

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

自动控制原理及应用

陈祥光 黄聪明 编著

Chen Xiangguang Huang Congming

**Principles and Applications of
Automatic Control**

清华大学出版社

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

自动控制原理及应用

Principles and Applications of Automatic Control

陈祥光 黄聪明 编著

Chen Xiangguang Huang Congming

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书以工程应用为背景,基于专业教学规范的核心知识点,较全面地阐述了自动控制的基本理论,重点介绍经典控制理论和现代控制理论基础。全书共分8章。第1章为绪论,结合实际介绍自动控制的基本概念;第2章介绍线性控制系统的运动方程及模型描述方法;第3章介绍连续控制系统的时域和频域分析方法;第4章介绍闭环控制系统的稳定性分析方法;第5章介绍闭环控制系统的误差分析方法;第6章介绍闭环控制系统的综合校正方法;第7章介绍离散控制系统;第8章介绍控制系统的状态空间分析与设计方法。全书在结构上既集中阐述了线性连续单变量定常系统理论,又体现了经典的连续多变量系统、离散系统与现代控制理论的结合。

本书以工程应用为背景,理论联系实际,部分例题涉及多个学科领域,适用于测控技术与仪器专业、自动化专业以及相关专业的教材,也可供有关科技人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理及应用/陈祥光,黄聪明编著.--北京:清华大学出版社,2011.11

(普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材)

ISBN 978-7-302-27047-8

I.. ①自… II. ①陈… ②黄… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 204172 号

责任编辑:张占奎 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:29 字 数:700 千字

版 次:2011 年 11 月第 1 版 印 次:2011 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:48.00 元

产品编号:034645-01

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

编 委 会

主 任 丁天怀

副 主 任 陈祥光 张 玘

委 员 (按姓氏笔划排列)

王跃科 王光明 邓 焱

安志勇 张文娜 李东升

赵 军 蒋秀珍 魏 彪

责任编辑 张占奎

序

PREFACE

在高技术迅速发展的信息时代,我国仪器科学与技术学科在理论研究、计量基准、产品制造技术、新器件、新材料、新工艺的研究和应用等方面已日趋完善,并形成门类品种比较齐全、布局较为合理、具有相当技术基础和生产规模的仪器仪表产业体系。作为仪器科学与技术学科唯一的本科专业——测控技术与仪器专业的发展速度很快,在近 10 年的时间内,其办学规模大约翻了两番,呈现出招生和分配两头热的良好状态,顺应了信息技术蓬勃发展的趋势。

在学科的建设和发展中,教材建设始终是关注的焦点。鉴于此,2008 年,经清华大学出版社建议,由清华大学牵头组织国内一些在本领域有丰富教学科研经验的专家学者编写一套体系合理、知识实用、内容涵盖面较广的仪器科学与技术学科本科专业系列教材,以满足各兄弟院校本科专业人才培养的需求。

2008 年 7 月,在广泛征求意见的基础上,清华大学、北京理工大学、国防科技大学联合召开会议,讨论仪器科学与技术专业教材的编写思路,并参考“高等学校仪器科学与技术学科本科专业教学规范”初步确定教材定位与结构。为使教材具有代表性并保证更高的编写质量,决定邀请重庆大学、哈尔滨工业大学、中国计量大学、长春理工大学等高校的老师共同组成“普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材”编委会,一起完成教材的组织和编写工作。

2008 年 11 月,编委会正式成立,并在北京召开编委会第 1 次工作会议,进一步明确了本系列教材的具体编写任务和计划。

本系列教材旨在为普通高等学校仪器科学与技术学科本科专业以及其他相关专业的本科生提供一套教学参考书,希望突破传统编写思维的束缚,建立一个新体系。教材内容注重新理论、新技术的应用。每本教材拟采取一校为主、多校合作的方式编写,以保证“新颖性、前沿性和实用性”。

经过编委会认真讨论,本系列共设 15 本教材,分别是《仪器科学与技术概论》、《信号分析与处理》、《自动控制原理及应用》、《误差及不确定度理论与数据处理》、《计量技术》、《测量原理》、《传感器技术》、《工程光学基础及应用》、《测量技术基础》、《精密机械结构设计》、《仪器嵌入式系统技术》、《精密测控仪器设计》、《测控系统工程技术》、《仪器测控电路设计》、《测控系统集成技术》。在内容的组织和编排上,与学生已学过的专业基础课程的内容成先后关系,一般要求学生在进入本系列的专业课程学习之前,应先修诸如“电路原理”、“电子技术”等课程。

2009 年 7 月,编委会第 2 次会议在北京召开,对各教材大纲逐一进行了审查,并明确了编写进度以及编写过程中需要注意的问题,整个教材编写工作进展顺利。

这套教材基本涵盖了仪器科学与技术学科本科专业的主要知识领域,同时也反映了仪器科学与技术学科的发展趋势,不仅适用于普通高等学校测控技术与仪器、机电工程、信息技术、自动化等专业的本科生使用,对研究生、高职学生以及相关专业的工程技术人员也有很好的参考价值。

因水平所限,加之仪器科学与技术学科发展迅速,教材中不妥之处在所难免,欢迎批评指正,以便再版时修改、完善。

编委会

2010年12月于北京

前言

FOREWORD

本书是根据教育部高等学校仪器科学与技术教学指导委员会制定的专业教学规范的要求,在汲取国内外同类教材的优点、结合编者多年的教学实践基础上编写的。

本书主要包括经典控制理论和现代控制理论基础两个部分。经典控制理论以线性定常连续控制系统为主线,在阐述反馈控制基本原理与概念的基础上,着重介绍线性控制系统运动方程的建立方法,系统介绍连续控制系统的时域和频域分析方法,还介绍了闭环控制系统的稳定性分析、误差分析以及综合校正方法。现代控制理论基础部分是在阐述状态空间法的基本概念的基础上,重点介绍了离散系统控制理论,系统介绍了系统状态空间模型的建立与求解方法、能控性和能观性定义及判据,扼要介绍了状态空间设计法。

本书在编写中致力于以下两个目标:在结构安排上,充分考虑控制理论体系的发展形成特点及其认识规律,既注重遵循传统模式,又注意经典与现代控制理论的适当融合;在内容处理上,既注重基本概念、基本方法的阐述,力求概念清楚、思路清晰、循序渐进,又注意理论与实际相结合,力求联系工程应用背景,深入浅出地论述,并精选典型例题与习题,以便于自学。

本书由陈祥光教授和黄聪明教授编写。其中陈祥光编写第1~6章,黄聪明编写第7、8章。在本书的内容策划与撰写过程中,清华大学丁天怀教授、国防科技大学张玘教授以及本系列教材编委会的各位老师给予了热情的支持与帮助,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,清华大学出版社给予了大力支持和帮助,特在此深表谢意。

限于作者水平,书中难免存在问题和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2011年6月于北京

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制的发展概述	1
1.2 控制系统工作原理	3
1.3 自动控制系统类型	5
1.3.1 开环控制系统和闭环控制系统	5
1.3.2 定值控制系统、随动控制系统、程序控制系统	7
1.3.3 连续控制系统和离散控制系统	8
1.3.4 线性控制系统和非线性控制系统	9
1.3.5 单变量控制系统和多变量控制系统	10
1.4 小结	11
习题	12
第 2 章 线性控制系统的运动方程及模型描述	15
2.1 引言	15
2.2 传递函数	16
2.2.1 传递函数的定义	16
2.2.2 传递函数的极点和零点	17
2.2.3 典型环节及其传递函数	17
2.3 线性控制系统的数学模型	20
2.3.1 电气系统的数学模型	20
2.3.2 机械系统的数学模型	23
2.3.3 工业过程装置的数学模型	25
2.3.4 检测与执行装置的数学模型	31
2.3.5 典型对象或环节的数学模型	37
2.4 框图	45
2.4.1 框图的基本符号和连接	45
2.4.2 框图的变换和简化	47
2.5 信号流图	53
2.5.1 信号流图常用术语	54
2.5.2 框图及相应的信号流图	55

2.5.3	框图与信号流图的转换	56
2.5.4	信号流图的运算与简化规则	57
2.5.5	梅森增益公式	59
2.6	应用 MATLAB 对数学模型进行描述	62
2.6.1	应用 MATLAB 进行数学模型转换	62
2.6.2	应用 MATLAB 求系统时域解	63
2.6.3	基于 MATLAB 求取系统传递函数	65
2.7	小结	67
	习题	68

第 3 章	连续控制系统的时域和频域分析方法	75
3.1	引言	75
3.2	连续控制系统的时域分析法	76
3.2.1	典型输入信号	76
3.2.2	控制系统的瞬态响应及性能指标	80
3.3	连续控制系统的根轨迹分析法	98
3.3.1	根轨迹法的基本概念	99
3.3.2	绘制根轨迹的基本条件和规则	100
3.3.3	根轨迹绘制方法举例	113
3.4	连续控制系统的频域分析法	125
3.4.1	频率特性及其与传递函数的关系	125
3.4.2	频率特性的图示方法	128
3.5	基于 MATLAB 的时域和频域分析方法	155
3.5.1	利用 MATLAB 求系统的时域响应	155
3.5.2	利用 MATLAB 计算时域性能指标	157
3.5.3	应用 MATLAB 分析系统根轨迹	159
3.5.4	应用 MATLAB 绘制 Bode 图示例	164
3.5.5	应用 MATLAB 绘制 Nyquist 图示例	169
3.5.6	应用 MATLAB 绘制 Nichols 图示例	174
3.6	小结	178
	习题	179

第 4 章	闭环控制系统的稳定性分析	183
4.1	引言	183
4.2	劳斯稳定判据	183
4.2.1	系统稳定性的初步判别	184
4.2.2	劳斯判据	185
4.2.3	劳斯判据的特殊情况	187
4.2.4	劳斯判据的应用	190

4.3	奈奎斯特稳定判据	192
4.3.1	映射定理	193
4.3.2	奈奎斯特稳定判据原理	198
4.3.3	开环极点或零点位于 $j\omega$ 轴上时的奈奎斯特判据	202
4.4	伯德图的稳定性分析	206
4.4.1	增益裕量和相角裕量	207
4.4.2	相角裕量与过渡过程性能指标的关系	210
4.4.3	最小相位系统和非最小相位系统	213
4.5	闭环频率特性	214
4.5.1	由开环频率特性求取闭环频率特性	214
4.5.2	等 M 圆图和等 N 圆图	215
4.5.3	尼柯尔斯图线	217
4.6	应用 MATLAB 判断系统的稳定性	220
4.7	小结	221
	习题	222

第 5 章 闭环控制系统的误差分析

5.1	引言	225
5.2	控制系统的稳态误差	225
5.2.1	稳态误差和误差传递函数	225
5.2.2	控制系统的结构类型	227
5.2.3	给定输入下(随动系统)的稳态误差	227
5.2.4	扰动输入下(定值系统)的稳态误差	229
5.3	稳态误差与对数幅频特性曲线的关系	232
5.3.1	稳态位置误差系数的确定	232
5.3.2	稳态速度误差系数的确定	232
5.3.3	稳态加速度误差系数的确定	233
5.3.4	减小稳态误差的若干措施	233
5.4	小结	235
	习题	236

第 6 章 闭环控制系统的综合校正

6.1	引言	237
6.2	控制系统的根轨迹校正方法	237
6.2.1	基于根轨迹的超前校正	239
6.2.2	基于根轨迹的滞后校正	242
6.3	控制系统的频率特性校正方法	245
6.3.1	基于伯德图的超前校正	246
6.3.2	基于伯德图的滞后校正	249
6.4	PID 控制器特性分析及应用	253

6.4.1	PID 控制规律	253
6.4.2	PID 控制器参数对控制过程的影响	257
6.4.3	PID 控制器参数对系统根轨迹的影响	260
6.4.4	PID 控制器参数对系统频率特性稳定裕量的影响	266
6.5	小结	271
	习题	272

第 7 章	离散控制系统	274
7.1	引言	274
7.1.1	离散信号	274
7.1.2	离散系统	275
7.1.3	离散系统的研究方法	276
7.2	信号的采样和保持	277
7.2.1	采样过程及其数学描述	277
7.2.2	采样定理与保持器	279
7.3	Z 变换	284
7.3.1	Z 变换的定义	284
7.3.2	Z 变换的求法	285
7.3.3	Z 变换的基本定理	288
7.3.4	Z 反变换	292
7.3.5	改进 Z 变换	295
7.4	离散系统的数学描述	297
7.4.1	差分方程	297
7.4.2	脉冲传递函数	299
7.5	离散系统的分析与设计	308
7.5.1	离散系统的稳定性分析	308
7.5.2	离散系统的稳态性能分析	317
7.5.3	离散系统的动态性能分析	319
7.5.4	数字控制器的设计	327
7.6	MATLAB 在离散系统中的应用	332
7.6.1	连续系统的离散化	332
7.6.2	离散系统的时域分析	333
7.7	小结	334
	习题	335

第 8 章	控制系统的状态空间分析与设计	338
8.1	引言	338
8.2	控制系统的状态空间描述	339
8.2.1	状态空间描述的基本概念	339

8.2.2	状态空间表达式的建立	345
8.2.3	状态空间的线性变换与规范化	362
8.2.4	离散系统的状态空间描述	369
8.3	线性系统状态方程的解法	375
8.3.1	线性定常连续系统状态方程的解法	375
8.3.2	线性定常离散系统状态方程的解法	383
8.4	线性系统的能控性和能观性	386
8.4.1	能控性和能观性概念的提出	386
8.4.2	线性定常连续系统能控性定义及其判据	388
8.4.3	线性定常连续系统能观性定义及其判据	395
8.4.4	线性定常离散系统的能控性和能观性	401
8.4.5	能控性与能观性的对偶关系	405
8.4.6	能控性和能观性与传递函数(矩阵)的关系	406
8.5	控制系统的状态空间设计	408
8.5.1	状态反馈与极点配置	408
8.5.2	状态重构与状态观测器	418
8.6	MATLAB 在状态空间法中的应用	424
8.6.1	状态空间模型建立与转换	424
8.6.2	能控性与能观性的判定	425
8.6.3	状态反馈系统极点配置	426
8.7	小结	426
习题		428

附录

附录		434
A.1	Laplace 变换	434
A.1.1	Laplace 变换的定义	434
A.1.2	基本函数的 Laplace 变换	435
A.1.3	Laplace 变换的主要运算定理	437
A.2	Laplace 变换求解线性常微分方程	439
A.2.1	Laplace 反变换	439
A.2.2	Laplace 变换的应用举例	439
A.2.3	海维塞德(Heaviside)部分分式展开法	442

参考文献

参考文献		448
------	-------	-----



1.1 自动控制的发展概述

当前,自动控制技术几乎渗透到国民经济的各个应用领域及社会生活的各个方面,如在工农业生产、交通运输、国防建设、航空航天工程、家用电器等许多领域获得了越来越广泛的应用。在工业生产过程中,采用自动控制技术可以对压力、温度、流量、液位和成分等参数进行检测与控制,使生产过程实现自动化操作、提高劳动生产率、稳定产品质量、降低能源和原材料消耗、改善操作人员劳动条件、保证安全生产、减少对环境的污染,从而取得明显的经济效益和社会效益。

自动控制和反馈是自动控制系统中的重要概念。自动控制是在没有人的干预下,通过检测装置和执行装置,使被控对象或过程按照预定的规律运行;反馈是通过检测装置将系统的输出返回到系统的输入端,与设定值进行比较,产生偏差信号作为控制器的输入量。在古代,人类对控制与反馈的抽象概念早就有了认识,并利用它们制造了一些著名的装置,如我国古代的铜壶滴漏装置、指南车、水运仪象台,古希腊人制作的滴水时钟等。1769年,瓦特发明了蒸汽发动机离心式调速机构,如图1-1所示。

图1-1是一个与蒸汽机轴相连的机械装置,当蒸汽机的负载减轻或者蒸汽压力升高时,蒸汽机转速升高,飞球调节器的转速也升高,离心力增加,金属球升高,带着套环上升,操纵连杆关小蒸汽阀门,减少蒸汽流量,从而降低蒸汽机速度;反之,当蒸汽机的负载增加或者蒸汽压力下降时,蒸汽机转速降低,飞球调节器的转速也下降,离心力减小,金属球降低,带着套环下降,操纵连杆开大蒸汽阀门,蒸

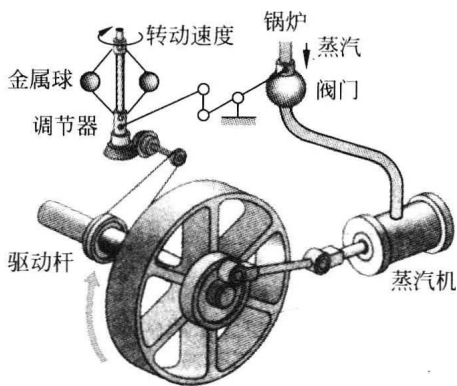


图1-1 瓦特发明的离心式调速机构

汽流量增加,从而提高蒸汽机速度。

蒸汽机的发明标志着英国工业革命的开始,飞球调节器的发明进一步推动了蒸汽机的应用,促进了工业生产的发展,奠定了自动化技术发展的基础。然而,当时为了提高调速精度,蒸汽机速度反而出现大幅度振荡,那时还不能从控制原理上解释这一现象。直到 1868 年,麦克斯威尔(J. C. Maxwell)建立了基于飞球调节器的蒸汽机控制系统的数学模型,解释了蒸汽机调速机构存在不稳定现象,指出了避免这种现象的调速器的设计原则,并提出了一种不直接求解微分方程、适用于低阶微分方程描述的系统的稳定性代数判据。1895 年,劳斯(Routh)及赫尔维茨(Hurwitz)把这种思想扩展到用高阶微分方程描述的更为复杂的系统,他们独立地发现了两种著名的代数判据,用于判断由任意阶线性定常微分方程所描述的系统稳定性。1927 年,伯德(H. W. Bode)分析了反馈放大器,提出了反馈控制系统频率域的分析方法。1932 年,奈奎斯特(H. Nyquist)提出了一种基于系统开环频率特性判别闭环系统稳定与否的判据,并能够给出一个稳定系统稳定程度的一种简单度量方法。1948 年,伊文思(W. R. Evans)根据反馈系统开环、闭环传递函数之间的内在联系,提出了直接由开环传递函数寻求闭环特征根(即闭环极点)的根轨迹法。

目前,在有些自动控制原理教科书中,把在第二次世界大战前后形成的、以系统的传递函数作为数学模型,以频率响应和根轨迹作为设计方法的控制理论,称为经典控制理论;而把在 1960 年前后形成的、以系统的状态变量描述作为数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波作为设计方法的控制理论,称为现代控制理论。控制理论的发展及应用历程简表如表 1-1 所示。近年来,控制理论的应用范围已经扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多领域,自动控制技术已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。随着微处理器、单片机及微型计算机的应用和发展,大大促进了自动控制理论的发展进程。控制理论在与其他学科的互相渗透与促进之中必将导致新的发明和创造。

表 1-1 控制理论的发展及应用历程简表

年 份	控制理论发展的主要内容
1769	瓦特(James. Watt)发明的蒸汽发动机离心式调速机构,标志着英国(也是世界)工业革命的开始
1868	麦克斯威尔发表了“论调节器”一文,利用线性微分方程对离心式调速机构的动态性能进行了分析和研究
1895	劳斯和赫尔维茨把这种思想扩展到高阶微分方程描述的更为复杂的系统,他们独立地发现了两种著名的代数判据,用于判断由任意阶线性定常微分方程所描述的系统稳定性
1927	伯德分析了反馈放大器,提出了基于频域分析(即 Bode 图)的控制系统稳定判据,它能够给出一个稳定系统趋于不稳定的程度的一种简单度量方法
1932	奈奎斯特分析了系统开环频率特性,提出一种判别系统稳定与否的判据(即 Nyquist 图),它能够给出一个稳定系统趋于不稳定的程度的一种简单度量方法
1942	齐格勒(Ziegler)和尼科尔斯(Nichols)提出了控制器参数的最优整定方法,并将该方法应用于生产过程
1946	美国福特公司的机械工程师哈德最先提出“自动化”一词,并用来描述发动机汽缸的自动传送和加工的过程

续表

年 份	控制理论发展的主要内容
1948	伊文思根据反馈系统开环、闭环传递函数之间的内在联系,提出了由开环传递函数寻求闭环特征根(即闭环极点)的根轨迹法
1950—1959	自动调节器和经典控制理论的发展,使自动化进入以单变量自动调节系统为主的局部自动化阶段。美国数学家卡尔曼(R. Kalman)提出了著名的卡尔曼滤波器
1960—1969	卡尔曼提出系统的可控性和可观测性问题,为现代控制理论的发展奠定了基础。随着现代控制理论的发展和电子计算机的推广应用,自动控制与信息处理结合起来,使自动化进入到生产过程的最优控制与过程信息管理的综合自动化阶段
1970—1979	针对大规模的工业生产过程、复杂的工程和非工程系统等,运用一般控制理论已难以解决复杂的控制问题。开展这些问题的研究,促进了自动控制理论和控制技术的发展,于是出现了大系统控制、自适应控制、智能控制等
1980—现在	单片微处理机的出现对控制技术产生了重大影响,使综合自动化和集成自动化成为现实。综合利用计算机技术、通信技术、系统工程和人工智能控制技术等,研制成功的一体化集成系统有 DCS 系统、FCS 系统、柔性制造系统、计算机集成制造系统、办公自动化系统、智能机器人、协同控制系统等

1.2 控制系统工作原理

所谓自动控制,就是利用各类自动控制装置和仪表(包括工业控制计算机)代替人的操作,使生产过程或机器设备自动地按预定的规律运行,或使它的某些参数(如温度、压力、流量、成分、电流、电压、转速等)按预定要求变化或在一定的精度范围内保持恒定。自动控制可以说是人工操作的模仿和发展。下面以一个温度控制系统为例,说明自动控制系统的构成和一些基本概念。

图 1-2 所示为一个液槽液位系统的例子,在该系统中人起到了控制器的作用,他希望使液槽的液位保持在设定值 H 上。为了测量液槽的实际液位,在液槽壁上安装了一个可视液位计 S 。操作者始终监视着液位计 S , h 为实际液位值。当发现液位高于设定值时,就开大液槽出口阀,以降低其液位;当发现液位低于设定值时,操纵者就关小液槽出口阀,使液槽流出量减少,以升高液位。在这个例子中。输出量的反馈(液位)与参考输入量(设定值)的比较,以及控制作用都是通过人工来实现的,这就是一种基于人工的反馈控制系统(或叫做人工闭环控制系统)。

如果用自动控制器来取代人工操作,如图 1-3 所示,就构成了自动控制系统,或叫反馈控制系统。控制系统的输出量,即液槽的实际液位,由传感器检测后通过变送器将输出液位变换成标准信号,与输入量(即设定值)进行比较并作为控制器的输入,在控制器中进行某种运算后,转换成标准信号输出并施加到控制阀上,从而改变控制阀的开度,使液槽的输出流量发生相应变化,最后使实际的液位得到校正。如果没有误差信号,就不必改变阀的开度。在上述系统中,环境温度的变化以及输入流量的变化等,都可以看作是系统的外部干扰。

上述人工反馈和自动反馈控制系统的工作原理是相似的,操作者的眼睛类似于误差测量装置;操纵者的头脑类似于自动控制器;而操作者的肌体则类似于执行机构。

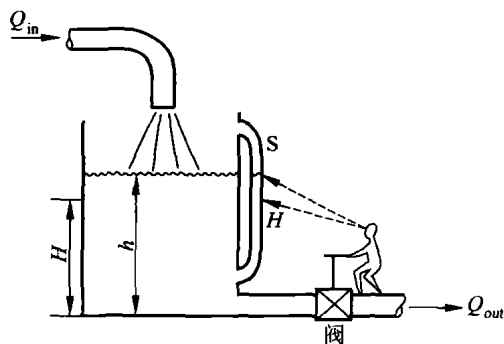


图 1-2 基于人工操作的液位控制系统

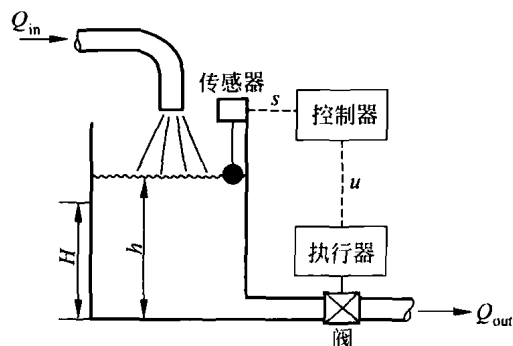


图 1-3 基于控制器的液位自动控制系统

在复杂的控制系统中,由于系统中各变量之间存在着错综复杂的关系,所以就很难进行人工操作。应当指出,即使在简单的系统中,采用自动控制器也有利于消除人工操作所造成的误差。所以,如果要求精确控制,就必须采用自动控制系统。

要实现对液槽液位的自动控制,至少必须有检测元件和变送器、控制(调节)器、控制(调节)阀、液槽等四个部分,它们组成一个简单的自动控制系统。流量、压力、液位、成分等过程参数的控制系统同样也是由这四部分组成的。

常规的自动控制系统由被控对象、测量装置、控制器以及执行器组成,如图 1-4 所示。

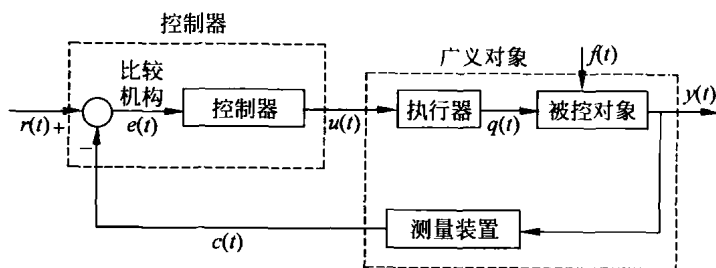


图 1-4 自动控制系统的组成

$r(t)$ —设定值; $y(t)$ —被控参数(实际值); $e(t)$ —偏差, $e(t)=r(t)-c(t)$;
 $u(t)$ —控制量(控制器输出); $c(t)$ —被控参数(测量值); $q(t)$ —操纵量; $f(t)$ —扰动

下面说明控制系统中常用的一些术语。

测量装置(包括检测元件和变送器):检测现场的被控参数 $y(t)$,并将其转化为标准测量值 $c(t)$ 。例如,用热电阻或热电偶测量温度,并用温度变送器将其转换为标准直流信号(0~10mA 或 4~20mA)。

比较机构:比较设定值 $r(t)$ 与测量值 $c(t)$ 并输出其偏差值。

控制器:根据偏差值的正负、大小及变化情况,按某种预定的控制规律给出控制量 $u(t)$ 。比较机构通常包含在控制器里,统称为控制器。目前在工业中应用的控制器有气动式或电动式控制器、智能型控制器或工业控制计算机(简称工控机)。

执行器:接受控制器输出的 $u(t)$,相应地去改变操纵量 $q(t)$ 。工业生产过程中应用的执行器为气动控制阀、电动控制阀等执行机构。

被控对象(过程):一般是指工业生产中需要进行控制的设备、装置或生产过程。如图 1-3 所示的液位自动控制系统中,液槽就是控制对象。

被控参数：在控制对象中要求按预定规律变化的物理量，即被控制的物理量，又称被调参数。在图 1-3 的液位控制系统中，液槽的液位就是被控参数。

控制量：也称调节量，是控制（调节）器的输出，它通过执行器（例如控制阀）改变作用在被控对象上的控制作用大小（例如出口流量），从而对被控对象实现控制。

扰动（干扰）：在自动控制系统中，干扰又称扰动作用。除控制量以外引起被控参数变化的所有作用因素都可视为干扰。如在液位控制系统中，入口流量的变化是扰动作用。又如在蒸汽加热的温度控制系统中，冷流体流量的变化、蒸汽压力的变化等都是扰动因素。

设定（给定）值：指与被控参数工艺规定值相对应的信号值，又称控制目标值，是控制系统的输入变量。

偏差值：指设定值与被控参数测量值之差，在自动控制系统中，一般规定偏差值 $e(t) = r(t) - c(t)$ 。

广义对象：在系统中，控制器以外的各部分组合在一起，即被控对象、执行器、检测装置的组合称为广义对象。

1.3 自动控制系统的类型

由于自动控制技术广泛应用于诸多领域，因此，自动控制系统的种类是很多的，为了对自动控制系统的应用范围和不同系统的主要特点有个概括的了解，在此只介绍一些典型的、不同类型的控制系统。

1.3.1 开环控制系统和闭环控制系统

开环控制是比较简单的控制方式，其特点是，系统的输出量对系统的控制作用没有影响，即没有反馈控制作用，这种系统称为开环控制系统。

图 1-5 所示为直流电动机速度控制系统，这是一个开环控制系统，其输入量是设定电压 U_g ，输出量是电动机转速 n 。当改变电位器滑动端位置时，就相应地改变了设定电压 U_g 和可控硅整流装置的输出电压 U_d 。电位器滑动端的位置对应电动机的转速，改变电位器滑动端的位置，就可对电动机的转速进行控制。

当系统中出现扰动（如电动机的负载变化、可控硅的电源电压变化或可控硅的移相特性变化）时，电动机转速将偏离设定值。此时要维持设定的转速不变，必须人工重新调整电位器滑动端的位置。例如负载突然增加，电动机的转速相应地降低，偏离了设定值。操作人员检测到实际转速并与设定值进行比较，判断出转速低于设定值时，可相应调整电位器的滑动端子，增加设定电压 U_g ，使电动机转速恢复到设定值。图 1-6 所示的结构图，可以表示这种系统的输入量与输出量之间的关系。这种开环控制系统多用于轧钢厂的许多辅助传动设备中。在这些传动过程中，有的只需要控制其起、制动过程，或者有的转速率需要精确地