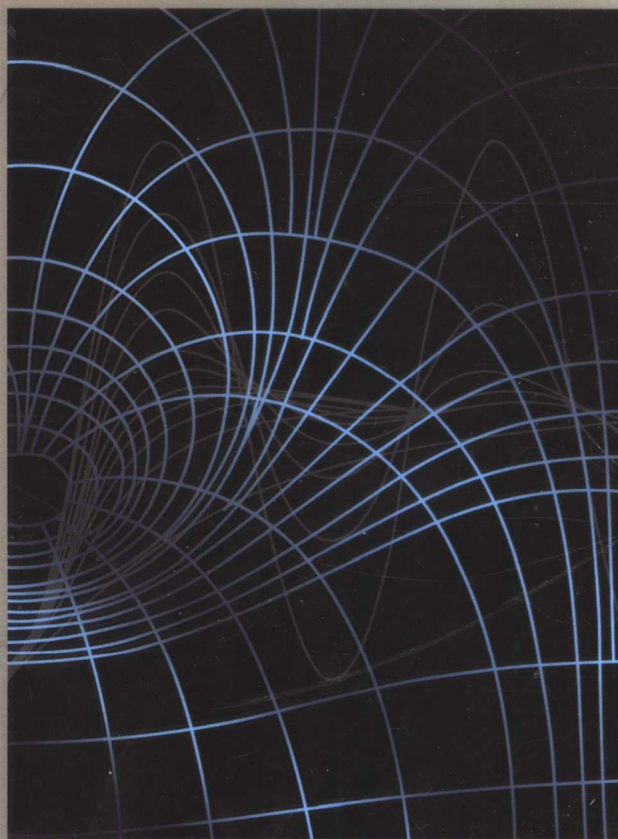


21 世纪高等院校
..... 自动化类专业系列教材

自动控制原理

窦日轩 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书主要介绍分析和设计反馈控制系统的经典理论和方法。全书共 7 章, 内容有自动控制系统的基本概念、线性控制系统的数学模型、控制系统的稳定性分析、控制系统的性能研究、根轨迹法、控制系统的校正、采样离散控制系统等。每章有小结、示例以及习题, 并在书末附有部分习题的参考答案。

本书可以作为高等院校自动化相关专业的教材或参考书, 也可以供从事自动化技术的人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/窦日轩编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.10

(21 世纪高等院校自动化类专业系列教材)

ISBN 7-111-20174-4

I. 自... II. 窦... III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124585 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 戴琳 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣

封面设计: 刘吉维 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 32.75 印张 · 814 千字

0 001—4 000 册

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高等院校自动化类专业系列教材

编 审 委 员 会

主 任 袁著祉 南开大学

副主任 王桂增 清华大学

席裕庚 上海交通大学

委 员 (以姓氏笔画为序)

田作华 上海交通大学

李华德 北京科技大学

陈大钦 华中科技大学

张长水 清华大学

胡毓坚 机械工业出版社

贾 磊 山东大学

韩崇昭 西安交通大学

薛定宇 东北大学

出版说明

自动化技术是一门集控制、系统、信号处理、电子和计算机技术于一体的综合技术,广泛用于工业、农业、交通运输、国防、科学研究以及商业、医疗、服务和家庭等各个方面。自动化水平的高低是衡量一个国家或社会现代化水平的重要标志之一,建设一个现代化的国家需要大批从事自动化事业的人才。高等院校的自动化专业是培养国家所需要的专业面宽、适应性强,具有明显的跨学科特点的自动化专门人才的摇篮。

为了适应新时期对高等教育人才培养工作的需要,以及科学技术发展的新趋势和新特点,并结合最新颁布实施的高等院校自动化专业教学大纲,我们邀请清华大学、南开大学、上海交通大学、西安交通大学、东北大学、华中科技大学、山东大学、北京科技大学等名校的知名教师、专家和学者,成立了教材编写委员会,共同策划了这套面向高校自动化专业的教材。

本套教材定位于普通高等院校自动化类专业本科层面。按照教育部颁发的《普通高等院校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求,适合作为广大高校相关专业的教材,反映了当前教学与技术发展的主流和趋势。

本套教材的特色:

1. 作者队伍强。本套教材的作者都是全国各院校从事一线教学的知名教师和相关专业领域的学术带头人,具有很高的知名度和权威性,保证了本套教材的水平和质量。
2. 观念新。本套教材适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求。
3. 内容新。近 20 年,自动化技术发展迅速,与其他学科的联系越来越紧密。这套教材力求反映学科发展的最新内容,以适应 21 世纪自动化人才培养的要求。
4. 体系新。在以前教材的基础上重构和重组,补充新的教学内容,各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化,避免了遗漏和不必要的重复。根据基础课教材的特点,本套教材的理论深度适中,并注意与专业教材的衔接。
5. 教学配套的手段多样化。本套教材大力推进电子讲稿和多媒体课件的建设工作。本着方便教学的原则,一些教材配有习题解答和实验指导书,以及配套学习指导用书。

机械工业出版社

前 言

随着工农业生产和科学技术的发展,自动控制系统已经普遍出现在人类生活、生产和科学探索新技术的各个领域中,自动控制的应用范围已经扩展到工程技术领域以外的诸多领域,如社会、经济、金融、生命科学等等。“自动控制原理”是专门研究有关自动控制系统中的基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,是理工科院校自动控制和自动化相关专业本科学生必修的技术基础课程。

目前,有关自动控制原理的教材很多,本书与大多数同类教材的不同之处在于,从自动控制的三个基本问题——系统的数学模型、系统的性能分析和系统的综合设计出发,系统地阐述了以传递函数为基础的经典控制理论的基本内容。全书共7章,第1章自动控制概述,主要介绍自动控制的基本原理、自动控制系统的基本组成及分类和自动控制理论的发展。第2章控制系统的数学模型,主要介绍控制系统输入输出模式的数学模型,包括微分方程描述、传递函数和频率特性函数。第3章控制系统的稳定性,介绍了控制系统稳定性的概念和稳定性判据,主要介绍了基于控制系统闭环特征方程的劳斯稳定性判据和基于控制系统开环频率特性函数的奈奎斯特稳定性判据。第4章控制系统的性能指标,介绍了衡量控制系统品质优劣的稳态性能指标和动态性能指标的概念,介绍了稳态误差和稳态误差系数的计算;分析了基于单位阶跃响应的控制系统时域性能指标和基于控制系统频率响应特性的频域性能指标。第5章根轨迹法,介绍了根轨迹的基本概念、绘制根轨迹的基本规则以及常规根轨迹、参量根轨迹和零度根轨迹的绘制方法,并且介绍了基于根轨迹的系统分析。第6章自动控制系统的校正,介绍了输出反馈控制系统的校正方式和基本控制规律、常用校正装置及其特性,讨论了基于根轨迹法和频率特性法串联校正装置的设计方法,简单介绍了反馈校正和复合控制校正。第7章采样离散控制系统,介绍了线性离散控制系统的基本理论和应用,包括数学模型、性能分析及数字控制器的设计。

清华大学微电子学研究所赛维治完成了本书全部文稿的计算机录入和电子文档的制作,在此深表感谢。感谢清华大学自动化系王焕钢老师在本书编写过程中付出的辛劳。

在编写本书的过程中,参考了许多优秀的教材和著作,编者向收录于参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。

由于编者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。您可以将宝贵意见和建议发送至:jsjfw@mail.machineinfo.gov.cn。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 自动控制概述	1
1.1 自动控制的基本原理及自动控制系统的基本组成	1
1.1.1 自动控制的初步概念	1
1.1.2 自动控制的基本原理	1
1.1.3 自动控制系统的基本组成	3
1.2 自动控制系统示例	5
1.2.1 液面控制系统	5
1.2.2 直流电动机速度控制系统	6
1.2.3 火炮跟踪系统	7
1.2.4 电阻炉温度微机控制系统	7
1.2.5 蒸汽发电机的协调控制系统	8
1.3 自动控制系统的类型	8
1.3.1 调节系统和随动系统	9
1.3.2 连续系统和离散系统	9
1.3.3 线性系统和非线性系统	10
1.3.4 单输入单输出系统和多输入多输出系统	10
1.3.5 确定性系统和不确定性系统	10
1.3.6 集中参数系统和分布参数系统	11
1.4 自动控制理论概要	11
1.4.1 自动控制理论的发展	11
1.4.2 对自动控制系统的基本要求	14
1.4.3 本书内容及实际应用问题	15
1.5 小结	16
1.6 习题	16
第 2 章 控制系统的数学模型	19
2.1 引言	19
2.2 控制系统的微分方程	20
2.2.1 线性系统微分方程的建立	20
2.2.2 非线性系统微分方程的线性化	25
2.2.3 线性微分方程的解	29
2.3 控制系统的传递函数	35
2.3.1 传递函数的概念	35
2.3.2 传递函数的性质	36

2.3.3 典型环节及其传递函数	37
2.3.4 电气网络的运算阻抗与传递函数	42
2.3.5 控制系统的传递函数	43
2.3.6 利用传递函数求解系统的输出响应	45
2.4 控制系统结构图和信号流图	48
2.4.1 控制系统结构图的概念及建立	48
2.4.2 结构图的等效变换及控制系统的传递函数	52
2.4.3 信号流图概念及控制系统信号流图的建立	60
2.4.4 梅逊增益公式	63
2.5 控制系统的频率特性函数	67
2.5.1 频率特性概念	67
2.5.2 开环频率特性的图形表示	72
2.5.3 闭环频率特性图	95
2.5.4 由频率特性实验曲线确定最小相位系统的传递函数	105
2.6 小结	108
2.7 示例	109
2.8 习题	121
第3章 控制系统的稳定性	129
3.1 稳定性的概念和定义	129
3.1.1 稳定的基本概念	129
3.1.2 渐近稳定和 BIBO 稳定	130
3.1.3 线性定常系统稳定的充分必要条件	132
3.2 Routh-Hurwitz 稳定性判据	133
3.2.1 Routh 稳定性判据	133
3.2.2 Hurwitz 稳定性判据	137
3.2.3 参数对稳定性的影响及参数的稳定域	138
3.3 Nyquist 稳定性判据	144
3.3.1 映射定理	144
3.3.2 Nyquist 稳定性判据及其应用	146
3.3.3 根据开环对数频率特性分析线性控制系统稳定性	154
3.4 控制系统的相对稳定性	155
3.4.1 稳定裕度	156
3.4.2 稳定裕度的求取	158
3.4.3 利用 Routh 稳定性判据分析系统的相对稳定性	162
3.5 小结	163
3.6 示例	164
3.7 习题	172
第4章 控制系统的性能指标	177
4.1 引言	177
4.1.1 典型输入信号	177

4.1.2 控制系统的输出响应	180
4.2 控制系统的稳态响应及稳态误差	181
4.2.1 典型输入信号的稳态响应	181
4.2.2 误差与稳态误差	183
4.2.3 参考输入作用下系统稳态误差的计算	186
4.2.4 扰动输入作用下系统稳态误差的计算	198
4.2.5 稳态误差的抑制	202
4.3 控制系统的瞬态响应及时域性能指标	203
4.3.1 控制系统的时域性能指标	203
4.3.2 一阶系统的动态响应	205
4.3.3 二阶系统的动态响应	209
4.3.4 高阶系统的动态响应及性能分析	219
4.4 控制系统的频域性能指标	227
4.4.1 开环频率特性对应的性能指标	227
4.4.2 闭环频率特性对应的性能指标	228
4.4.3 频域性能指标与时域性能指标的关系	228
4.5 小结	233
4.6 示例	233
4.7 习题	242
第5章 根轨迹法	248
5.1 根轨迹的基本概念	248
5.1.1 根轨迹的定义	248
5.1.2 根轨迹方程	250
5.1.3 绘制根轨迹的基本条件	251
5.2 根轨迹的绘制	253
5.2.1 绘制根轨迹的基本规则	253
5.2.2 根轨迹绘制举例	260
5.3 广义根轨迹	269
5.3.1 参数根轨迹和根轨迹族	269
5.3.2 零度根轨迹和完全根轨迹	273
5.3.3 延迟系统的根轨迹	279
5.4 控制系统的根轨迹分析方法	284
5.4.1 利用根轨迹分析控制系统	285
5.4.2 根轨迹的改造	286
5.5 小结	292
5.6 示例	293
5.7 习题	304
第6章 自动控制系统的校正	309
6.1 控制系统校正的概念	309
6.1.1 引言	309

6.1.2	控制系统的校正方式	310
6.1.3	线性系统的基本控制规律	312
6.2	常用校正装置及其特性	315
6.2.1	无源校正网络	315
6.2.2	有源调节器	322
6.3	根轨迹法校正	325
6.3.1	串联领先校正	326
6.3.2	串联滞后校正	330
6.3.3	零、极点对消的校正	333
6.4	频率特性法校正	335
6.4.1	串联领先校正	336
6.4.2	串联滞后校正	341
6.4.3	串联滞后-领先校正	346
6.4.4	期望频率特性法和自动控制系统的工程设计方法	348
6.5	控制系统的反馈校正及复合控制	360
6.5.1	反馈校正的解析法设计	360
6.5.2	反馈校正的根轨迹法设计	365
6.5.3	反馈校正的对数频率特性法设计	368
6.5.4	复合控制	371
6.6	小结	379
6.7	示例	380
6.8	习题	388
第7章	线性离散控制系统	393
7.1	引言	393
7.1.1	采样控制系统	393
7.1.2	数字控制系统	395
7.1.3	复杂的计算机控制系统	397
7.1.4	离散控制系统的特点和研究方法	399
7.2	信号的采样与保持	400
7.2.1	采样过程及其数学描述	400
7.2.2	采样定理及采样周期的选择	403
7.2.3	信号的保持及保持器	405
7.3	z 变换	410
7.3.1	z 变换的定义和方法	410
7.3.2	z 变换的基本定理和性质	417
7.3.3	z 反变换	421
7.4	采样离散控制系统的数学模型	427
7.4.1	差分方程及其求解	427
7.4.2	脉冲传递函数	432
7.4.3	连续控制系统的离散化	439
7.5	采样离散控制系统的性能分析	443
7.5.1	离散控制系统的稳定性分析	443

7.5.2 离散控制系统的稳态误差及计算	453
7.5.3 离散控制系统的动态响应及性能分析	458
7.6 采样离散控制系统的校正	466
7.6.1 模拟化设计方法	466
7.6.2 数字化设计方法	475
7.7 小结	488
7.8 示例	489
7.9 习题	492
附录	496
附录 A 拉普拉斯变换	496
附录 B 部分习题参考答案	498
参考文献	514

第 1 章 自动控制概述

本章主要介绍自动控制的基本概念和基本的名词术语,介绍自动控制的基本原理、自动控制系统的基本组成、常见的自动控制系统实例、自动控制系统的分类和自动控制理论的发展以及对自动控制系统的基本要求。

1.1 自动控制的基本原理及自动控制系统的基本组成

1.1.1 自动控制的初步概念

20 世纪是科学和工程技术发展迅速的一个世纪。人类的许多希望和梦想,被科学和技术由神话变成现实,其中,自动控制技术所取得的成就和起到的作用给各行各业的工作者留下了深刻的印象。从最初的机械转速、位移的控制到工业过程中温度、压力、流量的控制,从远洋巨轮到深水潜艇的控制,从雷达火炮的跟踪到空中飞行器的姿态控制,从电动假肢到机器人的控制,在现代的工业、农业、国防和科学技术领域中,自动控制技术得到了广泛的应用。自动控制技术已经介入到许多学科,渗透到各个工程领域。

所谓自动控制,就是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备和装置(称为控制装置或控制器)使机器、设备或生产过程(统称为被控对象)自动地按照给定的规律运行,使被控对象的一个或几个物理量(称被控变量,如电压、电流、速度、位移、温度、压力、流量、张力、浓度、化学成分等)能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。例如,数控机床按照预定程序自动地对工件进行切削加工;化学反应釜的温度或流量及压力自动地维持恒定;雷达和计算机组成的火炮或导弹的发射和制导系统,自动地将炮弹或导弹引导到敌方目标;轧钢机按照预定的轧制速度和板材厚度自动地变化轧辊速度和压下装置的位移;无人驾驶飞行器按照预定的航迹自动起落和飞行;人造卫星准确的进入预先计算好的轨道和位置,自动地保持正确的姿态运行并准确地回收;电视台的移动机器人按照预定计划自动地取、放要播放的录像带等,这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

系统的定义十分广泛。为达到某一目的,由一些相互联系和相互制约的环节按一定规律组成并具有一定功能的整体,称为系统。每个系统都有输入量和输出量。系统可以是物理系统,也可以是生物系统、

经济系统或社会系统。由控制器和被控对象所组成的整体就叫控制系统。在控制系统中,控制器接收输入信号 $r(t)$,产生相应的控制作用 $u(t)$,去操纵被控对象,使其输出 $y(t)$ 符合对系统所提出的性能要求,如图 1-1 所示。

当被控对象能由控制器自动操纵时,这样的系统就称为自动控制系统。

1.1.2 自动控制的基本原理

1. 开环控制和闭环控制

自动控制系统有两种最基本的控制形式,即开环控制和闭环控制。

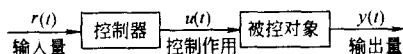


图 1-1 控制系统示意图

图 1-1 是一个开环控制的示意图。开环控制是一种最简单的控制方式，其特点是，在控制器与被控对象之间只有顺向控制作用而没有反向联系，即控制是单方向进行的，系统的输出量对控制作用没有影响，控制作用直接由系统的输入量经控制器产生。在开环控制系统中，对于每一个参考输入量，就有一个与之相对应的控制作用和相应的工作状态及输出量。开环控制的缺点是：系统的控制精度取决于组成系统的元器件的精度和特性调整的精度，因此对于元器件的要求比较高。由于输出量不能反向影响控制作用，所以输出量受扰动信号的影响比较大，系统抗干扰能力差。

扰动是加于系统的某些不希望的信号作用或参数变化，它对被控制量产生不利影响。扰动可以分为内扰和外扰，内扰是由于组成系统的元器件参数的变化引起的；外扰则是由于系统的动力源或负载等外部因素所引起的。在一定的输入量（信号）作用之下，这些扰动量都会使系统相应的输出量出现偏差，开环控制系统并不具有抑制这种偏差的能力。因此，开环控制系统的准确度或控制精度是较低的。另外，被控对象总是有惯性的，所以控制系统一般都是动态系统。在动态系统中，当输入量变化时，系统输出量的相应变化（称输出响应）不可能瞬时完成，存在着由一个稳态到另一个稳态的动态变化过程（即动态响应，也叫过渡过程）。开环控制系统的动态响应较差，其输出量往往不能及时跟随输入量的变化而变化。

闭环控制的特点是，在控制器与被控对象之间，不仅存在着顺向控制作用，而且存在着反向作用，即控制系统的输出量对控制作用有直接影响。闭环控制能够检测出输出量并将其送回到系

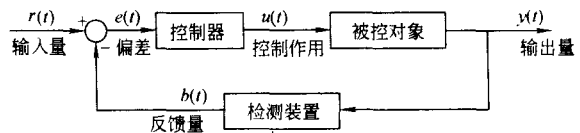


图 1-2 闭环控制系统示意图

统的输入端，与输入量进行比较，从而产生偏差信号，偏差信号作用于控制器上，使系统的输出量向着趋向于期望输出量而减少误差的方向变化。闭环控制的实质，就是利用系统的输出对控制器的作用来减少系统的偏差，提高控制的精度。闭环控制的示意图如图 1-2 所示。

2. 反馈控制原理

上述闭环控制系统中，系统的输出量通过测量装置返回到系统的输入端，并和系统的输入量进行比较的过程称为反馈，检测装置的输出信号称为反馈量。如果输入量与反馈量极性相反，两者合成的过程是相减，称为负反馈；反之则称为正反馈。因此，闭环控制又称为反馈控制。反馈控制系统一般采用负反馈方式，输入量与反馈量之差称为偏差信号，又称误差。

在反馈控制系统中，控制器对于被控对象的控制作用中具有来自被控对象输出量的反馈信息，用来不断修正被控输出量的偏差，从而实现对被控对象进行控制的目的，这就是反馈控制原理。

采用负反馈控制，可以有效地抑制被反馈通道（由输出到输入）所包围的顺向通道（由输入到输出）中各种扰动对系统输出量的影响，使系统的输出量能够自动地跟踪输入量，减少偏差，提高系统的控制精度。除此之外，采用负反馈控制构成闭环控制系统，还具有其他优点：引进反馈通道后，使得系统对前向通道中各元、部件参数的变化不灵敏，从而对前向通道中元、部件的精度要求不高；反馈作用还可以使得整个系统对于某些非线性影响不敏感；由于负反馈的存在，对应于一定输出量的输入量必然加大，因此在到达稳态之前的动态过程中，施于控制器的输入信号比较大，产生所谓的强激作用，提高了系统输出量跟踪输入

量的速度等等。但是，反馈控制的引入也给控制系统带来了新的问题：由于系统中惯性的存在，控制作用所起的控制效果是有时间延迟的，系统得不到及时的校正。如果控制器的强激作用与被控对象的惯性延时之间匹配不当，反馈控制的闭环控制系统可能产生振荡，甚至不稳定，不能正常工作。

3. 按偏差控制与按扰动控制

如上所述，反馈控制原理是自动控制的基本原理，反馈控制的基本思想是按照被控对象的实际输出量偏离设定输出量（与给定输入量相对应的理想输出量）的方向（即偏差的极性）而向相反方向（即减小偏差）改变控制作用，所以也称为按偏差控制，反馈控制原理就是按偏差控制的原理。这是一种广泛使用的重要控制方式。

除了按偏差控制之外，还有一种按扰动控制的控制方式。在这种控制方式中，当扰动因素已知，并且可以直接地或间接地检测出来，则可以利用扰动信号产生一种补偿作用，即与扰动的影响相反的作用，以抵消扰动的影响。这种控制方式称为按扰动控制，又称为补偿控制。

在按扰动进行控制时，是从扰动作用取得信息，产生控制作用，去影响输出量。信息和控制的作用是单方向传送的，没有反馈，而是顺馈；不构成闭环，而是开环。按扰动进行控制实际上也是按扰动进行补偿，其示意图如图 1-3 所示。

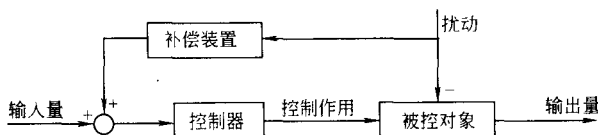


图 1-3 按扰动控制示意图

按扰动控制在技术上常常比按偏差控制简单，但它只适用于扰动是可以测量的场合，而且一个补偿装置通常只能补偿一个扰动因素，对加于系统的其他扰动均不起补偿作用。如果系统中有多种扰动存在，要为每一种扰动配备一个补偿装置就显得复杂，可靠性也差；而且各种补偿装置之间有时还会有矛盾。因此，比较合理的控制方式是把按偏差的反馈控制和按扰动的顺馈控制结合起来，对于主要的扰动采用适当的补偿装置实现按扰动的顺馈控制；同时，再组成闭环负反馈方式的按偏差的反馈控制，以消除其他扰动造成的偏差。这样，系统的主要扰动已被补偿或近似补偿，系统所受到的扰动大大减轻，按偏差的反馈控制部分就比较容易设计，控制效果也会更好。这种按偏差的反馈闭环控制和按扰动的顺馈补偿控制相结合的控制方式称为复合控制方式，图 1-4a 所示为按扰动补偿的复合控制系统。

除了按扰动补偿的复合控制系统外，还有一种按输入补偿的复合控制系统，如图 1-4b 所示。因为任何自动控制系统的输出量总是与一定形式的输入量相对应的，同一个控制系统对不同形式的输入量的控制精度是不同的，为了提高控制系统对不同形式输入量的适应性，当输入量形式发生变化时，系统的输出量仍能保持满意的控制精度，则可以构成按输入量进行补偿的复合控制系统。

1.1.3 自动控制系统的基本组成

自动控制系统通常都是带有输出量负反馈的闭环控制系统，是由各种结构不同的元、部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看，自动控制系统是由被控对象和控制器这两大部分组成的，其中控制器又是由各种基本的部件或元件构成的，每个部件或元件发挥一定的

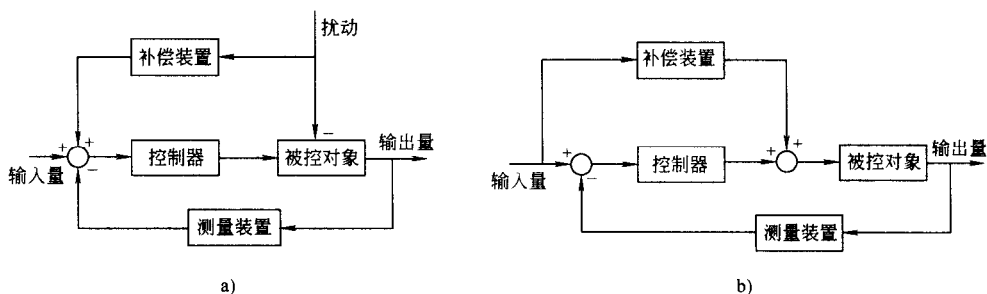


图 1-4 复合控制系统示意图

a) 按扰动补偿控制 b) 按输入补偿控制

职能。在不同系统中，结构完全不同的元、部件可以具有相同的职能，因此，在典型情况下，按职能划分，控制器由以下基本元、部件组成。

1. 测量元件

它的职能是检测被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，如温度、压力、流量、位移、转速等，一般要把它转换成电量。因此，测量元件是用电的手段测量非电量的元件，又称为传感器，通过传感器，可以把上述非电物理量变换成标准的电信号后作为反馈量送到控制器。

测量元件应当牢固可靠，其特性应当准确稳定，不受环境条件的影响。测量元件得到的电信号中所含的噪声和交流声应当小。优良的测量元件是好的控制系统的基本保证。

2. 给定元件

它的职能是给出与期望的输出量相对应的系统输入量，又称给定输入信号、参考输入信号或设定值。给定元件给出的给定输入信号必须准确、稳定，其精度应当高于系统要求的控制精度。

3. 比较元件

它的职能是把测量元件检测到的、代表实际输出量的反馈信号与给定元件给出的设定信号进行比较，用以产生偏差信号来形成控制信号，起信号的综合作用。常用的比较元件有差动放大器和信号比较器。有些控制系统中，比较元件常常和测量元件或线路结合在一起，这时统称为偏差检测器或偏差传感器，如某些机械差动装置和电桥电路等。

4. 放大元件

它的职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大，因为比较元件给出的偏差信号通常比较微弱，不能直接驱动执行元件去控制被控对象。放大元件的输出必须有足够的幅值和功率，才能实现控制功能。电信号放大元件，可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管及全控型电力电子器件等组成。

5. 执行元件

它的职能是直接驱动被控对象，使被控对象的输出量发生变化。有时放大元件的输出可以直接驱动被控对象，但是大多数情况下被控对象都是大功率级的，而且其输入信号是非电物理量，因此需要进行功率级别或者物理量纲的转换，实现这种转换的装置就是执行元件，又称为执行机构。常见的执行元件有各类电动机、阀以及各种驱动装置等。

6. 校正元件

校正元件又称为校正装置，也叫补偿元件。校正元件是结构或参数易于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统的性能。在某些控制系统中，由于控制器控制作用的动态特性与被控对象不相适应，其控制质量很差，甚至不能发挥控制作用。因此，实际系统中通常总要引入一些装置来改变控制器的动态性质，使其产生的控制作用既足够强，足够快，又能与被控对象的动态特性很好地配合，最好地发挥控制作用。这些引入的装置就是校正元件，它可以实现某种“控制规律”，是控制系统中极为重要的部分。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的校正元件可以含有工业控制计算机。

7. 能源元件

它的职能是为整个控制器提供能源（电源）。

一个典型的自动控制系统的基本组成可以用图 1-5 的方块图表示。图中，用圆圈（○）表示比较元件。“+”和“-”表示参与比较的信号极性，符号相同表示相加，符号不同表示相减；如果参与比较的两个信号是输入量和反馈量，则极性相同表示正反馈，极性相异表示负反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路（或称通道）称为顺馈通路或前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的通路称为主反馈通路。顺馈通路和主反馈通路共同构成主回路（或称回环）。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含主反馈通路的系统称单回路系统或单回环系统，简称单环系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称为多回路系统或多回环系统，简称多环系统。

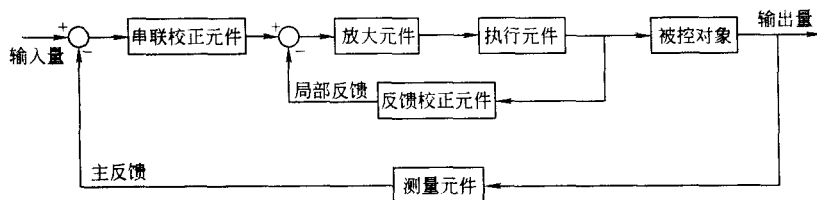


图 1-5 自动控制系统基本组成示意图

1.2 自动控制系统示例

在工程实践中有形形色色不同类型的自动控制系统，下面介绍一些自动控制系统的实际例子。

1.2.1 液面控制系统

在化工与制药等行业中，有许多反应釜等被控对象，经常需要控制釜内液面的位置，存在各种不同的液面控制系统。图 1-6 所示是储槽液面自动控制系统。图中 V_1 和 V_2 分别是输入液流和输出液流的阀门，M 是电动机，K 是放大器。该液面自动控制系统，不论阀门 V_2 的开度多大，通过 V_2 的输出液流如何变化，也能维持储槽内液面的高度在一定水平上，不超过允许的偏差值。该系统储槽内浮子的位置就是测量出来的液面的实际高度，它与电位器的滑动端相连，电位器的中点接地（电源的零电位）。当液面的实际高度恰好为某一希望高度 h 时，电位器的滑动端正处于中点位置，电位器没有输出电压，电动机不转。当储槽内液面的高度偏离希望高度 h 时，电位器的滑动端便会偏离中点，于是电位器便输出一个电压 u_e ， u_e 经放大器 K 后作用于电动机 M 上，随着电动机 M 的旋转，调节阀门 V_1 的开度，

从而调节输入液流的流量，使储槽内液面的高度恢复到希望高度 h 值附近。反映液面高度的浮子也使电位器复原，滑动端移到中点，电压 $u_c = 0$ ，电动机 M 停止转动；储槽内液面高度维持在 h 值附近不超过允许误差的范围。液面自动控制系统的结构方块图如图 1-7 所示。

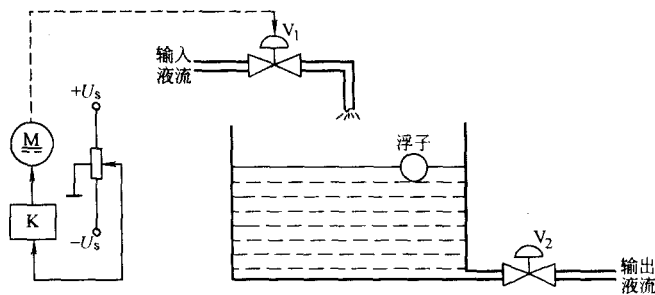


图 1-6 液面自动控制系统

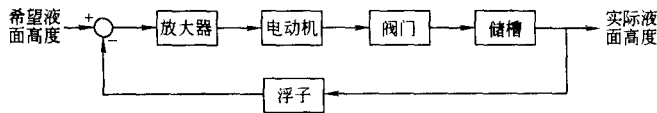


图 1-7 液面自动控制系统的方块图

1.2.2 直流电动机速度控制系统

图 1-8 所示是采用脉冲调宽放大器驱动的直流电动机速度控制系统。图中， M 为直流电动机，由脉宽调制功率放大器（PWM）供电，UPW 是脉宽调制控制器， K 是初级电压放大器，TG 是转速测量元件——测速发电机。这是一个速度自动控制系统。当速度给定电压 U_n^* 为某一数值时，通过放大器 K 、UPW、PWM，使电动机 M 的速度维持在与 U_n^* 相对应的一个数值上，由测速发电机 TG 产生的反馈电压 U_n 接近或者等于 U_n^* 值，系统处于稳定运行状态。当由于负载力矩的变化引起电动机 M 的速度发生变化（比如速度下降）的时候，测速发电机 TG 输出的反馈电压 U_n 将会偏离原来的数值而降低，从而使 U_n 与 U_n^* 的偏差变大，经电压放大器 K 后，改变 UPW 控制器的控制电压，从而改变 UPW 输出方波的占空比，使得 PWM 功率放大器的输出平均电压 U_d 升高，逐步使电动机 M 的速度上升至原来的与给定电压 U_n^* 相对应的数值附近，从而实现了电动机速度的自动调节过程。该系统的方块图如图 1-9 所示。

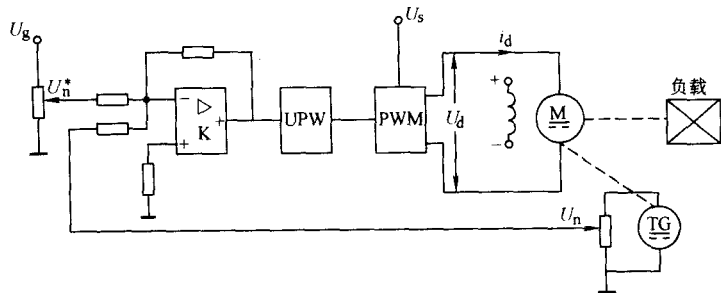


图 1-8 直流电动机速度控制系统

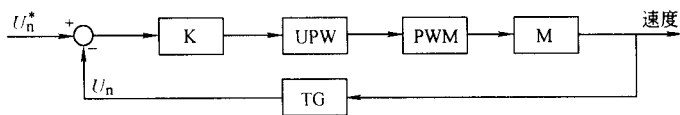


图 1-9 直流电动机速度控制系统方块图

1.2.3 火炮跟踪系统

火炮跟踪系统是军事工业中一类典型的自动控制系统。图 1-10 是火炮跟踪系统的示意图。在火炮跟踪系统中，雷达测到的敌方目标的方位转变成的指令信息，即输入角度 θ_i ，炮身当时的实际输出角度 θ_o ，经同位仪（角差检测装置）发出一个偏差信号，经放大装置和功率放大器后，使电动机带动火炮的炮架转动；与此同时，反馈装置又把炮架转动的即时角度送入到同位仪中，使同位仪输出的偏差信号发生相应变化。直到反馈角度的信号与输入角度的信号相等时，偏差信号以及放大装置的输出电压信号均变为零，功率放大器加到电动机两端的平均电压也为零，电动机停止转动，火炮炮架也就被转动到了指令的角度，发射炮弹便可命中敌方目标。

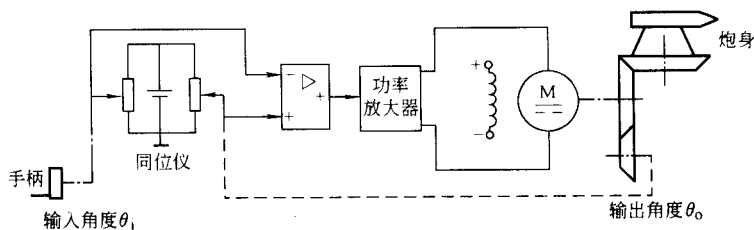


图 1-10 火炮跟踪系统示意图

在图 1-10 中，测量元件是电位器式同位仪，一对电位器组成桥式测量电路。两只电位器的滑动端分别与指令轴和输出轴相连，同位仪的输出电压信号正比于输入角度和输出角度的差值。实际的雷达火炮系统当然要比这复杂得多，比如测量元件一般采用精度比较高的自整角机或旋转变压器。但是从控制的角度来看，其基本的系统结构和工作原理是相同的。图 1-10 的火炮跟踪系统的方块图如图 1-11 所示。图中减速机构一般由齿轮系组成，因为电动机的转速通常比较高，输出转矩有一定限制，通过齿轮系可以使转矩增大速度变低，满足火炮的需要。

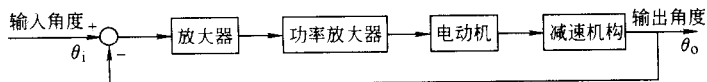


图 1-11 火炮跟踪系统方块图

1.2.4 电阻炉温度微机控制系统

用于工业生产中电炉温度的微型计算机控制系统，具有精度高、功能强、经济性好、无噪声、显示醒目、读数直观、打印存档方便、操作简单、灵活性和适应性好等一系列优点。利用微型计算机控制系统代替模拟式控制系统是当今工业过程控制的发展趋势，许多新建和在建的工业过程控制系统，几乎都采用了微型计算机实现电炉温度的实时控制。图 1-12 所示为某高校计算机控制实验室研制的电阻炉微型计算机控制系统的原理示意图，它也是大型