

2003年国家精品课程《自动控制原理》主干教材
2008年自动控制系列课程国家优秀教学团队精品教材
2009年《控制系统工程》国家双语教学示范课程双语教材



普通高等院校“十二五”规划教材

Principles of Automatic Control

自动控制原理

(第2版)

主 编 陈复扬
副主编 姜 斌
主 审 陶 钢



国防工业出版社

National Defense Industry Press



普通高等院校“十二五”规划教材

2003 年国家精品课程《自动控制原理》主干教材

2008 年自动控制系列课程国家优秀教学团队精品教材

2009 年《控制系统工程》国家双语教学示范课程双语教材

自动控制原理

(第2版)

主 编 陈复扬

副主编 姜 斌

主 审 陶 钢

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

《自动控制原理》(第2版),比较全面地阐述了自动控制的基本理论及应用。全书共分9章,主要包括自动控制系统建模、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、离散系统分析、非线性系统分析、线性系统理论、最优控制理论。各章均含有 MATLAB 支持下对控制系统进行计算机辅助分析与设计的典型实例,并免费提供相应的教学课件。为帮助读者更加熟练掌握该书内容,配套出版了《自动控制原理习题详解与考研辅导》。

本书为2009年《控制系统工程》国家双语教学示范课程双语教材中文版的第2版、2008年自动控制系列课程国家优秀教学团队主干教材、2003年国家精品课程《自动控制原理》精品教材。

本书可作为高等工业院校自动控制、工业自动化、电气自动化、机械、动力、冶金、管理等专业的教材;亦可供从事自动控制类各专业工程技术人员以及对自动控制感兴趣的读者自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/陈复扬主编.—2版.—北京:国防工业出版社,2013.8
ISBN 978-7-118-08872-4

I. ①自... II. ①陈... 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(2013)第 141968 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 584 千字

2013 年 8 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

第2版前言

自动控制原理是控制科学与工程一级学科的重要理论基础,是高等学校自动化及相关专业的一门核心基础理论课程,也是控制学科全国硕士研究生入学考试专业基础课必考科目。学好自动控制原理,对掌握自动化技术以及在自动化领域继续深造有着重要作用。

第2版对第1版内容进行了基础理论部分的删减与优化,并对A例题B考研题C课后习题进行了合理配置,将第1版重新修订分为主教材《自动控制原理》(第2版)和辅导书《自动控制原理习题详解与考研辅导》分别出版。主教材仍分为9章,第1章~第7章为古典控制理论,第8章、第9章为现代控制理论。第1章给出自动控制的基本概念;第2章介绍自动控制系统建模;第3章~第5章介绍线性连续系统的三大分析方法(时域分析法、根轨迹法、频率响应法);第6章阐述线性离散系统的分析法;第7章介绍非线性系统分析法;第8章阐述了线性系统的状态空间分析方法;第9章介绍动态系统的最优控制方法。

本书编委均多年讲授《自动控制原理》、《控制系统工程》课程,教学经验丰富,其中三分之一的编委有在英国、美国、法国、新加坡、香港的求学或工作经历。2009年,本书列选为“《控制系统工程》国家双语教学示范课程双语教材的中文版”。本书按照本科教学大纲的要求编写,突出了基础性、先进性、国际性、易读性,以工程应用为背景,全面阐述自动控制的基本理论、基本概念和基本方法,并配有大量的典型习题、考研试题、课后习题。

在编写和修订过程中:

(1) 本书作为面向双语教学的教材,充分考虑教学模式的国际化,具有国外求学经历与工作经历的编委积极引进国外的教学内容与教学方法,参考了国内外控制理论及应用发展的方向,并邀请美国弗吉尼亚大学陶钢教授担任主审,提出宝贵意见,编写组经反复讨论编写而成。

(2) 根据多年的教学经验及学生的反馈,编写中做到以学生为本,加强能力培养,内容叙述力求深入浅出、削枝强干、层次分明,以最基本的内容为主线,注重工程概念,便于学生课后复习或者自学。

(3) 主教材中引入MATLAB辅助分析与设计,以培养学生现代化的分析与设计能力,适应21世纪教学现代化的发展要求。辅导书配有不同层次和不同用途的例题讲解、考研题分析与课后习题解答,方便学生熟练掌握和深刻理解自动控制原理的基础理论。

编写团队成员均为2008年“自动控制系列课程”国家优秀教学团队主干成员、2003年首批国家精品课程《自动控制原理》主要建设者、2009年《控制系统工程》国家双语教学示范课程核心成员。以该书第1版作为主要成果的教改项目“创建自动化专业系列课程双语教学体系,培

养具有国际竞争力的创新型人才”获得了 2011 年江苏省高等教育教学成果奖二等奖。

第 2 版由陈复扬、姜斌负责改版内容设计,陈复扬负责改版内容组织、校对、统稿、定稿。双语教材中文版第 1 版由陈复扬、姜斌负责内容设计、组织安排编写,各章编写人员是:陈复扬第 1 章;张绍杰第 2 章;王新华、陈复扬第 3 章;齐瑞云、姜斌第 4 章;刘剑慰、陈复扬第 5 章;盛守照第 6 章;丁勇第 7 章;杨蒲第 8 章;陆宁云第 9 章。第 1 版全书由陈复扬统稿、定稿。

第 1 版从酝酿到编写以及成稿,是一个不断完善、不断提高的过程。在此感谢胡寿松教授对编者的多年培养;忠心感谢本书的主审来自美国弗吉尼亚大学的陶钢教授对该书的指导;感谢 2008 年自动控制系列课程国家优秀教学团队带头人吴庆宪教授、国防工业出版社责任编辑丁福志先生对本书的大力支持;同时对在本书编写过程中给予帮助的各位人员表示诚挚的谢意。

在第 2 版出版之时还要感谢广大读者以及网友对本书的批评与指正,督促我们对第 1 版进行了大量仔细的纠错工作,提高了第 2 版的质量。

由于水平有限,对于本版中存在的错误和不妥之处。恳请广大读者不吝指正。

编者 Email:chenfuyang@nuaa.edu.cn

自动控制原理国家精品课程网址:<http://cae.nuaa.edu.cn/ftp/index.asp>

控制系统工程国家双语教学示范课程网址:<http://gc.nuaa.edu.cn/cse>

陈复扬
中国南京
2013 年 5 月

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念 1	
1.1 引言..... 1	
1.2 自动控制简史..... 1	
1.3 自动控制系统的基本概念..... 2	
1.3.1 自动控制系统..... 2	
1.3.2 控制方式的分类..... 5	
1.3.3 开环与闭环控制系统的 比较..... 6	
1.4 自动控制系统的分类及组成..... 7	
1.4.1 自动控制系统的分类..... 7	
1.4.2 自动控制系统的组成..... 7	
1.5 对控制系统的性能要求..... 8	
1.5.1 自动控制系统的性能 要求..... 8	
1.5.2 自动控制系统的典型外 作用..... 9	
本章小结..... 9	
第 2 章 控制系统的数学模型 10	
2.1 引言..... 10	
2.2 控制系统的时域数学模型..... 11	
2.2.1 控制系统的微分方程..... 11	
2.2.2 控制系统的线性近似..... 13	
2.3 拉普拉斯变换..... 16	
2.3.1 拉普拉斯变换的定义..... 16	
2.3.2 拉普拉斯变换的常用定理..... 17	
2.3.3 拉普拉斯反变换..... 20	
2.3.4 微分方程的求解..... 22	
2.4 控制系统的复域数学模型..... 23	
2.4.1 传递函数..... 23	
2.4.2 传递函数的极点和 零点对输出的影响..... 25	
2.4.3 典型元件的传递函数..... 26	
2.5 控制系统的结构图与信号 流图..... 27	
2.5.1 控制系统的结构图..... 27	
2.5.2 控制系统的信号流图..... 32	
2.5.3 闭环系统的常用传递 函数..... 36	
2.6 控制系统建模的应用研究..... 37	
2.6.1 数学模型的实验测定..... 37	
2.6.2 利用 MATLAB 进行 系统建模..... 38	
2.7 控制系统建模的设计实例..... 40	
本章小结..... 42	
课后练习题..... 43	
第 3 章 线性系统的时域分析法 47	
3.1 引言..... 47	
3.2 线性系统的时域性能指标..... 47	
3.2.1 典型输入信号..... 47	
3.2.2 动态性能与稳态性能..... 49	
3.3 线性系统的稳定性分析..... 51	
3.3.1 稳定性的基本概念..... 51	
3.3.2 线性系统稳定的充分 必要条件..... 52	
3.3.3 劳斯稳定判据..... 54	
3.3.4 劳斯稳定判据的 特殊情况..... 55	
3.3.5 劳斯稳定判据的应用..... 57	
3.4 线性系统的快速性分析..... 60	

3.4.1	一阶系统的时域分析	60
3.4.2	二阶系统的时域分析	64
3.5	线性系统的准确性分析	72
3.5.1	线性系统的稳态误差计算	73
3.5.2	减小和消除稳态误差的方法	79
3.6	线性系统的时域法校正	81
3.6.1	比例—微分环节(PD)校正	81
3.6.2	比例—积分环节(PI)校正	84
3.6.3	比例—积分—微分环节(PID)校正	84
3.7	线性系统时域法的应用	85
3.7.1	利用 MATLAB 研究时域法	85
3.7.2	时域分析法的设计实例	87
	本章小结	88
	课后练习题	89
第4章	线性系统的根轨迹法	93
4.1	引言	93
4.2	根轨迹法的基本概念	93
4.2.1	闭环零、极点与开环零、极点的关系	94
4.2.2	根轨迹方程	96
4.3	根轨迹绘制的基本法则	97
4.3.1	绘制根轨迹的基本法则	97
4.3.2	闭环极点的确定	104
4.4	广义根轨迹	106
4.4.1	参数根轨迹	106
4.4.2	零度根轨迹	107
4.5	线性系统的控制性能分析	109
4.5.1	闭环零、极点分布与阶跃响应的定性分析	110
4.5.2	主导极点与偶极子的概念	110
4.5.3	用主导极点估算系统	

	的性能	112
4.6	线性系统的根轨迹法校正	114
4.6.1	超前校正	114
4.6.2	滞后校正	118
4.6.3	超前—滞后校正	119
4.7	线性系统根轨迹法的应用	121
4.7.1	利用 MATLAB 研究根轨迹法	121
4.7.2	根轨迹法的设计实例	123
	本章小结	125
	课后练习题	125
第5章	线性系统的频域分析法	128
5.1	引言	128
5.2	频率特性	128
5.2.1	频率特性的基本概念	128
5.2.2	频率特性的几何表示方法	130
5.3	开环系统的频率特性	133
5.3.1	典型环节的频率特性	133
5.3.2	开环系统的频率特性	143
5.4	线性系统的稳定性分析	151
5.4.1	频率域稳定判据	151
5.4.2	稳定裕度	157
5.5	闭环系统的频域性能指标	158
5.5.1	控制系统的带宽	159
5.5.2	闭环系统频域性能指标和时域指标的转换	159
5.6	线性系统的频域法校正	161
5.6.1	串联超前校正	162
5.6.2	串联滞后校正	165
5.6.3	串联滞后—超前校正	167
5.7	线性系统频域法的应用	171
	本章小结	175
	课后练习题	175
第6章	线性离散系统的分析	180
6.1	引言	180

6.2	离散控制系统的基本概念	180	7.3	常见非线性特性及其对系统性能的影响	220
6.2.1	离散控制系统的应用	180	7.4	描述函数法	226
6.2.2	离散控制系统的特点	181	7.4.1	描述函数的基本概念	226
6.2.3	离散控制系统的研究方法	182	7.4.2	典型非线性特性描述函数	228
6.3	信号的采样和保持	182	7.4.3	非线性系统的简化	233
6.3.1	采样过程	182	7.4.4	描述函数法进行非线性系统分析	236
6.3.2	采样过程的数学描述	183	7.5	非线性控制系统的设计实例	241
6.3.3	采样定理	184	本章小结	244	
6.3.4	零阶保持器	186	课后练习题	244	
6.4	Z 变换理论	188			
6.4.1	Z 变换的定义	188	第 8 章	线性系统的状态空间分析与综合	247
6.4.2	Z 变换的求法	189	8.1	引言	247
6.4.3	Z 变换的基本定理	192	8.2	线性系统的状态空间描述	248
6.4.4	Z 反变换	194	8.2.1	状态与状态变量	248
6.5	离散系统的数学模型	197	8.2.2	状态空间表达式	248
6.5.1	离散系统的数学定义	197	8.2.3	状态空间表达式的建立方法	250
6.5.2	线性常系数差分方程及其解法	197	8.2.4	线性连续时不变系统状态方程的解	259
6.5.3	脉冲传递函数	199	8.2.5	系统的传递函数矩阵	264
6.6	离散系统的稳定性分析	207	8.2.6	线性系统状态空间模型的线性变换	265
6.6.1	离散控制系统稳定的充要条件	207	8.2.7	线性离散系统的状态空间模型	270
6.6.2	劳斯稳定判据	207	8.3	线性系统的能控性和能观性	272
6.6.3	采样周期与开环增益对稳定性的影响	210	8.3.1	线性连续系统的能控性	272
6.6.4	离散系统的稳态误差分析	210	8.3.2	输出能控性	274
本章小结		214	8.3.3	线性连续系统的能观性	275
课后练习题		214	8.3.4	状态空间表达式的能控和能观标准型转化	277
第 7 章	非线性控制系统分析	217	8.3.5	线性定常系统的规范分解	282
7.1	引言	217	8.3.6	离散系统的能控性和能观性	285
7.2	非线性控制系统概述	217			
7.2.1	非线性系统的特点	217			
7.2.2	非线性系统的分析与设计方法	220			

8.4 李雅普诺夫稳定性分析.....	288	9.3.1 微积分基础	319
8.4.1 李雅普诺夫意义下的 稳定性	289	9.3.2 泛函与变分法基本概念	321
8.4.2 李雅普诺夫第一法 (间接法)	290	9.3.3 泛函极值问题与欧拉 方程	322
8.4.3 李雅普诺夫第二法 (直接法)	291	9.3.4 条件泛函极值与动态 系统的最优控制问题	326
8.4.4 李雅普诺夫第二法在线性 定常系统中的应用	294	9.4 极小值原理及其应用.....	335
8.5 线性定常系统的状态综合.....	296	9.4.1 经典变分法的局限	335
8.5.1 两种常用反馈控制结构	297	9.4.2 连续系统的极小值原理	335
8.5.2 反馈结构对系统性能的 影响	298	9.4.3 极小值原理的应用	337
8.5.3 系统的极点配置.....	300	9.5 线性二次型最优控制问题.....	343
8.5.4 全维状态观测器.....	302	9.5.1 线性二次型问题.....	343
8.5.5 分离特性	305	9.5.2 线性系统状态调节器 问题	344
8.6 状态空间分析法的设计实例.....	306	9.5.3 倒立摆的最优控制问题	348
本章小结	309	9.6 动态规划.....	351
课后练习题	309	9.6.1 动态规划基本思想	351
第9章 最优控制理论基础.....	315	9.6.2 动态规划法求解离散 最优控制问题	353
9.1 引言.....	315	本章小结	354
9.2 最优控制问题导论.....	315	课后练习题	355
9.3 最优控制中的变分法.....	318	参考文献.....	356

第 1 章 自动控制的一般概念

本章提要

本章主要介绍自动控制技术的发展史,进而介绍自动控制原理的基本概念及一系列专有名词,分析了自动控制系统的分类、组成以及对自动控制系统的性能要求。

1.1 引言

工程技术是通过理解并控制自然而造福人类的。控制系统工程师通过理解和控制他们周边环境的一部分,即所谓的系统,为社会提供经济实用的产品。理解和控制,这种双重目标是相辅相成的,因为对系统的有效控制需要对系统的理解和建模。不过,控制工程也常常不得不考虑对尚未充分理解的系统实施控制,如对化工过程的控制。控制工程师当前面临的挑战,是对诸如交通管制系统、化工过程、机器人系统等复杂的、关联性强的现代系统进行建模和控制。所幸的是,工程师已能对许多感兴趣的实用工业自动化系统实施控制。或许控制工程最显著的特征就是对各类机器、工业生产过程及经济活动过程等实施控制,以直接造福于社会。

控制工程以反馈理论和线性系统理论为基础,并综合应用了网络理论和通信理论的有关概念。因此,控制工程并不局限于任一单个工程学科,而是在航空工程、化工工程、机械工程、环境工程、土木工程、电气工程等工程学科中都有同样广泛的应用。例如,一个控制系统通常会包括电子、机械和化工部件。另外,随着对商业、社会和政治系统运动规律的进一步认识,人类对它们的控制能力也将逐步增强。

1.2 自动控制简史

利用反馈对系统实施控制有着多彩的历史。最早的反馈控制实例可能是公元前 300 年—公元前 1 年在古希腊出现的浮球调节装置。大约在公元前 250 年,Philon 发明了油灯,该灯使用浮球调节器来保持燃油的油面高度。生活在公元 1 世纪前后的亚历山大人 Heron,曾经出版过一本名为《气体力学》的书,书中介绍了几种利用浮球调节器控制水位的方法。

近代欧洲最早发明的反馈系统是荷兰人 Cornelis Drebbel(1572 年—1633 年)发明的温度调节器,Dennis Papin(1647 年—1712 年)则在 1681 年发明了第一个锅炉压力调节器,该调节器是一种安全调节装置,与目前压力锅的减压安全阀类似。

人们普遍认为最早应用于工业过程的自动反馈控制器,是 James Watt 于 1769 年发明的飞球调节器,它被用来控制蒸汽机的转速。俄国人则断言,最早的具有历史意义的反馈系统是由 I. Polzunov 于 1765 年发明的用于水位控制的浮球调节器。

1868 年之前,自动控制系统发展的主要特点是凭借直觉的实证性发明。提高控制系统精度的不懈努力导致人们要解决瞬态振荡的减振问题,甚至是系统的稳定性问题,因此,发展自动控

制理论便成为当务之急。J. C—Maxwell 用微分方程建立了一类调节器的模型,发展了与控制理论相关的数学理论,其工作重点在于研究不同系统参数对系统性能的影响。在同一时期,I. A. Vyshnegradskii 建立了调节器的数学理论。

第二次世界大战之前,控制理论及在美国和西欧的发展与它在俄国和东欧的发展采取了不同的途径。在美国,Bode、Nyquist 和 Black 等人在贝尔电话实验室电话系统和电子反馈放大器所做的研究工作,是促进反馈系统应用的主要动力,采用带宽等频域变量术语的频域方法当初主要用来描述反馈放大器的工作情况。与此相反,在苏联,一些著名的数学家和应用力学家发展和主导着控制理论,因而,他们倾向于用微分方程描述系统的时域方法。

第二次世界大战期间,自动控制理论及应用得到了巨大的发展。战争需要用反馈控制的方法设计和建造飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些军用系统的复杂性和对高性能的追求,要求拓展已有的控制技术。这导致人们更加关注控制系统,同时也产生了许多新的见解和方法。1940 年以前,控制系统设计在绝大部分场合是一门艺术或手艺,用的是“试凑法”。在 20 世纪 40 年代,数学和分析的方法无论在数量还是在实用性方面都有了很大发展,控制工程因而也发展成为一门工程科学。

随着拉普拉斯(Laplace)变换和频域复平面的广泛应用,频域方法在第二次世界大战之后仍在控制领域占据着主导地位。20 世纪 50 年代,控制工程理论的重点是发展和应用平面方法,特别是根轨迹法。到了 20 世纪 80 年代,数字计算机用作控制部件已届平常,这些新部件为控制工程师提供了前所未有的运算速度和精度。在美国,现在安装和使用着逾 40 万台控制用数字计算机,它们主要用于过程控制系统,同时也用于多变量同步测量和控制。

随着人造卫星和空间时代的到来,控制工程又有了新的推动力。为导弹和空间探测器设计复杂、高精度的控制系统成了现实需要。此外,由于既要减轻卫星等飞行器的重量,又要对它们实施精密控制,最优控制因而变得十分重要。正是基于上述需求,最近 20 年来,由 Liapunov、Minorsky 等人提出的时域方法受到了极大的关注。由苏联的 L. S. Pontryagin 和美国的 R. Bellman 研究提出的最优控制理论,以及近期人们对鲁棒系统的研究,都为时域方法增色不少。已经众所周知的是,控制工程在进行控制系统分析与设计时应同时考虑时域和频域两种方法。

1.3 自动控制系统的基本概念

自动控制系统实例很多,这里首先介绍几个名词,再通过分析交通信号灯自动控制系统、水池水位人工控制系统、水池水位阀门连动控制系统、水池水位浮球控制系统等阐述自动控制的基本概念,并对自动控制系统的控制方式进行分类,分别阐述开环控制闭环控制的优缺点。

定义 1.3.1 所谓自动控制就是应用控制装置自动地、有目的地控制或操纵机器/设备或生产过程,使其具有一定的状态和性能。

定义 1.3.2 被控制的机器设备或物体称为被控对象。

定义 1.3.3 所用的控制装置称为控制器。

1.3.1 自动控制系统

例 1.3.1 交通信号灯的自动控制系统。

如图 1.3.1 所示,城市里繁忙的交通路口常见这种无人管理的自动信号灯系统,一般按照一定的时间间隔以绿/黄/红的顺序反复切换以此来控制在路口通过的交通元(人流和车流)。



图 1.3.1 交通信号灯自动控制系统

例 1.3.2 水池水位人工控制系统。

如图 1.3.2 所示的水池中,水自水泵源源不断地通过管道和阀门二流进水池,而由各出水管流出,供用户使用。要求在用水量随意改变的情况下,保持水池水位的高度不变。

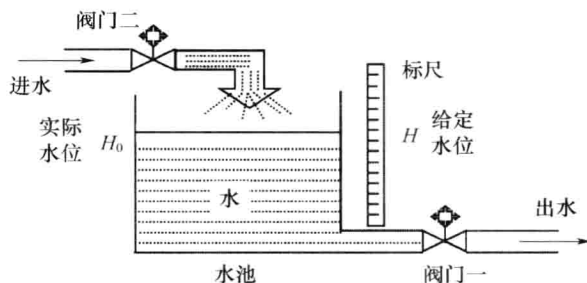


图 1.3.2 水池水位人工控制系统示意图

用人工操作来实现这一目的过程是:操作人员首先测量水池的实际水位 H_0 ,将它和要求的的水位值 H 相比较,得出偏差或误差,然后根据偏差值调节进水阀门的打开程度,改变进水量。

例如,当用水量增大、水池水位迅速下降时,应开大阀门使进水量大于出水量,使水位回升,当水池水位回升到要求值时,调节阀门使进水量等于用水量。如果用水量等于零,则应关闭阀门使水位保持在要求的高度。

通过分析可知,水池水位人工控制系统需要人参与,并且需要人 24h 看护该系统,用工成本较高。随着工程技术人员的开发设计,设计出了水池水位阀门连动控制系统来解决自动控制问题。

例 1.3.3 水池水位阀门连动控制系统。

如图 1.3.3 所示的水池水位控制系统中没有人为的外界干预,一个杠杆力图控制水池里出水量与进水量一致从而保持水位的不变。显然,它是一个自动控制系统,被控对象是水池,被控量是水池水位,控制器是杠杆和两个阀门。

通过分析其工作原理可知,由于该系统的各种元件会存在误差,误差积累会造成系统无法使用,所以该系统虽然是自动控制系统,但是设计中存在原理性误差,所以仍需要人参与。虽然该系统不像例 1.3.2 系统那样需要 24h 派人看护,但是仍需要隔一段时间派一个人检查一下水池

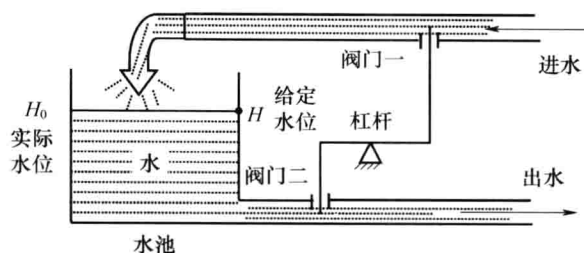


图 1.3.3 水池水位阀门联动控制系统示意图

水位控制情况(如 2h 去检查 1 次),以消除误差,使用户安全用水,不至于出现用户无水用或者水池水溢出。科技人员设计出水池水位浮球控制系统来消除原理性误差。

例 1.3.4 水池水位浮球控制系统。

如图 1.3.4 所示的系统,同样是用装置替代操作人员构成的水池水位控制系统。实际水位高于给定期望值时,浮球顶起杠杆,从而关小阀门二使进水量小于出水量,水位下降。相反,当实际水位低于期望值时,浮球下降,作用于杠杆使阀门二打开,使入水量大于出水量,水位上升,最终达到进出平衡。显然,它也是一个自动控制系统,被控对象是水池,被控量是水池水位,控制器是浮球、杠杆和阀门二。

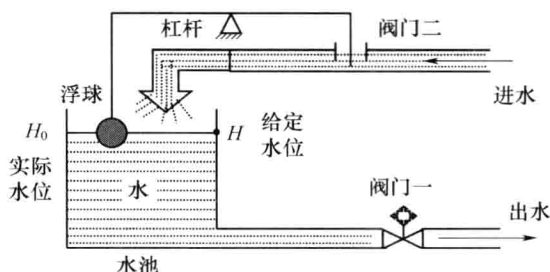


图 1.3.4 水池水位浮球控制系统示意图

由工作原理分析可知,水池水位浮球控制系统则不存在原理性误差,不需要人参与,完全实现了无人控制,安全使用。这就是常用的抽水马桶的工作原理。

为了便于分析控制系统的工作原理,这里以例 1.3.2 为例,以方块图的形式给出系统的职能图。水池水位人工控制系统的职能图如图 1.3.5 所示。

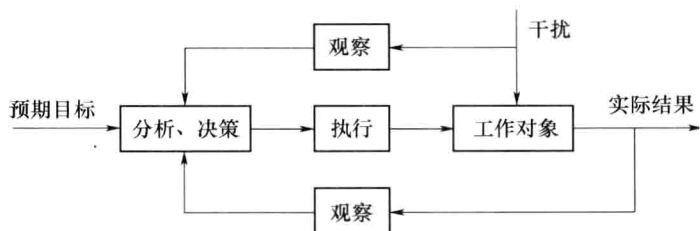


图 1.3.5 水池水位人工控制系统的职能图

用一般的控制工程语言代换职能图中的文字,得到自动控制系统的方框图。水池水位人工控制系统的方框图如图 1.3.6 所示。

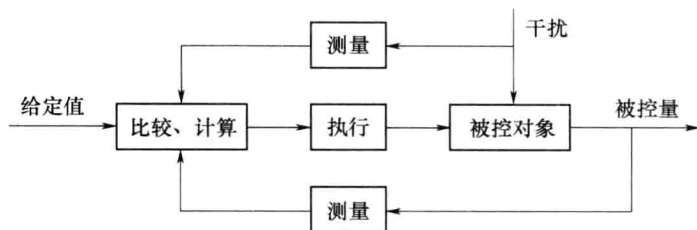


图 1.3.6 水池水位人工控制系统的方框图

从图 1.3.6 控制方框图可以看出，控制装置应具有三种基本功能，分别是测量、计算与执行，这些功能需要相应的元件承担。参与控制的信号来自三条通道，分别是给定值、被控量与干扰，这是控制的主要依据。基于这些分析，可以获得两大类共三种自动控制的基本方式。三种基本控制方式分别是按给定值操纵、按干扰补偿、按偏差调节，前两种控制方式属于开环控制，第三种控制方式属于闭环控制。

1.3.2 控制方式的分类

1. 按给定值操纵

由例 1.3.1 交通信号灯控制系统的控制方式可以发现，系统的输出量（被控量）对输入量（控制量——信号灯绿/黄/红的变色指令）没有任何影响，干扰（等待通行的交通元——人流/车流）对输入量也无任何影响。其工作方框图如图 1.3.7 所示。



图 1.3.7 按给定值操纵控制方框图

定义 1.3.4 按给定值操纵。

一般地，将控制输入既不依赖于输出又不依赖于干扰的控制方式称为按给定值操纵。

这种控制方式比较简单，但有较大的缺陷，即系统的精度难以保证。目前，在国民经济各部门中应用的此类控制系统还有自动售货机、自动洗衣机、产品生产流水线、包装机、线切割机等。

2. 按干扰补偿

由例 1.3.3 水池水位阀门连动控制系统的控制方式可以发现，尽管系统的控制量（进水速度——进水阀门的开启大小）不依赖于输出量（水池实际水位），但是干扰（出水量）对控制信号的影响却是直接的。其工作方框图如图 1.3.8 所示。

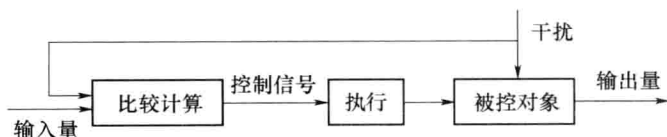


图 1.3.8 按干扰补偿控制方框图

定义 1.3.5 按干扰补偿。

一般地，将利用干扰信号产生控制作用，以补偿干扰对被控量的影响的控制方式称为按干扰

补偿。

这种控制方式在精度上比按给定值操纵的方式要好,但由于它对不可测干扰以及对象/各功能部件内部参数变化给被控量造成的影响,系统自身无法控制,因此,其控制精度仍然受到原理上的限制。工作机械的恒速控制(如稳定刀具转速)、电流系统的稳压、稳频控制都常用这种补偿方式。

3. 按偏差调节

由例 1.3.4 水池水位浮球控制系统的控制方式可以发现,该系统的控制量是由系统的输出量和输入量同时决定的。其工作方框图如图 1.3.9 所示。

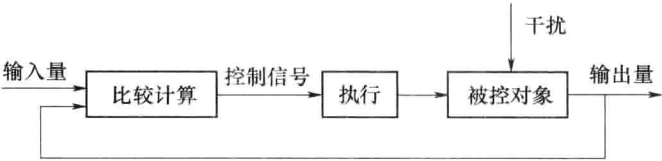


图 1.3.9 按偏差调节控制方框图

定义 1.3.6 按偏差调节。

一般地,称这种控制信号往复循环,沿前向通道和反馈通道闭路传送的控制方式为按偏差调节(又称反馈控制)。

反馈控制是自动控制系统中最基本的控制方式,因为它无论是由于干扰造成的,还是由结构参数的变化引起的,只要被控量出现偏差,系统就能自行纠偏,在原理上提供了实现高精度控制的可能性,所以这种控制方式在工程中获得了广泛应用。

定义 1.3.7 开环控制。

图 1.3.7 按给定值操纵控制方式与图 1.3.8 按干扰补偿控制方式的原理图中的控制信号只能单向传输,故统称为开环控制方式。

定义 1.3.8 闭环控制。

图 1.3.9 按偏差调节控制方式中控制信号可以在系统中往复循环传输(即信号通道形成了一个闭环),故称这类控制方式为闭环控制方式。

定义 1.3.9 复合控制。

由于反馈控制只有在偏差出现后才产生控制作用,因此,系统在强干扰作用下,控制过程中被控量可能有较大的波动,对于这种工作环境,同时采用按偏差调节和按干扰补偿的开—闭式复合控制更为合适。

1.3.3 开环与闭环控制系统的比较

表 1.3.1 分别给出了开环与闭环控制方式的优缺点,供读者在选择控制方式时参考。

表 1.3.1 开环控制与闭环控制方式比较

控制方式	优点	缺点	控制方式	优点	缺点
开环控制	结构简单 经济 无不稳定问题 便于调试	抗干扰能力差 控制精度不高	闭环控制	抗干扰能力强 控制精度高	结构复杂 价格高 有不稳定问题 难以调试

1.4 自动控制系统的分类及组成

1.4.1 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。例如,按控制方式可分为开环控制、反馈控制、复合控制等;按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等;按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等;按系统性能可分为线性系统 and 非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等;这里主要按输入量变化规律又可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统等。一般地,为了全面反映自动控制系统的特点,常常将上述各种分类方法组合应用。

1. 恒值控制系统

这类控制系统的输入量是一个常值,要求输出量亦等于一个常值,故又称为调节器。但由于扰动的影响,输出量会偏离输入量而出现偏差,控制系统便根据偏差产生控制作用,以克服扰动的影响,使输出量恢复到给定的常值。因此,恒值控制系统分析、设计的重点是研究各种扰动对被控对象的影响以及抗扰动的措施。在恒值控制系统中,输入量可以随生产条件的改变而改变,但是,一经调整后,输出量就应与调整好的输入量保持一致。例 1.3.4 水池水位浮球控制系统就是一种恒值控制系统,其输入量是常值。此外,还有温度控制系统、压力控制系统、液位控制系统等。在工业控制中,如果被控量是温度、流量、压力、液位等生产过程参量时,这种控制系统则称为过程控制系统,它们大多数都属于恒值控制系统。

2. 程序控制系统

这类控制系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数,要求输出量迅速、准确地加以复现,例 1.3.1 交通信号灯控制系统便是一例。程序控制系统的输入量是已知的时间函数。恒值控制系统可视为程序控制系统的特例。

3. 随动系统

这类控制系统的输入量是预先未知的随时间任意变化的函数,要求输出量以尽可能小的误差跟随输入量的变化,故又称为跟踪系统。在随动系统中,扰动的影响是次要的,系统分析、设计的重点是研究输出量跟随的快速性和准确性。在随动系统中,如果输出量是机械位置或其导数时,这类系统称为伺服系统。

1.4.2 自动控制系统的组成

反馈控制系统是由各种结构不同的元件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看,一个系统必然包含被控对象和控制装置两大部分,而控制装置是由具有一定职能的各种基本元件组成的。在不同系统中,结构完全不同的元件却可以具有相同的职能,因此,将组成系统的元件按职能分类主要有以下几种:

(1) 测量元件。其职能是检测被控制的物理量,如果这个物理量是非电量,一般要再转换为电量。例如,测速发电机用于检测电动机轴的速度并转换为电压;电位器、旋转变压器或自整角机用于检测角度并转换为电压;热电偶用于检测温度并转换为电压等。

(2) 给定元件。其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量(即给定值)。

(3) 比较元件。其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的输入量进行比

较,求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

(4) 放大元件。其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大,用来推动执行元件去控制被控对象。电压偏差信号可用集成电路、晶闸管等组成的电压放大级和功率放大级加以放大。

(5) 执行元件。其职能是直接推动被控对象,使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

(6) 校正元件。校正元件也叫补偿元件,它是结构或参数便于调整的元件,用串联或反馈的方式连接在系统中,以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络,复杂的则用电子计算机。

一个典型的反馈控制系统基本组成可用图 1.4.1 所示的方块图表示。图中,用“O”代表比较元件,它将测量元件检测到的被控量与输入量进行比较,“—”号表示两者符号相反,即负反馈;“+”号表示两者符号相同,即正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路;系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外,还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统,有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

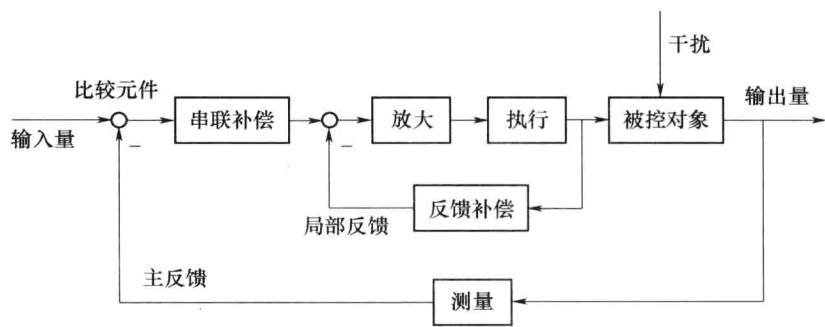


图 1.4.1 反馈控制系统的基本组成

一般地,加到反馈控制系统上的外作用有两种类型:一种类型是有用输入;另一种类型是扰动。有用输入决定系统被控量的变化规律;扰动是系统不希望有的外作用,它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中,扰动总是不可避免的,而且它可以作用于系统中的任何元件上,也可能一个系统同时受到几种扰动作用。电源电压的波动,环境温度、压力以及负载的变化,飞行中气流的冲击,航海中的波浪等,都是现实中存在的扰动。

1.5 对控制系统的性能要求

1.5.1 自动控制系统的性能要求

按照反馈原理设计的自动控制系统,是否都能很好地进行工作,是否都能精确地保持被控量等于给定值,这并不知道。系统也有可能工作得很坏,甚至会发生被控量的强烈振动,使被控对象遭到破坏。这将取决于被控对象和控制装置之间各功能元件的特性参数之间是否匹配得当。

在理想情况下,自动控制系统的被控量和给定值,任何时候都相等,完全没有误差,而且不受干扰的影响,即 $c(t)=r(t)$ 。

实际系统中,由于机械部分质量、惯量的存在,电路中的电感、电容的存在,并且也由于能源