新编《信息、控制与系统》系列教材

自动控制理论例题习题集

王诗宓　杜继宏　窦曰轩　编著

清华大学出版社　　Springer
北　京

内 容 简 介

本书比较系统、全面地总结了自动控制理论课程中经典方法和状态空间方法、线性和非线性控制系统的概念和基本原理;对多数典型例题进行详细解答之后又作了较深入的讨论;所选习题比较具有代表性。附录包括学习自动控制理论所需的数学知识、清华大学研究生入学考试的部分控制理论试卷和绝大部分习题的参考答案。读者理解了书中的例题并独立完成习题,就能较好地、较全面地掌握该课程的主要内容。对于修读或是自学该课程的学生和工程科技人员,本书既是一本内容丰富、讲解透彻、能扩展读者思路的学习参考书,也是一本适于随时查询的手册,同时还是一本高效的复习参考书。

版权所有,翻印必究。
本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

书　名: 自动控制理论例题习题集
作　者: 王诗宓　杜继宏　窦曰轩　编著
出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)
http: // www .tup .tsinghua .edu .cn
印刷者: 清华大学印刷厂
发行者: 新华书店总店北京发行所
开　本: 787×1092 1/ 16　印张: 36 .25　字数: 728 千字
版　次: 2002 年 6 月第 1 版　2003 年 5 月第 2 次印刷
书　号: ISBN 7-302-05275-1/ TP・3099
印　数: 5001～7000
定　价: 45 .00 元

第 1 章

控制系统的基本概念

1.1 基本术语

自动控制系统:能对被控对象的工作状态进行控制,使其按指定规律变化的系统称为控制系统。如果不需要人的直接干预,则称为自动控制系统。自动控制系统可以用图 1.1 所示的方块图表示。

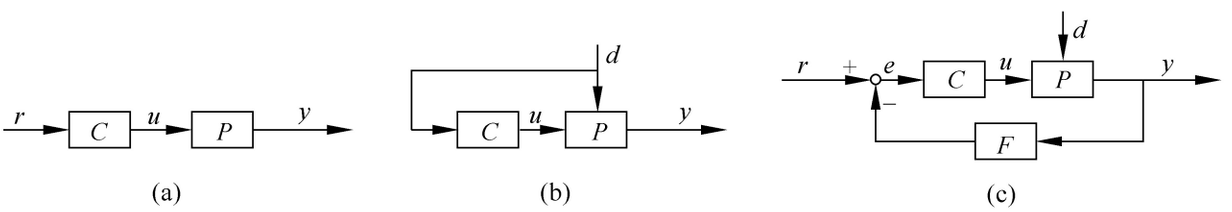


图 1.1　自动控制系统方块图

对象:被控的物体或过程,如图 1.1 中的 P。广义地说,对象不一定是物理实体,它可以是包含抽象动态过程的社会和经济现象。

过程:被控的运行状态。

系统:为完成一定任务的部件或功能的组合。系统的概念可以推广到抽象的动态对象。

被控量:被控对象的输出,也称为输出量。如图 1.1 中的 y。

控制量:作用于被控对象、改变对象运行状态的量。如图 1.1 中的 u。

参 输入:被控对象输出应当达到的数值,也称为给定信号或给定值、整定值。如图 1.1 中的 r。

输入量:泛指输入到控制系统中的信号,如图 1.1 中的给定值 r,甚至外扰 d。

扰动:使系统输出量偏离期望状态的信号,如图 1.1 中的 d。产生于系统内部的扰动称为内扰,产生于系统外部的扰动称为外扰。

反馈:将系统的输出量馈送到参考输入端,并与参考输入进行比较的过程。如图 1.1 中的 F 就代表完成反馈功能的部件。反馈信号的符号与被比较信号相反时称为负反馈,相同时称为正反馈。

反馈控制:将系统的输出量与参考输入进行比较,并力图保持两者之间既定关系的控制原理。反馈控制是一种根据误差进行控制的方法。

前向通道:从给定信号到被控变量的通道。

反馈通道:从被控变量到比较点的通道。

误差:期望输出值与实际输出值之间的偏差,譬如 $e = r - y$。但在反馈控制系统中,参考输入和反馈信号的偏差也称为误差。所以,如果在具体情况下可能引起混淆,最好用文字或公式进行说明。

1.2 开环和闭环控制系统

开环控制系统:输出量对系统的控制作用不产生影响的系统,如图 1.1(a)所示。开环控制系统不是反馈控制系统,它的输入量由预先设定的、与输出量无关的程序给定。系统的精度取决于校准的精度。

顺馈控制系统:直接或间接地测定扰动,并产生一种与扰动影响相反的控制作用来抵消扰动影响的控制方法,如图 1.1(b)所示。顺馈控制系统是一种开环控制系统。如果能够准确测量扰动,顺馈控制系统可以获得满意的控制效果。不过针对一种扰动设计的顺馈控制系统不一定适合另一种扰动。

闭环控制系统:输出量对系统的控制作用有直接影响的系统,如图 1.1(c)所示。闭环控制系统是反馈控制系统。在设定值变化或扰动产生时,就会出现误差信号,从而产生控制作用,以减小系统的误差。当系统中存在无法预计的扰动和变化时,应当采用闭环控制系统。采用闭环控制,就可能使用低成本的器件构成精确的控制系统。

1.3 反馈控制系统的构成

一个典型的反馈控制系统如图 1.2 所示。现对其中一些前面未曾说明的部件和信号描述如下。

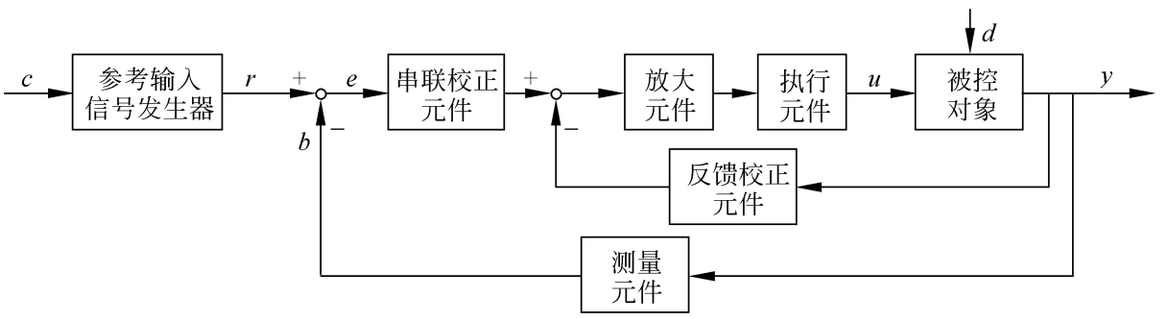


图 1.2 典型的反馈控制系统示意图

指令信号:期望的输出值,如图 1.2 中的 c。它可能不是一个真正的物理信号,而只是表征一个物理量的数、一个表盘刻度值。

参考输入信号发生器:产生与指令信号数值对应的、能够被系统处理的参考输入信号 r 的元件。随系统的不同,参考输入信号发生器可以产生电气、气压或液压信号。

测量元件:对系统输出进行测量、并提供便于处理的信号量的元件。测量值用于和参考输入进行比较以产生适当的控制信号。

比较元件:对系统给定值和反馈信号进行比较以获得误差信号的元件,如图中进行 $e = r - b$ 运算的元件。比较元件产生的误差信号一般比较弱,无法直接推动被控对象。

放大元件:对微弱信号进行放大以提供足够功率信号的元件。

执行元件:接收放大元件提供的功率,直接推动被控对象、改变输出量的元件。

校正元件:能够根据误差和系统要求,产生适合对象动态特性的控制作用(控制律)以获得满意输出的元件。校正元件的作用就是实现某种控制律。常用的校正分为串联校正和反馈校正。串联校正元件位于系统的前向通道,它与反馈测量元件、对象等构成主反馈回路。反馈校正元件位于系统的反馈通道,它与对象构成局部反馈回路。反馈校正元件不一定从对象的输出获得信号;对于某些特殊的系统,它有时利用对象中间环节的信号进行反馈,先局部地调整对象的特性,然后再由主反馈回路使系统具有满意的输出特性。

1.4 控制系统的分类

研究问题的出发点不同,可以有不同的分类方法。下面列举一些常见的控制系统。它们不是按同一个角度分类的,而且也不完全。

调节系统:保持被控量等于给定常数值的系统。它的主要任务是克服各种扰动使输出量没有误差或误差尽可能地小。在调节系统中,给定值也可以是缓慢变化的量。

随动系统:保持被控量等于某个不能预知的变化量的系统。随动系统中不可避免地存在误差,但应使误差尽量小。随动系统亦称伺服系统。随动系统的输出量主要为机械位移、速度和加速度等。

电气、气动、液动控制系统:控制、测量、给定信号主要为电信号、气压信号或液压信号的系统。

连续控制系统:系统中的信号均为连续信号的控制系统称为连续控制系统。

采样控制系统:利用连续信号的采样值,误差、控制等信号包含离散时间信号的控制系统称为采样控制系统。

运动控制系统:被控量为位移、转角、速度等位置信号的系统。

过程控制系统:被控量为温度、压力、流量、液(料)位和 pH 值等连续过程信号的系统。

线性控制系统:系统中各部件的输入和输出信号间为线性关系的控制系统。

非线性控制系统:包含有非线性元件的控制系统。

最优控制系统:根据每一时刻系统的有关变量自动生成反馈信号和控制作用,并使被控过程的某种指标达到最优的系统。

自适应控制系统:能自动改变系统的参数甚至结构,以适应系统本身参数和环境条件不可预计的显著变化的系统。

例 题

例 1.1 图 1.3(a)表示一个电动机转速控制系统。U_0 是一个固定的电压。电动机带动负载以速度 ω旋转。试分析该转速控制系统的工作原理,并画出方块图。

解: 由于 U_0 为固定电压,所以电位器变化时,放大器的入口电压发生变化。电位器的旋钮可以按速度刻度。设电位器旋钮正向旋转时放大器的入口电压升高,则经放大器放大后电动机的电枢电压也升高,于是转速 ω上升。同样可以分析放大器的入口电压降低时,转速 ω下降的情形。转速不仅受电动机的电枢电压影响,它也

随负载而变。在这个系统中输出量是转速 ω,它不影响控制作用,所以是一个开环控制系统。方块图如图 1.3(b)所示。

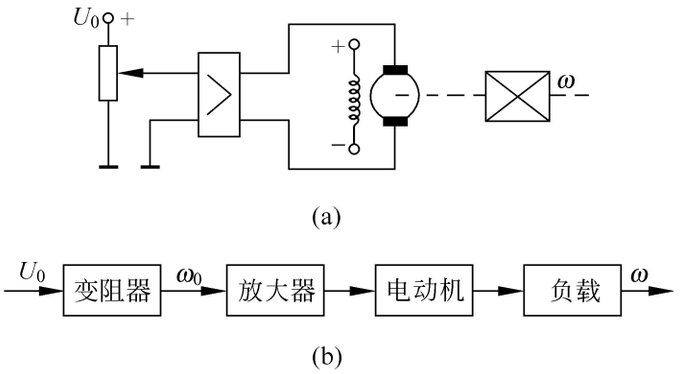


图 1.3　电动机转速控制系统

例 1.2　图 1.4(a)是一个自动液位控制系统。试说明其工作原理,并画出方块图。

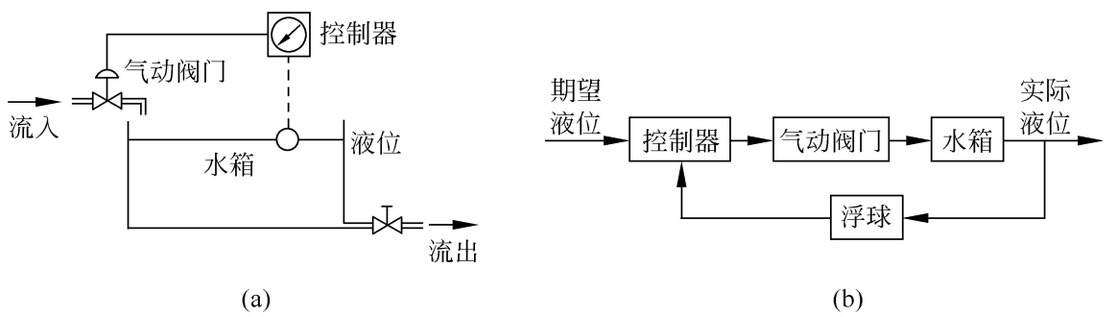


图 1.4　自动液位控制系统

解: 控制器将实际液位和期望液位的高度进行比较得到误差信号,根据该误差调节气动阀门的开度,增、减流入量来保持液位高度不变。其方块图见图 1.4(b)。

例 1.3　用方块图表示司机沿给定路线行驶时观察道路正确驾驶的反馈过程。

解: 司机根据眼睛观察到的车行驶路线及车的前进方向,估计车的前进路线。再由实际道路与估计的前进路线的差指挥手来操纵方向盘,以使车正确地沿道路前进。其方块图见图 1.5。

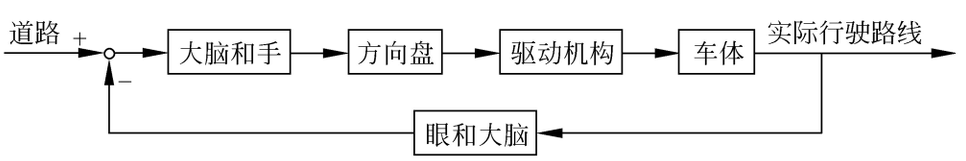


图 1.5　驾驶过程方块图

例 1.4　图 1.6(a)中 U 是发电机的端电压,U_0 是某电源电压,非常稳定,且等于发电机端电压的设定值。由于负载变化及其他原因,发电机端电压会随时波动。试分析图中端电压控制系统的工作原理,并画出方块图。

解: 由于 U_0 等于发电机端电压 U 的设定值,所以在端电压 U 符合要求的正常情况下,$U_{ab} = U_0 - U = 0$。但由于负载变化或其他原因引起 U 升高时,便有 $U_{ab} < 0$。

U_{ab} 经放大器放大(包括电压及功率放大)后使电动机转动,带动变阻器使电阻变大,从而使励磁电流 I_f 减小,最终使端电压 U 回降。对端电压 U 下降的情况可以作类似的分析。方块图如图 1.6(b)所示,图中用负载扰动集中代表各种因素对端电压的影响。

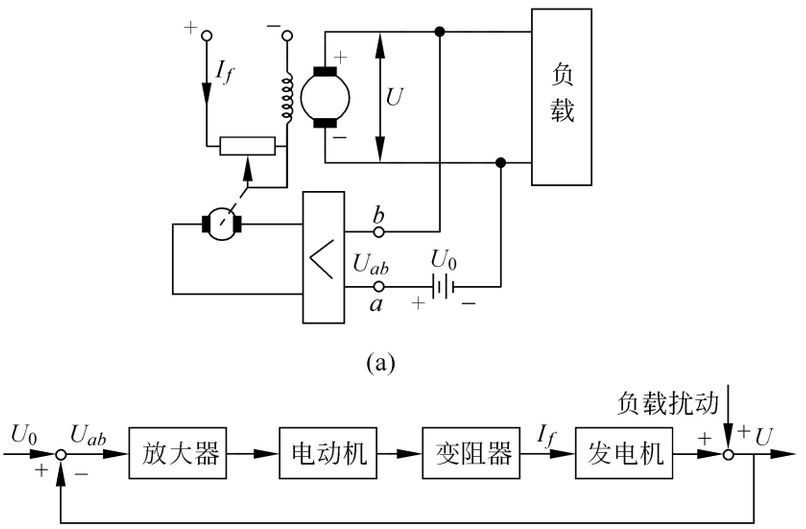


图 1.6　发电机端电压控制系统

例 1.5　图 1.7(a)表示一个火炮跟踪系统。图中 θ 是输入角度,θ_o 是输出角度。电动机通过齿轮传动装置使火炮旋转。试分析该跟踪控制系统的工作原理,并画出方块图。

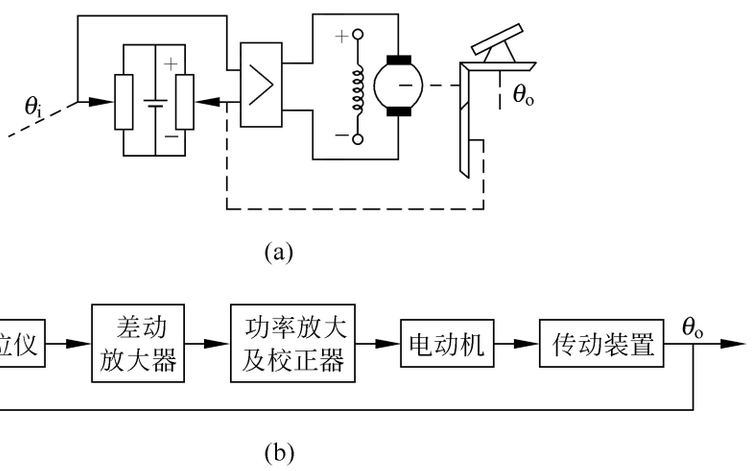


图 1.7　火炮跟踪系统

解: 当输入角度 θ 变化时,输入角度 θ 和输出角度 θ_o 的差会发生变化,于是在电位器上产生差动电压。该差动电压被放大后带动电机转动,再通过传动装置使火炮转动。火炮转动角度(即输出角度)θ_o 则被反馈到输入端与输入角度比较。只要两个角度不同,电机就会继续旋转,直到输出角度和输入角度一致为止。为保证跟踪精度,除了需要足够的功率外,还需要具有适当的动态特性,所以系统中应包括某种

校正装置。方块图如图 1.7(b)所示。

习　题

1.1　图 1.8 表示一个张力控制系统。当送料速度在短时间内突然变化时,试说明该控制系统的作用情况。画出该控制系统的方块图。

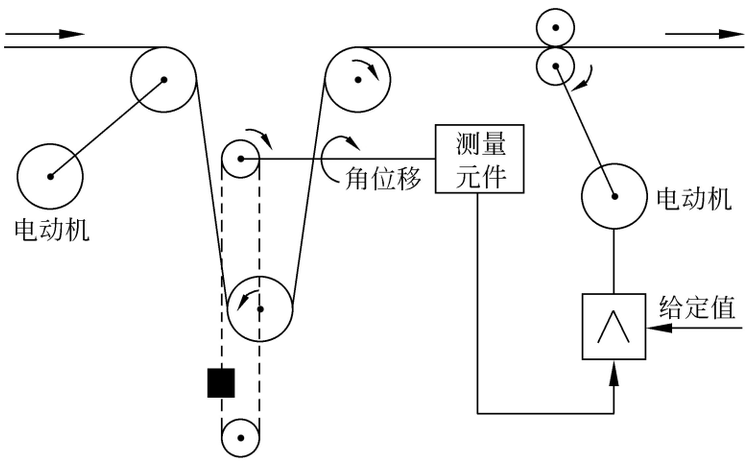


图 1.8　张力控制系统

1.2　图 1.9 表示一个发动机速度控制系统。试说明该控制系统的工作原理。画出该控制系统的方块图。

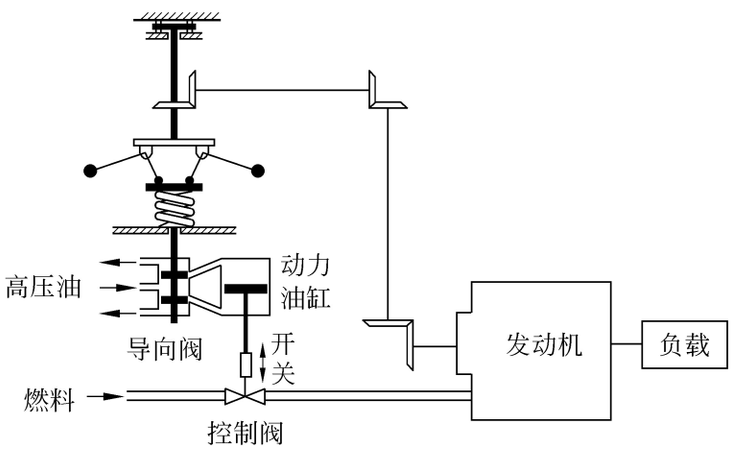


图 1.9　速度控制系统

1.3　图 1.10 是一个自动热水器的示意图。水箱中的水位由冷水入口调节阀保证,温度由加热器维持。试分析水位和温度控制系统的工作原理;并以热水出口流量的变化为扰动,画出温度控制系统的方块图。

1.4　图 1.11 表示一个电加热炉温度计算机控制系统。要求温度按一定方式变化,该变化方式由编程输入给定。试描述该系统的工作原理,并画出方块图。

1.5　图 1.12 是一个液压伺服装置的示意图。输入信号 x 使动力活塞产生位移 y。试描述该系统的工作原理,并以 x 为参考输入、y 为输出画出该系统的方块图。

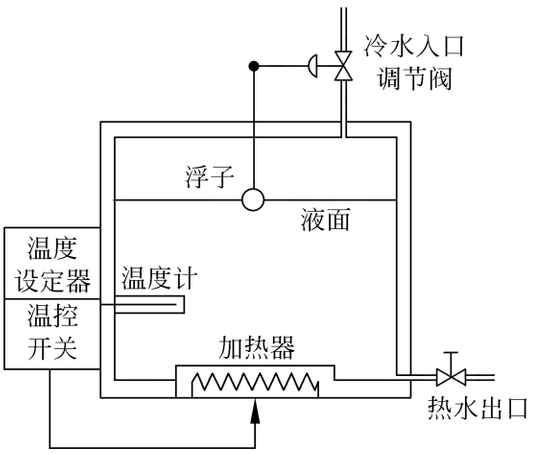


图 1.10 自动热水器示意图

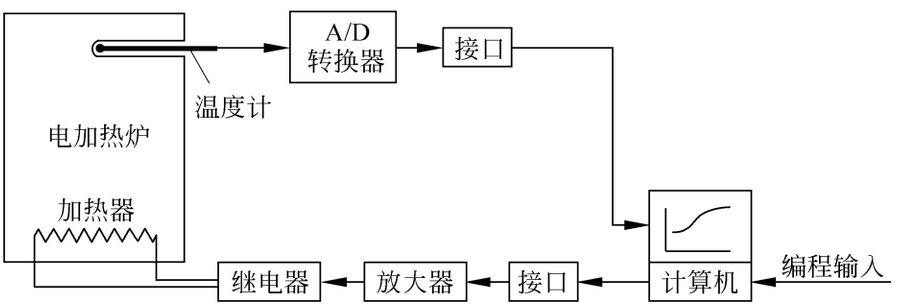


图 1.11 温度控制系统

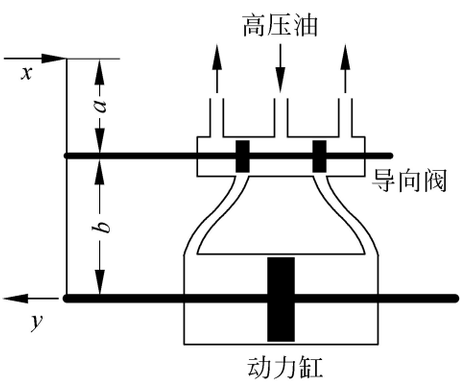


图 1.12 液压伺服系统

1.6 图 1.13 是一个简化的位置伺服系统。参考输入信号是给定的角位移 r，输出信号是输出轴的角位移 c，N_1 和 N_2 为减速齿轮的齿数。试分析该系统的工作原理，并画出方块图。

1.7 图 1.14 是一个气动比例调节器的示意图。稳定的气源气压 p_s 经阻尼孔后由喷嘴喷出，由于受到挡板阻挡，在喷嘴管内产生压力 p_c，它也是调节器的输出。喷嘴和挡板间距离 x 极小，所以认为由 x 到 p_c 间是一个放大倍数极高的放大器。过程中的误差信号 e 是调节器的输入。试描述该系统的工作原理，并画出方块图。

1.8 图 1.15 是一个精馏塔液位控制系统示意图。LC 代表液位调节器，FC 代

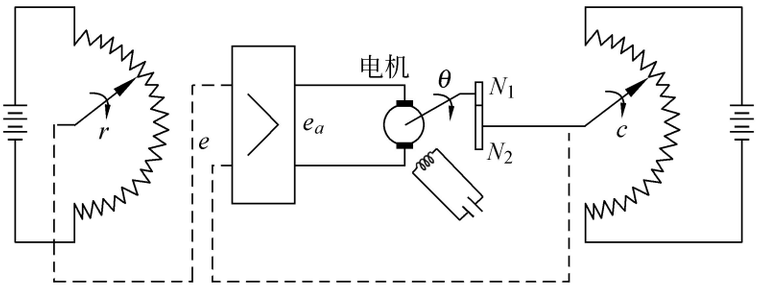


图 1.13　位置伺服系统

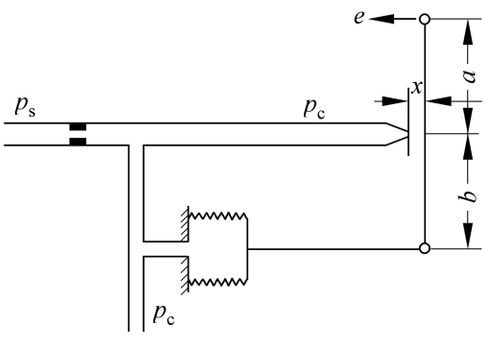


图 1.14　气动比例调节器示意图

表流量调节器。箭头代表液体的流向。P 为排液泵，V 为调节阀。液位调节器接受塔液位信号，流量调节器接受流量信号，并以液位调节器的输出作为它的参考输入。试描述该系统的工作原理，并画出方块图。

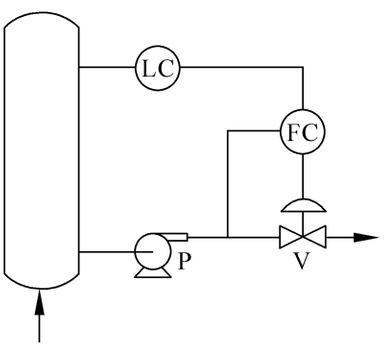


图 1.15　精馏塔液位控制系统示意图

1.9　图 1.16 是一个远程机械手控制示意图。图中机械手在月球表面，机械手的活动由摄像机摄制图像并通过无线电送回地面操作站。地面操作站人员通过操纵

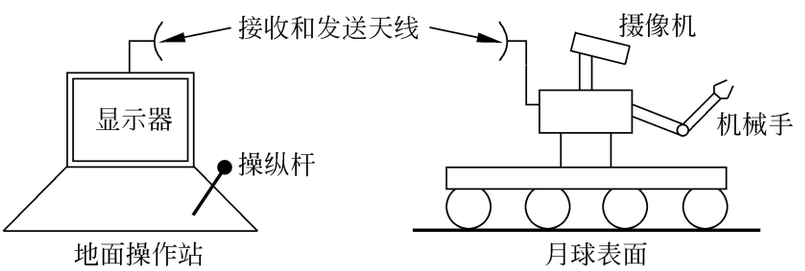


图 1.16　远程机械手控制示意图

杆进行操作，操作信号通过天线发往月球。机械手和地面站的平均距离约 384 318km。试画出显示闭环系统工作原理的方块图。

1.10 图 1.17 所示为一个依靠电磁铁吸引力的磁悬浮钢球。钢球应保持在希望高度的 10%之内。设钢球到地面的距离为 y，光源和光线检测器可以检测钢球的位置和运动速度。为完成闭环控制，试在图中补充画出控制器的位置，标出控制器的输入、输出信号，并画出方块图。

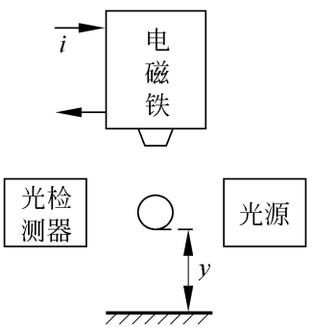


图 1.17 电磁悬浮球示意图

第 2 章

控制系统的数学模型

数学模型是描述控制系统中各变量之间相互作用关系和各自变化规律的数学表达式。描述控制系统数学模型的形式不止一种,它们各有特长和最适合使用的场合,且彼此之间有紧密的联系。建立描述控制系统运动的数学模型,是控制理论的基础。

控制系统数学模型的建立方法有分析法和实验法两类。分析法是对组成系统各部分的运动机理进行分析,根据它们所依据的物理和化学定律,列写出各变量之间的数学关系式,又称为机理分析法或解析法。实验法则是对系统施加某种典型测试信号,记录其输出响应,从而得到系统的数学模型。本章仅讨论分析法。

2.1 物理对象的微分方程描述

微分方程是描述各种事物的最基本的数学工具,是各种数学描述方法的共同基础。

(1) 微分方程

控制系统的微分方程是在时间域(简称时域)内描述动态系统性能的数学模型。线性定常系统或元件微分方程的典型形式为

$$a_0\frac{\mathrm{d}^{(n)}y}{\mathrm{d}t^n}+a_1\frac{\mathrm{d}^{(n-1)}y}{\mathrm{d}t^{(n-1)}}+\cdots+a_{n-1}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+a_n y$$

$$=b_0\frac{\mathrm{d}^{(m)}u}{\mathrm{d}t^m}+b_1\frac{\mathrm{d}^{(m-1)}u}{\mathrm{d}t^{(m-1)}}+\cdots+b_{m-1}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+b_m u \qquad (2.1)$$

其中：$a_0 \neq 0$，且 $n \geq 1$，$b_0 \neq 0$，$m \geq 0$，通常 $n \geq m$。

式(2.1)左端是输出变量及其各阶导数，右端是输入变量及其各阶导数。各项的系数 $a_j\ (j = 0, 1, \cdots, n)$和 $b_i\ (i = 0, 1, \cdots, m)$均为实数。

(2) 对象微分方程的列写

建立系统或元件微分方程的一般步骤如下：

① 分析对象的工作原理及其中各变量之间的相互作用关系，确定系统或元件的输入变量和输出变量。

② 根据对象工作中所遵循的物理或化学定律，并考虑到相邻组成部分之间的彼此影响，即所谓的负载效应，列写出各组成部分的原始微分方程。

③ 从系统输入端开始，依照信号的传递顺序，在由各组成部分的微分方程构成的方程组中，消去中间变量，得到描述对象输入变量和输出变量关系的微分方程，并将其化成如式(2.1)所示的典型形式。即将与输出变量有关的各项放在方程的左边，与输入变量有关的各项放在方程的右边，左、右两侧各项按降幂排列，各项系数化成具有一定物理意义的表示形式。

列写对象的微分方程时，在可能的情况下，要略去一些次要因素，力求使模型简化，为系统的分析和设计带来方便。

(3) 非线性方程的线性化

严格来说，实际物理系统或元件都具有不同程度的非线性，所以输出变量与输入变量之间的函数关系应当用非线性动态方程描述。但非线性方程的性质一般比线性方程复杂得多，因此工程上常常在一定条件下将非线性方程近似转化为线性方程。这称为非线性方程的线性化。

若输入变量与输出变量函数的函数值及各阶导数值在预定的工作点附近都存在，则可以采用微偏线性化方法将非线性关系近似成线性关系。微偏线性化方法又称为切线法或小偏差法，其实质是在一个很小的范围内，将非线性特性用一段直线来代替，具体方法如下。

设非线性函数 $y = f(x)$是光滑的，如图 2.1 所示，A 为预定的工作点，且对应有 $y_0 = f(x_0)$。当 $x = x_0 + \Delta x$ 时，有 $y = y_0 + \Delta y$。则函数 $y = f(x)$在 A 点附近可以展开成泰勒级数

$$y = f(x) = f(x_0) + f'(x_0)\Delta x + \frac{1}{2!}f''(x_0)\Delta x^2 + \cdots \quad (2.2)$$

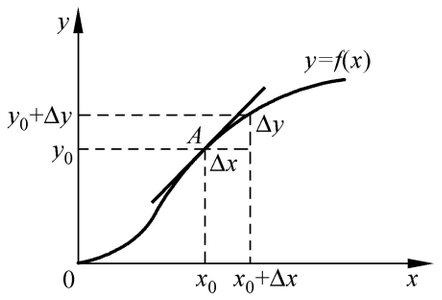


图 2.1 微偏线性化示意图

当 Δx 很小时，略去其高阶项，式(2.2)可以写成 $y = f(x) = f(x_0) + f'(x_0)\Delta x$ 或 $y - y_0 = f(x) - f(x_0) = f'(x_0)\Delta x$，即

$$\Delta y = f'(x_0)\Delta x \quad (2.3)$$

略去增量“号Δ,则非线性函数 $y=f(x)$在预定工作点 A 处的线性化方程为

$$y = f'(x_0)x = Kx \tag{2.4}$$

式中 $K=f'(x_0)$是比例函数,它是函数 $f(x)$在 A 点切线的斜率。

(4) 线性微分方程的解

给定输入变量形式及初始条件,可以求得微分方程的解。线性定常微分方程的求解方法有正规解法(经典法)和拉普拉斯(Laplace)变换解法,也可以用计算机求解微分方程。用拉普拉斯变换法求解线性定常微分方程的步骤如下:

① 考虑初始条件,对微分方程中的每一项分别取拉普拉斯变换,将微分方程转换为复数变量 s 的代数方程;

② 由代数方程求出输出变量的拉普拉斯变换函数表达式;

③ 对输出变量拉普拉斯变换函数求拉普拉斯反变换,可得到输出变量的时间域表达式,即所求微分方程的解。

求解微分方程可以得到系统的输出响应,这种方法比较直观,特别是借助于电子计算机可以迅速而准确地求得结果,但不便于对系统的分析和设计。

(5) 运动的模态

线性微分方程的解是一个特解与对应的齐次微分方程的解之和。其中齐次微分方程的解代表对象的自由运动,由微分方程的特征根决定。如果 n 阶微分方程的特征根是 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n$,且没有重根,则函数 $e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t},\cdots, e^{\lambda_n t}$ 等称为该微分方程所描述的运动的模态,也叫振型。模态只取决于齐次微分方程,与系统的输入变量无关,也与输出变量的选择无关。每一种模态代表一种类型的运动形态,齐次微分方程的解则是它们的线性组合,即

$$y(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + \cdots + c_n e^{\lambda_n t} \tag{2.5}$$

式中的系数是由初始条件决定的一组常数。特征根 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n$ 则称为各相应模态的极点。如果特征根中有重根,则模态会具有形如 $te^{\lambda t}, t^2 e^{\lambda t},\cdots$的函数;如果特征根中有共轭复数,则共轭复模态可写成实函数模态 $e^{at}\sin bt$ 与 $e^{at}\cos bt$ 的形式,它们是一对共轭复模态的线性组合。

2.2 系统的传递函数

传递函数是控制系统在频率域(简称频域)描述动态系统性能的数学模型,是线性定常系统的一种重要的数学模型。它不仅可以表征系统的动态特性,而且可以用来研究系统的结构和参数变化对系统性能的影响。

2.2.1 传递函数的定义和性质

(1) 传递函数的定义

线性定常系统的传递函数是零初始条件下,输出变量的拉普拉斯变换像函数与输入变量的拉普拉斯变换像函数之比。

当初始条件为零时,对式(2.1)的两端取拉普拉斯变换,可得

$$(a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n) Y(s) = (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m) U(s) \tag{2.6}$$

根据传递函数的定义得到系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} \tag{2.7}$$

(2) 传递函数的性质

① 传递函数是复变量 s 的有理分式函数,通常 $n \geq m$,且所有系数均为实数。

② 传递函数的分子多项式及分母多项式与相应微分方程的右端及左端微分算符多项式相对应,传递函数与微分方程所包含的信息量相同。

③ 传递函数只取决于系统或元件的结构和参数,与输入量的形式无关,也不反映系统内部的任何信息。传递函数是数学模型的输入输出模式,是系统的外部描述。

2.2.2 传递函数的极点和零点

传递函数的分子多项式和分母多项式经因式分解后可写成传递函数的零、极点表示形式

$$G(s) = \frac{b_0 (s + z_1)(s + z_2)\cdots(s + z_m)}{a_0 (s + p_1)(s + p_2)\cdots(s + p_n)} = \frac{K^* \prod_{i=1}^{m} (s + z_i)}{\prod_{j=1}^{n} (s + p_j)} \tag{2.8}$$

式中 $-z_i\ (i = 1, 2, \cdots, m)$ 是分子多项式的根,称为传递函数的零点; $-p_j\ (j = 1, 2, \cdots, n)$ 是分母多项式的根,称为传递函数的极点。传递函数的分母多项式就是它的特征多项式。分母多项式等于零所得的方程就是它的特征方程。特征方程的根称为特征根,也就是它的极点。$K^* = b_0 / a_0$ 是传递系数。传递函数的极点决定了所描述系统自由运动的模态,零点会影响系统各模态在响应中所占的比重。

传递函数也可以写成传递函数的时间常数表示形

$$G(s) = \frac{b_m(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)\cdots(\tau_m s+1)}{a_n(T_1 s+1)(T_2 s+1)\cdots(T_n s+1)} = \frac{K\prod_{i=1}^{m}(\tau_i s+1)}{\prod_{j=1}^{n}(T_j s+1)} \tag{2.9}$$

式中 τ_i 和 T_j 称为时间常数，$K = b_m/a_n$。当 $G(s)$是控制系统的开环传递函数时，K 是系统的开环放大倍数，或称稳态增益。

2.3 方块图和信号流图

控制系统的方块图和信号流图都是描述系统中各变量间关系的数学图形，应用方块图和信号流图可以简化复杂控制系统的分析和设计。

2.3.1 方块图

方块图是系统中各个环节的函数功能和信号流向的图形表示，由函数方块、信号分支点(引出点、测量点)、信号相加点(综合点、比较点)及具有方向(箭头)的信号线组成，又称为框图、方框图、结构图或传递函数图。控制系统方块图的基本形式如图 2.2 所示。图中 $R(s)$和 $N(s)$分别表示给定输入和扰动输入，$Y(s)$为系统输出，$B(s)$为主反馈信号，$E(s)$为误差信号。

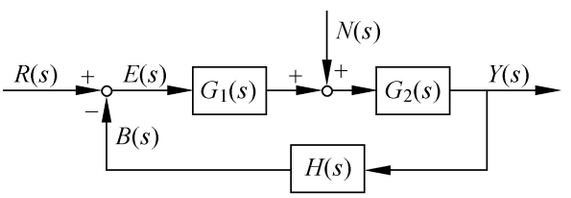


图 2.2 控制系统方块图

(1) 系统方块图的绘制步骤

① 考虑负载效应，分别列写系统各元部件(环节)的微分方程；

② 写出各元部件的传递函数，并将它们用方块表示，得到函数方块；

③ 根据各元部件的信号流向，把各函数方块用信号线依次连接起来，便得到系统的方块图。

(2) 方块图的基本运算和变换

方块图的基本运算形式有三种：串接运算、并接运算和反馈连接运算。

串接运算如图 2.3 所示，为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) \tag{2.10}$$



图 2.3 串接方块图的简化