

第 1 章 控制系统简介

1.1 引言

现在经常采用的控制理论,是经典控制理论(又称传统控制理论),现代控制理论和鲁棒控制理论。本书在经典控制理论和现代控制理论的基础上,提供了控制系统分析和设计的广泛的处理方法。在第 10 章中,包含了对鲁棒控制理论的简单介绍。

自动控制在任何工程和科学领域都是必不可少的。在宇宙飞船,机器人系统,现代制造系统,以及包括温度、压力、湿度、流量等任何工业操作过程中,自动控制都是其重要的组成部分。因此,大多数工程技术人员和科学工作者,都需要熟悉自动控制理论和实践知识。

本书是为高等院校的高年级学生编写的一本控制系统教科书。书中包括了所有必须的基础知识。与拉普拉斯变换和向量矩阵分析有关的基础知识,在附录中分别进行了介绍。

1.1.1 控制理论和实践发展史的简单回顾

18 世纪,詹姆斯·瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器,是自动控制领域的第一项重大成果。在控制理论发展初期,做出过重大贡献的众多学者中有迈纳斯基(Minorsky)、黑曾(Hazen)和奈奎斯特(Nyquist)。1922 年,迈纳斯基研制出船舶操纵自动控制器,并且证明了如何从描述系统的微分方程中确定系统的稳定性。1932 年,奈奎斯特提出了一种相当简便的方法,根据对稳态正弦输入的开环响应,确定闭环系统的稳定性。1934 年,黑曾提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念,讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电式伺服机构。

20 世纪 40 年代,频率响应法,特别是由伯德[Bode]提出的伯德图法,为工程技术人员设计满足性能要求的线性闭环控制系统,提供了一种可行的方法。20 世纪 40 年代和 50 年代,许多工业控制系统采用 PID 控制器去控制压力、温度等。20 世纪 40 年代初,齐格勒(Ziegler)和尼柯尔斯(Nichols)提出了用来调整 PID 控制器的法则,称为齐格勒-尼柯尔斯调整法则。20 世纪 40 年代末到 50 年代初,伊凡思(Evans)提出并完善了根轨迹法。

频率响应法和根轨迹法是经典控制理论的核心。由这两种方法设计出来的系统是稳定的,并且或多或少地满足一组独立的性能要求。一般来说,这些系统是令人满意的,但它不是某种意义上的最佳系统。从 20 世纪 50 年代末期开始,控制系统设计问题的重点从设计许多可行系统中的一种系统,转变到设计在某种意义上的一种最佳系统。

具有多输入和多输出的现代设备变得越来越复杂,因此需要大量方程来描述现代控制系统。经典控制理论只涉及单输入、单输出系统,对于多输入、多输出系统就无能为力了。大约从 1960 年开始,数字计算机的出现为复杂系统的时域分析提供了可能性。因此,利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论应运而生,从而适应了现代设备日益增加的复杂性,同时也满足了军事、空间技术和工业应用领域对精确度、质量和成本方面的严格要求。

从 1960 年到 1980 年这段时间内,不论是确定性系统和随机系统的最优控制,还是复杂系统的自适应和学习控制,都得到了充分的研究。从 20 世纪 80 年代至今,现代控制理论的进展集中于鲁棒控制及相关的课题。

现代控制理论是建立在微分方程组时域分析基础上的。因为这种理论基于实际控制系统的模型,所以现代控制理论使得控制系统的设计变得比较简单。但是,这种系统的稳定性,对实际系统与其模型之间的误差比较敏感。这意味着当把根据模型设计出的控制器应用到实际系统时,系统可能会不稳定。为了避免发生这种情况,我们通过首先设置可能的误差范围,然后设计控制器,使系统的误差保持在设定的范围内,这样设计出的控制系统就能保持稳定。基于这种原理的设计方法,称为鲁棒控制理论。这种理论把频率响应法和时域响应法两者结合到了一起。这种方法是一种数学上很复杂的方法。

因为这种理论要求具有研究生水平的数学背景,所以本书中鲁棒控制理论的内容只局限于初步知识。对鲁棒控制理论的详细内容感兴趣的读者,可以到正规的高等院校选学研究生水平的控制课程。

1.1.2 定义

在讨论控制系统之前,我们必须对一些基本术语加以定义。

(1) 被控变量和控制信号或操作变量

被控变量是一种被测量和被控制的量值或状态。控制信号或操作变量是一种由控制器改变的量值或状态,它将影响被控变量的值。通常,被控变量是系统的输出量。控制意味着对系统的被控变量的值进行测量,并且使控制信号作用于系统,以修正或限制测量值对期望值的偏离。

在研究控制工程时,为了描述控制系统,我们需要定义一些附加的术语。

(2) 对象

它可能是一个设备,多数由一些机器零件有机地组合在一起,其作用是完成一种特定的操作。在本书中,我们称任何被控物体(如一种机械装置,一个加热炉,一台化学反应器或者一架航天器)为一个对象。

(3) 过程

麦里亚-韦伯斯特(*Merriam-Webster*)字典对过程的定义是:一种自然的逐渐进行的运行或发展,其特征是,有一系列逐渐的变化,以相对固定的方式相继发生在运行或发展过程中,并且最后导致一种特定的结果或目标;或者也可以定义为:人为的或自发的连续进行的运行状态,这种运行状态由一系列被控制的动作和一直进行到某一特定结果或目标的有规则的运动构成。在本书中,我们称任何被控制的运行状态为过程,具体的如化学过程、经济学过程和生物学过程。

(4) 系统

系统是一些部件的组合,这些部件组合在一起,完成一定的任务。系统不限于物理系统。系统的概念可以应用于抽象的动态现象,如在经济学中遇到的一些现象。因此,“系统”这个词,应当理解为包含了物理学、生物学和经济学等方面的系统。

(5) 扰动

扰动是一种对系统的输出量产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统的内部,则称之为内部扰动;反之,当扰动产生在系统的外部时,则称之为外部扰动。外部扰动是系统的输入量。

(6) 反馈控制

反馈控制是这样一种控制,它能够在存在扰动的情况下,力图减小系统的输出量与某种参考输入量之间的偏差,并且其工作原理正是基于这种偏差的。这里所说的扰动仅仅指不可预测的扰动,因为对于可预测的扰动,或者已知的扰动,总是可以在系统内部加以补偿。

1.2 控制系统举例

本节将介绍一些控制系统的例子。

1.2.1 速度控制系统

在图 1.1 所示的原理图中,展示了发动机的瓦特式速度调节器的基本原理。允许进入发动机内的燃料数量,根据希望的发动机速度与实际的发动机速度之差进行调整。

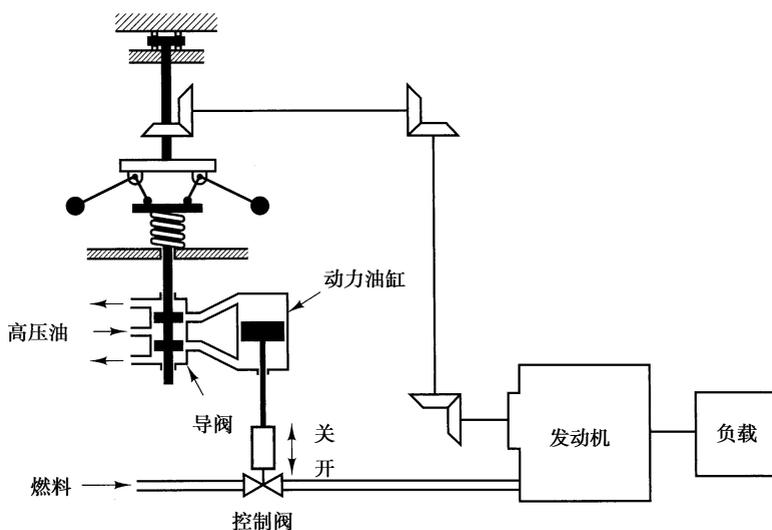


图 1.1 速度控制系统

该系统的工作过程陈述如下:速度调节器的调节原理是当工作于希望的速度时,高压油将不进入动力油缸的任何一侧。如果由于扰动而使实际速度下降到低于希望值,则速度调节器的离心力下降,导致控制阀向下移动,从而对发动机的燃料供应增多,发动机的速度增大,直至达到希望的速度时为止。另一方面,如果发动机的速度增大,以至于超过了希望的速度值,则速度调节器的离心力增大,从而导致控制阀向上移动。这样就会减少燃料供应,导致发动机的速度减慢,直至达到希望的速度时为止。

在这个速度控制系统中,控制对象(被控系统)是发动机,而被控变量是发动机的速度。希望速度与实际速度之间的差形成误差信号,作用到对象(发动机)上的控制信号(燃料的数量)为驱动信号,对被控变量起干扰作用的外部输入量称为扰动量。不能预测的负载变化就是一种扰动量。

1.2.2 温度控制系统

图 1.2 表示了电炉温度控制系统的原理。电炉内的温度由温度计测量,温度计是一个模拟装置。模拟量温度通过模数转换器转变为数字量温度,数字量温度通过接口设备传送到控制器。这个数字量温度与编程输入温度进行比较,如果存在某种差别(误差),控制器就会通过接口、放大器和继电器向加热器发送信号,从而使炉温达到要求的温度。

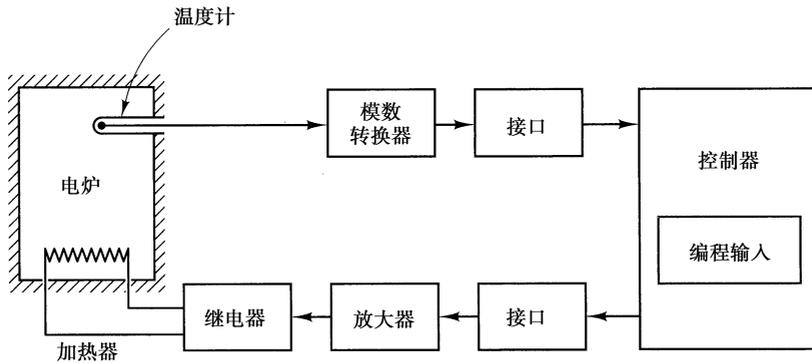


图 1.2 电炉温度控制系统

1.2.3 业务系统

一个业务系统可以由许多部门组成,分配给每个部门的任务代表系统中的一个动态元件。为了保证系统正常运行,在这类系统中必须建立对每一个部门完成任务情况的反馈通报方法。为了减小系统中不希望的时间延误,必须使各个业务部门之间的相互牵连达到最小。这种相互牵连越小,工作信息和资料的传递就越顺利。

业务系统是一个闭环系统。该系统的合理设计,将会减少必要的管理控制。应当指出,业务人员或资料的短缺、通信的中断和人员的失误等是这类系统中的扰动量。

为了进行适当的管理,有必要建立基于统计学基础的良好估计系统,通过采用超前或“预测”的方法,可以改善这类系统的性能,这是众所周知的事实。

为了用控制理论改善这类系统的性能,必须采用相当简单的一组方程,用于表示系统中各组成部门的动态特性。

虽然导出各组成部门的数学表达式的确是一项困难的任务,但是将最佳化技术应用到业务系统中去,确实能使业务系统的性能获得重大改进。

作为例子,考虑一个工程组织系统,它由下列主要部门组成:管理部门、研究和开发部门、样品设计部门、样品试验部门、产品设计和绘图部门、制造和装配部门以及产品检验部门。这些部门互相联系在一起,共同完成一项工程任务。

通过将系统简化为必需的最基本的组成部分(这些组成部分可以提供必要的分析资料),并且通过简单的方程表示每一个组成部分的动态特性,就可以对系统进行分析(这种系统的动态特性可以根据完成工作的顺序与时间之间的关系来确定)。

功能方框图可以利用方框和互连信号线画出来,其中方框表示系统运行的功能行为,互连信号线表示系统运行的信息或产品输出。图 1.3 是这个系统的一种可能的方框图。

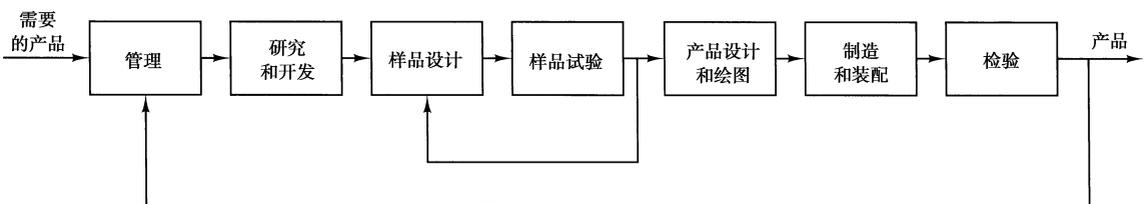


图 1.3 工程组织系统方框图

1.2.4 鲁棒控制系统

设计控制系统的第一步，是获得对象或控制目标的数学模型。实际上，任何我们要控制的对象的模型，在建模过程中都将包含误差。这就是说，实际的对象与在控制系统设计中采用的模型是不同的。

为了保证根据模型设计出的控制器能够令人满意地进行工作，当这个控制器与实际的对象一同使用时，一种合适的方法是从一开始便假设，在实际对象和它的数学模型之间存在着不确定因素或者误差，并且在控制系统的设计过程中包含着这种不确定因素或者误差。根据这种方法设计出来的控制系统，就称为鲁棒控制系统。

假设我们要控制的实际对象是 $\tilde{G}(s)$ ，并且假设实际对象的数学模型是 $G(s)$ ，即

$$\begin{aligned}\tilde{G}(s) &= \text{实际对象模型, 它含有不确定因素 } \Delta(s) \\ G(s) &= \text{用于设计控制系统的名义对象模型}\end{aligned}$$

$\tilde{G}(s)$ 和 $G(s)$ 可以用乘法因子联系如下：

$$\tilde{G}(s) = G(s)[1 + \Delta(s)]$$

或者用加法因子联系如下：

$$\tilde{G}(s) = G(s) + \Delta(s)$$

或者表示成其他形式。

因为不确定因素或者误差 $\Delta(s)$ 的精确描述是未知的，所以我们采用 $\Delta(s)$ 的估计，并且在控制器的设计中，利用这个估计及 $W(s)$ 。 $W(s)$ 是纯量传递函数，使得

$$\|\Delta(s)\|_{\infty} < \|W(s)\|_{\infty} = \max_{0 \leq \omega < \infty} |W(j\omega)|$$

式中， $\|W(s)\|_{\infty}$ 是 $|W(j\omega)|$ 在 $0 \leq \omega < \infty$ 时的最大值，并且被称为 $W(s)$ 的 H 无穷大范数。

利用小增益定理，这里可以把设计步骤归结为确定控制器 $K(s)$ ，使其满足下列不等式关系：

$$\left\| \frac{W(s)}{1 + K(s)G(s)} \right\|_{\infty} < 1$$

式中， $G(s)$ 是设计过程中采用模型的传递函数， $K(s)$ 是控制器的传递函数，而 $W(s)$ 则选定为与 $\Delta(s)$ 近似的传递函数。在大多数实际情况中，必须满足一个以上的这种不等式，其中包含 $G(s)$ ， $K(s)$ 和 $W(s)$ 。例如，为了保证鲁棒稳定性和鲁棒性能，可以要求满足两个不等式，比如

$$\left\| \frac{W_m(s)K(s)G(s)}{1 + K(s)G(s)} \right\|_{\infty} < 1 \quad \text{针对鲁棒稳定性}$$

$$\left\| \frac{W_s(s)}{1 + K(s)G(s)} \right\|_{\infty} < 1 \quad \text{针对鲁棒性能}$$

这些不等式是在 10.9 节中导出的。在许多不同的鲁棒控制系统中，有许多不同的此类不等式需要予以满足。鲁棒稳定性意味着控制器 $K(s)$ ，保证包括系统和实际对象的一组系统中的所有系统的内部稳定性。鲁棒性能则意味着一组系统中的所有系统都能满足规定的性能。本书中讨论的所有控制系统对象，都假设是精确知道，10.9 节讨论的对象除外。在 10.9 节中介绍了鲁棒控制理论的初步知识。

1.3 闭环控制和开环控制

1.3.1 反馈控制系统

能对输出量与参考输入量进行比较,并且将它们之间的偏差作为控制手段,以保持两者之间预定关系的系统,称为反馈控制系统。室温控制系统就是反馈控制系统的例子。通过测量实际室温,并且将其与参考温度(希望的温度)进行比较,温度调节器就会按照某种方式,将加温或冷却设备打开或关闭,从而将室温保持在人们感到舒适的水平上,且与外界条件无关。

反馈控制系统不限于工程系统,在各种不同的非工程领域,同样存在着反馈控制系统。例如,人体本身就是一种高级反馈控制系统,人体的体温和血压都是通过生理反馈的方式保持常态的。事实上,反馈具有非常重要的作用:它使得人体对外界干扰相当不敏感,从而使人体在变化的环境中仍能正常活动。

1.3.2 闭环控制系统

反馈控制系统通常属于闭环控制系统。在实践中,反馈控制和闭环控制这两个术语常常交换使用。在闭环控制系统中,作为输入信号与反馈信号(反馈信号可以是输出信号本身,也可以是输出信号的函数及其导数和/或其积分)之差的作用误差信号被传送到控制器,以便减小误差,并且使系统的输出达到希望的值。闭环控制这个术语,总是意味着采用反馈控制作用,减小系统误差。

1.3.3 开环控制系统

系统的输出量对控制作用没有影响的系统,称为开环控制系统。换句话说,在开环控制系统中,既不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到系统的输入端,与输入量进行比较。洗衣机就是开环控制系统的例子。在洗衣机中,浸泡、洗涤和漂清过程都是按照一种时基顺序进行的,洗衣机不必对输出信号,即衣服清洁程度进行测量。

在任何开环控制系统中,均无须将输出量与参考输入量进行比较。因此,对于每一个参考输入量,有一个固定的工作状态与之对应。这样,系统的精确度便取决于标定的精确度。当出现扰动时,开环系统便不能完成既定任务了。在实践中,只有当输入量与输出量之间的关系已知,并且既不存在内部扰动,也不存在外部扰动时,才能采用开环控制系统。显然,这种系统不是反馈控制系统。应当指出,沿时基运行的任何控制系统都是开环系统。例如,采用时基信号运行的交通管制,是开环控制的另一个例子。

1.3.4 闭环与开环控制系统的比较

闭环控制系统的优点是采用了反馈,因而使系统的响应对外部干扰和内部系统的参数变化均相当不敏感。这样,对于给定的控制对象,有可能采用不太精密且成本较低的元件构成精确的控制系统。在开环情况下,就不可能做到这一点。

从稳定性的角度出发,开环控制系统比较容易建造,因为对开环系统来说,稳定性不是主要问题。但是另一方面,在闭环控制系统中,稳定性则始终是一个重要问题,因为闭环系统往往会引起过调误差,从而导致系统进行等幅振荡或变幅振荡。

应当强调指出,当系统的输入量能预先知道,并且不存在任何扰动时,采用开环控制比较合适。只有当存在着无法预计的扰动和(或)系统中元件的参数存在着无法预计的变化时,闭环控

制系统才具有优越性。还应当指出,系统输出功率的大小在某种程度上确定了控制系统的成本、质量和尺寸。闭环控制系统中采用的元件数量比相应的开环控制系统多,因此闭环控制系统的成本和功率通常比较高。为了减小系统所需要的功率,在可能的情况下,应当采用开环控制。将开环控制与闭环控制适当地结合在一起,通常比较经济,并且能够获得满意的综合系统性能。

本书中介绍的大多数控制系统分析和设计,涉及的都是闭环控制系统。但是在一定的情况下(如不存在干扰,或者输出不易测量),开环控制系统可能是希望采用的系统。因此,有必要对采用开环控制系统的优、缺点进行概括。

开环控制系统的主要优点如下:

1. 构造简单,维护容易。
2. 成本比相应的闭环系统低。
3. 不存在稳定性问题。
4. 当输出量难以测量,或者出于成本考虑难以精确地测量输出量时,采用开环控制系统比较合适(例如在洗衣机系统中,要提供一种测量洗衣机输出品质,即衣服的清洁程度的装置,必将成本很高)。

开环控制系统的主要缺点如下:

1. 扰动和标定尺度的变化将引起误差,从而有可能使系统的输出量偏离希望的值。
2. 为了保持必要的输出品质,需要随时对标定尺度进行修正。

1.4 控制系统的设计和校正

本书将讨论控制系统设计和校正的基本问题。校正的目的是改善系统的动态特性,以满足给定的性能指标。在本书中,用来进行控制系统设计和校正的方法是根轨迹法,频率响应法和状态空间法。这种控制系统的设计和校正,将在第6章、第7章、第9章和第10章中进行介绍。基于PID的控制系统设计中的校正方法,将在第8章中进行介绍。

在控制系统的实际设计中,是采用电子、气动或液压校正装置中的哪一种,在一定程度上取决于控制对象的性质。例如,如果被控对象中包含易燃流体,则应当选择气动元件(包括校正装置和执行机构)。以防止产生火花。但是,如果不存在发生火灾的危险,则电子校正装置最常采用(事实上,我们常常把非电气信号转换成电气信号,因为后者传输简单,精确度高,可靠性大,并且容易校正等)。

1.4.1 性能指标

设计控制系统的目的,是为了完成某项特定的工作。对控制系统的要求,通常以性能指标的形式给出。性能指标可以以瞬态响应要求(诸如阶跃响应中的最大过调量和调整时间)和稳态要求(诸如在跟踪斜坡输入信号时的稳态误差)的形式给出。控制系统的性能指标,必须在设计过程开始以前给出。

在通常的设计问题中,性能指标(它与精确度、相对稳定性和响应速度有关)可以用一些精确的数值形式给出。但是在另外一些情况下,可能一部分性能指标以精确的数值形式给出,另外一部分性能指标以定性说明的方式给出。在目前情况下,在设计过程中,可能需要对性能指标进行修改,因为给定的性能指标有可能永远也得不到满足(由于一些要求是矛盾的),或者导致设计出的系统造价很高。

一般来说,性能指标不应当比完成给定的任务所需要的指标更高。在给定的控制系统中,如果稳态工作精确度是最为重要的,就不必对系统瞬态响应的性能指标提出过分严格的要求,因为过高的性能指标需要昂贵的元件予以支持。应当记住,确切地阐明性能指标,是控制系统设计中的一个最重要的组成部分。因为在此基础上,对于给定的任务,才能够设计出最佳的控制系统。

1.4.2 系统的校正

为了使系统获得满意的性能,对系统进行调整时,首先应当调整增益值。但是,在大多数实际情况下,只调整增益并不能使系统的性能得到充分的改变,以满足给定的性能指标。正如通常的情况那样,随着增益值的增大,系统的稳态性能得到改善,但是稳定性却随之变坏,甚至有可能造成系统不稳定。因此,需要对系统进行再设计(通过改变系统结构,或在系统中加进附加的装置元件),以改变系统的总体性能,使系统的性能满足要求。这种再设计,即在系统中加进适当的装置,称为校正。为达到满足性能指标的目的而加进系统中的装置,称为校正装置。校正装置弥补了原系统的性能缺陷。

1.4.3 设计步骤

在控制系统的设计过程中,我们要建立控制系统的数学模型,并且调整校正装置的参数。这时,最花费时间的工作是在每次调整参数后,用分析的方法对系统性能指标进行检查。因此,设计人员应当采用 MATLAB 或其他可以利用的计算机软件包,以避免检查过程中必需的繁重的数值计算工作。

一旦得到了满意的数学模型,设计者就应当着手建造样机,并且进行开环系统试验。如果闭环的绝对稳定性可以得到保证,设计者就可以把回路闭合起来,对该闭环系统的性能进行试验。因为忽略了元件中的负载效应、非线性因素和分布参数等,这些因素在初步设计阶段均未予以考虑,所以样机系统的实际性能可能与理论上的预测结果不尽相同。因此,第一次设计可能无法满足所有的性能要求。设计者必须调整系统参数,并且修改样机,直到系统满足性能指标为止。在这个过程中,人们必须对每一次试探进行分析,并且把分析结果结合进下次试探中。设计者必须检查最终设计出的系统对性能指标的满足情况,同时还要查看系统的可靠性和经济性。

1.5 本书概况

本书共分为 10 章,每一章的内容可以概括如下。

第 1 章介绍了本书的基础知识。

第 2 章讨论控制系统的数学模型,它是用线性微分方程描述的。这一章还导出了微分方程系统的状态空间表达式。利用 MATLAB 进行了数学模型转换,从传递函数转换成状态空间方程,或者进行相反的转变。本书详细地讨论了线性系统。如果任何系统的数学模型是非线性的,那么在应用本书中提供的理论之前,必须先将其线性化。在这一章中,介绍了对非线性数学模型进行线性化的方法。

第 3 章讨论各种各样的机械和电气系统的数学模型,这些系统常常在控制系统中出现。

第 4 章讨论出现在控制系统中的各种流体系统和热力系统。这里的流体系统包括液位系统、气动系统和液压系统、热力系统,诸如温度控制系统,也在这里进行了讨论。控制工程技术人员必须熟悉所有这些在本章中讨论的系统。

第5章介绍以传递函数定义的控制系统的瞬态响应和稳态响应分析,详细地介绍了怎样用MATLAB方法进行瞬态和稳态响应分析。对于用MATLAB方法获得三维图形,也进行了介绍。在本章中还包括了基于劳斯稳定判据的稳定性分析,并且简单讨论了赫尔维茨稳定判据。

第6章讨论控制系统分析和设计的根轨迹法。它是一种根据闭环系统开环极点和零点的位置信息,在某一参数(通常为增益)从零变化到无穷大时,确定所有闭环极点位置的图解方法。这种方法是20世纪50年代,由W. R. 伊凡思研究出来的。近年来,利用MATLAB可以容易而且迅速地产生根轨迹。本章在产生根轨迹图时,既介绍了手工方法,也介绍了采用MATLAB的方法。利用超前校正装置、滞后校正装置和滞后-超前校正装置,本章详细讨论了控制系统设计的内容。

第7章介绍了控制系统分析和设计的频率响应法。这是一种最古老的控制系统分析和设计方法,是20世纪40~50年代由奈奎斯特、伯德、尼柯尔斯和黑曾等人研究出来的。这一章详细地介绍了利用超前校正技术、滞后校正技术和滞后-超前校正技术,进行控制系统设计的频率响应法。在状态空间法得到普及之前,频率响应法是最常采用的分析和设计方法。但是,因为用来设计鲁棒控制系统的 H 无穷大控制已经得到普及,所以频率响应法再次受到人们欢迎。

第8章讨论PID控制器和变形PID控制器,诸如多自由度PID控制器。PID控制器有三个参数,即比例增益、积分增益和微分增益。在工业控制系统中,有半数以上的控制器采用了PID控制器。PID控制器的性能取决于这三个参数的相对大小。确定这三个参数的相对大小,称为PID控制器的调节。

早在1942年,齐格勒和尼柯尔斯就提出了所谓“齐格勒-尼柯尔斯调节法则”。此后,又有许多调节法则被提出来。近年来,PID控制器的产品都有其自身的调节法则。在这一章中,我们将介绍一种计算机最佳化方法,它利用MATLAB确定三个参数,以满足给定的瞬态响应特性。这种方法可以扩展为确定三个参数,以满足任何给定的特性。

第9章介绍了状态空间方程的基本分析。由卡尔曼(Kalman)提出的可控性和可观测性概念,作为现代控制理论中的最重要概念,在本章内进行了充分的讨论。在本章内,还详细地推导出了状态空间方程的解。

第10章讨论了控制系统状态空间设计。这一章首先讨论极点配置问题和状态观测器。在控制工程中,常常希望建立一种意味深长的性能指标,并且试图使其变成最小(或者使其变成最大,这要视具体情况而定)。如果性能指标选择得具有明显的物理意义,那么这种方法对于确定最佳控制变量就相当有用。这一章讨论了二次型最佳调节器问题,这里采用的性能指标是状态变量和控制变量的二次函数的积分。积分限是从 $t = 0$ 到 $t = \infty$ 。最后,作为本章的结束,简单地讨论了鲁棒控制系统。