



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
荣获中国石油和化学工业优秀教材奖一等奖

过程自动化及仪表

(非自动化专业适用)

第三版

俞金寿 孙自强 编著



化学工业出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
荣获中国石油和化学工业优秀教材奖一等奖

过程自动化及仪表

(非自动化专业适用)

第三版

俞金寿 孙自强 编著



化学工业出版社

本书以自动控制系统为主体,辅以各种自动化仪表和控制装置,深入浅出地叙述了生产过程有关变量的测量方法及应用特点,自动控制系统的组成和简单、复杂、先进控制系统,以及在设计、运行中与工艺过程有关知识要点,最后介绍了典型工业生产过程:流体输送设备、传热设备、锅炉设备、精馏塔、反应器、窑炉、生化过程、冶金过程、造纸过程等的控制。

本书可作为高等学校非自动化专业(工艺类专业)自动化仪表课程教材,亦可供生产过程工艺技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程自动化及仪表:非自动化专业适用/俞金寿,
孙自强编著. —3版. —北京:化学工业出版社,
2015.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-22487-3

I. ①过… II. ①俞… ②孙… III. ①过程控制-高等
学校-教材②仪表-高等学校-教材 IV. ①TP273②TH7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第287542号

责任编辑:唐旭华 郝英华
责任校对:陶燕华

装帧设计:刘剑宁

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16 $\frac{3}{4}$ 字数430千字 2015年2月北京第3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:32.00元

版权所有 违者必究

前 言

本书第一版于2003年出版，2007年获得过上海市优秀教材一等奖。2007年修改后出版第二版，是国家“十一五”规划教材，2009年获得上海市优秀教学成果奖二等奖、中国石油和化学工业优秀教材奖一等奖。本书不仅是华东理工大学的上海市精品课程“化工自动化及仪表”所用教材，同时还受到不少大专院校的欢迎，被选为相关课程教材。也受到了许多自动化技术人员的欢迎。

现在距离本书第二版修订又过去七年多了，过程自动化及仪表与整个的工业自动化一样发生着变化。除了先进控制策略发展迅速外，自动化仪表也有所更新变化。本书第三版修订大体上仍保持原来的体系，保持紧密结合工业过程实际、理论联系实际的特点，在内容上主要针对仪表和控制装置部分的一些内容进行了更新。

总的来看，在生产过程工艺设计与技术改造中，工艺技术人员必须熟悉生产过程自动控制的项目及具体控制方案，并与自动化技术人员密切合作；在生产过程控制、管理和调度中，工艺技术人员必须熟悉自动化仪表、计算机及其他自动化技术工具，并正确使用；熟悉各个控制回路和其他系统，使它们充分发挥作用。通过自动化来掌握生产，提高生产；在处理各类技术问题时，用一些系统论和控制论的观点分析思考，寻求考虑整体条件、考虑事物间相互关联、考虑过渡历程的可行解或最优解。

本书仍以自动控制系统为主体，辅以各种自动化仪表和控制装置，深入浅出地叙述了生产过程有关变量的测量方法及应用特点，自动控制系统的组成和简单、复杂、先进控制系统，以及在设计、运行中与工艺过程有关知识要点，最后介绍了典型工业生产过程的控制。

本书相关电子课件可免费提供给本书作为教材的大专院校使用，如有需要请联系：cipedu@163.com。

由于编著者水平所限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编著者
2014年12月

目 录

1 自动控制系统概述	1
1.1 自动化及仪表发展状况	1
1.2 自动控制系统	2
1.2.1 自动控制系统	2
1.2.2 闭环控制与开环控制	4
1.2.3 自动控制系统的组成及方 框图	4
1.2.4 自动控制系统的分类	6
1.3 自动控制系统的过渡过程及品质 指标	8
1.3.1 静态与动态	8
1.3.2 自动控制系统的过渡过程	8
1.3.3 自动控制系统的品质指标	9
思考题与习题 1	11
2 过程特性	12
2.1 过程特性的类型	12
2.2 过程的数学描述	14
2.3 过程特性的一般分析	15
2.3.1 放大系数 K	16
2.3.2 时间常数 T	17
2.3.3 纯滞后 τ	18
2.4 过程特性参数的实验测定方法	19
思考题与习题 2	20
3 检测变送	22
3.1 概述	22
3.1.1 测量误差	23
3.1.2 仪表性能指标	23
3.2 温度检测	25
3.2.1 温度检测方法	25
3.2.2 热电偶	26
3.2.3 热电阻	29
3.2.4 热电偶、热电阻的选用	30
3.3 流量检测	31
3.3.1 流量检测的主要方法	31
3.3.2 速度式流量计	32
3.3.3 容积式流量计	36
3.3.4 质量流量计	36
3.3.5 流量仪表的选用	38
3.4 压力检测	39
3.4.1 压力单位和压力检测方法	39
3.4.2 常用压力检测仪表	41
3.4.3 压力表的选用	44
3.5 物位检测	44
3.5.1 物位检测方法	45
3.5.2 常用物位检测仪表	45
3.5.3 物位检测仪表的选用	50
3.6 成分和物性参数检测	50
3.6.1 成分和物性参数检测方法	51
3.6.2 成分、物性检测的静态 特性	56
3.6.3 成分、物性检测的动态 特性	57
3.7 其他变量检测	57
3.7.1 位移量检测	58
3.7.2 转速检测	59
3.7.3 振动检测	60
3.7.4 厚度检测	60
3.7.5 火焰检测	60
3.7.6 重量检测	60
3.8 变送器	61
3.8.1 变送器量程迁移和零点 迁移	62
3.8.2 温度变送器	63
3.8.3 差压变送器	66
3.8.4 智能变送器	70
3.9 现代传感器技术的发展	73
思考题与习题 3	75
4 显示仪表	76
4.1 模拟式显示仪表	77
4.1.1 电子电位差计	77
4.1.2 电子自动平衡电桥	79
4.2 数字式显示仪表	80
4.2.1 数显仪表的分类	80
4.2.2 数显仪表的主要技术指标	80
4.2.3 数显仪表的基本组成	80
4.3 新型显示仪表	82

4.3.1 显示仪表发展动态	82	6.4.3 YSI700 控制器	119
4.3.2 无纸记录仪	83	6.5 可编程序控制器	120
4.3.3 虚拟显示仪表	84	6.5.1 可编程序控制器概述	120
思考题与习题 4	84	6.5.2 可编程序控制器的工作 原理	123
5 执行器	85	6.5.3 可编程序控制器的编程	126
5.1 执行机构	86	6.5.4 可编程序控制器系统应用 示例	129
5.1.1 气动执行机构	86	6.6 集散控制系统	131
5.1.2 电动执行机构	88	6.6.1 集散控制系统发展概况	131
5.2 控制阀	88	6.6.2 集散控制系统特点	132
5.2.1 控制阀结构	88	6.6.3 集散控制系统的硬件和 软件	133
5.2.2 控制阀类型	89	6.6.4 TPS 系统简介	134
5.3 气动薄膜控制阀的流量特性	90	6.6.5 TPS 系统应用举例	138
5.3.1 理想流量特性	91	6.7 现场总线控制系统	143
5.3.2 工作流量特性	92	6.7.1 现场总线系统的特点	143
5.3.3 动态特性	93	6.7.2 现场总线系统的发展	144
5.4 控制阀口径的确定	94	6.7.3 基金会现场总线	145
5.4.1 控制阀流量系数 K_v 的计算	94	6.7.4 现场总线控制系统的 应用	147
5.4.2 控制阀口径的确定	94	思考题与习题 6	149
5.5 阀门定位器	94	7 简单控制系统	151
5.5.1 电-气阀门定位器	95	7.1 控制系统的组成	151
5.5.2 阀门定位器作用	95	7.2 简单控制系统的设计	152
5.6 气动薄膜控制阀的选用	96	7.2.1 控制系统设计概述	152
5.6.1 控制阀结构形式及材质的 选择	96	7.2.2 被控变量的选择	153
5.6.2 控制阀流量特性的选择	98	7.2.3 操纵变量的选择	153
5.6.3 气动薄膜控制阀的安装 使用	98	7.2.4 控制规律及控制器作用方 向的选择	153
5.7 智能控制阀	99	7.2.5 执行器(气动薄膜控制阀) 的选择	155
思考题与习题 5	100	7.3 简单控制系统的参数整定	156
6 控制器	101	7.3.1 经验整定法	156
6.1 控制器概述	101	7.3.2 临界比例度法	157
6.2 控制器的基本控制规律	102	7.3.3 衰减曲线法	158
6.2.1 连续 PID 控制算法	103	7.4 控制系统的投运	158
6.2.2 离散 PID 控制算法	111	7.5 简单控制系统设计案例	159
6.3 模拟式控制器	113	思考题与习题 7	160
6.3.1 模拟式控制器基本结构	113	8 复杂控制系统	162
6.3.2 DDZ-III 型电动单元控 制器	113	8.1 串级控制系统	162
6.4 数字式控制器	115	8.1.1 串级控制系统的基本原理 和结构	162
6.4.1 数字式控制器主要特点	115		
6.4.2 数字式控制器的基本 构成	116		

8.1.2	串级控制系统的特点	163	9.6.1	系统的关联分析	183
8.1.3	串级控制系统的设计	164	9.6.2	减少与解除耦合途径	183
8.1.4	串级控制系统控制器参数的 整定	166	9.7	差拍控制系统	185
8.2	比值控制系统	166	9.7.1	差拍控制系统	185
8.2.1	基本原理和结构	166	9.7.2	达林控制算法	185
8.2.2	比值系数的计算	167	9.7.3	V.E. 控制算法	185
8.3	均匀控制系统	168	9.8	自适应控制	186
8.3.1	均匀控制系统的基本原理和 结构	168	9.8.1	简单自适应控制系统	186
8.3.2	均匀控制系统的控制规律的 选择及参数整定	170	9.8.2	模型参考型自适应控制 系统	186
8.4	前馈控制系统	170	9.8.3	自校正控制系统	187
8.4.1	基本原理	170	9.9	鲁棒控制	187
8.4.2	前馈控制的主要结构 形式	171	9.10	智能控制系统	188
8.4.3	采用前馈控制系统的 条件	171	9.10.1	智能控制简介	188
8.5	选择性控制系统	172	9.10.2	专家系统	188
8.6	分程控制系统	173	9.10.3	模糊逻辑控制	189
8.6.1	不同工况需要不同的控制 手段	173	9.10.4	神经网络控制	190
8.6.2	扩大控制阀的可调范围	173	9.11	故障检测诊断和容错控制	191
思考题与习题8		173	9.11.1	故障检测和诊断	191
9 先进控制技术		175	9.11.2	容错控制	192
9.1	基于模型的预测控制	175	9.12	综合自动化系统	193
9.1.1	预测控制的基本原理	176	9.12.1	综合自动化的意义	193
9.1.2	预测控制的优良性质	177	9.12.2	综合自动化系统的特点	194
9.1.3	预测控制的应用	177	9.12.3	工业生产过程计算机集成 控制系统的构成	195
9.2	推断控制	177	思考题与习题9		196
9.3	软测量技术	179	10 生产过程控制		197
9.3.1	机理分析与辅助变量的 选择	179	10.1	流体输送设备的控制	197
9.3.2	数据采集和处理	180	10.1.1	泵的控制	197
9.3.3	软测量模型的建立	180	10.1.2	压缩机的控制	199
9.3.4	软测量模型的在线校正	181	10.1.3	变频调速器的应用	200
9.3.5	软测量技术工业应用	181	10.1.4	防喘振控制系统	201
9.4	双重控制系统	181	10.2	传热设备的控制	202
9.5	纯滞后补偿控制系统	182	10.2.1	传热设备的静态数学 模型	202
9.5.1	史密斯预估补偿控制	182	10.2.2	一般传热设备的控制	203
9.5.2	史密斯预估补偿控制实施 中若干问题	183	10.2.3	管式加热炉的控制	205
9.6	解耦控制系统	183	10.3	锅炉设备的控制	206
			10.3.1	锅炉汽包水位的控制	207
			10.3.2	锅炉燃烧系统的控制	209
			10.3.3	蒸汽过热系统的控制	211
			10.4	工业窑炉过程的控制	212
			10.4.1	电热式工业窑炉控制	212

10.4.2 燃烧式工业窑炉控制	213	10.8.4 聚合过程的控制	240
10.5 精馏塔的控制	215	10.9 生化过程的控制	244
10.5.1 精馏塔的控制要求	216	10.9.1 常用生化过程控制	245
10.5.2 精馏塔的扰动分析	217	10.9.2 青霉素发酵过程控制	246
10.5.3 精馏塔被控变量的 选择	217	10.9.3 啤酒发酵过程控制	247
10.5.4 精馏塔的控制	219	10.10 造纸过程的控制	248
10.5.5 精馏塔的先进控制	221	10.10.1 纸浆浓度的控制	248
10.6 化学反应器的控制	225	10.10.2 纸料配浆的比值控制	249
10.6.1 化学反应器的控制要求 ...	225	10.10.3 磨浆机的控制	250
10.6.2 化学反应器的基本控制 策略	226	10.10.4 白水回收控制	251
10.6.3 化学反应器的基本控制 ...	226	10.11 转炉控制	251
10.7 合成氨过程的控制	230	10.11.1 顶吹供氧控制系统	251
10.7.1 变换炉的控制	230	10.11.2 底吹供气控制系统	252
10.7.2 转化炉水碳比控制	230	10.11.3 炉口微差压及煤气回收 控制系统	253
10.7.3 合成塔的控制	231	思考题与习题 10	254
10.8 石油化工过程的控制	233	附录 1 自控工程设计字母代号	255
10.8.1 常减压过程的控制	233	附录 2 部分热电偶、热电阻分 度表	256
10.8.2 催化裂化过程的控制	235	参考文献	260
10.8.3 乙烯生产过程的控制	238		

1

自动控制系统概述

1.1 自动化及仪表发展状况

20 世纪 40 年代开始形成的控制理论被称为“20 世纪上半叶三大伟绩之一”，在人类社会的各个方面有着深远的影响。控制理论与其他任何学科一样，源于社会实践和科学实践。在自动化的发展中，有两个明显的特点：第一，任务的需要、理论的开拓与技术手段的进展三者相互推动，相互促进，显示了一幅交错复杂，但又轮廓分明的画卷，三者间表现出清晰的同步性；第二，自动化技术是一门综合性的技术，控制论更是一门广义的学科，在自动化的各个领域，移植和借鉴起了交流汇合的作用。

自动化技术的前驱，可以追溯到我国古代，如指南车的出现。至于工业上的应用，一般以瓦特的蒸汽机调速器作为正式起点。工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的。这时候的自动化装置是机械式的，而且是自力型的。随着电动、液动和气动这些动力源的应用，电动、液动和气动的控制装置开创了新的控制手段。

到第二次世界大战前后，控制理论有了很大发展。电信事业的发展导致了 Nyquist (1932) 频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 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简单图解方法——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 (SISO) 控制系统进行分析与设计的理论，这就是今天所谓的古典控制理论。古典控制理论最辉煌的成果之一要首推 PID 控制规律。PID 控制原理简单，易于实现，对无时间延迟的单回路控制系统极为有效，直到目前为止，在工业过程控制中有 80%~90% 的系统还使用 PID 控制规律。经典控制理论最主要的特点是：线性定常对象、单输入单输出、完成镇定任务。即便对这些极简单对象的描述及控制任务，理论上也尚不完整，从而促使现代控制理论的发展。

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，而以采用 Kalman 滤波器的随机干扰下的线性二次型系统 (LOG) (Kalman, 1960) 宣告了时域方法的完成。现代控制理论在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果。现代控制理论中首先得到透彻研究的是多输入多输出系统，其中特别重要的是对描述控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、实现理论、典范型、分解理论等，使控制由一类工程设计方法提高成为一门新的科学。为了扩大现代控制理论的适用范围，相继产生和发展了系统辨识与估计、随机控制、自适应控制以及鲁棒控制等各种理论分支，使控制理论的内容越来越丰富。现代控制理论虽然在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果，但对于复杂的工业过程却显得无能为力。

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,逐步发展形成了大系统理论 (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,它对其他复杂系统仍然束手无策。对于含有大量不确定性和难于建模的复杂系统,基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制等应运而生,它们在许多领域都得到了广泛的应用。

从自动控制系统结构来看,已经经历了四个阶段。

20 世纪 50 年代是以基地式控制器等组成的控制系统,像自力式温度控制器、就地式液位控制器等,它们的功能往往限于单回路控制,时至今日,这类控制系统仍没有被淘汰,而且还有了新的发展,但所占的比重大为减少。

20 世纪 60 年代出现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。因此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 直流电流信号 (DDZ II 系列) 和 4~20mA 直流电流信号 (DDZ III 系列)。单元组合仪表已延续了 30 多年,目前国内还广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统,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、分程和选择性控制等)。

20 世纪 70 年代出现了计算机控制系统,最初是直接数字控制 (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。就控制策略而言,DCS 仍以简单 PID 控制为主,再加上一些复杂控制算法,并没有充分发挥计算机的功能和控制水平。

20 世纪 80 年代以后出现二级优化控制,在 DCS 的基础上实现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、双向和多站通讯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 正在走向国际统一标准的开放式系统;综合自动化系统 (CIPS) 是发展方向。

1.2 自动控制系统

1.2.1 自动控制系统

生产过程中,对各个工艺过程的物理量 (或称工艺变量) 有着一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程,对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如,精馏塔的塔顶或塔釜温度,一般在操作压力不变的情况下,必须保持一定,才能得到合格的产品;加热炉出口温度的波动不能超出允许范围,否则将影响后一工段的效果;化学反应器的反应温度必需保持平稳,才能使效率达到指标。有些工艺变量虽不直接地影响产品的数量和质量,然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如,用蒸汽加热反应器或再沸器,在蒸汽总压

波动剧烈的情况下,要把反应温度或塔釜温度控制好将极为困难;中间储槽的液位高度与气柜压力,必须维持在允许的范围之内,才能使物料平衡,保持连续的均衡生产。有些工艺变量是决定安全生产的因素,例如,锅炉汽包的水位、受压容器的压力等,不允许超出规定的限度,否则将威胁生产的安全。还有一些工艺变量直接鉴定产品的质量,例如,某些混合气体的组成、溶液的酸碱度等。对于以上各种类型的变量,在生产过程中,都必须加以必要的控制。

图 1-1 所示是工业生产常见的锅炉汽包示意图,其液位是一个重要的工艺参数。液位过低,影响产汽量,且易烧干而发生事故;液位过高,影响蒸汽质量,因此对汽包液位应严加控制。

如果一切条件(包括给水量、蒸汽量等)都近乎恒定不变,只要将进水阀置于某一适当开度,则汽包液位能保持在一定高度。但实际生产过程中这些条件是变化的,例如进水阀前的压力变化,蒸汽流量的变化等。此时若不进行控制(即不去改变阀门开度),则液位将偏离规定高度。因此,为保持汽包液位恒定,操作人员应根据液位高度变化情况,控制进水量。

在此,把工艺所要求的汽包液位高度称为设定值;把所要求控制的液位参数称为被控变量或输出变量;那些影响被控变量使之偏离设定值的因素称为扰动作用,如给水量、蒸汽量的变化等,设定值和扰动作用都是系统的输入变量;用以使被控变量保持在设定值范围内的作用称为控制作用。

为了保持液位为定值,手工控制时主要有三步:

- ① 观察被控变量的数值,在此即为汽包的液位;
- ② 把观察到的被控变量值与设定值加以比较,根据二者的偏差大小或随时间变化的情况,作出判断,并发布命令;
- ③ 根据命令操作给水阀,改变进水量,使液位回到设定值。

如采用检测仪表和自动控制装置来代替手工控制,就成为自动控制系统。

现以图 1-2 所示的锅炉汽包液位自动控制系统为例,说明自动控制系统的原理。当系统受到扰动作用后,被控变量(液位)发生变化,通过检测仪表得到其测量值 h 。在自动控制装置(液位控制器 LC)中,将 h 与设定值 h_0 比较,得到偏差 $e = h - h_0$,经过运算后,发出控制信号,这一信号作用于执行器(在此为控制阀),改变给水量,以克服扰动的影响,使被控变量回到设定值。

这样就完成了所要求的控制任务。这些自动控制装置和被控的工艺对象组成了一个自动控制系统。

通常,设定值是系统的输入变量,而被控变量是系统的输出变量。输出变量通过适当的检测仪表,又送回输入端,并与输入变量相比较,因此称为反馈,二者相加称为正反馈,二者相减称为负反馈。输出变量与输入变量相比较所得的结果叫做偏差,控制装置根据偏差方向、大小或变化情况进行控制,使偏差减小或消除。发现偏差,然后去除偏差,这就是反馈控制的原理。利用这一原理组成的系统称为反馈控制系统,通常也称为自动控制系统。实现自动控制的装置可以各不相同,但反馈控制的原理却是相同的。由此可见,有反馈存在,按偏差进行控制,是自动控制系统最主要的特点。

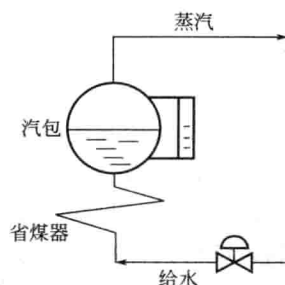


图 1-1 锅炉汽包示意图

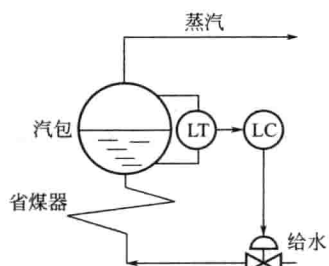


图 1-2 锅炉汽包液位自动控制系统示意图

1.2.2 闭环控制与开环控制

在反馈控制系统中，被控变量送回输入端，与设定值进行比较，根据偏差进行控制，控制被控变量，这样，整个系统构成了一个闭环，因此称为闭环控制。

闭环控制的特点是按偏差进行控制，所以不论什么原因引起被控变量偏离设定值，只要出现偏差，就会产生控制作用，使偏差减小或消除，达到被控变量与设定值一致的目的，这是闭环控制的优点。

由于闭环控制系统按照偏差进行控制，所以尽管扰动已经发生，但在尚未引起被控变量变化之前，是会产生控制作用的，这就使控制不够及时。此外，如果系统内部各环节配合不当，系统会引起剧烈震荡，甚至会使系统失去控制，这些是闭环控制系统的缺点，在自动控制系统的设计和调试过程中应加以注意。

有时亦采用比较简单的开环控制方式，这种控制方式不需要对被控变量进行测量，只根据输入信号进行控制。由于不测量被控变量，也不与设定值相比较，所以系统受到扰动作用后，被控变量偏离设定值，并无法消除偏差，这是开环控制的缺点。

图 1-3 所示是目前数字程序控制机床中广泛应用的精密定位控制系统。这是一个开环控制系统。工作台位移是被控变量，它只根据控制信号（控制脉冲）而变化。系统中既不对被控变量进行测量，也不将其与控制信号进行比较，系统结构比较简单，但不能保证消除误差。图中步进电机是一种由“脉冲数”控制的电机，只要输入一个脉冲，电机就转过一定角度，称为“一步”。所以根据工作台所需要移动的距离，输入端给予一定数量的脉冲。如果因为外界扰动，步进电机多走或少走了几步，系统并不能“觉察”，从而造成误差。



图 1-3 精密定位开环控制系统方框图

图 1-4 所示是开环的液位控制系统。这里是根据扰动信号（蒸汽流量）来控制给水量。

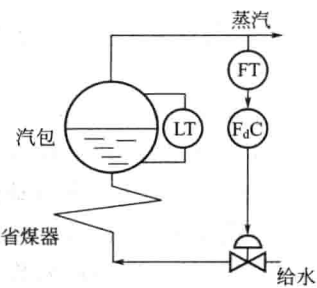


图 1-4 开环液位控制系统

这种开环控制仅在蒸汽扰动信号对液位影响时，才进行补偿，而对其他影响液位的扰动无控制作用。因此，不能保证液位无误差。

依据扰动作用进行控制的系统，虽然不一定能消除偏差，但是也有突出的优点，即控制作用不需等待偏差产生，控制很及时，对于较频繁的主要扰动能起到补偿的效果。这种系统称为前馈控制系统。所用的控制装置 F_dC 称为前馈控制器。

综上所述，开环控制与闭环控制各有特点，应根据各种不同的情况和要求，合理选择适当的方式。前馈-反馈控制系统就是开环与闭环控制的组合形式，在不少情况下可获得很好的效果。

1.2.3 自动控制系统的组成及方框图

在研究自动控制系统时，为了更清楚地表示控制系统各环节的组成、特性和相互间的信号联系，一般都采用方框图。图 1-5 所示是自动控制系统的方框图。每个方框表示组成系统的一个环节，两个方框之间用带箭头的线段表示信号联系；进入方框的信号为环节输入，离开方框的为环节输出。输入会引起输出变化，而输出不会反过来直接引起输入的变化，环节的这特性称为单向性。

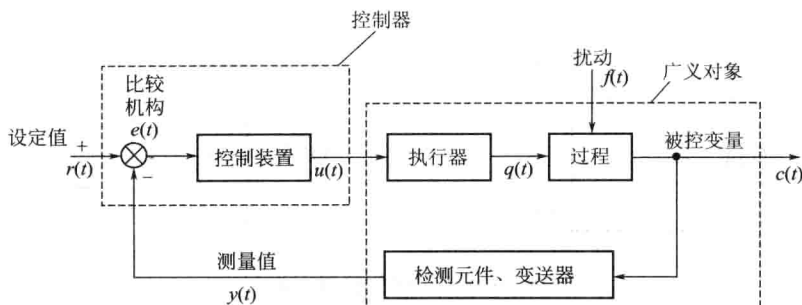


图 1-5 闭环控制系统组成

图 1-5 所示方框图采用下列符号：

$r(t)$ 设定值；

$y(t)$ 测量值；

$e(t)$ 偏差， $e(t) = r(t) - y(t)$ ；

$u(t)$ 控制作用（控制器输出）；

$c(t)$ 被控变量；

$q(t)$ 操纵变量；

$f(t)$ 扰动。

检测元件和变送器的作用是把被控变量 $c(t)$ 转化为测量值 $y(t)$ 。例如，用热电阻或热电偶测量温度，并用温度变送器转换为统一的气压信号（20~100kPa）或直流电流信号（0~10mA 或 4~20mA）。

比较机构的作用是比较设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 并输出其差值。在自动控制系统分析中，把 $e(t)$ 定义为 $[r(t) - y(t)]$ 。然而在仪表制造行业中，却把 $[y(t) - r(t)]$ 作为偏差，两者的符号恰好相反。

控制装置的作用是根据偏差的正负、大小及变化情况，按某种预定的控制规律给出控制作用 $u(t)$ 。

比较机构和控制装置通常组合在一起，称为控制器。目前应用最广的控制器是气动和电动控制器，它们的输出 $u(t)$ 也是统一的气压或电流信号。

执行器的作用是接受控制器送来的 $u(t)$ ，相应地去改变操纵变量 $q(t)$ 。最常用的执行器是气动薄膜控制阀，在采用电动控制器的场合，控制器的输出 $u(t)$ 还需经电-气转换器将统一的电流信号转换成统一的气压信号。

系统中控制器以外的各部分组合在一起，即过程、执行器、检测元件与变送器的组合称为广义对象。

在分析控制系统的工作过程时，有以下几个很重要的概念。

① 信息的概念 图 1-5 中的 $r(t)$ 、 $y(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 、 $q(t)$ 、 $c(t)$ 和 $f(t)$ 尽管是实际的物理量，然而它们是作为信息来转换和作用的。图 1-5 中的箭头方向表示信息的流向。对于图 1-6 中的两个液位控制系统，图 1-6(a) 的操纵变量是进入量，图 1-6(b) 的操纵变量是流出量。作为物料流动方向来看，两者有进、出之分；但作为信息来看，它们都是作用于过程，使液位发生变化的输入信号，因此信息流的流向是相同的。图 1-5 中的每一个部分称为一个环节，作用于它的信息称为该环节的输入信号，它送出的信息称为输出信号。上一环节的输出信号就是下一环节的输入信号。每一环节的输出信号与输入信号之间的关系仅仅取决于该环节的特性。从整个系统来看，设定值和扰动是输入信号，被控变量或其测量值是输出信号。

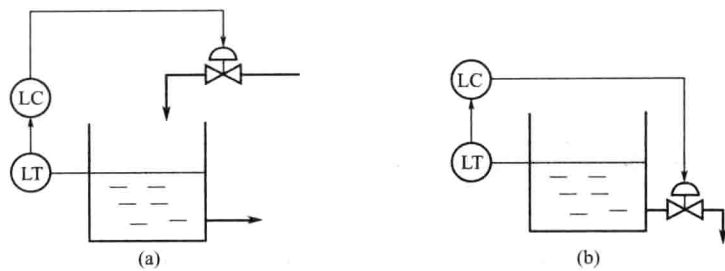


图 1-6 两个液位控制系统

② 闭环的概念 在方框图中，任何一个信息沿着箭头方向前进，最后又回到原来的起点，构成一个闭合回路，这种系统称为闭环系统。闭环控制系统的闭合回路是通过检测元件及变送器，将被控变量的测量值 $y(t)$ 送回到输入端与设定值 $r(t)$ 进行比较而形成的，所以闭环一定要有反馈。

③ 动态的概念 $r(t)$, $y(t)$, $e(t)$, $u(t)$, $q(t)$, $c(t)$ 和 $f(t)$ 都是时间函数，它们随时间而变，是不断运动的，在定值控制系统中，扰动作用使被控变量偏离设定值，控制作用又使它恢复到设定值。扰动与控制构成一对主要矛盾时，被控变量则处于不断运动之中。

1.2.4 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法有多种，这里按设定值的不同情况，将自动控制系统分为三类，即定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

(1) 定值控制系统

设定值保持不变（为一恒定值）的反馈控制系统称为定值控制系统。这类系统在工业生产中得到广泛的应用，例如各种温度、压力、流量、液位等控制系统；恒温箱的温度控制；稳压电源的电压稳定控制等。

图 1-7(a) 所示是一个用电阻丝加热的恒温箱温度控制系统。控制变压器活动触点的位置即改变了输入电压，则通过电阻丝的电流将产生变化，使恒温箱得到不同的温度。所以，控制活动触点的位置可以达到控制温度的目的。这里的被控变量是恒温箱的温度，经热电偶测量并与设定值比较后，其偏差经过放大器放大，控制电动机的转向，然后经过传动装置，移动变压器的活动触点位置。结果使偏差减少，直到温度达到设定值为止，系统的方框图如图 1-7(b) 所示。

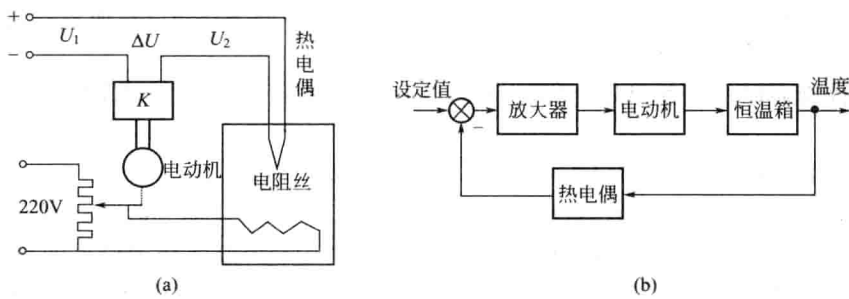


图 1-7 恒温箱温度控制系统

(2) 随动控制系统

这类控制系统的特点是设定值不断变化，且事先是不知道的，并要求系统的输出（被控变量）随之而变化。例如雷达跟踪系统。各类测量仪表中的变送器本身亦可以看作是一个随动控制系统，它的输出（指示值）应迅速和正确地随着输入（被测量值）而变化。

图 1-8(a) 所示是自动平衡电子电位差计示意图。自动平衡电子电位差计实际上是一种电压转换器, 将被测电压转换成角位移, 通过传动机构显示出来。其动作原理是: 被测电压与滑线电阻上的反馈电压相比较, 其偏差经放大器放大, 由可逆电机移动滑线电阻活动触点, 改变反馈电压, 使之与被测电压相平衡, 同时通过传动机构使被测电压显示出来。只要被测电压发生变化, 就有偏差进入放大器, 系统就会动作, 直到被测电压与反馈电压平衡为止。其方框图如图 1-8(b) 所示。显然, 自动平衡电子电位差计是一个典型的随动系统, 它的输出跟随输入变化, 输出与输入之间存在着单值比例关系。

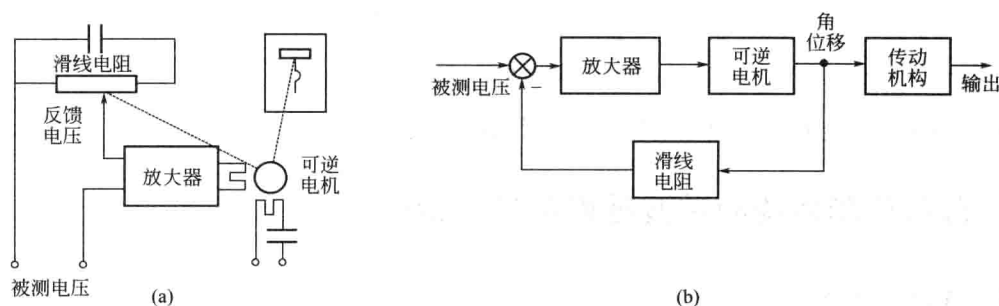


图 1-8 自动平衡电子电位差计示意图及方框图

图 1-9(a) 是工业生产中常用的比值控制系统。生产上要求将物料 F_2 与物料 F_1 配成一定比例送至下一工序。物料 F_1 代表生产负荷, 经常发生变化。若 F_1 发生变化, F_2 也需随之发生变化, 使 F_2/F_1 比值保持不变。为了满足这个要求, 就组成了图 1-9(a) 的比值控制系统, 其动作原理是: 当 F_1 发生变化时, F_1 经测量变送, 并乘以某一比例系数 K 后, 作为物料 F_2 控制器 FC 的设定值。此时由于设定值变化而产生偏差, 使 FC 动作, 从而改变 F_2 使之与 F_1 的比值保持不变; 若由于 F_2 本身变化时, 由测量变化而产生偏差使 FC 动作, 控制 F_2 使之恢复到原值, 从而保持比值不变。图 1-9(b) 是该系统的方框图, 从图中可以清楚地看出, 该系统也是一个随动控制系统。

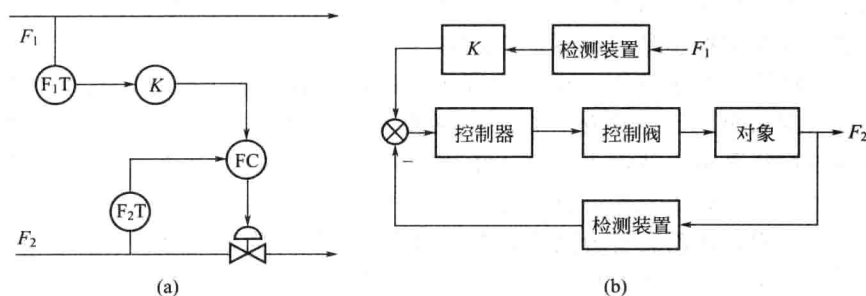


图 1-9 比值控制系统示意图及方框图

(3) 程序控制系统

这类控制系统的设定值也是变化的, 但它是一个已知的时间函数, 即根据需要按一定时间程序变化, 例如程序控制机床、冶金工业中退火炉的温度控制等。

图 1-10 所示是某电炉炉温程序控制系统示意图。给定电压 U_0 由程序装置给出 (根据需要按时间变化, 由时钟机构和凸轮产生), 并与热电偶所产生的热电动势 U_1 比较。若 $U_1 \neq U_0$, 则放大器输入端有偏差电压 $U = U_0 - U_1$ 产生, 此电压经放大后送到电动机。电动机根据偏差大小和极性而动作, 经减速器改变电炉电阻丝的电流, 使电炉内温度发生变化, 直至 $U_0 = U_1$ 为止。此时放大器将无偏差电压输入, 电动机不转动。当 U_0 按一定程序变化时,

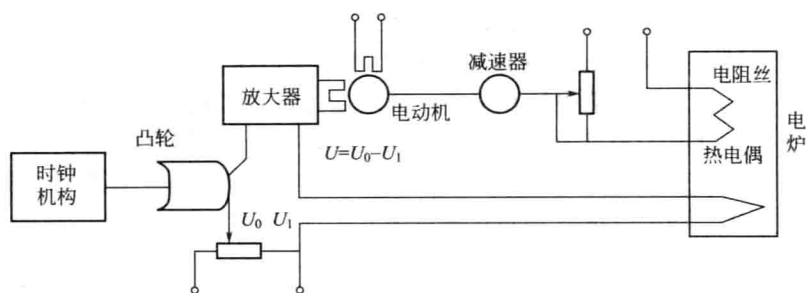


图 1-10 电炉炉温程序控制系统示意图

电炉温度也随之而变化，使热电动势 U_1 时时跟踪 U_0 。

1.3 自动控制系统的过渡过程及品质指标

1.3.1 静态与动态

自动控制系统的输入有两种，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。例如前述锅炉汽包液位系统中，当给水量与蒸汽量相等时，液位保持不变，此时称系统达到了平衡，亦即处于静态。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。

系统和环节的静态特性是很重要的。系统的静态特性是控制品质的重要一环；对象的静态特性是扰动分析、确定控制方案的基础；检测装置的静态特性反映了它的精度；控制装置和执行器的静态特性对控制品质有显著的影响。

假若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。另一方面，在设定值变化时，也引起动态过程，控制装置力图使被控变量在新的设定值或其附近建立平衡。总之，由于输入的变化，输出随时间而变化，其间的关系称为系统的动态特性。

同样，对任何一个环节来说，当输入变化时，也引起输出的变化，其间的关系称为环节的动态特性。

在控制系统中，了解动态特性甚至比静态特性更为重要，也可以说，静态特性是动态特性的一种极限情况。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，设定值不断变化，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。

1.3.2 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（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。

定值控制系统的过渡过程几种形式如图 1-11 所示。图 1-11(a) 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 1-11(b) 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。以上两种形式都是不稳定的，而系统稳定是正常工作的前提。图 1-11(c) 是等幅振荡，亦称中性，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 1-11(d) 是衰减振荡，图 1-11(e) 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。

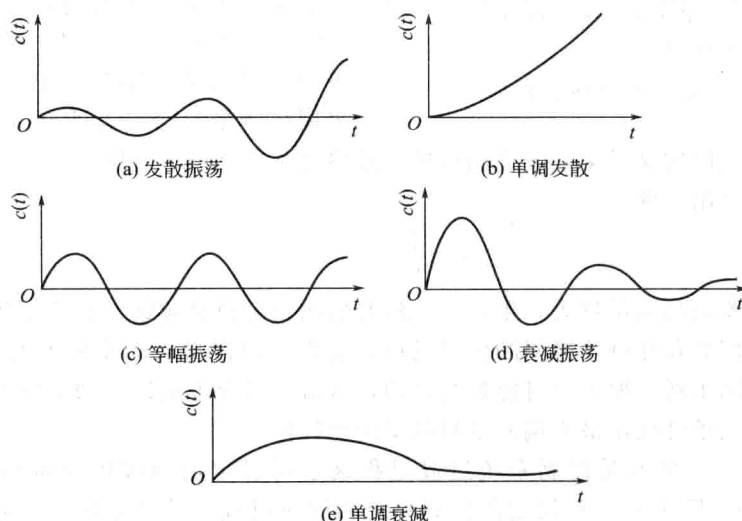


图 1-11 定值控制系统的过渡过程几种形式

稳定的随动系统过渡过程如图 1-12 所示。

1.3.3 自动控制系统的品质指标

图 1-13 是定值控制系统和随动控制系统在阶跃作用下的过渡过程响应曲线。一个控制系统在受到外作用时，要求被控变量要平稳、迅速和准确地趋近或恢复到设定值。因此，在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各种单项控制指标和综合性控制指标。这些控制指标仅适用于衰减振荡过程。

(1) 单项控制指标

① 衰减比 n 衰减比是衡量过渡过程稳定性的动态指标，它的定义是第一个波的振幅与同方向第二个波的振幅之比。在图 1-13 中，若用 B 表示第一个波的振幅， B' 表示同方向第二个波的振幅，则衰减比 $n=B/B'$ 。显然，对衰减振荡而言， n 恒大于 1。 n 越小，意味着控制系统的振荡过程越剧烈，稳定度也越低， n 接近于 1 时，控制系统的过渡过程接近于等幅振荡过程；反之， n 越大，则控制系统的稳定度也越高，当 n 趋于无穷大时，控制系统的过渡过程接近于非振荡

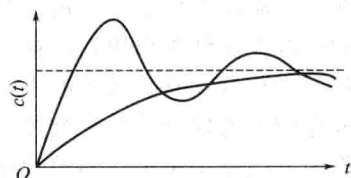


图 1-12 稳定的随动系统过渡过程