串级控制系统的工作过程	194	9.5.2 模糊控制的几种方法	234
8.1.3 串级控制系统的特点及应用范围	195	9.6 神经网络控制	234
8.1.4 串级控制系统主、副回路的选择	195	9.6.1 神经元模型	234
8.1.5 主、副控制器控制规律及正、反作用的选择	198	9.6.2 人工神经网络	236
8.1.6 主、副控制器参数的工程整定	200	9.6.3 神经网络在自动控制中的应用	237
8.2 均匀控制系统	201	9.7 智能控制与专家系统	237
8.2.1 均匀控制的目的	201	9.7.1 智能控制概述	237
8.2.2 均匀控制方案	202	9.7.2 智能控制的主要类型	238
8.3 比值控制系统	203	9.7.3 专家控制系统	239
8.3.1 概述	203	9.8 故障检测与故障诊断	240
8.3.2 比值控制的类型	203	9.8.1 提高控制系统可靠性的主要方法	240
8.4 选择性控制系统	206	9.8.2 故障检测与诊断的主要方法	241
8.4.1 概述	206	思考题与习题	242
8.4.2 选择性控制系统的类型	206	10 典型化工单元的控制	243
8.4.3 积分饱和及抗积分饱和措施	209	10.1 化工单元自动控制的一般设计原则	243
8.5 分程控制系统	210	10.2 流体输送设备的控制	244
8.5.1 概述	210	10.2.1 离心泵的控制	244
8.5.2 分程控制的应用	211	10.2.2 容积式泵的控制	245
8.5.3 分程控制系统应用中应注意的几个问题	213	10.2.3 压缩机的控制	245
8.6 前馈控制系统	213	10.3 传热设备的控制	247
8.6.1 概述	213	10.3.1 无相变情况下传热设备的控制	248
8.6.2 前馈控制系统的结构	215	10.3.2 有相变情况下传热设备的控制	249
		10.4 化学反应器的自动控制	251

10.4.1	釜式反应器的自动控制	252
10.4.2	固定床反应器的自动控制	252
10.4.3	流化床反应器的自动控制	253
10.4.4	鼓泡床反应器的控制	254
	思考题与习题	255

11	计算机控制系统的应用	257
11.1	计算机控制系统的工程设计	257
11.1.1	计算机控制系统的基本设计 原则	257
11.1.2	计算机控制系统的工程设计 程序	257
11.1.3	计算机控制系统的硬件设计	258
11.1.4	计算机控制系统的软件设计	260
11.2	PLC 在啤酒发酵过程中的应用	260
11.2.1	发酵过程的生产工艺和控制要求 简介	260
11.2.2	S7 PLC 的硬件设计	261
11.2.3	软件设计	263
11.3	DCS 在链条锅炉系统中的应用	265

11.3.1	工艺简介	265
11.3.2	系统的主要控制要求	266
11.3.3	系统控制方案分析	266
11.3.4	控制方案在 DCS 上的实现	267
11.4	FCS 在大颗粒尿素装置中的应用 简介	272
11.4.1	工艺简介	272
11.4.2	DeltaV 系统简介	273
11.4.3	控制要求在 FCS 上的实现	273
	思考题与习题	274

部分习题参考答案	276
-----------------------	------------

附录	280
附录 1 部分压力单位的换算关系	280
附录 2 热电偶分度表	280
附录 3 热电阻分度表	282

参考文献	284
-------------------	------------

1 自动控制系统概述

在工业生产过程中采用自动控制装置，部分或全部地取代人工操作，使生产在不同程度上自动地进行，这种用自动化装置来操纵和管理生产过程的办法，称为工业自动化。工业自动化一般主要包括自动检测、自动控制、自动保护、自动操纵等方面的内容。

本章首先介绍自动控制的一些基本概念，如系统组成、工作原理、动态及反馈，以及过渡过程的品质指标、传递函数等，为后面章节的学习提供必要的基础知识。

1.1 自动控制系统的组成

自动控制系统是在人工控制的基础上产生和发展起来的。为对自动控制有一个更加清晰的了解，下面对人工操作与自动控制作一个对比与分析。

图 1-1 所示是一个液体贮槽，在生产中常用来作为一般的中间容器或成品罐。从前一个工序出来的物料连续不断地流入槽中，而槽中的液体又送至下一工序进行加工或包装。当流入量 Q_i （或流出量 Q_o ）波动时会引起槽内液位的波动，严重时会出现溢出或抽空。解决这个问题的最简单办法，是以贮槽液位为操作指标，以改变出口阀门开度为控制手段，如图 1-1 所示。当液位上升时，操作人员可以将出口阀门开大，液位上升越多，阀门开得越大；反之，当液位下降时，则关小出口阀门，液位下降越多，阀门关得越小。归纳起来，操作人员所进行的工作有以下三个方面。

① 检测 用眼睛观察玻璃管液位计（测量元件）中液位的高低。

② 运算、命令 大脑根据眼睛看到的液位高度，与要求的液位值进行比较，得出偏差的大小和正负，然后根据操作经验，经思考、决策后发出命令。

③ 执行 根据大脑发出的命令，用手去改变阀门开度，以改变出口流量 Q_o ，使液位保持在所需高度上。

眼、脑、手三个器官，分别担负了检测、运算/决策和执行三个任务，来完成测量偏差、操纵阀门和纠正偏差的全过程。

若采用一套自动控制装置来取代上述人工操作，就称为液位自动控制。自动化装置和液体贮槽一起，构成了如图 1-2 所示的自动控制系统。

为以后叙述的方便，下面结合图 1-2 的例子介绍几个常用术语。

① 被控对象 需要实现控制的设备、机械或生产过程称为被控对象，简称对象，如图 1-2 中的液体贮槽。

② 被控变量 对象内要求保持一定数值（或按某一规律变化）的物理量称为被控变量，如图 1-2 中的液位。

③ 控制变量（操纵变量） 受执行器控制，用以使被控变量保持一定数值的物料或能量称为控制变量或操纵变量，如图 1-2 所示的出料流量。

④ 干扰（扰动） 除控制变量（操纵变量）以外，作用于对象并引起被控变量变化的一切其



图 1-1 液位人工控制

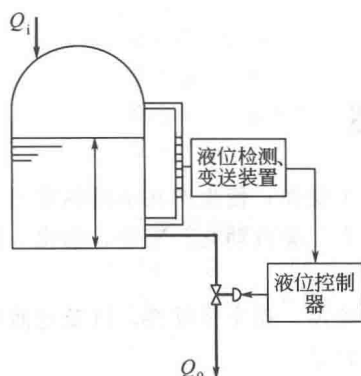


图 1-2 液位自动控制

他因素称为干扰，如图 1-2 中的流入贮槽的液体流量。

⑤ 设（给）定值 工艺规定被控变量所要保持的数值，如图 1-2 中的液位高度。

⑥ 偏差 偏差本应是设定值与被控变量的实际值之差，但能获取的信息是被控变量的测量值而非实际值，因此，在控制系统中通常把设定值与测量值之差定义为偏差。

图 1-2 所示的液位自动控制系统可用图 1-3 的方块图来表示。每个方块表示组成系统的一个环节，两个方块之间用一条带箭头的线条表示其相互间的信号联系，箭头表示进入还是离开这个方块，线上的字母表示相互间的作用信号。

由图 1-3 可见，图 1-2 所示的液位自动控制系统由控制器（含比较环节）、执行器、被控对象及测量、变送环节四部分

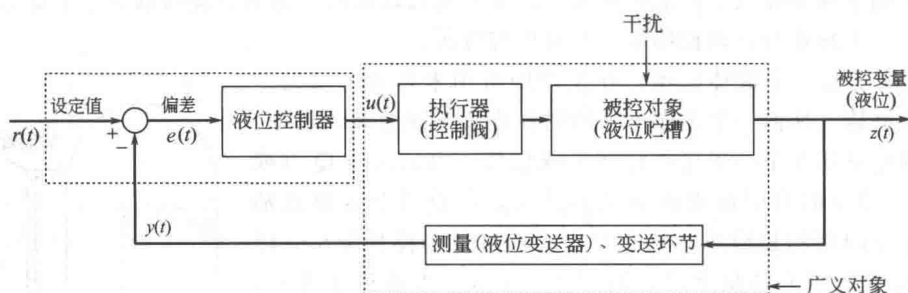


图 1-3 自动控制系统方块图

组成。事实上，图 1-3 所示的结构也就是一个典型的简单控制系统的基本组成。因此，一个控制系统的基本组成环节为控制器、执行器、测量/变送环节及被控对象，各部分的功能如下。

① 测量变送环节 它测量被控变量 $z(t)$ ，并将被控变量转换为特定的信号 $y(t)$ 。

② 控制器 它接受来自于变送器的信号，与设定值进行比较得出偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$ ，并根据一定的规律进行运算，然后将运算结果用特定的信号发送出去。比较环节是控制器的一个组成部分。

③ 执行器 它根据控制器送来的信号相应地改变控制变量的流量，以达到控制被控变量的目的。

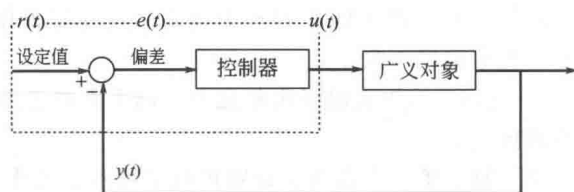


图 1-4 控制器与广义对象之间的关系

图中执行器、被控对象及测量、变送环节统称为广义对象，则图 1-3 又可用图 1-4 所示的方块图表示。

1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。按系统的反馈形式可以分为开环控制系统与闭环控制系统；按系统的结构形式可以分为简单控制系统与复杂控制系统；按系统的给定值可以分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

1.2.1 定值控制系统

给定值恒定不变的闭环控制系统称为定值控制系统。在生产过程中，若工艺要求被控变量为恒定值，那么，就需要采用定值控制系统。图 1-2 所示的液位控制系统就是定值控制系统。其目

的是为了使贮槽内的液位保持恒定。

1.2.2 随动控制系统

随动控制系统又称自动跟踪系统，这类系统的特点是给定值不断变化，而这种变化不是预先规定好的，也就是说，给定值是随机变化的。随动控制的目的是使被控变量准确、快速地跟随给定值的变化。例如军事领域的导弹制导系统、航空领域的导航雷达系统等都是随动控制的例子。在化工生产中，比值控制系统就属于随动控制系统。

1.2.3 程序控制系统

这类控制系统的给定值是变化的，但它是一个已知的时间函数，即被控变量按一定的时间程序变化，如图 1-5 所示。

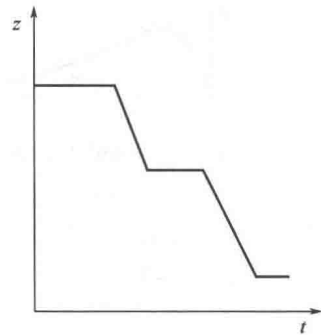


图 1-5 程序控制曲线

1.3 自动控制系统的过渡过程和品质指标

1.3.1 系统的稳态和动态

① 稳态 被控变量不随时间变化的平衡状态称为系统的稳态。在这种状态下，自控系统的输入和输出均保持原有的状态不变，整个控制系统处于相对稳定的平衡状态，系统各组成环节的输入、输出信号也都处于相对的静止状态，即各环节信号的变化率为零。此时输入与输出的关系称为稳态特性。

这里所谓的稳态并不是指物料不流动或能量不交换，而是指物料的流动和能量的交换达到了动态平衡。如图 1-2 所示的液位贮槽的流入量等于贮槽的流出量时，贮槽的液位就达到了相对平衡状态，即所谓的系统处于稳态。

② 动态 被控变量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。在这种状态下，系统各环节的输入、输出信号都处于变化的过程之中。此时输入与输出的关系称为动态特性。此时由于系统各环节的输入是变化的，所以系统的被控变量及各环节的输出信号也是变化的。

在定值控制中，扰动不断使被控变量偏离设定值，控制作用也就不断克服其影响，系统总是处于动态过程中。同样，在随动或程序控制系统中，设定值不断变化，系统也总是处于动态过程中。所以，在自动控制中，了解系统的动态特性比了解系统的稳态特性更为重要。

1.3.2 系统的过渡过程

自动控制的目的是使被控变量保持在设定值上。但在实际生产过程中，总是会有干扰存在，使系统偏离平衡状态，处于动态之中，而控制作用又使系统回复到平衡状态。系统从偏离平衡的状态回复到平衡状态的过程称为过渡过程。了解过渡过程中被控变量的变化规律对于研究自动控制系统是十分重要的。

被控变量的变化规律取决于系统的特性和作用于系统的干扰形式。在生产中，出现的干扰是没有固定形式的，多数属于随机性质。在分析和设计控制系统时，为了方便，常选择一些定型的干扰形式，其中常用的是图 1-6 所示的阶跃干扰。采用阶跃干扰的形式来研究自动控制系统是因为考虑到这种形式的干扰比较突然，它对被控变量的影响较大。如果一个控制系统能够有效地克服这种类型的干扰，那么对于其他较缓和的干扰也能较好地克服。同时，这种干扰的形式简单，容易实现，便于分析、实验和计算。

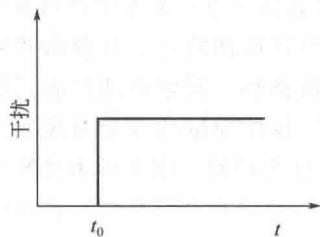


图 1-6 阶跃干扰

一般来说，自动控制系统在阶跃干扰作用下的过渡过程有图 1-7 所示的几种基本形式。

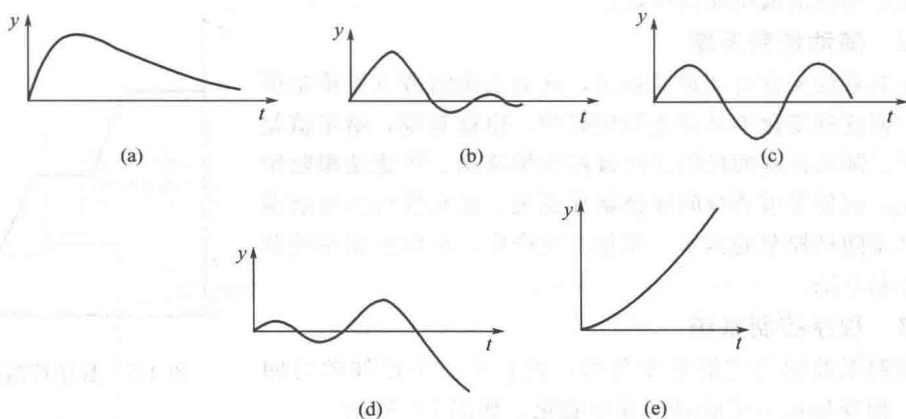


图 1-7 过渡过程的几种形式

① 非周期衰减过程 被控变量在给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，这种过渡过程形式为非周期衰减过程，如图 1-7 (a) 所示。

② 衰减振荡过程 被控变量上下在给定值附近波动，但幅度逐渐减小，最后稳定在某一数值上，这种过渡过程形式为衰减振荡过程，如图 1-7 (b) 所示。

③ 等幅振荡过程 被控变量在给定值附近来回波动，且波动幅度保持不变，这种情况称为等幅振荡过程，如图 1-7 (c) 所示。

④ 发散振荡过程 被控变量来回波动，且波动幅度逐渐变大，即偏离给定值越来越远，这种情况称为发散振荡过程，如图 1-7 (d) 所示。

⑤ 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，如图 1-7 (e) 所示。

以上过渡过程的五种形式可以归纳为三类（参照图 1-7）。

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，由于这种过渡过程变化较慢，被控变量在控制过程中长时间地偏离给定值，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)、(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，而且逐渐远离给定值，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。

1.3.3 描述系统过渡过程的品质指标

控制系统的过渡过程形式是衡量控制系统品质的依据。由于在多数情况下，都希望得到衰减

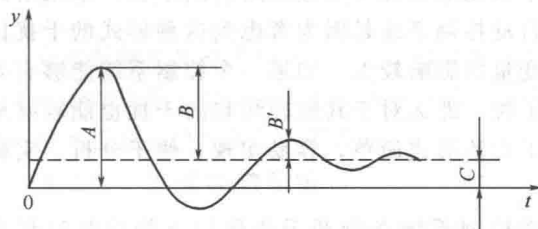


图 1-8 过渡过程的品质指标

振荡过程，所以取衰减振荡的过渡过程形式来讨论控制系统的品质指标。假定自动控制系统在阶跃输入作用下，被控变量的变化曲线如图 1-8 所示。图上横坐标为时间，纵坐标为被控变量。假定在时间 $t=0$ 之前，系统稳定，且被控变量等于给定值，在 $t=0$ 时刻，外加阶跃干扰作用，系统的被控变量开始按衰减振荡规律变

化, 然后逐渐稳定在 C 值上。

对于如图 1-8 所示的过渡过程一般采用下列品质指标来评价控制系统的质量。

1.3.3.1 最大偏差或超调量

最大偏差是指在过渡过程中, 被控变量偏离给定值的最大数值。在衰减振荡过程中, 最大偏差就是第一个波的峰值, 在图 1-8 中以 A 表示。最大偏差表示系统瞬间偏离给定值的最大程度。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、触媒烧结温度极限等, 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给定值的程度。在图 1-8 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给定值, 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。

$$\sigma = \frac{B}{C} \times 100\% \quad (1-1)$$

1.3.3.2 衰减比 n

衰减比指前后相邻两个峰值之比。在图 1-8 中, 衰减比 $n=B/B'$ 。若 $n>1$, 过渡过程是衰减振荡过程; 若 $n=1$, 过渡过程是等幅振荡过程; 若 $n<1$, 过渡过程是发散振荡过程。

要满足控制要求, n 必须大于 1。若 n 虽然大于 1, 但只比 1 稍大一点, 则过渡过程接近于等幅振荡过程, 由于这种过程不易稳定、振荡过于频繁, 一般不采用。如果 n 很大, 则又太接近于非振荡过程, 过渡过程过于缓慢, 通常这也是不希望的。一般 n 取 $(4:1) \sim (10:1)$ 之间为宜。因为衰减比在 $(4:1) \sim (10:1)$ 之间时, 过渡过程开始阶段的变化速度比较快, 被控变量在同时受到干扰作用和控制作用的影响后, 能比较快地达到一个峰值, 然后马上下降, 又较快地达到一个低峰值, 而且第二个峰值明显低于第一个峰值。当操作人员看到这种现象后, 心里就比较踏实, 因为操作人员知道被控变量再振荡数次后就会很快稳定下来不会出现太高或太低的现象, 更不会远离给定值以致造成事故。尤其在反应比较缓慢的情况下, 衰减振荡过程的这一特点尤为重要。对于这种系统, 如果过渡过程接近于非振荡的衰减过程, 操作人员很可能在较长时间内, 都只看到被控变量一直上升(或下降), 就会怀疑被控变量会继续上升(或下降)不止, 由于这种焦急的心情, 很可能会进行干预。假若一旦出现这种情况, 那么就等于给系统施加了人为的干扰, 有可能使被控变量离开给定值更远, 使系统处于难以控制的状态。所以, 选择衰减振荡过程并规定衰减比在 $(4:1) \sim (10:1)$ 之间, 是根据多年的实践经验总结得出的结论。

1.3.3.3 余差

过渡过程终了时, 被控变量新稳态值与设定值之差称为余差。或者说余差就是过渡过程终了时存在的残余偏差, 在图 1-8 中用 C 表示。给定值是生产的技术指标, 所以, 被控变量越接近给定值越好, 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, 如一般贮槽的液位调节要求就不高, 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。

1.3.3.4 过渡时间

从干扰信号作用开始, 到系统重新建立平衡为止, 过渡过程所经历的时间称为过渡时间。从理论上讲, 要完全达到新的平衡状态需要无限长的时间。实际上, 当被控变量接近于新稳态值的

$\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 的偏差范围内且不再越出时为止所经历的时间, 可计为过渡时间。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; 反之, 过渡时间太长, 前一个干扰引起的过渡过程尚未结束, 后续干扰就已经出现, 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。

1.3.3.5 振荡周期或频率

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。一般希望振荡周期短一些。

除上述品质指标外, 还有一些次要的品质指标, 其中振荡次数, 是指在过渡过程内被控变量振荡的次数。所谓“理想过渡过程两个波”, 就是指过渡过程振荡两次就能稳定下来, 它在一般情况下, 可认为是较为理想的过程。另外, 上升时间也是一个品质指标, 它是指干扰开始作用起至第一个波峰时所需要的时间, 显然, 上升时间以短一些为好。

综上所述, 过渡过程的品质指标主要有: 最大偏差、衰减比、余差、过渡时间等。这些指标在不同的系统中各有其重要性。因此, 应根据具体情况分清主次, 区别轻重, 对那些对生产过程有决定性意义的主要品质指标应优先予以保证。另外, 对一个系统提出的品质要求和评价一个控制系统的质量, 都应该从实际需要出发, 不应过分偏高偏严, 否则就会造成人力物力的巨大浪费, 有时甚至根本无法实现。

例 1-1 某换热器的温度调节系统在单位阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图 1-9 所示。试分别求出最大偏差、余差、衰减比、振荡周期和过渡时间 (给定值为 200°C)。

- 解** (1) 最大偏差: $A = 230 - 200 = 30 (^{\circ}\text{C})$ 。
(2) 余差 $C = 205 - 200 = 5 (^{\circ}\text{C})$ 。
(3) 第一个波峰值 $B = 230 - 205 = 25 (^{\circ}\text{C})$, 第二个波峰值 $B' = 210 - 205 = 5 (^{\circ}\text{C})$, 衰减比 $n = 25 : 5 = 5 : 1$ 。
(4) 振荡周期为同向两波峰之间的时间间隔, 故周期 $T = 20 - 5 = 15 (\text{min})$ 。

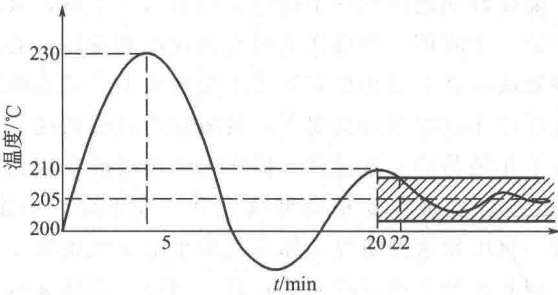


图 1-9 温度控制系统过渡过程曲线

(5) 过渡时间与规定的被控变量限制范围大小有关, 假定被控变量进入设定值 $\pm 2\%$ 的偏差范围内就可以认为过渡过程已经结束, 那么限制范围为 $200 \times (\pm 2\%) = \pm 4 (^{\circ}\text{C})$, 这时, 可在新稳态值 (205°C) 两侧以宽度为 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 画一区域, 图 1-9 中以画有阴影线的区域表示, 只要被控变量进入这一区域且不再越出, 过渡过程就可以认为已经结束。因此, 从图上可以看出, 过渡时间为 22min 。

1.4 传递函数和方块图

1.4.1 问题的引入

分析和研究控制系统, 实际上就是要分析、研究组成系统的各环节的特性, 以及由这些环节组合而成的系统的特性。系统特性也就是系统输入与输出之间的关系。在知道系统特性之后, 就可以知道在以某一规律变化的输入的作用下, 系统的输出 (即被控变量) 是怎样变化的、是否稳定、最终稳态值是多少、是否符合生产要求等问题。了解这些问题, 对于设计、投运控制系统是非常重要的。

本书所研究的范围仅限于线性系统, 即组成系统的各环节的输入与输出之间为线性关系。如果系统组成如图 1-3 所示, 图中所示的各环节特性都可用线性微分方程来描述, 则在已知各环节

特性的基础上, 联立求解微分方程组, 就可得到整个控制系统的特性。

但求解表征其特性的微分方程或微分方程组是比较繁琐的, 而且在分析多个单元或环节组成的复杂系统时很不方便。采用拉普拉斯变换可以将微分方程转化为代数方程以便于运算。而传递函数及方块图变换则是在拉普拉斯变换的基础上, 为了使自控系统的分析更为方便而引入的一种概念和分析方法。

1.4.2 拉普拉斯变换

1.4.2.1 拉普拉斯变换的定义

拉普拉斯变换将以时间 t 为自变量的函数 $f(t)$ 转换为以复数 s 为自变量的函数 $F(s)$ 。其定义如下: 若函数 $f(t)$ 在 s 复数平面是收敛的, 则定义

$$F(s) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (1-2)$$

$F(s)$ 称为函数 $f(t)$ 的象函数, $f(t)$ 称为 $F(s)$ 的原函数。

不难验证, 只要在 $t \rightarrow \infty$ 的过程中, $|f(t)|$ 项多按指数式 $e^{s_0 t}$ (s_0 为有限实数) 增长, 则总可以选取实部足够大的 s 使积分收敛。

1.4.2.2 常用函数的拉普拉斯变换式

$$\textcircled{1} \text{ 阶跃函数 } f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A, & t \geq 0 \end{cases} \text{ 的象函数 根据定义} \quad (1-3)$$

$$F(s) = \int_0^{\infty} A e^{-st} dt = \frac{A}{s} \quad (1-4)$$

$$\text{对于单位阶跃函数, 即 } A=1 \text{ 时} \quad F(s) = \frac{1}{s} \quad (1-5)$$

$$\textcircled{2} \text{ 斜坡函数 } f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ At, & t \geq 0 \end{cases} \text{ 的象函数 根据定义}$$

$$F(s) = \int_0^{\infty} At e^{-st} dt = -\frac{A}{s} [t e^{-st}] \Big|_0^{\infty} + \frac{A}{s} \int_0^{\infty} e^{-st} dt = \frac{A}{s^2} \quad (1-6)$$

$$\text{当 } A=1 \text{ 时} \quad F(s) = \frac{1}{s^2} \quad (1-7)$$

$$\textcircled{3} \text{ 指数函数 } f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ e^{\lambda t}, & t \geq 0 \end{cases} \text{ 的象函数 根据定义} \quad (1-8)$$

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{\lambda t} e^{-st} dt = \frac{1}{s - \lambda} \quad (1-9)$$

1.4.2.3 拉普拉斯变换的性质

(1) 微分性质

导数 $\frac{df(t)}{dt}$ 的拉普拉斯变换式为

$$L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0) \quad (1-10)$$

若 $f(0)=0$, 则

$$L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) \quad (1-11)$$

同理, 若 $f(0)=f'(0)=\dots=f^{(n)}(0)=0$, 则

$$L\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n F(s) \quad (1-12)$$

证明 根据定义

$$\begin{aligned} L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] &= \int_0^{\infty} \frac{df(t)}{dt} e^{-st} dt = f(t) e^{-st} \Big|_0^{\infty} + s \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) e^{-st} - f(0) + sF(s) = sF(s) - f(0) \end{aligned} \quad (1-13)$$

(2) 积分性质

积分 $\varphi(t) = \int f(t) dt$ 的拉普拉斯变换式为

$$L[\varphi(t)] = L\left[\int f(t) dt\right] = \frac{1}{s} F(s) \quad (1-14)$$

证明 对积分式两边同时求导后, 进行拉普拉斯变换, 并由式 (1-10) 得

$$L[f(t)] = F(s) = L[\varphi'(t)] = sL[\varphi(t)] - \varphi(0) \quad (1-15)$$

由于

$$\varphi(0) = \int_0^{0^+} f(t) dt = 0 \quad (1-16)$$

所以

$$L[f(t)] = F(s) = L[\varphi'(t)] = sL[\varphi(t)]$$

(3) 平移性质

延迟函数 $f(t-\tau)$ [$t < \tau$ 时, $f(t-\tau) = 0$] 的拉普拉斯变换式为

$$L[f(t-\tau)] = e^{-s\tau} F(s) \quad (1-17)$$

证明 根据定义

$$L[f(t-\tau)] = \int_0^{\infty} f(t-\tau) e^{-st} dt \quad (1-18)$$

令 $\xi = t - \tau$; 由于 $t < \tau$ 时, $f(t-\tau) = 0$, 式 (1-18) 可表示为

$$L[f(t-\tau)] = \int_0^{\infty} f(\xi) e^{-s(\xi+\tau)} d\xi = e^{-s\tau} \int_0^{\infty} f(\xi) e^{-s\xi} d\xi = e^{-s\tau} F(s) \quad (1-19)$$

(4) 线性性质

函数 $Af(t)$ 及函数 $f_1(t) + f_2(t)$ 的拉普拉斯变换式为

$$L[Af(t)] = AF(s) \quad (1-20)$$

$$L[f_1(t) + f_2(t)] = F_1(s) + F_2(s) \quad (1-21)$$

(5) 端点性质

$$\text{终值} \quad f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) \quad (1-22)$$

$$\text{初值} \quad f(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s) \quad (1-23)$$

根据上述讨论, 采用拉普拉斯变换可以方便地将微分方程转换为代数方程。其简单的代换关系如下。

① 用 $F(s)$ 代换 $f(t)$ [$f(t) \rightarrow F(s)$]。

② 用 s 代换 $\frac{d}{dt}$, 或用 s^n 代换 $\frac{d^n}{dt^n}$ ($\frac{d}{dt} \rightarrow s; \frac{d^n}{dt^n} \rightarrow s^n$)。