



21世纪普通高等教育规划教材

自动控制原理

任彦硕 主编

Principles of Automatic Control

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育规划教材

自动控制原理

主 编 任彦硕
副主编 罗云林
参 编 刘玉华 牛学芬
 马淑华 范丽娜
主 审 汪晋宽



机械工业出版社

本书是工科院校“自动控制原理”课程的教材。全书共分八章，全面介绍了经典控制理论的内容，主要包括：控制系统数学模型的建立，时域分析，根轨迹分析，频域分析，频域校正和根轨迹串联校正，非线性系统分析，离散系统分析和校正。全书注重理论联系工程实际，并介绍了MATLAB针对系统控制问题的应用。

全书叙述精练，引人入胜，适于教学和自学，也可供工程技术人员和考研读者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/任彦硕主编. —北京: 机械工业出版社,
2004.8

21 世纪普通高等教育规划教材
ISBN 7-111-14759-6

I. 自… II. 任… 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 (2004) 第 060337 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: 王保家 版式设计: 张世琴 责任校对: 姚培新
封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行
2004 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷
787mm × 1092mm¹/₁₆ · 15.25 印张 · 374 千字
定价: 26.00 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) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书按经典控制理论的内容分八章编写。第一章 绪论，通过实例分析介绍了自动控制系统的基本组成和分类；第二章 自动控制系统的数学模型，介绍了建立数学模型的理论方法；第三章 线性系统的时域分析法，介绍了控制系统的性能指标、暂态和稳态性能分析、系统的稳定性分析，应用 MATLAB 的时域分析方法；第四章 根轨迹分析法，介绍了根轨迹的绘制规则，广义根轨迹、零度根轨迹、多闭环系统的根轨迹，用根轨迹法分析系统性能，应用 MATLAB 绘制根轨迹；第五章 频域分析法，介绍了用开环、闭环频率特性分析控制系统的性能，用实验法建立数学模型，应用 MATLAB 绘制频率特性曲线；第六章 自动控制系统的校正，分别介绍了频域法超前、滞后、按期望的频率特性等的串联校正，根轨迹法串联校正，频域法反馈校正等；第七章 非线性控制系统分析，介绍了常见非线性环节对系统运动的影响，应用描述函数法分析系统的稳定性和自振，应用相平面法分析系统的响应性能；第八章 离散控制系统，介绍了离散系统数学模型的建立，离散系统的稳定性分析、稳态误差分析，离散系统的动态响应性能分析和离散系统的根轨迹校正，应用 MATLAB 分析离散控制系统。各章后均附有习题。

本书由汪晋宽教授主审。第一章、第五章第一~第四节由刘玉华编写，第二章由牛学芬编写，第三章由罗云林编写，第四章由马淑华和范丽娜编写，第五章第五~第七节、第六、七、八章由任彦硕编写，全书由任彦硕统稿。

本书参考学时为 80 学时，其中授课 66 学时，上机及实验为 14 学时。非电气控制类专业可选讲第一章~第六章，参考学时为 48 学时，其中授课 42 学时，上机及实验为 6 学时。

编 者

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 开环控制与闭环控制	2
第三节 自动控制系统的分类	5
第四节 自动控制系统举例	6
习题	8
第二章 自动控制系统的数学模型	10
第一节 线性连续系统微分方程的建立	10
第二节 传递函数	17
第三节 控制系统的动态结构图	26
第四节 信号流图	32
习题	36
第三章 线性系统的时域分析法	40
第一节 典型输入函数和时域性能指标	40
第二节 一阶系统的暂态分析	43
第三节 二阶系统的暂态分析	44
第四节 高阶系统的暂态分析	54
第五节 代数稳定判据	55
第六节 稳态误差分析	60
第七节 应用 MATLAB 进行时域分析	70
习题	72
第四章 根轨迹分析法	75
第一节 根轨迹方程	75
第二节 绘制根轨迹的一般规则	80
第三节 控制系统的根轨迹	88

第四节	应用根轨迹法分析控制系统的性能	95
第五节	应用 MATLAB 绘制根轨迹	98
习题	.....	99
第五章	频域分析法	101
第一节	频率特性	101
第二节	频率特性曲线	104
第三节	奈奎斯特稳定判据及稳定裕度	112
第四节	用开环对数频率特性分析系统的性能	120
第五节	用闭环频率特性分析控制系统的性能	128
第六节	实验法建立数学模型	131
第七节	应用 MATLAB 绘制频率特性曲线	132
习题	.....	134
第六章	自动控制系统的校正	137
第一节	控制系统校正的一般概念	137
第二节	校正装置及其特性	139
第三节	频域法串联校正	147
第四节	根轨迹法串联校正	158
第五节	频域法反馈校正	161
习题	.....	163
第七章	非线性控制系统分析	167
第一节	非线性控制系统概述	167
第二节	常见非线性环节对系统运动的影响	168
第三节	描述函数法	171
第四节	相平面法	180
习题	.....	193
第八章	离散控制系统	195
第一节	离散控制系统的基本概念	195
第二节	信号的采样与复现	196
第三节	离散系统的数学模型	201
第四节	离散控制系统的稳定性分析	212
第五节	离散控制系统的稳态误差分析	215
第六节	离散控制系统的动态分析	218
第七节	离散控制系统的校正	222
第八节	应用 MATLAB 分析离散控制系统	227
习题	.....	229

附录	232
附录 A 根轨迹的平滑性	232
附录 B MATLAB 应用的基础知识	233
参考文献	236

第一章

绪 论

第一节 概 述

自动控制在工程、军事和科学技术等各个领域，在国民经济的各个部门一直发挥着十分重要的作用，有着非常广泛的应用。例如，航空、航天、航海、冶金、机械、能源、电子、生物、医疗、化工、石油、建筑等各行业都应用控制理论解决相关的系统控制问题，有些应用甚至涉及到像人口控制、成本控制等社会科学领域，至少用于解决优化问题。

能够完成自动控制功能的基本体系称为自动控制系统。自动控制系统有简单系统、复杂系统和大系统之分。一个复杂的控制工程可能汇集了几个甚至数量众多的自动控制系统。例如，一个机器人身上每一个关节的动作需要一个电动机来拖动，控制它就需要设置一个控制系统，所以机器人的自动控制系统数量自然很多。

自动控制作为一门学科常被划分为自动控制技术和自动控制理论两部分。近几十年来，自动控制应用范围的扩大及被控对象科技含量的增加对自动控制技术提出了更新更高的要求，计算机及芯片业的发展也推动了控制技术的迅猛发展。控制技术的应用是以控制理论为基础的，当控制技术发展到所提问题现有理论无法解决的时候，新的理论便产生了。

控制理论按其发展的不同阶段分为经典控制理论和现代控制理论。经典控制理论通过传递函数来研究控制系统的输入输出关系，并且局限于单输入单输出的系统。现代控制理论则是基于状态空间表达式来研究控制系统，它可以是单输入单输出的，也可以是多输入多输出的。即使是单输入单输出的系统，在应用现代控制理论研究时也可以是更高阶的。近年来将计算机引入控制系统完成一个或几个环节的控制功能已十分普遍，由于计算机编程灵活，在不同条件下可以使用不同的参数、采用不同的控制方式，于是便产生了类似于自适应控制、自学习控制、模糊控制、专家系统、神经元及其网络控制等智能控制理论和控制实践。目前的大系统理论和智能控制理论已经开始形成所谓的第三代控制理论。

自动控制原理是经典的控制理论，属基础控制理论。由于实际应用中的控制系统仍以单输入单输出的为多见，使得经典控制理论仍然有着广泛的应用基础。

人类最早应用自动控制的历史大约可以追溯到两千年前古希腊人发明的浮球调节装置，但是，自动控制真正意义上的应用是在18世纪蒸汽机发明以后。直到1868年以前的自动控制系统一直是凭直觉设计（发明）的实证性系统，工业革命导致了控制系统应用的迅速增多，从那时起，提高控制精度、减小振荡性以及解决稳定性等问题成为人们关心的理论性问题，于是产生了经典控制理论。劳斯稳定判据就是1877年提出的。自动控制的应用最初在汽车制造业首先得到普及，二战期间，各参战国为了赢得战争的胜利投入了大量的人力、物力和财力研究自动控制系统：自动火炮定位系统、雷达天线控制系统、飞机自动驾驶仪以及

2 自动控制原理

其他一些军事控制系统相继得到了应用。这期间为解决系统设计的理论问题相继产生了基于直接求解微分方程的时域法、基于特征根理论的根轨迹法和在频率域分析设计系统的频域法。这些方法奠定了经典控制理论的基础。上个世纪中叶，随着人造卫星和空间技术的到来，为发射火箭及空间探测器而设计的控制系统要求用最少的能量完成更精确的控制，于是又产生了最优控制理论。复杂控制系统往往是多变量输入多变量输出的，一些变量之间存在耦合关系甚至是强耦合，这样的系统需要由现代控制理论加以研究了。本书介绍经典控制理论。

第二节 开环控制与闭环控制

图 1-1 是开环控制的例子，控制的对象是炉膛温度，控制的要求是保持炉温在某一恒定值。炉内需要的热能由电加热器提供，自耦变压器的可调输出端接电加热器以获得数值可调的交流电压。显然，在控制温度下要求电加热器提供的热量与吸收及消耗的热量相等才能维持温度恒定不变。事实上，加热过程中的工况是随时变化的，比如，被加热的物体初始温度比较低，初期吸热要比温度更接近要求值时单位时间内的吸热要多；热量散失也不同，由于是非绝热过程，炉温高时比炉温低时单位时间内散失的热量要多，还有进料出料期间炉门开启等随机因素造成的热量散失等等。如果不随时调节自耦变压器滑动触头以同步改变维持恒温所需的热能，温度将偏离期望的数值。调节滑动触头可由运行人员通过观察反映炉内温度的温度表来完成，这属于人工控制。引入闭环控制可以实现自动控制。

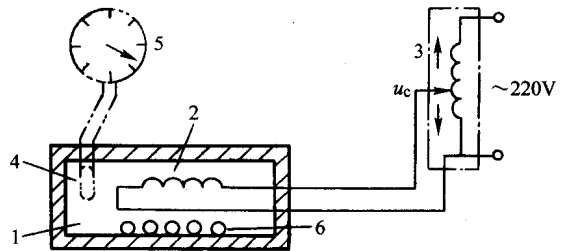


图 1-1 开环炉温控制系统

1—炉膛 2—电加热器 3—自耦变压器 4—温度检测元件 5—温度表 6—加热物体

图 1-2 是这个炉温控制的闭环控制系统，其中调节自耦变压器滑动触头的动作由直流伺服电动机经减速器来操动，炉内温度由热电偶检测出来后转换成电压信号与给定电压相比较（给定电压减去热电偶转换的电压），其差值被放大后加在直流伺服电动机的电枢上。直流伺服电动机得到电压后：① 既可以正转也可以反转；② 电压大转速快，电压小转速慢，电压为零则停止转动。这很像人工控制的功能：人通过观察反映炉内温度的温度表

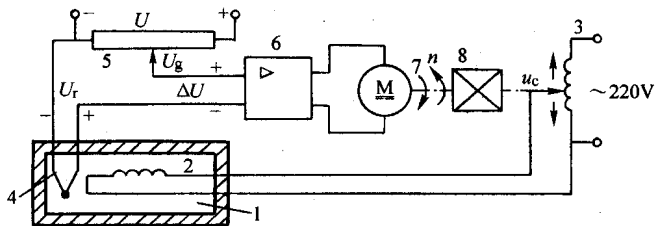


图 1-2 闭环炉温控制系统

1—炉膛 2—电加热器 3—自耦变压器 4—热电偶 5—给定电位器 6—放大器 7—伺服电动机 8—减速器

将炉温值输入大脑，在大脑中将温度值与期望值进行比较，小了，则调高输出电压，大了，则调低输出电压。其中，热电偶完成的是检测炉内温度并将观察到的温度值输入到大脑的功能；给定电位器完成了人脑将期望的温度值减去温度计上检测值的减法计算，并判断出是应该提高自耦变压器的输出电压还是降低它。差值信号输入给运算放大器之后的过程相当于人

操纵自耦变压器滑动触头的过程。从理论上讲，闭环自动控制可以做到快速、准确，甚至是无误差。而人工控制则有其笨拙的地方，有时需要经过反复试凑才能完成控制。由此可见自动控制的优越性。

图 1-2 所示的炉温闭环控制系统虽然简单，但从物理量的作用关系上看，它有单输入单输出系统的特征；从系统结构上看有组成闭环控制系统的各个主要环节。由此可做出单输入单输出系统的一般抽象。

一、物理量

1. 输入量

控制系统的输入量分为给定输入量和扰动输入量。图 1-2 系统的输入量是给定输入量 U_g （有时简称给定量），在单输入单输出系统中给定输入量只能有一个。扰动输入量是控制系统在工作期间出现的扰动量。扰动量可能有多个，比如，图 1-2 所示系统的扰动量可能是由环境温度的改变使电子放大器产生了零点漂移，炉门缝隙造成的炉内热量散失，电源电压的波动等。扰动量的存在对控制效果会带来不利影响，减小或消除它们是系统设计的一个任务。

2. 输出量

输出量可以是被控量，也可以是别的物理量。在单输入单输出系统中输出量只有一个，且常常指定为被控量。一般情况下，被控量也是被检测的量，所以输出量也是被测量。图 1-2 所示系统的输出量是炉膛温度。

给定输入量是系统能够工作的源泉，没有给定输入量的系统实际上是停机状态，自然就谈不上输出量和扰动量了。给定输入量为零是 0 值输入量，它不同于无给定输入量。

二、系统结构

按控制系统的部件（元件）所完成的功能将它们划分为不同的环节（有时一个部件完成几个功能，于是它组成几个环节）。一般的控制系统常常有如下的环节（部分环节可以省略）：

1. 给定环节

给定输入量通过给定环节作用于系统。图 1-2 的给定环节是接直流电压 U 的电位器 5，它将给定量 U_g 作用于控制系统的输入端。

2. 比较环节

比较环节完成将给定量与反馈量进行比较的功能。这里的“比较”有两种含义，一种是完成给定量减反馈量的减法运算；另一种是完成它们的加法运算。完成减法运算的须将反馈量与给定量接成相反的极性（反馈量的作用削弱了给定量），称为负反馈，图 1-2 的反馈是负反馈，放大器 6 的输入端完成了比较环节的功能。反之，如果反馈量的极性与给定量的极性相同（反馈量的作用增大了给定量），则是正反馈。在多闭环控制系统中为了得到好的响应性能有时将某个内环接成正反馈，而外环则都接成负反馈。

3. 放大环节

闭环控制系统是靠给定量与反馈量的差值信号实现对输出量控制的。由于差值信号很小（有时为 0），直接加在控制设备上不足以使系统工作，所以需要经放大器放大（这里的放大器并非只指具有放大倍数的放大器，有的还具有积分功能和其他的功能，即使输入为 0，输出也存在有限值）。图 1-2 中的放大器 6 是放大环节。

4 自动控制原理

4. 执行环节

执行环节（又称执行机构）是指由它的动作使被控量得到控制，是控制系统的末端环节。图 1-2 的执行环节是直流电动机及其减速机构。

5. 控制环节

控制环节（有时又称校正环节或控制器、调节器）是系统本身以外的人为设置的环节。设置该环节的常常是为了取得好的控制效果，表现为输出量跟随输入量变化得更快、更稳、更精确。图 1-2 的系统没有采用控制环节。

6. 被控对象

被控对象（也称控制对象）是指受系统控制的物理量，被控对象常被选为输出量。图 1-2 系统中的被控对象是炉膛温度。

7. 反馈环节

反馈环节将检测到的被控量反馈传输到输入端与给定量进行比较以实现闭环控制，有的系统将被测量直接接入比较环节，称为单位反馈。图 1-2 所示的反馈是单位负反馈。

图 1-3 示出了一般控制系统的框图。图中符号“ \otimes ”是比较环节符号，前向箭头指向该环节的是它的输入量（不标正负号的寓指正号），反馈量须注明正负号。系统信号在各环节的传输是有方向的，它指明了系统内各环节间物理量的控制与被控制关系，其间有能量的传递，但传递的能量只起控制作用而并非能量的完全传输。比如，图 1-2 所示系统比较环节的差值电压信号 ΔU 经放大器放大后驱动直流电动机，放大后的电压事实上是由放大器的外接电源产生的；还比如，电动机的旋转移动了自耦变压器的滑动触头从而改变了电加热器上交流电压的大小，但提供电加热器能源的是外接的 220V 交流电源。

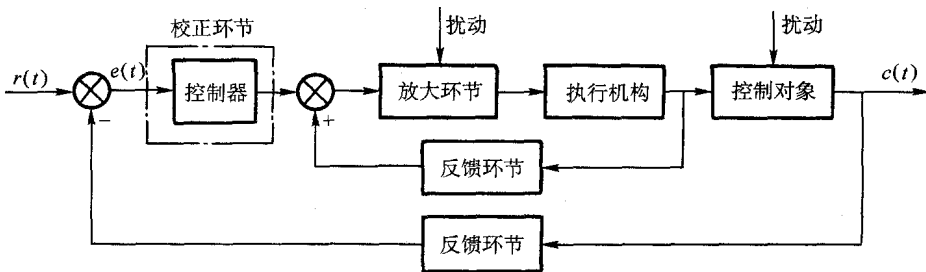


图 1-3 组成闭环控制系统的框图

图 1-3 中从输入信号 $r(t)$ → 控制器 → 放大环节 → 执行机构 → 控制对象 → 输出信号 $c(t)$ 的信号传输路径称为闭环系统的前向通道。反馈环节所在路径称为反馈通道，图 1-3 有两个反馈通道，内环的称局部反馈，是正反馈；外环的称闭环主反馈，是负反馈。

从系统设计要完成的工作步骤上将图 1-3 所示系统划分为两个部分。一部分为校正环节（这里的校正环节位于前向通道输入端处，有的校正环节在反馈通道或别的地方）；另一部分则是除校正环节以外的部分，称为系统的固有部分。系统设计时这两部分都要设计，首先是固有部分的设计，然后是校正环节的设计。设计固有部分要求满足：①控制对象提出的基本要求；②系统本身能够正常工作的要求。设计校正环节则是使系统输出响应跟随给定输入信号以及抑制扰动信号都更快、更平稳、更精确。

第三节 自动控制系统的分类

由于控制系统的多样性，需将它们进行分类。

一、按输入信号的特征分类

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的给定输入量是个常数，被控制的输出量希望是个恒定值，在除给定输入量以外的工况发生变化时希望系统的输出量维持恒值不变。前述的图 1-2 所示温度闭环控制系统属于这种类型。

2. 程序控制系统

程序控制系统的输入信号不是恒值，它可以是时间的函数、空间的函数，也可以是几何图形或按照某种规律编制的程序等等。这些函数、几何图形或者程序等由计算机输出后作用于自动控制系统的给定输入端，输出量便由变化的输入设定值控制。

3. 位置随动控制系统（又称伺服系统）

位置随动控制系统的给定输入量可以按事先未知的规律变化，要求被控制的输出量能够迅速准确地随输入量而变。自动火炮方位控制系统是位置随动系统的一个例子，火炮的给定输入量来自于雷达探测器，雷达将随时变化的目标方位传给计算机位置随动控制系统，计算机根据雷达信息设置给定输入量，随动系统完成由给定输入量确定的火炮方位的运动，这个运动过程要求既快又准。还比如， γ 刀将放射线聚焦于人体肿瘤杀死癌细胞的手术是通过核磁共振扫描肿瘤部位，将肿瘤部位的信息传给计算机，由计算机设定 γ 刀位置随动控制系统的输入值以完成肿瘤部位放射线的准确聚焦，从而将散射的放射线聚焦在肿瘤上杀死癌细胞又不伤害正常的组织细胞。

二、按信号传输过程是否连续分类

1. 连续控制系统

系统中各处传输的信号均是时间 t 的连续函数，这类控制系统称为连续控制系统。描述连续控制系统的动态方程是微分方程。

2. 离散控制系统

如果控制系统在信号传输过程中存在间歇采样、脉冲序列等离散信号，则称这样的系统为离散控制系统。描述离散控制系统的动态方程是差分方程。引入计算机参与控制的系统，由于有将模拟量转换成数字量的过程，属离散控制系统。有的控制系统对被控量或系统中某一物理量采用开关量控制，开关闭合时系统中有信号的传输，开关开启时信号传输中断，也属离散控制系统。比如图 1-1 的炉温控制系统，假设不调节电加热器的端电压而是采取开关控制电加热器的方式供热，只要通电和断电的时间间隔选择的好，也能达到控制炉温的效果。

三、按系统构成元件是否线性分类

1. 线性控制系统

均由线性元件构成的的控制系统是线性控制系统。事实上，绝对线性化是不存在的，一般情况下非线性程度不太严重的系统均可划归为线性系统范畴，这是闭环控制使非线性产生的偏离能够得到纠正的缘故。

6 自动控制原理

2. 非线性控制系统

控制系统内如果含有至少一个非线性元件，则该系统是非线性系统。非线性元件一般指其输出输入关系具有饱和限幅特性、死区特性、继电器特性、传输间隙特性等。它们的特点是不能用小信号线性化方法加以近似。

四、按系统参数是否随时间变化分类

1. 定常控制系统

系统参数不随时间变化的系统是定常控制系统。定常控制系统的微分方程或差分方程的系数是常数。

2. 时变控制系统

系统参数随时间变化的系统是时变控制系统。时变控制系统的微分方程或差分方程的系数是时间的函数。例如，发射卫星的火箭姿态控制系统，由于燃料的燃烧使质量参数随时减少，属时变控制系统。

第四节 自动控制系统举例

一、速度给定（恒速）控制系统

图 1-4 是具有负反馈的速度给定控制系统原理图。给定负极性的电压由给定电位器 8 设定。元件 1 是由反相输入端输入的运算放大器，它兼有比较环节和放大环节两个功能，其正相输入端经 R_b 接地，A 点为虚地点，对 A 点列稳态电流方程得： $I_1 = \frac{-U_n^*}{R_0}$ ； $I_2 = \frac{U_n}{R_0}$ ； $I_3 = 0$ 。稳定运行时由于放大器反馈支路上的电容已充好电，它建立了两个条件：①其隔直作用使 $I_1 = I_2$ ，即 $U_n = -U_n^*$ ；②建立了正值电压 U_{ct} 。方框 2 和方框 3 合起来完成功率放大功能，将弱电电压 U_{ct} 放大为强电电压 U_d ，驱动直流电动机。直流电动机是他励电动机，励磁磁通保持恒定，转速受端电压单变量控制。与直流电动机同轴相连的是直流测速发电机，其端电压近似与转速成正比，经分压后作为反馈信号 U_n 。这里的 U_n 极性要接成与给定电压 U_n^* 的相反，即负反馈连接。只有这样才能使系统稳定运行时电容器支路的电流为 0。

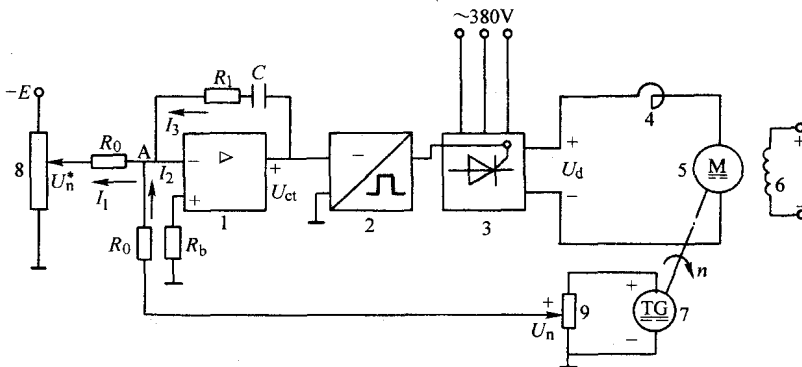


图 1-4 具有负反馈的速度给定控制系统原理图

- 1—运算放大器 2—触发电路 3—可控整流器 4—平波电抗器 5—直流电动机
6—直流他励绕组 7—直流测速发电机 8、9—电位器

现在分析扰动作用下系统稳定转速的动态过程。假设某一时刻开始直流电动机转轴上的负载转矩增加了一个恒定的量，这时，由于电动机轴上的输出功率没有来得及改变，转速将降低。降低的转速使测速发电机端电压下降，分压值 U_n 也下降，导致运算放大器输入端电流平衡关系遭到破坏， $I_3 \neq 0$ 。 I_3 给电容 C 充电使 U_{ct} 增加，经功率放大后的 U_d 增加使电动机输出转矩增加，转速得以回升，稳定后进入新的平衡状态。新平衡状态对应于电容器的隔直状态，转速回到了原来的数值，转速负反馈电压 U_n 回到了给定值 $-U_n^*$ 。但电容器上的电压值、电动机获得的电磁功率及输出转矩等都与原来不同。假设经过一段时间的运行负载扰动量消失了，这时电动机提供的功率因负载的减少而出现过剩，转速将升高，升高的转速使 U_n 大于原来的值，导致 $I_2 > I_1$ ，电容器支路电流 I_3 在图示参考方向下为负值，电容器放电， U_{ct} 、 U_d 均降低，减小了电动机的输出转矩而使转速下降，达到新的平衡。

速度给定控制系统在工业控制中得到了广泛的应用。比如，轧制钢板的轧辊转速要求恒定才能轧制均匀厚度的钢板。

二、函数记录仪位置随动控制系统

图 1-5 所示系统为函数记录仪位置随动控制系统。设放大器 1 为比例放大器，其输出量与输入量的比值是个常数，当 ΔU 作用于放大器输入端时，经放大后的输出量驱动伺服电动机 2 旋转，由于 ΔU 有正负大小之分，伺服电动机正反转、快慢转受其控制， $\Delta U = 0$ 时，电动机停止转动。测速发电机 3 将速度信号测出后反馈给放大器形成速度负反馈闭环，这样有利于消除或抑制闭环内扰动量对转速的影响以稳定转速。

ΔU 是由电位器 5、滑线变阻器 6、电动势 E 构成的电桥电路在输入函数 9 的作用下形成的，其等效电路如图 1-6 所示。电桥平衡条件下 A、B 两点间的电压为零。比如 $u_r = 0$ ， ΔU 也为 0 时可动点 A 的位置是电桥电路的初始平衡点，由于输入信号 u_r 和 ΔU 均串接于平衡桥支路， u_r 随时间变化时 ΔU 也随时间变化，经其外接电路使 A 点上下移动，以保持电桥平衡。在保持电桥平衡前提下，可动点 A 的位移与输入函数的幅值成比例，这样，纸带机 8 匀速运动时，A 点绘制的轨迹便是 u_r 的函数曲线。

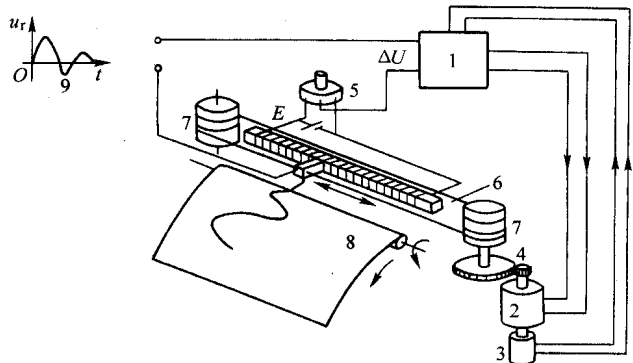


图 1-5 函数记录仪原理示意图

- 1—放大器 2—伺服电动机 3—测速发电机
- 4—减速器 5—电位器 6—滑线变阻器
- 7—线轮 8—纸带机 9—输入函数

由于输入信号 u_r 和 ΔU 均串接于平衡桥支路， u_r 随时间变化时 ΔU 也随时间变化，经其外接电路使 A 点上下移动，以保持电桥平衡。在保持电桥平衡前提下，可动点 A 的位移与输入函数的幅值成比例，这样，纸带机 8 匀速运动时，A 点绘制的轨迹便是 u_r 的函数曲线。

三、导弹发射架方位随动控制系统

图 1-7 所示系统为由单片计算机控制的导弹发射架方位随动控制系统原理图。所谓方位是指水平面上的定位。输入信号 $u_r(t)$ 可以是反映三维空间位置的雷达信号在水平面上的分量，经模数转换器 6 转换的数字量输入到单片机 7；另一

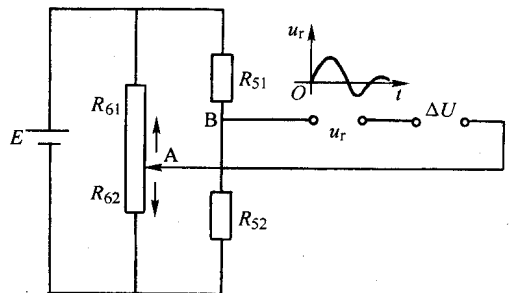


图 1-6 函数记录仪电桥等效电路

8 自动控制原理

路数字量来自于光电编码盘 5，它将被控对象——导弹发射架 4 的旋转角度编成数码后输入给单片机。单片机将得到的输入量信息和反馈量信息经控制程序运行（或查表）后输出一个数字量，经数模转换器 8 转换成离散的模拟量，再由保持器 9 连续化后作用于放大器 1，放大的电压 U_d 拖动电动机 2 带动发射架 4 沿水平面转动。导弹发射架方位数字控制系统框图如图 1-8 所示。如果要控制导弹发射架的俯仰角，则需要设置另一套电动机拖动的自动控制系统了。

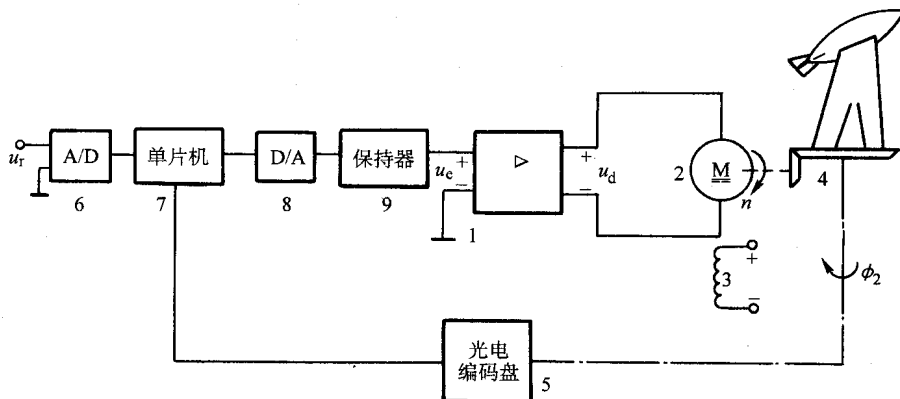


图 1-7 导弹发射架方位随动控制系统原理图

1—放大器 2—伺服电动机 3—他励绕组 4—减速器及发射架底盘 5—光电编码盘 6—模数转换器 7—单片机 8—数模转换器 9—保持器

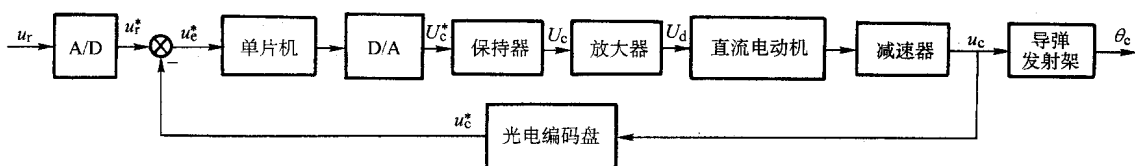


图 1-8 导弹发射架方位数字控制系统框图

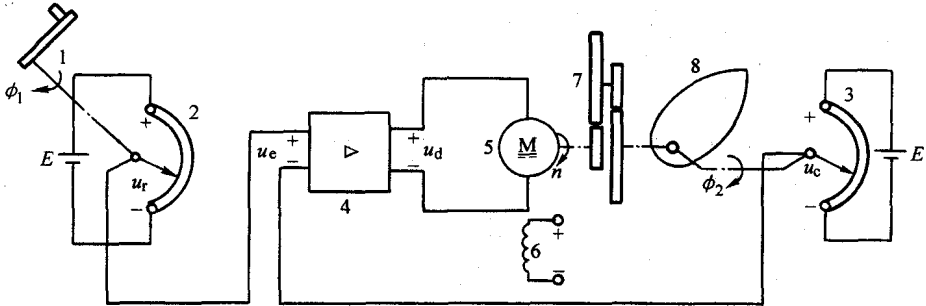
火炮炮身方位及俯仰角的自动控制、机器人的运动控制等都是位置随动控制系统应用的例子。

习 题

- 1-1 试列举几个日常生活中见到的控制系统的例子，它们是开环控制还是闭环控制？它们如何工作？
- 1-2 自动控制系统通常由哪些基本环节组成？各环节起什么作用？
- 1-3 如何理解自动控制技术已发展到了计算机控制时代经典控制理论仍然起着重要作用？
- 1-4 试分析图 1-4 所示负反馈速度给定控制系统：
 - (1) 给定电压 U_n^* 降低时系统的工作情况；
 - (2) 电网电压降低时系统的工作情况。

如果将图中测速发电机 7 的极性反接，系统能否正常工作？

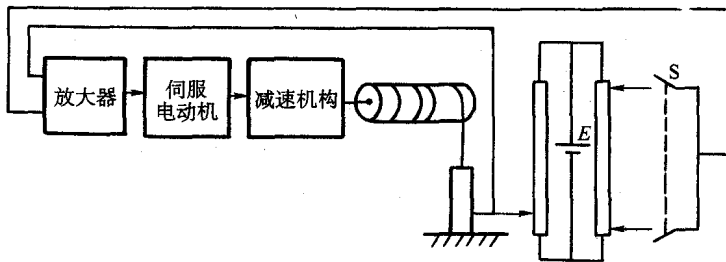
1-5 船舶的航行是靠旋转驾驶舵轮改变船尾水下舵叶与船身之间的角度实现航向改变的，水下舵叶由电动机经传动机构拖动，控制舵叶转动的位置随动系统原理图如题 1-5 图所示。试分析该控制系统的工作原理，并找到组成系统的各个基本环节，绘出系统框图。



题 1-5 图 船舶舵叶位置随动控制系统原理图

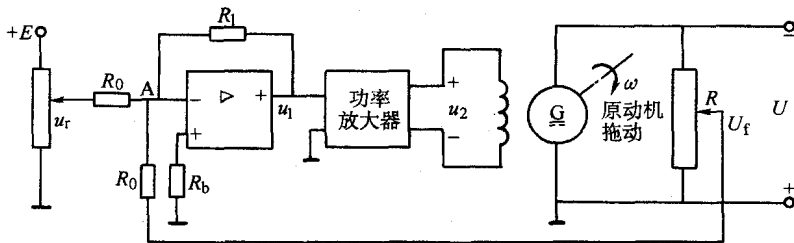
- 1—手轮 2—给定电位器 3—检测电位器 4—放大器 5—伺服电动机
6—他励绕组 7—传动机构 8—舵叶

1-6 吊起式安装的油库大门控制系统如题 1-6 图所示。试叙述该系统的工作原理，并绘出系统框图。



题 1-6 图 油库大门位置随动控制系统原理图

1-7 稳定他励直流发电机机端电压是靠调节励磁电流实现的，其闭环控制系统如题 1-7 图所示。试叙述该系统的工作原理，并指出组成系统的基本环节，绘出系统的框图。



题 1-7 图 发电机励磁控制系统原理图

第二章

自动控制系统的数学模型

笼统地说,自动控制系统的数学模型是指描述系统内部各物理量之间相互关系的数学表达式及其派生的系统动态结构图。由于控制系统各物理量之间存在着控制与被控制的关系,描述它们的数学表达式应能体现出这种控制关系并且方便求解。数学模型有多种形式,比如,描述连续系统的微分方程及由微分方程派生出来的状态方程;描述离散系统的差分方程及由差分方程派生出来的状态方程;描述连续系统的拉氏变换象函数表达式;描述离散系统的 Z 变换象函数表达式;以及由象函数表达式派生出来的系统动态结构图等等。尽管形式不同,但实质都一样。不过,由动态结构图观察系统内部物理量之间的函数关系更直观细致。一般说来,系统中最为关心的物理量是输出量,由数学表达式描述的模型通常是指输入量作用下的输出量数学方程。类似于自变量与函数的关系式,在写输入量作用下的输出量表达式时,将输入量写在方程的右侧,输出量写在左侧,以方便求解输出量。

建立控制系统的数学模型(简称系统建模)是系统分析和设计的基础工作。没有数学模型就无法定量了解输出量的变化情况,更无法提出改进的措施了。建立数学模型一般有两种途径,一种是通过数学推演来建立,另一种则是通过实验来建立。数学推演是先对构成系统的各个环节加以分析,在弄清楚各环节输出量和输入量的关系机理及相关参数后,建立它们的数学模型。这常常要用到电学、运动学、热学、力学等相关定理和定律。对无法确切知道关系机理的则需要应用实验法。当然,也可应用实验法对由数学推演建立的模型加以验证。实验法是对被测试的对象施加某种特殊的输入函数,由输出的响应特性应用已知的函数去逼近。例如,电路理论介绍了网络冲激响应的象函数是网络函数,控制系统在输入端施加冲激函数时响应的象函数便是传递函数。将一个逼近的冲激函数施加在控制系统的输入端,在输出端记录输出特性曲线,用时间函数表达之并取其零初始条件下的拉氏变换便可得到传递函数。当然还有别的方法。实验法建模属“系统辨识”,近年来系统辨识已发展成为一门独立的学科分支。本书第五章简单介绍了应用频率特性确定传递函数的实验方法。本章主要介绍由数学推演建立连续系统的微分方程、传递函数、动态结构图等数学模型,离散系统的建模将在第八章介绍。

第一节 线性连续系统微分方程的建立

这里讨论的线性连续系统限定为定常系统并且不考虑分布参数因素。

一、线性元件单元的微分方程

线性元件“单元”一般说来是指可以成为控制系统一个组成部分的几个(或一个)线性元件的某种连接。建立线性元件单元的微分方程是在该单元输入量作用下寻找输出量的函数关系。下面以几个单元为例介绍单元微分方程的建立。