



普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

过程仪表及自动化

马修水 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

过程仪表及自动化

主 编 马修水

副主编 关宏伟 祝连庆 钟伟红



机械工业出版社

本书内容包括五部分。第一部分介绍了工业过程控制的基本概念,包括自动控制系统的组成、自动控制系统过渡过程及品质指标、工艺管道及控制流程图、过程对象特性的参数等。第二部分系统地介绍了压力、流量、温度、物位检测仪表及传感器。第三部分具体介绍了显示仪表、控制器及执行器。第四部分简要介绍了各种控制方法,包括单回路控制、串级控制、前馈控制、比值控制、计算机控制系统等。第五部分介绍了化学、化工典型生产过程的控制实例。

本书可作为医药工程、生物工程、高分子材料与工艺、化学工程与工艺、生物技术专业开设的“过程控制基础”课程的教材,也可供冶金工程、无机非金属材料工程、给水排水工程、建筑环境与设备工程、环境工程、热能与动力工程等相关专业的学生使用,还可以供相关领域的工程技术人员参考。

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

过程仪表及自动化/马修水主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 10
普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-39831-8

I. ①过… II. ①马… III. ①化工仪表—高等学校—教材②化工过程—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TQ056

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 224498 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 王寅生 刘丽敏
版式设计:霍永明 责任校对:张媛 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 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·15 印张·371 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-39831-8
定价:32.00 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

随着科学技术的进步,各类生产技术不断得到改进和提高,生产过程连续化、大型化、复杂化不断强化,广大的生产工艺技术人员需要学习和掌握必要的检测技术和自动化方面的知识,这是现代工业生产实现高效、优质、安全、低耗的基本条件和重要保证。随着高等教育大众化及高等学校的扩招,传统的研究型大学和研究型大学化学工程与工艺等非自动化类专业的“过程控制工程”或“过程自动化及仪表”课程的教材已不能适应应用型本科人才培养的需要,为此,我们结合宁波市生物医药工程应用型人才培训基地建设,结合医药工程、生物工程、高分子材料与工艺、化学工程与工艺、生物技术专业开设的“过程控制基础”课程的教学,在教学研究与实践的基础上,编写了适合非自动化专业的《过程仪表及自动化》教材,本教材除供上述专业学生使用外,还可以供冶金工程、无机非金属材料工程、给水排水工程、建筑环境与设备工程、环境工程、热能与动力工程等专业学生使用。本书在编写过程中,注重与非自动化专业课程之间知识点的衔接,注重对基本概念、基本理论的介绍,注重应用型本科学生的特点,以够用为原则,强调工程的概念,从工程应用的角度出发来组织教学内容。同时,注重近年来本领域理论和技术的发展,根据本科教学需要,有选择性地部分新方法和新技术编入本教材中。

全书内容包括五部分。第一部分介绍了工业过程控制的基本概念,包括自动控制系统的组成,自动控制系统过渡过程及品质指标、工艺管道及控制流程图、过程对象特性的参数等。第二部分系统地介绍了压力、流量、温度、物位检测仪表及传感器。第三部分具体介绍了显示仪表、控制器及执行器。第四部分简要介绍了各种控制方法,包括单回路控制、串级控制、前馈控制、比值控制、计算机控制系统等。第五部分介绍了化学、化工典型生产过程控制的实例,使学生能够进一步运用基础知识解决过程控制的实际问题。

本书由浙江大学宁波理工学院马修水教授担任主编。马修水编写了第1章的1.1节、第2章的2.1~2.3节;李文涛编写了第1章的1.2节、第5章;钟伟红编写了第3章及第4章的4.1~4.4节;祝连庆编写了第4章的4.5节;关宏伟编写了第6章及第8章的8.1, 8.3~8.5节;李园编写了第8章的8.2节;李英道编写了第7章;马颀编写了第2章的2.4、2.5节及附录。全书由马修水统稿。

本书为宁波市生物医药工程应用型人才培训基地建设项目研究成果之一,在编写过程中得到浙江大学宁波理工学院教务处副处长沈波副教授的指导和帮助,浙江大学宁波理工学院生物与化学工程学院沈昊宇教授、尚龙安教授认真审阅了本书的编写大纲,并提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中,还参阅了许多专家的著作、教材和论文,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,出现差错在所难免,恳请广大读者批评指正(E-mail: mxsh63@yahoo. com. cn)。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工业过程控制的基本概念	1
1.1.1 过程自动化及仪表发展概述	1
1.1.2 自动控制系统的组成及框图	2
1.1.3 自动控制系统的分类	5
1.1.4 自动控制系统的过渡过程及品质指标	6
1.1.5 工艺管道及控制流程图	9
1.2 过程特性	13
1.2.1 过程特性的类型	13
1.2.2 过程的数学描述	14
1.2.3 过程对象特性的参数	16
思考题与习题	19
第 2 章 测量仪表及传感器	21
2.1 概述	21
2.1.1 测量过程与测量误差	21
2.1.2 传感器与变送器	22
2.1.3 仪表的性能指标	22
2.1.4 工业仪表的分类	25
2.1.5 仪表防爆的基本知识	26
2.2 压力检测及仪表	29
2.2.1 压力单位及测压仪表	30
2.2.2 弹性式压力计	31
2.2.3 电气式压力计	32
2.2.4 压力计的选用及安装	38
2.3 流量检测及仪表	40
2.3.1 概述	40
2.3.2 差压式流量计	41
2.3.3 转子流量计	44
2.3.4 椭圆齿轮流量计	45
2.3.5 涡轮流量计	46
2.3.6 电磁流量计	47
2.3.7 涡街流量计	48
2.3.8 质量流量计	49
2.3.9 流量仪表的选用	50
2.4 温度检测及仪表	51
2.4.1 温标	51

2.4.2 温度检测的主要方法	53
2.4.3 热电偶温度计	53
2.4.4 热电阻温度计	59
2.4.5 其他温度检测方法及仪表	62
2.4.6 测温元件的安装	63
2.5 物位检测及仪表	64
2.5.1 物位检测的主要方法	64
2.5.2 静压式物位检测	65
2.5.3 浮力式物位检测	68
2.5.4 电气式物位检测	69
2.5.5 核辐射物位计	70
2.5.6 声学式物位检测	71
思考题与习题	71
第3章 显示仪表	73
3.1 模拟显示仪表	73
3.1.1 自动电子电位差计	74
3.1.2 自动电子平衡电桥	76
3.2 数字显示仪表	78
3.2.1 数字显示仪表分类	79
3.2.2 数字显示仪表的主要技术指标	79
3.2.3 数字显示仪表的基本组成	80
3.2.4 XMZ 系列单回路数字显示仪表	81
3.3 图像显示仪表	82
3.3.1 无纸记录仪	82
3.3.2 虚拟显示仪表	83
思考题与习题	85
第4章 控制器	86
4.1 概述	86
4.2 基本控制规律及其对系统过渡过程的影响	87
4.2.1 双位控制	87
4.2.2 比例控制	89
4.2.3 积分控制	91
4.2.4 微分控制	92
4.3 模拟式控制器	94
4.3.1 模拟式控制器的基本结构	94
4.3.2 DDZ-III 型电动单元控制器	94
4.4 数字式控制器	97
4.4.1 数字式控制器的主要特点	97
4.4.2 数字式控制器的基本构成	98
4.5 可编程序控制器	105
4.5.1 概述	105
4.5.2 可编程序控制器的基本组成	107
4.5.3 可编程序控制器的编程语言	110

4.5.4 应用举例	114
思考题与习题	117
第5章 执行器	119
5.1 概述	119
5.1.1 执行器的作用	119
5.1.2 执行器的构成	119
5.1.3 执行器的分类及特点	119
5.1.4 执行器的作用方式	120
5.2 执行机构	120
5.2.1 气动执行机构	120
5.2.2 电动执行机构	122
5.3 控制阀	122
5.3.1 控制阀结构	122
5.3.2 控制阀类型	123
5.4 数字阀和智能控制阀	125
5.4.1 数字阀	125
5.4.2 智能控制阀	126
思考题与习题	126
第6章 控制方法	127
6.1 单回路控制	127
6.1.1 对象特性	127
6.1.2 被控变量及操纵变量的选择	129
6.1.3 滞后对控制系统的影响	129
6.1.4 调节阀流量特性的选择	130
6.1.5 阀门定位器的选用	131
6.1.6 控制器正、反作用的选择	132
6.1.7 一些常见的控制系统分析	132
6.2 串级控制	134
6.2.1 串级控制系统的基本概念及工作过程	134
6.2.2 串级控制系统的特点	135
6.2.3 串级控制系统的设计原则	136
6.3 前馈控制	137
6.3.1 前馈控制的基本概念	137
6.3.2 前馈控制模型	137
6.3.3 前馈-反馈控制	140
6.4 大纯滞后过程的控制	141
6.5 具有反向响应过程特性的控制	142
6.6 比值控制	145
6.6.1 比值控制的目的	145
6.6.2 几种常见的比值控制方案	145
6.6.3 比值控制系统注意事项	147
6.6.4 数字比值控制系统	148
6.7 均匀控制	148

6.7.1 均匀控制的目的和任务	148
6.7.2 均匀控制方案的实施	149
6.8 选择性控制	149
6.8.1 用于设备软保护的选择性控制	149
6.8.2 其他选择性控制系统	151
思考题与习题	152
第7章 计算机控制系统	153
7.1 集散控制系统 (DCS)	153
7.1.1 DCS 概述	153
7.1.2 DCS 的网络结构	154
7.1.3 现场控制站	155
7.1.4 操作站	157
7.1.5 DCS 的软件	157
7.2 现场总线控制系统	159
7.2.1 现场总线概述	159
7.2.2 几种主要现场总线简介	161
7.3 监控软件	173
7.3.1 概述	173
7.3.2 DCS 监控层应用功能设计	175
思考题与习题	177
第8章 生产过程控制	178
8.1 流体输送设备控制	178
8.1.1 泵的控制	178
8.1.2 压缩机的控制	181
8.1.3 防喘振控制系统	182
8.2 传热设备控制	186
8.2.1 两侧均无相变的换热器控制方案	186
8.2.2 载热体进行冷凝的加热器自动控制	187
8.2.3 冷却剂进行汽化的冷却器自动控制	188
8.3 精馏塔的自动控制	190
8.3.1 精馏塔的控制要求和扰动分析	190
8.3.2 精馏塔被控变量的选择	192
8.3.3 精馏塔的控制方案	194
8.4 化学反应器的控制	199
8.4.1 反应器的控制要求及被控变量的选择	199
8.4.2 釜式反应器的控制	201
8.4.3 固定床反应器的控制	203
8.4.4 流化床反应器的控制	204
8.4.5 管式裂解反应器的控制	205
8.4.6 鼓泡床反应器的自动调节	210
8.5 生化过程控制	213
8.5.1 常用生化过程控制	213
8.5.2 青霉素发酵过程控制	215

8.5.3 啤酒发酵过程控制	216
8.5.4 合成氨装置过程控制	217
思考题与习题	221
附录	222
附录 A 常用压力表规格及型号	222
附录 B 铂热电阻分度表	223
附录 C 铜热电阻分度表	225
附录 D 铂铑 10-铂热电偶分度表	226
附录 E 镍铬-镍硅热电偶分度表	229
参考文献	232

第1章 绪 论

本章介绍了工业过程控制的发展历程及基本概念，重点介绍自动控制系统的组成及框图、自动控制系统的过渡过程及品质指标、工艺管道及控制流程图、过程的数学描述等。

1.1 工业过程控制的基本概念

1.1.1 过程自动化及仪表发展概述

自动化技术可以追溯到古代，如指南车的发明，至于工业上的应用，一般以瓦特的蒸汽机调速器为起点。工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的，那时候的自动化装置是机械式的。随着电动、液动、气动动力源的应用，电动、液动、气动的控制装置为工业自动化提供了新的控制手段。

第二次世界大战前后，控制理论有了很大的发展。电信事业的发展导致了 Nyquist (1932) 频率域分析技术和稳定判据的产生。Bode (1945) 的进一步研究开发了易于实际应用的 Bode (伯德) 图。1948 年，Evans 提出了一种易于工程应用的求解闭环特征方程根的根轨迹分析方法。至此，自动控制技术开始形成一套完整的、以传递函数为基础、在频率域对单输入单输出控制系统进行分析与设计的理论，就是今天所谓的经典控制理论。

20 世纪 60 年代，控制理论迅猛发展，这是以状态空间方法为基础、以极小值原理 (Pontryagin, 1962) 和动态规划方法 (Bellman, 1963) 等最优控制理论为特征的，以采用 Kalman 滤波器对随机干扰下的线性二次型系统 (Kalman, 1960) 滤波标志了时域方法的完成。现代控制理论中最先研究的是多输入多输出系统，建立了可控性、可观性、实现理论、分解理论等描述控制系统本质的基本理论，使控制由一类工程设计方法提高成为一门新的科学，并在航空、航天、制导等领域取得了辉煌的成果。

从 20 世纪 70 年代开始，为了解决大规模复杂系统的优化与控制问题，现代控制理论和系统理论相结合，逐步发展成大系统理论 (Mohammad, 1983)，其核心思想是系统的分解与协调，多级递阶优化与控制 (Mesarovic, 1970) 正是应用大系统理论的典范，实际上，大系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想与框架，除了高维线性系统之外，对其他复杂系统仍然束手无策。

从自动控制系统结构来看，已经经历了基地式仪表控制系统、电动单元组合模拟式仪表控制系统、集中式数字控制系统、集散控制系统 (DCS) 4 个阶段。

20 世纪 50 年代是以基地式控制器等组成的控制系统，如自力式温度控制器、就地式液位控制器等，它们的功能往往限于单回路控制。

20 世纪 60 年代出现了单元组合仪表组成的控制系统，单元组合仪表有电动和气动两大类。所谓单元组合，就是把自动控制系统仪表按功能分成若干单元，依据实际控制系统结构的需要进行适当的组合。单元组合仪表使用方便、灵活。单元组合仪表之间用标准统一信号

联系。气动仪表（QDZ 系列）为 20 ~ 100kPa 气压信号。电动仪表信号为 0 ~ 10mA 直流信号（DDZ-II 系列）和 4 ~ 20mA 直流信号（DDZ-III 系列）。单元组合仪表已延续 50 多年，目前国内还在广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统，其控制策略主要是 PID 控制和常用的复杂控制系统（例如串级、均匀、比值、前馈、分程、选择性控制等）。

20 世纪 70 年代出现了计算机控制，最初是用直接数字控制（DDC）实现集中控制，代替常规控制仪表。由于集中控制的固有缺陷，未能普及与推广就被集散控制系统（DCS）所替代。DCS 在硬件上将控制回路分散化，数据显示、实时监督等功能集中化，有利于安全平稳生产。

20 世纪 80 年代以后出现的二级优化控制，在 DCS 的基础上实现了先进控制和优化控制。在硬件上采用上位机和 DCS 或电动单元组合仪表相结合，构成二级计算机优化控制。随着计算机及网络技术的发展，DCS 出现了开放式系统，实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统（CIPS）。同时，以现场总线为标准，实现以微处理器为基础的现场仪表与控制系统之间进行全数字化、双向和多站通信的现场总线网络控制系统（FCS），它将对控制系统结构带来革命性变革，开辟控制系统的新纪元。

当前自动控制系统发展的一些主要特点是：生产装置实施先进控制成为发展主流；过程优化受到普遍关注；传统的 DCS 正在走向用以太网作为高速现场总线框架的主传；综合自动化系统（CIPS）是发展方向。

1.1.2 自动控制系统的组成及框图

1. 控制系统举例

【例 1-1】图 1-1 所示为液位人工控制系统。从维持生产平稳考虑，工艺上希望罐内的液位 h 能维持在所希望的位置 h_{sp} 上。液位 h 是需要控制的工艺变量，称为被控变量； h_{sp} 为被控变量的控制目标，称为给定值或设定值。显然，当进水量 Q_i 或出水量 Q_o 波动时，都会使罐内的液位发生变化。现假定控制出水量 Q_o 维持液位的恒定，则称 Q_o 为操纵变量。而进水量 Q_i 是造成被控变量产生不期望波动的原因，称为扰动。若由操作工来完成这一控制任务，所要做的工作如下。

1) 检测：用眼睛观察液位计实际液位的指示值，并通过神经系统告诉大脑。

2) 运算修正：通过大脑对眼睛观测到的实际液位值与给定值进行比较，根据偏差的大小和方向，并结合操作经验发出命令。

3) 执行：根据大脑发出的控制指令，通过手去改变出水阀门开度，用改变 Q_o 来控制液位。

4) 反复执行上述操作，直到将液位控制到其给定值为止。

上述操作工通过眼、脑、手相互配合完成液位的控制过程就是一个典型的人工控制过程，操作工与所控制的液罐设备构成了一个人工控制系统。

显然，人工控制难以满足现代工业对控制精度的要求，如果能用一些仪表或自动化装置代替操作工的眼、脑、手来自动地完成控制任务，不仅能大大减轻操作工的劳动强度，而且可以提高控制精度与工作效率。以图 1-1 所示的液位控制问题为例，可采用液位测量变送器

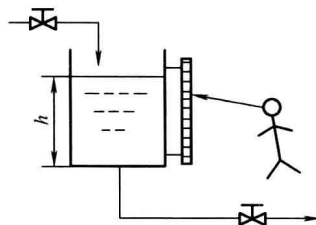


图 1-1 液位人工控制系统

LT 代替人眼来检测液位的高低,并将其转换为标准的电信号,如 $4 \sim 20\text{mA}$ 直流信号。同时,采用液位控制器 LC 代替人脑,通过接收液位测量信号,并与其给定值进行比较。控制器根据偏差的正、负、大、小及变化情况,发出标准的控制信号,如 $4 \sim 20\text{mA}$ 直流信号。此外,需要采用自动执行机构代替人手,来实施对出口流量的控制,这里为控制阀。控制阀根据控制信号变化来增大或减小出口阀门的开度以调节出水流量,并最终使液位测量值接近或等于给定值。这样,就构成了一个典型的液位自动控制系统,其中测量变送器、控制器和执行器分别具有眼、脑、手的功能。通常将控制器、变送器用通用符号来表示,液位自动控制回路如图 1-2 所示。

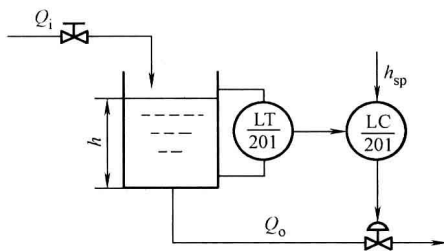


图 1-2 液位自动控制回路

在带控制点的工艺流程图中,圆圈表示某些自动化仪表,圆圈内通常由“两位以上字母+序号”组成,第 1 位字母表示被控变量的类别,常见的字母包括 T (温度)、P (压力)、dP (差压)、F (流量)、L (液位或料位)、A (分析量)、W (重量或藏量)、D (密度)等;后继字母表示仪表功能,常见的字母包括 T (传感变送器)、C (控制器)、I (指示仪表)等。而序号通常与被控变量的检测位号有关,同一回路的自动化仪表采用同一序号,序号位数可依据装置的复杂程度而有所不同。

在图 1-2 中,LT-201 表示第 2 工段第 1 号液位变送器,LC-201 表示第 2 工段第 1 号液位控制器。该控制回路的目标是保持液位恒定。当进料流量变化导致液位发生变化时,通过液位变送器 LT-201 将液位转化为电信号,并送至液位控制器 LC-201 与其给定值进行比较,该控制器根据其偏差信号进行运算后将控制命令送至控制阀,以改变出口流量来维持液位的稳定。

【例 1-2】 针对蒸汽加热器的某一温度自动控制系统如图 1-3 所示,它由蒸汽加热器、温度变送器 TT、温度控制器 TC 和蒸汽流量控制阀组成,控制目标是保持流体出口温度 T 恒定。当进料流量 R_F 或温度 T_i 等因素的变化引起出口物料的温度变化时,通过温度变送器 TT 测得温度的变化,并将其信号 T_m 送至温度控制器 TC 与给定值 T_{sp} 进行比较,温度控制器 TC 根据其偏差信号进行运算后将控制命令 $u(t)$ 送至控制阀,以改变蒸汽量 R_V 来维持出口温度。

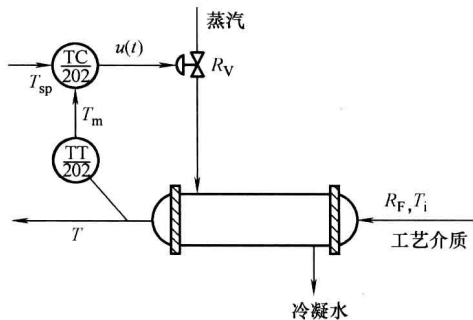


图 1-3 蒸汽加热器温度控制系统

【例 1-3】 储罐压力自动控制系统如图 1-4 所示,它由气体储罐、压力变送器 PT、压力控制器 PC 和进气控制阀组成。控制的目标是保持储罐内压力的恒定。当气源压力 p_1 、出口压力 p_2 或其他因素发生变化时,气罐压力将偏离其给定值。利用压力测量变送器,将压力信号转化为标准电流信号;该信号送至压力控制器与其给定值进行比较;压力控制器根据其偏差信号进行运算后,将控制命令送至控制阀,改变进气阀门开度,从而调整进气量,最终使罐内压力维持在给定值。

2. 控制系统的组成及框图

以上所列举的控制系统都属于简单控制系统，与任何其他控制系统相同，这些控制系统均由下列基本单元组成。

1) 被控对象（也称被控过程）。被控对象是指被控制的生产设备或装置。针对以上三个例子，分别是液罐、蒸汽加热器、气罐系统。

2) 测量变送器。测量变送器用于测量被控变量，并按一定的规律将其转换为标准信号输出。依据电气标准的不同，常用的标准信号包括 DC 0 ~ 10mA 信号（DDZ II 型仪表）、DC 4 ~ 20mA 信号（DDZ III 型仪表）、0.02 ~ 0.10MPa 气动信号等。

3) 执行器。常用的执行器是控制阀。它接收来自控制器的命令信号 u ，用于自动改变控制阀的开度。如例 1-1 中，控制器通过改变出水阀门的开度来调节出水量 Q_o ，最终达到克服外部扰动对被控变量 h 的影响。

4) 控制器（也称调节器）。它将被控变量的测量值与给定值进行比较，得出偏差信号 $e(t)$ ，并按一定的规律给出控制信号 $u(t)$ ，对于工业中常用的各类控制器，其输入输出信号大都为标准的电流信号，如 DDZ III 型仪表的 DC 4 ~ 20mA 信号。

通常，用文字叙述的方法来描述控制系统的组成和工作原理较为复杂，而在过程控制实践中常采用直观的框图来表示。如图 1-5 为液位控制系统框图。一般的单回路控制系统框图可用如图 1-6 所示的框图来表示。框图中每一条线代表系统中的一个信号，线上的箭头表示信号传递的方向；每个方框代表系统中的一个环节，它表示了其输入对其输出的影响。框图可以把一个控制系统变量间的关系完整地表达出来。

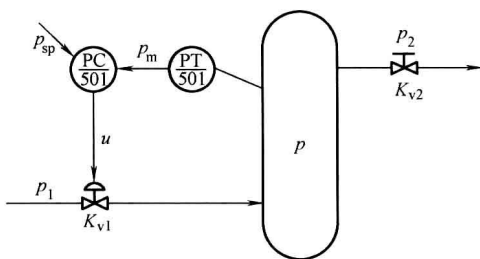


图 1-4 储罐压力自动控制系统

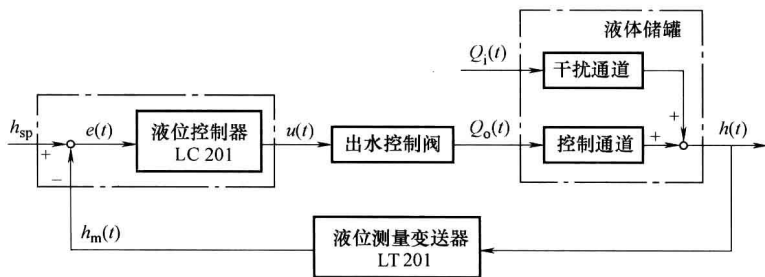


图 1-5 液位控制系统框图

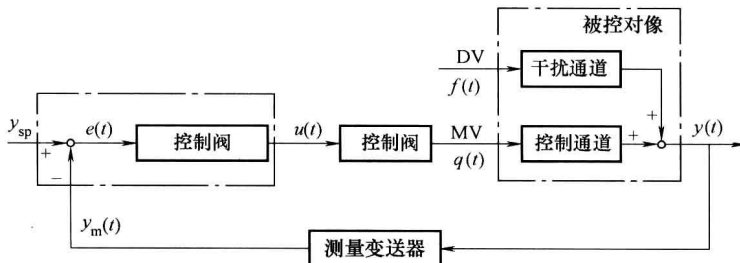


图 1-6 单回路控制系统框图

3. 过程控制的术语

在过程控制领域常用的专业术语有如下几种。

1) 被控变量 (Controlled Variable, CV)。也称为受控变量或过程变量 (Process Variable, PV)。它是指被控对象需要维持在其理想值的工艺变量, 如上述各例中的液罐液位、换热器工艺介质出口温度、罐内压力。在过程控制中常用的被控变量包括: 温度、压力/差压、液位/料位、流量、成分含量等实际物理量。有时, 也可以用过程变量的检测电信号来表示被控变量, 该测量信号称为过程变量的测量值 (Measurement)。

2) 设定值 (Setpoint, SP)。也称为给定值 (Setpoint Value, SV)。它是指被控变量要求达到的期望值。作为控制器的参考输入信号, 设定值在实际应用中通常用其对应的电量或相对百分比来表示, 以便于与被控变量的测量值进行比较。

3) 操作变量。也称为操纵变量 (Manipulated Variable, MV)。通常是由执行器控制的某一工艺介质流量。操纵变量对被控变量的影响要求直接、灵敏、快速。以图 1-3 所示的蒸汽加热器温度控制系统为例, 其操作变量为蒸汽流量, 它对被控变量 (流体出口温度) 的影响为“正作用”, 即蒸汽量的增加, 在其他条件不变的情况下使流体出口温度增加; 此外, 由于蒸汽冷凝所放出的大量潜热, 使操作变量对被控变量的作用非常灵敏。值得一提的是, 很多文献对“操作变量”与“控制变量”不加区分。在过程控制领域, “控制变量”通常指控制器的输出电信号, 即执行器的输入信号; 而“操作变量”往往指某一执行器可控制、对被控变量有直接影响的物理量, 最常见的是一些工艺介质流量。

4) 扰动变量 (Disturbance Variable, DV)。也称为干扰变量或简称扰动, 是指任何导致被控变量偏离其给定值的输入变量, 对于图 1-3 所示的蒸汽加热器温度控制系统, 其扰动变量包括: 蒸汽的阀前压力、工艺介质的进料流量、进料温度与组成等; 同样, 对于图 1-4 所示的储罐压力控制系统, 其扰动变量包括: 控制阀前压力、出口压力、出口阀开度等。对于控制系统而言, 扰动主要来源于扰动变量的动态变化。

1.1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法, 可以按被控变量来分类, 如温度、压力、流量、液位等控制系统; 也可以按控制器具有的控制规律来分类, 如比例、比例积分、比例微分、比例积分微分等控制系统。在分析自动控制系统特征时, 最常用的是将控制系统按照工艺过程需要控制的被控变量的给定值是否变化和如何变化来分类, 可将自动控制系统分为 3 类: 定值控制系统、伺服控制系统和程序控制系统。

1. 定值控制系统

所谓的“定值”就是恒定给定值的简称。生产工艺中, 如果要求控制系统的作用是使被控制的工艺参数保持在一个生产指标上不变, 或者说要求被控变量的给定值不变, 那么就需要采用定值控制系统。图 1-2 所讨论的液位控制系统就是定值控制系统的一个例子, 这个控制系统的目的是使罐内的液位保持在给定值不变。同样, 图 1-3 所示的温度控制系统也属于定值控制系统, 它的目的是为了出口物料的温度保持恒定, 化工生产要求的大都是这种类型的控制系统, 因此后面所讨论的, 如果未加特别说明, 都是指定值控制系统。

2. 伺服控制系统 (自动跟踪控制系统)

这类系统的特点是给定值不断地变化, 而且这种变化不是预先规定好了的, 也就是说给

定值是随机变化的，伺服控制系统的目的就是使所控制的工艺参数准确而快速地跟随给定值的变化而变化。例如航空上的导航雷达系统、电视台的天线接收系统，都是伺服控制系统的例子。

在化工生产中，有些比值控制系统就属于伺服控制系统。例如要求甲流体的流量与乙流体的流量保持一定的比值，当乙流体的流量变化时，要求甲流体的流量能快速而准确地随之变化。由于乙流体的流量变化在生产中可能是随机的，所以相当于甲流体的流量给定值也是随机的，故属于伺服控制系统。

3. 程序控制系统（顺序控制系统）

这类系统的给定值也是变化的，但它是一个已知的时间函数，即生产技术指标需按一定的时间程序变化。这类系统在间歇生产过程中应用比较普遍。例如合成纤维锦纶生产中的熟化罐温度控制和机械工业中金属热处理的温度控制都是这类系统的例子。

1.1.4 自动控制系统的过渡过程及品质指标

1. 控制系统的静态与动态

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。这里所说的静态，并非指系统内没有物料与能量的流动，而是指各个参数的变化率为零，即参数值保持不变。此时输出与输入之间的关系称为系统的静态特性。同样，对于任何一个环节来说，也存在静态。在保持平衡时的输出与输入关系称为环节的静态特性。

假如一个系统原来处于静态，由于出现了扰动，即输入起了变化，系统的平衡受到破坏，被控变量（即输出）发生变化，自动控制装置就会动作，进行控制，以克服扰动的影响，力图使系统恢复平衡。从输入开始，经过控制，直到再建立静态，在这段时间内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。另一方面，在给定值变化时，也引起动态过程，控制装置力图使被控变量在新的给定值或其附近建立平衡。总之，由于输入变化，输出随时间而变化，其输出与输入之间的变化关系称为系统的动态特性。

同样，对于任何一个环节来说，当输入变化时，也引起输出的变化，其输出与输入之间的关系称为环节的动态特性。

在控制系统中，了解动态特性比静态特性更为重要。在定值控制系统中，扰动不断产生，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，在随动控制系统中，给定值不断变化，系统也总是处于动态过程中。因此，控制系统的分析重点要放在系统和环节的动态特性上，这样才能设计出良好的控制系统，以满足生产提出的各种要求。

2. 自动控制系统的过渡过程

当自动控制系统的输入发生变化后，被控变量（即输出）随时间不断变化，它随时间而变化的过程称为系统的过渡过程，也就是系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。

对于一个稳定的系统，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能适应。

定值控制系统过渡过程的几种形式如图 1-7 所示。图 1-7a 是发散振荡,被控变量一直处于振荡状态,且振幅逐渐增加。图 1-7b 是单调发散,被控变量虽不振荡,但偏离原来的静态点越来越远。以上两种形式都不稳定,而系统稳定是正常工作的前提。图 1-7c 是等幅振荡,处于稳定与不稳定的边界,这种系统在一般情况下不采用。图 1-7d 是衰减振荡,图 1-7e 是单调衰减,这两种形式都是稳定的,即受到扰动作用后,经过一段时间,最终能趋于一个新的平衡状态,故这两种形式是可以采用的。

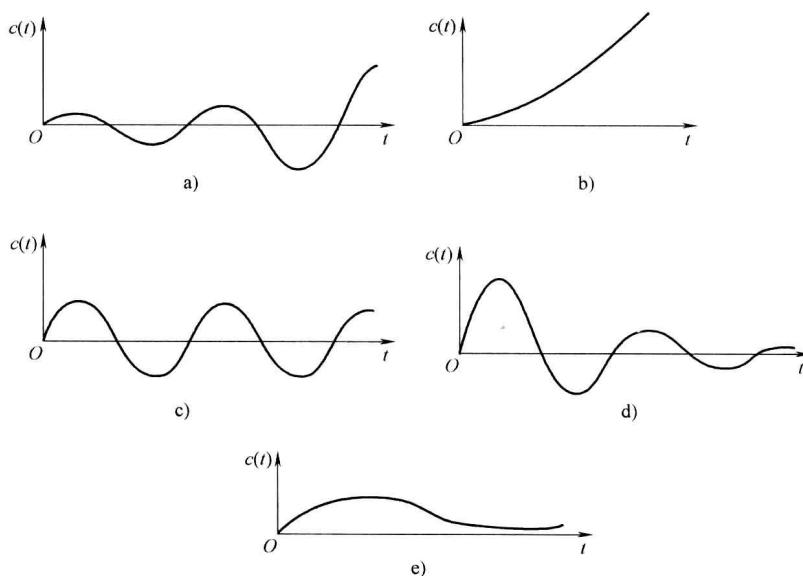


图 1-7 定值控制系统过渡过程的几种形式

a) 发散振荡 b) 单调发散 c) 等幅振荡 d) 衰减振荡 e) 单调衰减

3. 自动控制系统的品质指标

在工业过程中经常以阶跃作用下的过渡过程为准,采用时域内的单项指标来评价控制的好坏。图 1-8a、b 分别是设定值阶跃变化和扰动作用阶跃变化时过渡过程的典型曲线。设被控变量最终稳态值是 C , 超出其最终稳态值的最大瞬态偏差为 B 。

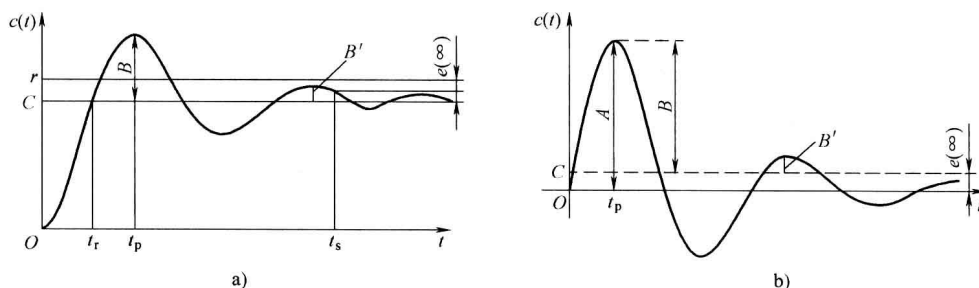


图 1-8 设定值和扰动作用阶跃变化时过渡过程的典型曲线

a) 设定值阶跃变化 b) 扰动作用阶跃变化

主要的时域指标包括衰减比、超调量与最大动态偏差、余差、调节时间和振荡频率、上

升时间和峰值时间等。

1) 衰减比。衰减比表示振荡过程的衰减程度，是衡量过渡过程稳定程度的动态指标。它等于曲线中前后两个相邻波峰值之比，即

$$n = \frac{B}{B'} \quad (1-1)$$

衰减比习惯上表示为 $n:1$ 。如果衰减比 $n < 1$ ，则过渡过程是发散振荡的；如果衰减比 $n = 1$ ，则过渡过程是等幅振荡的；如果衰减比 $n > 1$ ，则过渡过程是衰减振荡的。 n 越大，衰减越快，系统越接近非周期过程。为了保持有足够的稳定裕度，衰减比一般取 $4:1 \sim 10:1$ ，这样大约经过两个周期，系统就趋于新的稳定值。

2) 超调量与最大动态偏差。在伺服控制系统中，超调量是一个反映超调情况和衡量稳定程度的指标。超调量定义为

$$\sigma = \frac{B}{C} \times 100\% \quad (1-2)$$

对定值控制系统来说，用超调量来表征被控变量偏离给定值的程度，在图 1-8 中，以 B 表示，从图中可以看出，超调量为第一个峰值 A 与新稳定值 C 之差，即 $B = A - C$ 。但是，当最终稳态值是零或者很小的数值时，仍采用 σ 作为反映超调情况的指标就不合适了，通常改用最大动态偏差 A 作为指标。最大动态偏差 A 指的是在单位阶跃扰动下，最大振幅 B 与最终稳态值 C 之和的绝对值，即 $A = |B + C|$ 。

在衰减振荡过程中，最大动态偏差就是第一个波的峰值，在图 1-8 中以 A 表示。最大动态偏差表示系统瞬间偏离给定值的最大程度。

3) 余差。余差 $e(\infty)$ 是系统的最终稳态偏差，即过渡过程终了时设定值与新稳态值之差，即

$$e(\infty) = r - c(\infty) = r - C \quad (1-3)$$

对于定值控制系统来说， $r=0$ ，则有 $e(\infty) = -C$ 。

4) 调节时间和振荡频率。调节时间是从过渡过程开始到结束所需的时间。过渡过程要绝对达到新的稳态，理论上需要无限长的时间。一般认为当被控变量进入新稳态值附近 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 以内的区域，并保持在该区域内时，过渡过程结束，此时所需要的时间称为调节时间 t_s 。调节时间是反映控制系统快速性的一个指标。

过渡过程同向两波峰（或波谷）之间的间隔时间叫振荡周期，其倒数称为振荡频率。在衰减比相同的情况下，振荡周期与调节时间成正比，一般希望振荡周期短一些为好。

5) 峰值时间和上升时间。被控变量达到最大值的时间称为峰值时间 t_p ，过渡过程开始到被控变量第一次达到稳定值的时间称为上升时间 t_r ，它们都是反映系统快速性的指标。

综上所述，自动控制系统的品质指标主要有：最大动态偏差、超调量、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，且相互之间既有矛盾，又有联系。因此，在实际工程中，应根据具体情况，那些对生产过程有决定意义的重要指标应优先予以保证。此外，对于一个系统提出的品质要求和评价一个控制系统的质量，应该从实际需要出发，不应过分偏高偏严，否则会造成人力或物力的巨大浪费，甚至无法实现。

【例 1-4】某发酵过程工艺规定操作温度为 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。考虑到发酵效果，控制过程中