



普通高等教育

电气自动化类 国家级特色专业系列规划教材

现代控制工程基础

主 编 刘春生 吴庆宪
副主编 丁 勇 张绍杰



科学出版社

普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材

现代控制工程基础

主 编 刘春生 吴庆宪

副主编 丁 勇 张绍杰

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书简明阐述了自动控制的基本理论与应用。全书共 8 章,前 7 章着重以现代控制系统为背景,介绍了系统建模、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、离散系统分析和非线性系统分析,各章均包含 MATLAB 应用技术实例以及专为本书研制的可视化软件平台的设计实例;第 8 章内容借鉴国际著名商学院的教育理念,进行了现代控制系统的案例分析,以强化学生对控制系统概念的理解,提高分析、设计控制系统的的能力,激发学生的创新理念。

本书为 2008 年“自动控制系列课程”国家教学团队建设的重点教材,2003 年国家精品课程“自动控制原理”的主干教材。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器、热能与动力工程、化工自动化、飞行器设计与制造等专业的本科生教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制工程基础/刘春生,吴庆宪主编. —北京:科学出版社,2011.7
(普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材)
ISBN 978-7-03-031896-1

I. ①现… II. ①刘…②吴… III. ①现代控制理论-高等学校-教材
IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 144352 号

责任编辑:余 江 张丽花/责任校对:陈玉凤
责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 7 月第一次印刷 印张:15 1/2

印数:1—4 000 字数:407 000

定价:35.00 元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着生产的发展和科学技术的进步,自动控制技术已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防、宇航等领域,并成为当今备受关注的高技术之一。控制工程基础是研究各类控制系统共性的一门技术基础科学,具有科学方法论的鲜明特点,它研究的问题带有普遍性,对工程实践具有重要的指导意义,能为培养学生运用控制原理的方法分析和解决各种工程问题奠定扎实的理论基础。

本书以现代控制工程为背景,介绍系统建模、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、离散系统分析和非线性系统分析,各章均包含有 MATLAB 应用技术实例以及专为本书研制的可视化软件平台的设计实例,并且借鉴国际著名商学院的教育理念,进行了现代控制系统的案例分析,以强化学生对控制系统概念的理解,提高分析、设计控制系统的的能力,激发学生的创新理念。

本书作者均是 2003 年国家精品课程“自动控制原理”的主要建设者,也是 2005 年国家教学成果二等奖的主要获奖人员。主编之一吴庆宪教授为 2008 年“自动控制系列课程”国家教学团队负责人,其他人员为教学团队主要建设者。由于作者长期工作在“控制系统工程”教学一线,教学经验丰富,对教材改革与人才培养的关系有着深刻的理解和全面的认识。本书的内容体现了作者多年的教学改革成果与理念,能够满足复合性人才培养的要求。

本书的创新点如下:

(1) 强化工程背景,通过现代控制系统实例理解自动控制原理的概念、方法,而不拘泥于理论上过多的严格证明。

(2) 利用研制的“自动控制可视化软件平台”进行课堂教学,以强化自动控制原理的应用背景以及设计方法。

(3) 借鉴了国际著名商学院的教育理念,增加了一章“现代控制系统案例分析”,以提高学生对控制系统分析、设计的能力,激发学生的创新理念。

本书由刘春生教授和吴庆宪教授主编,负责教材的架构设计。各章的编写分工如下:刘春生编写第 1、5、8 章,吴庆宪编写第 4 章,丁勇编写第 3、7 章,张绍杰编写第 2、6 章。全书由刘春生统稿与定稿。此外,对在本书编写过程中给予帮助的王新华老师以及各位人员表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者不吝指正。

作 者
2011 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 控制系统的一般概念	1
1.1 引言	1
1.2 控制科学与控制论、系统论、信息论	2
1.3 自动控制的发展	2
1.4 自动控制系统的分类和组成	4
1.4.1 自动控制的有关概念.....	4
1.4.2 自动控制系统的分类.....	4
1.4.3 开环控制系统与闭环控制系统	4
1.4.4 恒值控制系统和伺服系统	5
1.5 闭环控制系统的基本组成	7
1.6 现代控制系统实例	8
1.7 对控制系统的基本要求	11
1.8 典型输入信号或者激励信号	12
习题	15
第 2 章 控制系统的数学模型	17
2.1 控制系统的微分方程	17
2.1.1 控制系统微分方程的建立	17
2.1.2 非线性系统的线性近似	19
2.2 拉普拉斯变换	23
2.2.1 拉普拉斯变换的定义	23
2.2.2 拉普拉斯变换的常用定理	24
2.2.3 拉普拉斯反变换	26
2.2.4 利用拉普拉斯变换法求解微分方程	28
2.3 控制系统的传递函数	29
2.3.1 传递函数	29
2.3.2 常用控制元件的传递函数	31
2.4 控制系统的结构图与信号流图	33
2.4.1 控制系统的结构图	33
2.4.2 控制系统的信号流图	37
2.4.3 闭环系统的常用传递函数	39
2.5 典型控制系统的数学模型	40
习题	43
第 3 章 线性连续系统的时域分析	48
3.1 控制系统的时域响应和时域性能指标	48

3.1.1	控制系统的时域响应	48
3.1.2	控制系统的时域性能指标	48
3.2	线性系统的动态性能分析	49
3.2.1	一阶系统的动态性能分析	49
3.2.2	二阶系统的动态性能分析	52
3.2.3	高阶系统的动态性能近似分析	62
3.3	线性系统的稳定性分析	65
3.3.1	系统稳定性的基本概念	65
3.3.2	线性定常系统稳定的充要条件	66
3.3.3	劳斯稳定判据	67
3.4	线性系统的稳态性能分析	73
3.4.1	误差及稳态误差	73
3.4.2	系统的稳态误差分析	75
3.4.3	减小或消除稳态误差的方法	80
3.5	PID 控制器设计	83
3.5.1	PID 控制原理及形式	83
3.5.2	PID 参数整定方法	86
3.6	基于可视化软件平台的伺服控制系统设计	91
	习题	92
第 4 章	根轨迹法	99
4.1	根轨迹法的基本概念	99
4.1.1	根轨迹的基本概念	99
4.1.2	根轨迹与系统性能关系分析	100
4.1.3	根轨迹方程	101
4.2	绘制根轨迹的一般方法	102
4.2.1	常规根轨迹	102
4.2.2	参数根轨迹	111
4.3	根轨迹法设计实例	112
4.4	基于可视化软件平台的飞机纵向通道控制系统设计	116
	习题	116
第 5 章	频率响应法	118
5.1	控制系统的频率响应	118
5.1.1	频率特性的基本概念	118
5.1.2	频率响应的计算方法	121
5.1.3	频率特性的几何表示方法	123
5.2	开环极坐标图	123
5.2.1	典型环节的极坐标图	124
5.2.2	开环传递函数的极坐标图绘制	127
5.2.3	用 MATLAB 绘制极坐标图	129
5.3	开环 Bode 图	130

5.3.1	典型环节的 Bode 图	131
5.3.2	开环传递函数的 Bode 图绘制	136
5.3.3	用 MATLAB 绘制系统的 Bode 图	140
5.3.4	最小相角和非最小相角系统	141
5.4	频域稳定判据	143
5.4.1	Nyquist 稳定判据的数学基础	144
5.4.2	对数频域稳定判据	149
5.4.3	频域稳定裕度	150
5.4.4	用 MATLAB 分析系统稳定性	153
5.5	频域性能指标	154
5.6	校正补偿及设计	158
5.6.1	典型补偿环节	158
5.6.2	补偿设计实例	159
5.7	基于可视化软件平台的磁悬浮控制系统设计	164
	习题	164
第 6 章	线性离散系统分析	170
6.1	离散系统的基本概念	170
6.1.1	采样控制系统	170
6.1.2	数字控制系统	171
6.1.3	离散控制系统的特点	172
6.2	信号采样与保持	172
6.2.1	信号采样	172
6.2.2	零阶保持器	173
6.3	z 变换理论	174
6.3.1	z 变换定义	174
6.3.2	z 变换方法	174
6.3.3	z 变换的基本性质	176
6.3.4	z 反变换	176
6.4	离散系统的数学模型	177
6.4.1	线性常系数差分方程及其解法	177
6.4.2	脉冲传递函数	179
6.4.3	开环系统脉冲传递函数	180
6.4.4	闭环系统脉冲传递函数	182
6.5	离散系统的性能分析	183
6.5.1	稳定性分析	183
6.5.2	离散系统的稳态误差	186
	习题	187
第 7 章	非线性控制系统分析	189
7.1	引言	189
7.2	非线性控制系统概述	189

7.2.1	非线性系统的特点	189
7.2.2	非线性系统的分析与设计方法	192
7.3	常见非线性特性及其对系统性能的影响	192
7.4	描述函数法	198
7.4.1	描述函数的基本概念	198
7.4.2	典型非线性特性描述函数	199
7.4.3	非线性系统的简化	204
7.4.4	描述函数法进行非线性系统分析	207
7.5	非线性控制系统仿真实例	210
	习题	213
第 8 章	现代控制系统案例分析	215
8.1	磁悬浮球控制系统	215
8.1.1	磁悬浮球系统的结构和工作机理	215
8.1.2	磁悬浮球的数学模型	215
8.1.3	磁悬浮球的 PID 控制	216
8.2	水平轨道式倒立摆控制系统	218
8.2.1	系统的结构和工作机理	218
8.2.2	一级倒立摆的数学模型及 PID 控制	218
8.2.3	倒立摆计算机控制系统	220
8.3	玻璃窑炉控制系统	221
8.3.1	玻璃窑炉的结构与工作原理	221
8.3.2	玻璃窑炉的温度控制	222
8.4	飞行控制系统	225
8.4.1	作用在飞机上的力与力矩	226
8.4.2	飞行控制系统的组成	228
8.4.3	俯仰角姿态飞行控制系统的分析与设计	229
附录 1	MATLAB 7.4.0 简介	234
附录 2	自动控制可视化软件平台简介	237
	参考文献	240

第 1 章 控制系统的一般概念

1.1 引言

在现代科学技术发展中,自动控制理论(Automatic control theory)与自动控制系统起着越来越重要的作用。除了在宇宙飞船系统、导弹制导系统和机器人系统等高科技领域中,自动控制具有特别重要的作用外,它已经成为现代制造业和工业过程中不可缺少的组成部分。例如,造纸厂中对纸张滚卷的恒张力控制;热轧厂中对金属薄板厚度的控制;特别是化学工业,要通过监控成千上万个传感信号和成百上千个阀门、加热器、泵和其他执行器,以实现压力、温度、流量等物理量的控制,以保证产品质量。又如,人造卫星要按照预定轨道运行并完成特定的任务,导弹准确命中目标,雷达跟踪系统的精确定位,先进战斗机的超机动飞行以及格斗等都是自动控制技术为前提的。人们熟悉的二战中的地毯式轰炸,为了炸毁所选中的工业或军事目标,不加选择地在居住区投下无制导的炸弹。现在,这些已经被精确制导的武器所取代,精确制导武器是相当准确的,能够一次只打击一个既定目标,而不伤及无辜。自动控制技术为系统提供了稳定性和准确性,并且当存在大的环境变化和系统不确定性时系统仍具有良好的跟踪性能。同样,电话系统、通信系统和互联网也离不开自动控制技术。控制系统调节发送器和转发器的信号功率,管理网络路由设备中的缓冲区,并提供对传输线路变化的自适应噪声抵消。

自动控制技术的核心就是反馈控制或闭环控制。图 1.1.1 是一个速度控制系统,目的是使直流电动机速度 n 维持在 1000r/s 。

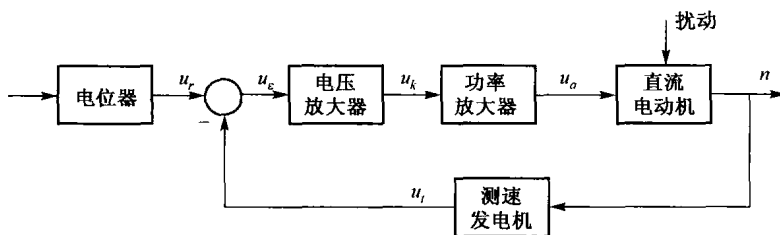


图 1.1.1 闭环速度控制系统

当外界扰动使得电动机的转速 n 升高时,测速发电机的输出电压 u_r 增大,从而导致电压放大器的输入电压 u_e ($u_r - u_r$) 降低, u_k 降低,导致电动机两端的电压 u_a 降低,最终使得电动机的输出转速降低,维持在希望的转速值 1000r/s 。

从以上叙述可以理解到,反馈的含义是将系统的输出经过处理后再送到系统的输入端,以调整系统的再输出。

除了工程系统以外,生物系统中的变量,如人体的血糖和血压受某些过程的影响,而这些过程都可以通过自动控制思想进行研究。同样,在经济系统中,大到宏观控制,小到商业管理经济系统中的变量,如受政府财政政策影响的失业和通货膨胀,亦可利用控制方法来研究。

自动控制的这些应用对现代社会的生产力产生了巨大的影响。目前,自动控制理论还在

继续发展,正向以控制论(Cybernetics)、信息论(Information theory)、系统论(Systematology)和仿生学(Bionics)为基础的智能控制理论深入。

1.2 控制科学与控制论、系统论、信息论

图 1.1.1 所述的自动控制系统是由各环节、部件组成,按反馈原理进行控制的。反馈控制是一种最基本的控制方式,它要求根据误差信息 u_e 通过一定的控制算法形成控制作用 u_k 。在自动控制系统中包括多个环节:信息的量测(提取)、处理(加工和变换)和信息的传输(图中的箭头代表信息的传输方向或称信息流向)、存储及利用,并最终形成控制作用(也是一种信息)。由此可以看出系统、信息和控制的紧密关系。系统是信息和控制的载体,而信息反映系统的性能,控制是实现预期性能的手段。

“三论”——系统论、信息论和控制论为现代科学技术提供了全新的思维方式和科学方法论原则,它们对整个人类社会起着巨大作用。

信息论的创始人是美国学者 C. 香农(Shannon)。人们通过分析系统中信息的流向、变换和处理来认识系统中每个元件的作用、功能和构成。系统论是研究系统结构和功能一般规律的科学,其研究对象为各类系统,包括工程系统、社会系统、经济系统、生物系统等。系统论另外一个任务就是在认识规律的基础上如何控制系统以得到好的系统功能,因而将控制论的思想引入到系统。

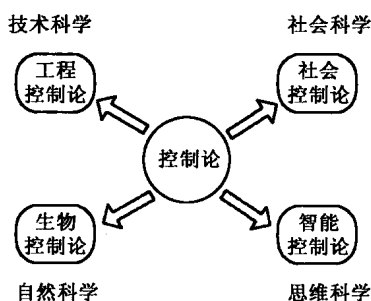


图 1.2.1 控制论的各个分支

然而,控制论不等同于控制理论(Control theory)。控制论是研究动物、机器、自然和社会等系统中控制、反馈和通信的共同规律的科学;而控制理论是在控制论出现之前将通信、控制和反馈应用到工程和物理系统,所形成的对自动控制系统分析、设计的数学理论和方法。但一般都认为,“控制论”的一个分支“工程控制论”就是“控制理论”。图 1.2.1 给出了控制论的各个分支。

本书的主要任务是介绍控制理论或工程控制论,即以工程系统为背景介绍自动控制的基本概念、设计及其应用。

1.3 自动控制的发展

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 1876 年发明的离心飞球调速器,它被用来调节蒸汽机的速度,如图 1.3.1 所示。图中的机械装置用来测量驱动杆的转速并利用飞球的转动来控制阀门,进而控制进入蒸汽机的蒸汽流量。当转速增大时,飞球离开轴线,重心上移,于是关紧阀门。

第二次世界大战之前,控制理论与应用在美国和欧洲得到了较快发展。美国的 Bode、Nyquist 和 Black 等在贝尔电话实验室对电话系统和电子反馈放大器所做的研究,是促进反馈系统应用的主要动力,创立了频域稳定性判据的两种形式。第二次世界大战期间,控制理论与应用得到了巨大发展,需要用反馈控制的方法来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以及对高性能的追求导致更多研究者的关注和投入,因而逐渐使自动控制发展成一门工程科学。

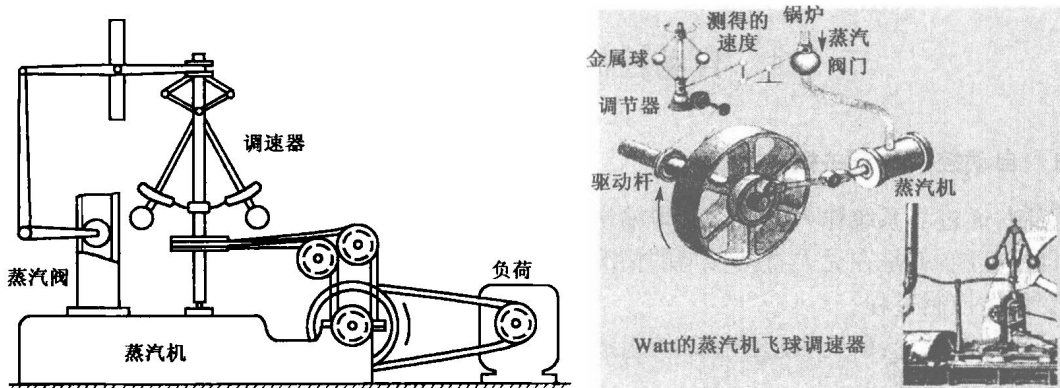


图 1.3.1 瓦特离心式调速器

随着人造卫星和空间飞行器及网络时代的到来,自动控制技术又有了新的推动力,要求控制理论能够解决多输入多输出、非线性、时变、时滞的被控对象。再加上现代数学和计算机的快速发展,因而促成了现代控制理论的产生,包括最优控制、自适应控制、鲁棒控制、智能控制以及近些年的网络控制等。

物联网(The internet of things)时代的到来,就好像第一次工业革命中蒸汽机的发明和应用,彻底改变了一个时代的生产、生活方式,也成为一个创新时代的起点和标杆。物联网是继计算机、互联网之后世界信息产业的第三次浪潮。工业自动化作为物联网的一部分,物联网技术的发展必定为自动控制理论提供新的内涵与发展动力。

控制理论通常分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论。经典控制理论以传递函数为基础,研究单输入-单输出、线性、时不变被控对象的控制器分析与设计,数学工具是常系数线性微分方程和复变函数。而现代控制理论是以状态方程为基础,可研究多输入-多输出、非线性、时变被控对象的控制器分析与设计,数学工具是线性代数或矩阵论。智能控制理论以人工智能为基础,研究模糊性、不确定性以及无法用数学模型描述的复杂被控对象的控制器分析与设计。

总之,控制领域历史悠久、成果丰硕,影响着商业、军事和科学技术的应用。通信、计算和传感技术的相互渗透将使许多新的控制应用成为可能,控制领域的前景将是光明的。读完这本书后,你可以了解:

- (1) 飞机是如何按照预定的航向、姿态进行安全飞行;
- (2) 你的电脑中移动硬盘如何读写数据;
- (3) 地下原油如何通过加工提炼为航空机油、柴油和一般机油产品;
- (4) 太空飞行器如何按照预定时间进行变轨飞行;
- (5) 各种显示器的显像管的生产工艺和控制过程。

你也能够:

- (1) 对简单的被控对象进行建模;
- (2) 对简单的被控对象进行控制器设计;
- (3) 参与大型自动化设备的开发和研制;
- (4) 在工业、国防等领域,运用自动控制的基本思想运筹帷幄,成为一个卓越的管理者与决策者。

来吧,让我们继续阅读本书的内容,品味自动控制的魅力!

1.4 自动控制系统的分类和组成

1.4.1 自动控制的有关概念

控制:通过对系统输入的操作使得输出达到指定的目标。

自控控制:就是在无人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象(过程)自动地按预定规律变化的控制过程。

自动控制理论:研究自动控制系统组成,进行系统分析设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的科学。

自动控制系统:由控制装置和被控对象组成,它们以某种相互依赖的方式组合成为一个有机整体,并对被控对象输出的物理量(如玻璃窑炉控制系统中的温度、压力、液位)进行自动控制。

1.4.2 自动控制系统的分类

根据控制方式分为开环控制系统、反馈控制(闭环控制)系统等。

根据系统性能分为线性系统和非线性系统、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。

根据被控制量变化规律分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统等。

根据元件类型分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统和生物系统等。

根据系统功能分为温度控制系统、压力控制系统和位置控制系统等。

1.4.3 开环控制系统与闭环控制系统

1. 开环控制系统(Open-loop control system)

只靠输入量对输出量单向控制,而输出量或被控物理量对输入量没有反向作用的系统,叫开环控制系统。如图 1.4.1 所示。

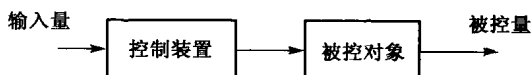


图 1.4.1 开环控制系统

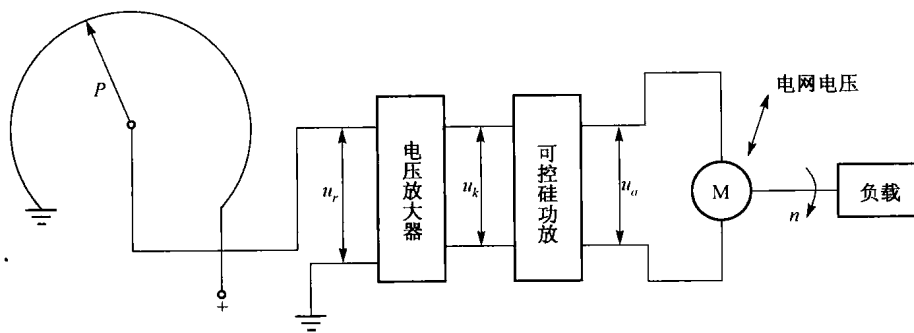
开环控制系统的特点:

- (1) 输出不影响输入,所以不需要对输出量进行测量,调试方便,易于实现;
- (2) 结构简单,成本低廉,多用于系统结构参数稳定和扰动信号较弱的场合;
- (3) 抗干扰能力差,控制精度不高。

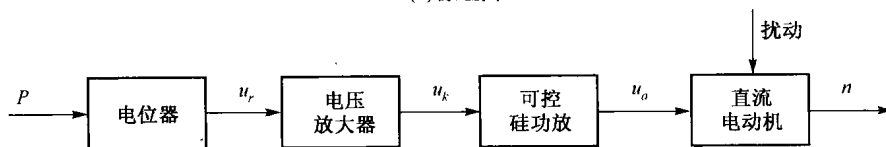
目前比较常见的开环控制系统有自动洗衣机、自动装配流水线、自动售货机、自动报警器。

例 1.4.1 直流电动机开环转速控制系统。

图 1.4.2 为直流电动机(Motor)开环转速控制系统原理图与框图,电动机的希望转速通过电位器的输出电压 u_r 给定,经过电压放大和功率放大得到电机两端的电压 u_a ,使电动机输出实际转速 n 。控制系统使用元件少,简单、可靠,但抗干扰能力差,如由于电网电压降低会导致转速 n 下降。这种开环系统可用于控制精度要求不高的系统。而对于控制精度要求高的系统,转速太大的波动可能导致产品的质量变差,此时必须采用闭环控制系统。



(a) 原理图



(b) 框图

图 1.4.2 直流电动机开环转速控制系统

2. 闭环控制系统(Closed-loop control system)

在闭环控制系统中,不仅输入量对输出量进行控制,输出量对输入量也有反向作用。反馈是指把系统输出量的全部或一部分回馈到输入端并进行比较,用偏差对输出量进行控制。闭环控制系统又称反馈控制系统(Feedback control system)。

例 1.4.2 直流电动机闭环转速控制系统。

图 1.4.3 为直流电动机闭环转速控制系统原理图与框图。如图 1.4.3(a)所示,测速发电机(Generator)与电动机同轴安装。当电网电压突然升高时,导致电动机的转速变大,测速发电机的电压 u_t 也变大。因为放大器的输入电压 $u_e = u_r - u_t$, 由于电压 u_r 不变所以 u_e 变小,最后使得 u_a 变小,因而电动机的转速降低,整个调整过程在很短时间内完成,动态调整过程如图 1.4.3(c)所示。

闭环系统的特点:

- (1) 系统具有降低偏差的能力;
- (2) 抗干扰性好,控制精度高;
- (3) 包含元件多,结构复杂,价格高;
- (4) 系统存在稳定性问题。

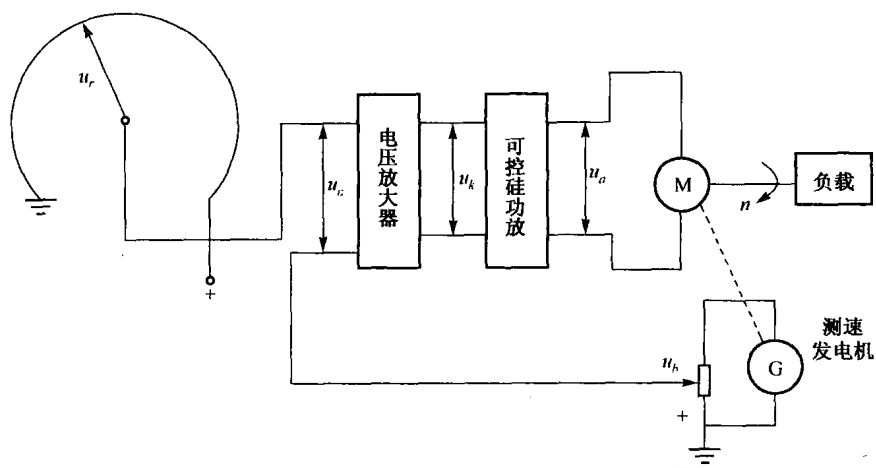
反馈系统分为负反馈系统和正反馈系统。当给定信号与反馈信号相减时为负反馈,否则为正反馈。一般情况下,大多为负反馈系统。

思考:在图 1.4.3(b)中,如果测速机的输出电压极性接反了,则会出现何种现象?

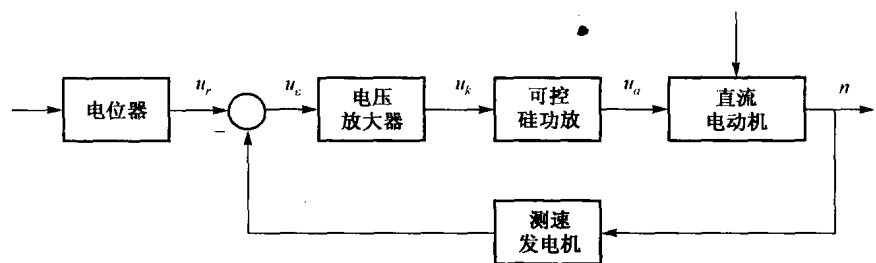
人取书的过程也是负反馈控制过程,如图 1.4.4 所示。

1.4.4 恒值控制系统和伺服系统

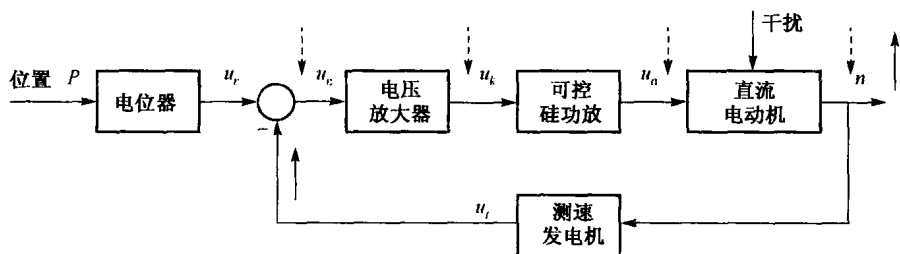
恒值控制系统:输入量为恒定常值的反馈系统为恒值控制系统。系统的任务是保证在任何扰动作用下,输出量以一定的精度接近给定值。如化工生产过程中的温度、压力、流量和液位等物理量的控制均为恒值控制。



(a) 原理图



(b) 框图



(c) 外界干扰出现后转速的动态调整过程

图 1.4.3 直流电动机闭环转速控制系统

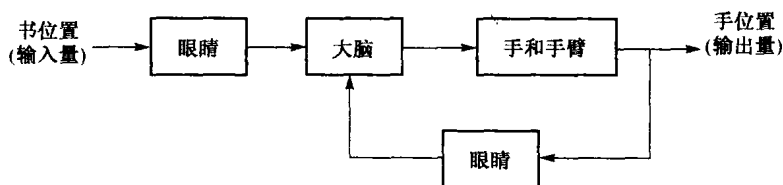


图 1.4.4 人取书的反馈控制系统框图

图 1.4.5 所示为一物料加热用的炉温自动控制系统。电炉是被控对象，而炉温是被控制量。由电位器组成的温度给定环节给出的电压 u_r 对应所期望的炉内温度，它与表示实际炉温的热电偶的电压 u_f 相比较，形成误差电压 $\Delta u = u_r - u_f$ 。 Δu 经过电压放大器和功率放大器后

驱动电动机向一定方向转动,再经过减速器提高或降低调压器的电压 u_h , 提供给加热炉,并使 u_f 接近 u_r , 即使 $\Delta u \approx 0$, 这时电动机不再转动,自动调节系统使输出温度接近于给定值。

随动系统(伺服系统或跟踪系统):输入量事先不确定的反馈系统称为随动系统(又称伺服系统或跟踪系统)。例如雷达跟踪系统就是这样的系统。在图 1.4.6 所示的典型雷达系统中,抛物面形状的天线不断地发射电脉冲,系统接收从目标飞行器发射回来的回波,并计算雷达天线的坐标和指向目标的向量之间的偏差。系统的任务是保证在任何扰动的作用下,让天线指向各个角落以保持与这些指向目标的向量平行。

火炮自动瞄准系统,飞机俯仰角的仪表指示系统,X-Y 记录仪均为类似的随动系统。

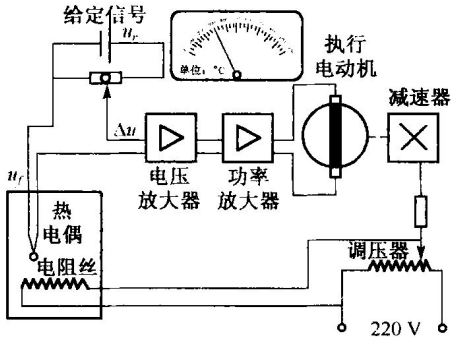


图 1.4.5 物料加热用电炉炉温自动控制系统

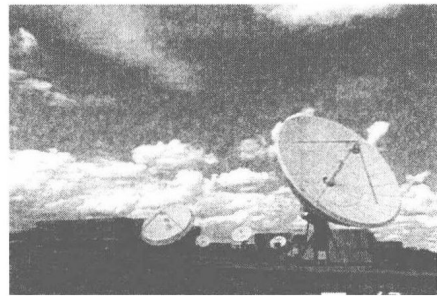


图 1.4.6 雷达系统

1.5 闭环控制系统的基本组成

闭环控制系统框图如图 1.5.1 所示。

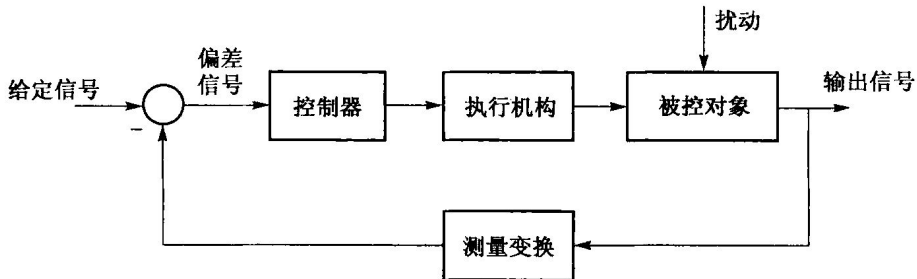


图 1.5.1 闭环控制系统框图

闭环控制系统是由各种不同的元部件组成的,将组成系统的元部件按职能分类主要有以下几种。

- (1) 测量元件:检测系统输出并参与控制的信号,如闭环调速系统中的测速机。
- (2) 给定元件:系统输入,其作用决定系统的控制目标,如闭环调速系统中的电位器。
- (3) 比较元件:比较系统输入和反馈信号,并给出它们的差值,如大脑比较手和书的位置。
- (4) 放大元件:对差值信号进行放大(包括功率放大)。
- (5) 执行元件:执行控制信号,实现控制目标,如手臂和手执行大脑的信号使手向书的位置移动。

此外,还有一些相关概念。

主反馈:直接取自系统输出端,经过测量和变换,又引入到系统输入端的信号叫主反馈信号,相应的反馈叫主反馈。

前向通道:从系统输入端到输出量之间的通道称为前向通道。

主反馈通道:从输出量到主反馈信号之间的通道称为主反馈通道。

单位反馈系统(Unit feedback system):主反馈信号等于输出量的系统叫单位反馈系统。

非单位反馈系统:主反馈信号不等于输出量的系统叫非单位反馈系统。

局部反馈:对应于内回路。

较为复杂的控制系统可能包括多个回路,如图 1.5.2 所示。

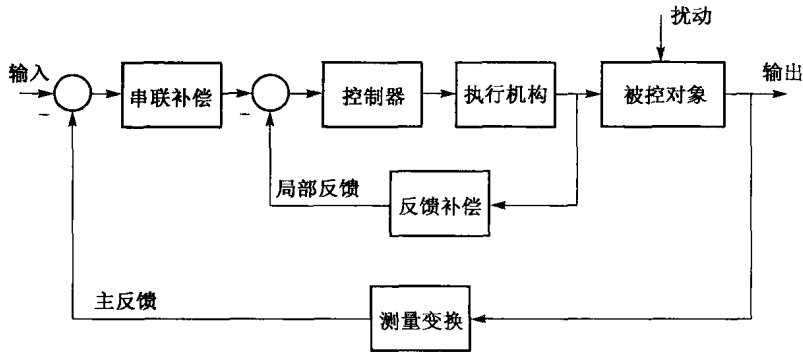


图 1.5.2 具有多个回路的闭环控制系统框图

1.6 现代控制系统实例

1. 硬盘驱动器的转速控制系统

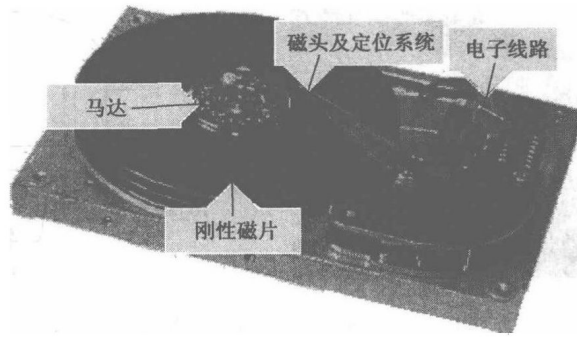
目前,全球的硬盘年产量有数十亿套。现在的硬盘盘片有几万到十几万个磁道,磁道的宽度非常小,因此磁盘驱动系统对磁头的定位精度,以及对磁头磁道间移动的精度与速度都有严格的要求。硬盘驱动器的实物图如图 1.6.1(a)所示,磁盘驱动器的读取系统采用直流电机带动滑动臂转动从而带动盘片转动,磁头安装在一个与机械手臂相连的簧片上。整个系统的控制目标是将磁头准确定位,以便正确读取磁盘磁道上的信息,因此被控制变量是磁头的位置。某早期硬盘驱动器的具体参数为:磁盘旋转速度在 1800r/min 和 7200r/min 之间,磁头悬浮于磁盘上方不到 100nm 的位置;要求磁头由一个磁道移动到另一个磁道的时间小于 50ms。磁盘驱动器的闭环转速控制系统框图如图 1.6.1(b)所示;若假定弹簧是刚性的,不会出现明显的弯曲,则简化后的闭环转速控制系统框图如图 1.6.1(c)所示。

2. 汽车驾驶控制系统

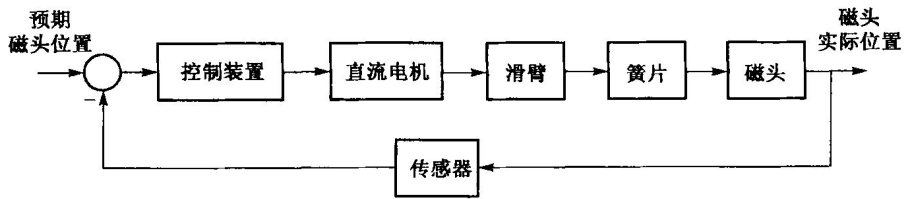
汽车驾驶控制系统如图 1.6.2 所示,将预期的行车路线与实际的行车路线相比较,便能得到行驶偏差。实际路线的测量通过眼睛(传感器)来实现或者通过手(传感器)感知方向盘的变化来实现。若是无人驾驶汽车,则一切测量、控制作用都通过自动驾驶仪来实现。

3. 磁悬浮列车控制系统

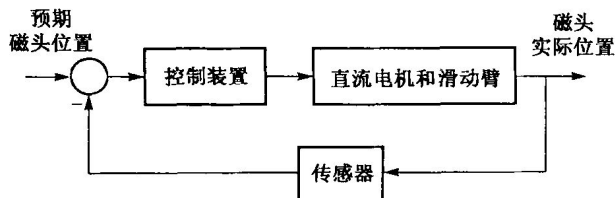
传统的铁路列车都是依靠诸如蒸汽、燃油、电力等各种类型机车作为牵引动力,车轮和钢轨之间的相互作用作为运行导向,由铁路线路承受压力,借助于车轮沿着钢轨滚动前进的。而



(a) 硬盘驱动器的实物图



(b) 硬盘驱动器的闭环转速控制系统



(c) 简化后的闭环转速控制系统

图 1.6.1

磁悬浮列车则依靠电磁场特有的“同性相斥”的特性将车辆托起,使整个列车悬浮在铁轨之上,利用电磁力进行导向,并利用直线电机将电能直接转换为推进力,来推动列车前进。由于避免了与轨道之间的接触,不存在由于轨道摩擦所造成的诸如极限速度等影响列车运行的问题,所以适于高速运行,并且运行过程稳定安全。

磁悬浮列车利用车上超导体电磁铁形成的磁场与轨道上线圈形成的磁场之间所产生的斥力,使车体悬浮于车道的导轨面上运行。悬浮力的大小由电磁线圈中的电流控制,它的方向与向下的重力相反。磁悬浮列车车轮与轨道的空间缝隙大约 10mm。为了可靠、稳定、高速运行,磁悬浮列车控制系统起着重要作用,如图 1.6.3 所示。

4. 飞行器控制系统

飞行器控制系统是指驾驶员(或自动控制装置)通过对飞行器的副翼、升降舵、方向舵等装

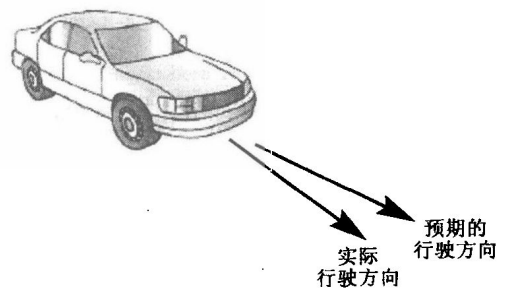


图 1.6.2 汽车驾驶控制系统