

# 第1章 绪论

本章主要介绍工程控制理论的基本概念、研究对象和研究内容，以及对控制系统的基本要求，最后对本门课程的特点以及学习方法做简要介绍。

## 1.1 概述

自动控制技术已广泛应用于工业、农业、交通、生命学科、国防装备、航空航天和科学实践的各个领域，极大地提高了整个社会的劳动生产率，改善了人们的劳动条件，推动和促进了现代社会的快速发展。除在宇宙飞船、导弹发射和飞机驾驶等领域中起着重要的作用之外，自动控制技术在现代制造业和工业生产过程中也是不可缺少的组成部分，在制造工业的数控机床、加工中心和工业机器人中，自动控制技术起到了关键作用。此外，在过程控制工业中，对于压力、温度和流量等的控制，自动控制技术也是不可缺少的。

自动控制技术的不断发展促使人们不断地探索自动控制技术的理论和方法。自动控制理论是自动控制技术的基础理论，是专门研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法的一门科学。根据自动控制技术的发展进程，自动控制理论可分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三大部分。

经典控制（Classical Control）理论是在复数域内以积分变换为数学工具研究单输入、单输出线性定常系统的动态历程，分析系统的稳定性、瞬态性能和稳态性能，以及系统性能校正的理论和方法。

现代控制（Modern Control）理论是在时间域内以状态方程为基础研究多输入、多输出系统的动态历程。这里的系统可以是线性的也可以是非线性的，可以是定常的也可以是时变的，可以是连续的也可以是离散的，可以是确定的也可以是随机的。

智能控制（Intelligent Control）理论是自动控制理论发展的高级阶段，是人工智能、控制理论、系统论、信息论、仿生学、神经生理学、进化计算和计算机等多种学科的高度综合与集成，是一门新兴的边缘交叉学科。它主要研究那些用传统方法难以解决的具有不确定性模型、高度非线性及各种功能要求的复杂系统的控制问题。

经典控制理论是自动化控制理论的基础，它在工业、化工、能源等领域得到了广泛的应用，不失为解决工程实际问题的基本理论和方法。

经典控制理论在机械系统和机械工业生产过程中得到广泛的应用，从而形成了一门新型科学——机械工程控制理论（Mechanical Engineering Control Theory）。机械工程控制理论是将经典控制理论应用于机械工程而形成的一门科学，是研究以机械工程技术为对象的经典控制理论问题，这是一门跨控制理论与机械工程领域的边缘科学。

## 1.2 工程控制理论的研究对象和研究内容

工程控制理论实质上是研究工程技术中广义系统的动力学问题。具体地说,它研究的是工程技术中的广义系统在一定的外界条件(即输入或激励,包括外加控制与外加干扰)作用下,从一定的初始状态出发,所经历的由其内部的固有特性(即系统的结构与参数所决定的特性)所决定的整个动态历程;同时研究这一系统(System)、输入(Input)和输出(Output)三者之间的动态关系,如图1-1所示。

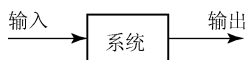


图1-1 工程控制理论研究对象

就系统、输入和输出三者之间的动态关系而言,工程控制理论的研究内容大致可归纳为如下5个方面:

- (1) 当系统已定、输入已知时,求系统的输出,通过输出研究系统本身固有特性问题,即系统分析(System Analysis)问题;
- (2) 当系统已定时,求系统的输入,并且所确定的输入应使输出尽可能符合给定的输出要求,即最优控制(Optimal Control)问题;
- (3) 当输入已知时,确定系统,并且所确定的系统应使输出尽可能符合给定的输出要求,即最优设计(Optimal Design)问题;
- (4) 当输出已知、系统已定时,识别输入或输入中有关的信息,即滤波(Filtering)与预测问题;
- (5) 当输入与输出均已知时,求系统的结构和参数,以建立系统的数学模型,即系统识别或系统辨识(System Identification)问题。

本书主要从经典控制理论的角度来研究问题。学习机械工程控制基础要解决两个问题:一是如何分析给定控制系统的工作原理、稳定性和瞬态性能;二是根据系统性能要求如何设计控制系统。前者是系统分析,后者是系统综合与设计问题。

## 1.3 控制系统

### 1.3.1 系统

系统是一个由相互联系、相互作用的若干部分构成的,并且有一定的目的或运动规律的整体。其实,在自然界、社会和工程中,存在着各种各样的系统,任何一个系统都处于同外界相互联系之中,也都处于运动之中。由于系统具有相应的机制,又同外界相互作用,所以会有相应的行为、响应或输出。外界对系统的作用和系统对外界的作用,分别称为输入和输出。

以实现一定的机械运动,承受一定的机械载荷为目的,由机械元件组成的系统,称为机械系统(Mechanical System)。这是一类广泛存在的系统,如各种工作机械、动力设备、交通工具以及某些工程结构等均是机械系统。数控机床工作台的驱动系统如图1-2所示,控制装置通过发出一定频率和数量的脉冲指令来驱动步进电机,以控制工作台的移动量。机械系统的输入与输出,往往又分别称为激励(Excitation)与响应(Response)。机械系统的激励一般是外界对系统的作用,如作用在系统上的力(即载荷)等,而响应则是系统的变形或位移等。

一个系统的激励，如果是人为地、有意识地加上去的，则往往又称为控制（Control）；而如果是偶然因素产生的且一般无法完全人为控制的，则称为扰动（Disturbance）。

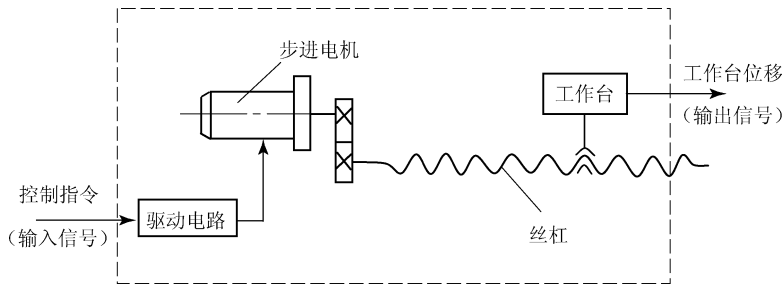


图 1-2 数控机床工作台的驱动系统

### 1.3.2 反馈控制系统

反馈（Feedback）是工程控制理论中一个最基本、最重要的概念。所谓反馈，就是将系统的输出信号通过一定的检测元件变送返回系统的输入端，并和系统的输入信号进行比较的过程。当反馈信号与输入信号同相，反馈信号加强输入信号的作用时，称为正反馈（Positive Feedback）；反之，当反馈信号与输入信号反相，反馈信号抵消输入信号的作用时，称为负反馈（Negative Feedback）。控制系统一般采用负反馈的工作方式，因为只有负反馈才能减小偏差量，使系统最终能稳定工作。系统及其输入、输出之所以有动态关系，就是因为系统本身有着信息的反馈。

人们早就知道利用反馈控制原理来设计和制造机器、仪表或其他工程系统。我国早在北宋时代就发明了具有反馈控制原理的自动调节系统——水运仪象台。通常把具有反馈的系统称为闭环控制系统（Closed-Loop Control System）。例如，在日常生活中经常使用的储水池，其水面自动调节系统就是一个简单的反馈控制系统，如图 1-3（a）所示。浮子测出水面实际高度  $h$ ，根据与期望水面高度  $h_0$  之差，推动杠杆来控制进水阀门进水，一直到实际水面高度  $h$  与期望水面高度  $h_0$  相等时，进水阀门自动关闭。这一系统的信息相互作用和传递关系可用图 1-3（b）表示，其中反馈信息为实际水面高度  $h$ ，通过与期望水面高度  $h_0$  相比较形成一个反馈控制系统。

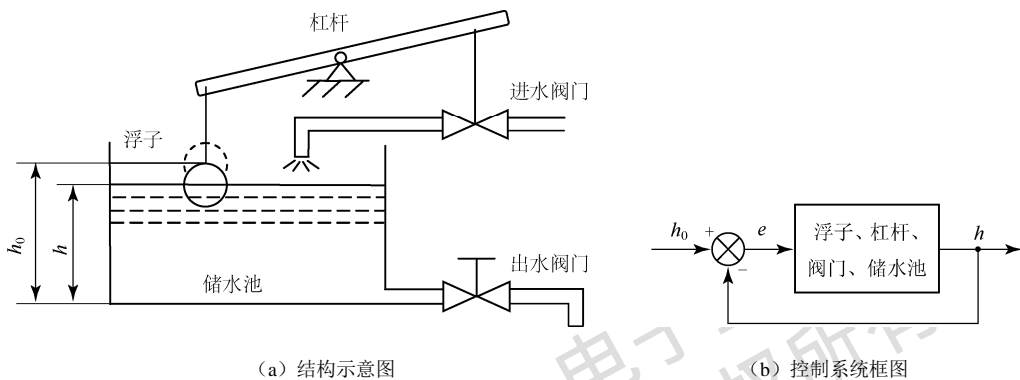


图 1-3 水面自动调节系统

图 1-2 所示的是数控机床工作台伺服驱动系统,从驱动电路到工作台整个传动链中任一环节的误差均会影响工作台的移动精度或定位精度,对工作台的实际移动量不进行检测和反馈,工作台的位移对系统的输入没有控制作用,因此,这种控制方式结构简单,成本低廉。为了提高工作台的定位精度,用检测装置测定工作台的实际位置,然后反馈到输入端,与控制指令进行比较,再根据工作台实际位置与期望位置之间的误差,决定控制动作,以达到消除误差的目的,这便是反馈控制系统,如图 1-4 所示。

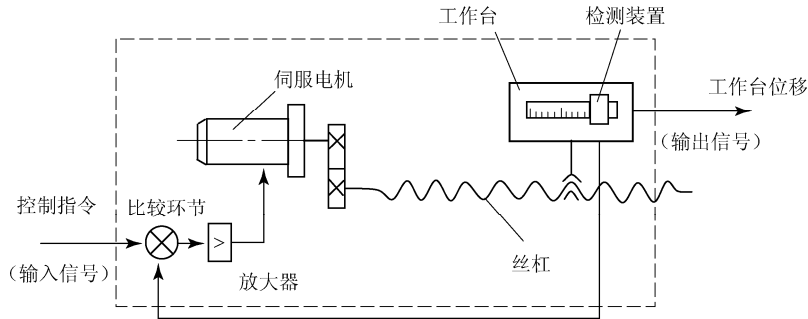


图 1-4 数控机床工作台伺服驱动系统

应当特别指出,人们往往把反馈控制系统局限于自动控制系统,或者仅从表面现象来判定系统是否为反馈控制系统,这就大大限制了控制理论的应用范围。人们往往利用反馈控制系统原理在机械系统或过程中加上一个“人为”的反馈,从而构成一个自动控制系统。例如,上述水面自动调节系统及其他自动控制系统都是人为地外加了反馈环节。但是,在许多机械系统或过程中,往往存在着由于相互耦合作用而构成了非人为的“内在”的反馈,从而形成一个闭环控制系统。例如,机械系统中由作用力与反作用力的相互耦合形成的内在反馈。又如,在机械系统或过程(例如,切削加工过程)中,自激振动的产生是由于存在内在反馈,使能量在系统内部循环,从而促使了振动的产生和持续进行。这样的例子有很多,因而很多机械系统或过程从表面上看是开环系统,但经过分析可以发现它们实际上都是闭环系统。但是,必须注意从动力学的而不是静力学的观点,从系统的而不是孤立的观点分析问题,从而揭示系统或过程的本质。

### 1. 反馈控制系统的基本组成

图 1-5 是一个典型的闭环控制系统(Closed-Loop Control System)方框图。该系统的控制部分由以下几个环节组成。

(1) 给定环节:该环节是给出输入信号的环节,用于确定被控制对象的“目标值”(或称为给定值),给定环节可以用各种形式(电量、非电量、数字量、模拟量等)发出信号。例如,在图 1-3 所示的水面自动调节系统中,期望水面高度  $h_0$  就是给定环节的给定值。

(2) 测量环节:该环节用于测量被控制量,并把被控制量转换为便于传送的另外一个物理量。例如,用电位计将机械转角转换为电压信号,用测速电机将转速转换为电压信号,用光栅测量装置将直线位移转换为数字信号等。图 1-4 中的工作台位置检测装置,图 1-3 中的浮子均为测量环节。

(3) 比较环节:在这一环节中,输入信号  $x_i$  与测量环节测量的被控制量  $x_o$  的反馈量  $x_b$  相比较,并得到一个小功率偏差信号  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon = x_i - x_b$ 。其中,比较包括幅值比较、相位比较和位移比

较等。偏差信号是比较环节的输出。

(4) 放大运算环节：为了实现控制，要对偏差信号进行必要的运算，然后进行功率的放大，以便推动执行环节。常用的放大类型有电流放大、电压放大等。

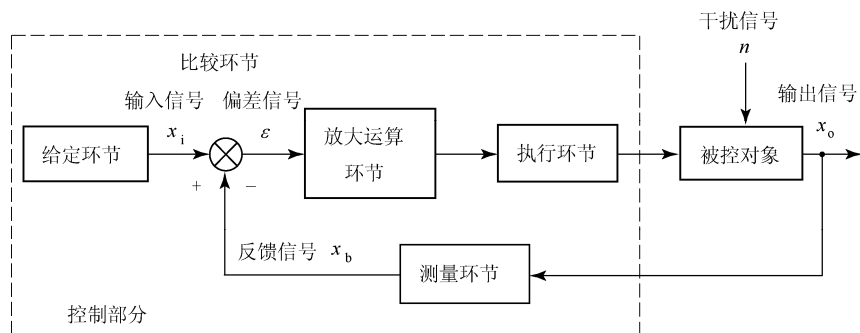


图 1-5 闭环控制系统的基本组成

(5) 执行环节：该环节接收放大环节送来的控制信号，驱动被控制对象按照预期的规律运行。执行环节一般是一个有源的功率放大装置，工作中要进行能量转换。例如，把电能通过直流电机转化为机械能，驱动被控制对象进行机械运动。在图 1-3 中，杠杆就是执行机构。

给定环节、测量环节、比较环节、放大运算环节和执行环节一起组成了这一控制系统的控制部分，目的是对被控制对象实现控制。当然，有的装置可能兼有两个环节的作用。

## 2. 反馈控制系统的信号

下面对反馈控制系统（Feedback Control System）中的信号进行定义。

(1) 输入信号（Input Signal）（又称为激励）：它是控制输出信号变化规律的信号。

(2) 输出信号（Output Signal）（又称为响应）：它的变化规律要加以控制，应保持与输入信号之间有一定的关系。

(3) 反馈信号（Feedback Signal）：从系统输出端测量的信号，通过变换后加到系统的输入端。

(4) 偏差信号（Error Signal）（或称为偏差）：它是输入信号与反馈信号之差。

(5) 误差信号（或称为误差）：它是系统的输出信号的实际值与期望值之差。

(6) 扰动信号（Disturbance Signal）（或称为干扰）：除输入信号之外，对系统的输出信号产生影响的因素都称为扰动信号。

### 1.3.3 控制系统分类

为便于研究和分析控制系统，可对有关控制系统从不同角度进行分类。

#### 1. 按反馈情况分类

##### 1) 开环控制系统

开环控制（Open-loop Control）是最简单的一种控制方式，如图 1-6 所示。它的特点是控制系统的控制量与被控量之间只有前向通道，即只有从输入端到输出端的单方向通道，而无反向通道。系统中只有输入信号对输出信号产生控制作用，输出信号不参与系统的控制，因

而控制作用的传递路径不是闭合的。

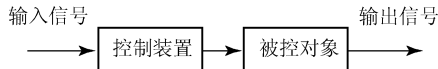


图 1-6 开环控制系统

图 1-7 是电枢控制直流电动机的转速控制系统。被控对象为电动机，控制装置为电位器，功率放大器为电动机提供所需的电枢电压。当调节电位器滑臂的位置，即改变给定电压  $U_g$  时，就改变了功率放大器的输入电压，功率放大器的输出电压即电动机电枢电压  $U_d$  也随之改变，从而最终改变了电动机的转速。

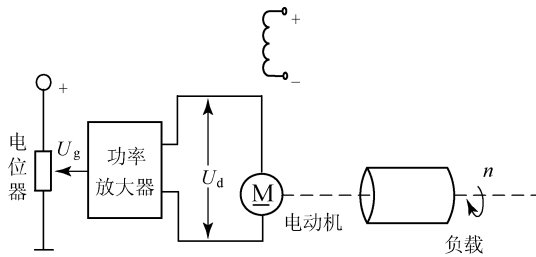


图 1-7 电动机转速控制系统

上面所述的电动机转速控制过程，可用图 1-8 电动机转速控制系统方框图表示。

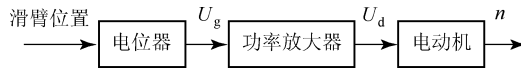


图 1-8 电动机转速控制系统方框图

从图 1-8 中可以很清晰地看到图 1-7 所示的电动机转速控制系统的控制作用仅由系统的输入信号决定，控制信号从输入端沿着箭头方向传递到输出端，控制作用路径不是闭合的，因而该系统采用的是典型的开环控制方式。

图 1-2 所示的数控机床进给系统，其方框图如图 1-9 所示。在此系统中，输入装置、控制装置、驱动装置和工作台四个环节的输入的变化自然会影响到工作台位置即系统的输出。但是，系统的输出并不能反过来影响到任一环节的输入，因为这里没有任何反馈回路。

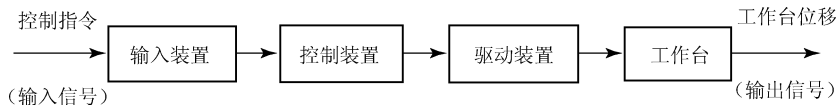


图 1-9 数控机床进给系统方框图

当系统工作在任何内、外扰动的环境下时，系统既简单又能实现一一对应的控制目的，即对应一个已知的输入信号就有一个确定的输出信号。但当该转速控制系统在实际的工作环境中进行转速控制时，各种扰动对系统的影响是随时存在的。当控制系统的给定量维持恒定，系统由于受到电网电压的波动，或负载的变化等扰动量的影响时，就会引起输出信号的变化，而偏离原来的期望输出信号。由于该系统的单向控制性，偏差不能反馈回来影响控制量，所

以系统的抗干扰能力差。当干扰信号引起的偏差过大时，系统不能满足控制精度的要求。另外，组成该开环转速控制（进给）系统的所有元件的性能好坏也都会直接影响系统的控制精度。

开环控制系统结构简单，调整方便，成本低廉，也不会产生振荡，系统总能稳定工作，但抗干扰能力差，在一些对控制精度要求不高、扰动作用不大的场合，仍有较广泛的应用。如日常生活中所使用的普通洗衣机、普通电烤箱、交通信号灯，以及工业上使用的简易数控机床。

## 2) 闭环控制系统

图 1-5 是典型的闭环控制系统的方框图。闭环控制系统不仅有一条从输入端到输出端的前向通道，还有一条从输出端到输入端的反馈通道。参与系统控制的不只是系统的输入信号，还有输出信号，控制作用的传递路径是闭合的，因而称为闭环控制系统。

图 1-10 所示的是采用转速负反馈的直流电动机闭环调速系统。该系统在前面所述的开环调速系统的基础上增加了一个测速回路检测信号  $n$ ，并给出了与  $n$  成正比的负反馈电压  $U_f$ ，与给定电压信号进行比较，以比较后所得到的偏差信号  $e=U_g-U_f$  控制转速  $n$ ，其方框图如图 1-11 所示。该闭环系统对应于一个电位器滑臂的给定位置，即一定的  $U_g$ ；一个确定的测速反馈回路，即对应一个输出转速  $n$  和偏差量  $e$ 。当系统受到干扰时，如负载增大，则  $I \uparrow \rightarrow$  转速  $n \downarrow \rightarrow$  测速反馈回路  $U_f \downarrow \rightarrow$  偏差量  $e \uparrow \rightarrow$  放大器输出  $U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$ ，从而使  $n$  恢复或接近原状态，偏差减小。对于该系统可能受到的多种扰动，如电网电压的波动、负载的变化以及除测量装置以外的系统其他部分的元件参数的变化等可预见的和不可预见的扰动，最终都将导致输出量的变化。通过闭环反馈作用，将根据偏差量的变化来对闭环系统进行调整控制，以使系统的输出量  $n$  基本维持恒定。

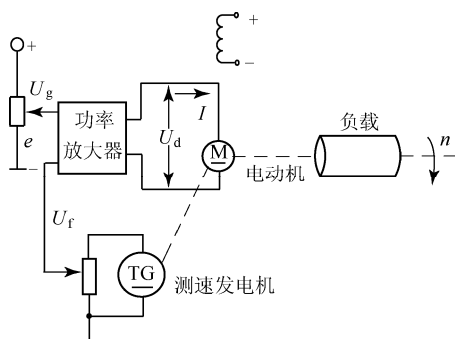


图 1-10 直流电动机闭环调速系统

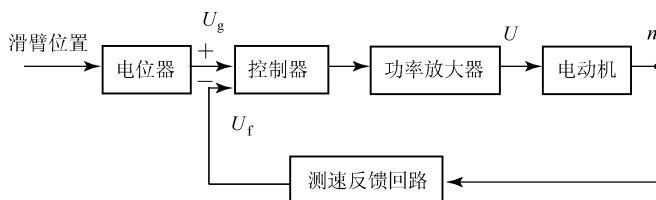


图 1-11 直流电动机闭环调速系统方框图

闭环控制系统对被控对象的控制作用不再只由输入信号来决定，而是由输入信号与反映

实际输出信号进行比较形成的偏差量来决定的。反馈的作用是减小偏差、克服扰动。

从直流电动机闭环调速系统的调节过程中可以看出,闭环控制系统能同时抵御多种扰动的影响,且对系统本身的原件参数不敏感,因而有较高的控制精度和较强的抗干扰能力,从而在对控制精度有较高要求的场合下得到了广泛的应用。

图 1-4 所示的数控机床工作台伺服驱动系统,其方框图如图 1-12 所示,系统的输出信号由测量装置检测后反馈给控制装置。显然,系统的输出信号与控制装置的输入信号有交互作用,因而控制着驱动装置与工作台输入。

就目前得到广泛应用的数控机床的控制来说,在各个进给轴和主轴的伺服控制中,就采用了多路反馈控制对位置信号、速度信号等被控量进行自动控制,以满足数控机床的加工精度要求。但闭环控制系统相对于开环控制系统元件多、成本高、功率大、调试工作量也较大。若闭环控制系统的设计调试不当,则易产生振荡甚至不能正常工作。

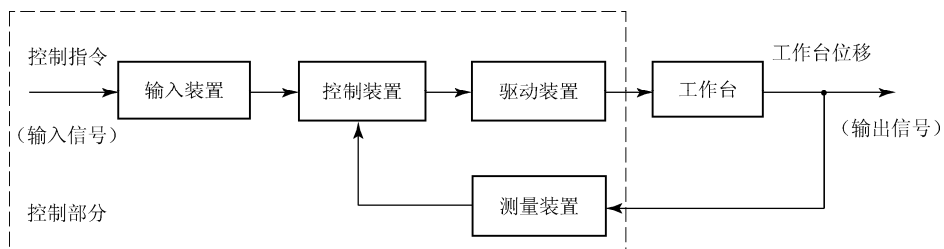


图 1-12 数控机床工作台伺服驱动系统方框图

## 2. 按输出变化规律分类

(1) 自动调节系统: 在外界干扰下,系统的输出仍能保持为常量的系统。如图 1-13 所示的恒温调节系统,室温为其输出。当恒温室受到某种干扰使室温偏离给定值时,热敏感元件测量出室温的变化,启动调温装置进行加热,直到室温回到给定值为止。显然,这类系统是闭环控制系统。

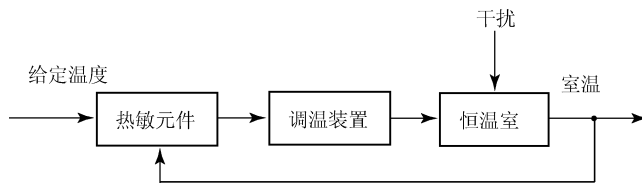


图 1-13 恒温调节系统方框图

(2) 随动系统: 在外界条件作用下,系统的输出能随着输入在广阔的范围按照任意规律变化的系统。例如,炮瞄雷达系统就是随动系统。飞机的位置是输入,高射炮的指向是输出,高射炮的指向随着飞机位置的变动而变动。

(3) 程序控制系统: 在外界条件的作用下,系统的输出按预先的程序产生变化的系统。例如,图 1-12 所示的数控机床工作台伺服驱动系统就是程序控制系统。又如绣花机通过程序控制绣出美丽的图案,也是典型的程序控制系统。

由上可知,一个闭环的自动控制系统主要是由控制部分和被控部分组成。控制部分的功能是接受指令信号和被控部分的反馈信号,并对被控部分发出控制信号。被控部分的功能则



是接受控制信号，并在控制信号的作用下实现被控运动。

闭环自动控制系统的特点是利用输入信号与反馈信号之间的偏差对系统的输出进行控制，使被控制对象按一定的规律运动。显然，反馈的作用是力图减小反馈信号与输入信号之间的偏差，以尽可能获得所希望的输出。只要偏差存在，系统的输出就要受到偏差的校正。偏差越大，校正作用越强；偏差越小，校正作用越弱，直至偏差趋向最小。这就是闭环自动控制系统中的反馈控制作用。

## 1.4 对控制系统的基本要求

由于不同的控制系统具有不同的要求，因此评价一个控制系统的指标是多种多样的。然而，控制技术是研究各种控制系统共同规律的一门技术，所以对控制系统要有一个基本要求，这一基本要求一般可归纳为：稳定性、快速性和准确性。

(1) 稳定性 (Stability): 稳定性是动态过程中的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。一个稳定的系统在偏离平衡状态后，其输出信号应该随着时间而收敛，最后回到初始的平衡状态。稳定性是系统工作的首要条件。

当系统被施加一个新的给定值或受到扰动后，如果经过一段时间的动态过程，在反馈的作用下，通过系统内部的自动调节，被控量随时间收敛并最终达到一个新的平衡状态或恢复至原来的平衡状态，则该系统是稳定的，如图 1-14 所示。如果被控量随时间发散，从而失去平衡，则系统是不稳定的，如图 1-15 所示。

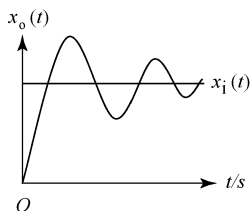


图 1-14 稳定系统的动态过程

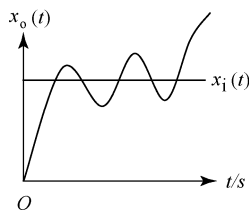


图 1-15 不稳定系统的动态过程

稳定是系统正常运行的前提，不稳定的系统将无法正常工作，甚至会毁坏设备，造成损失。对稳定的系统来说，因工作目的不同，对其在动态过程中振荡的大小即动态平衡性也有不同的要求。

(2) 快速性 (Fast Response): 这是在系统稳定的前提下提出来的。快速性是指当系统的输出信号与给定的输入信号之间产生偏差时，消除这种偏差的时间的长短。

(3) 准确性 (Accuracy): 准确性是指在调整过程结束后输出信号与给定的输入信号之间的偏差，或称为静态精度，这也是衡量系统工作性能的重要指标。例如，数控机床精度越高，加工的精度也越高。

由于被控制对象的具体情况不同，各种系统对稳、快、准的要求各有侧重。例如，随动系统对快速性要求较高，而自动调整系统对系统稳定性的要求较高。

同一个系统的稳、快、准是相互制约的。提高系统响应的快速性，可能会导致系统强烈的振荡；改善系统的稳定性，可能会降低系统响应的快速性和准确性。分析和解决这些矛盾，也是控制理论研究的重要内容。对于机械工程控制系统，系统稳定性问题是研究系统的前提

条件,然后再研究如何提高系统响应的快速性和准确性。

## 1.5 本课程的特点及学习方法

“机械程控制基础”是机械程专业中一门比较抽象、理论性较强的专业基础理论课程。该课程侧重于介绍机械程中的经典控制理论,是介于控制理论与机械程理论之间的边缘学科,起到在控制理论的基础理论和机械程专业课程之间搭设桥梁的作用。

本课程涉及机械程专业的学生在本课程之前所学的全部数学知识,特别是微分方程、积分变换、复变函数;要用到有关力学知识,特别是理论力学、机械振动理论;同时涉及大学物理、电工学等理论课程。因此,在学习本课程之前,应有良好的数学、力学和电学等基础知识,有一定的机械设计和机械制造方面的专业知识,还要有一些其他学科领域的知识。应指出的是,在学习本课程时,不必过分追求数学论证上的严密性,但一定要充分注意到物理概念的明晰性与数学结论的准确性。

在学习本课程的过程中要结合机械程专业的特色,将机械程中的典型实例引入教学和学习过程中,将机械程的机械结构、运动学、动力学、测试与运动控制技术等知识点渗透到教与学的过程中。在系统学习经典控制理论的基础上,要着重于经典控制理论在机械程方面的应用,以机械程中的实际问题为基础展开教学和学习过程,从而提高学生分析实际问题和解决问题的能力。

## 1.6 本章小结

(1) 经典控制理论主要研究系统、输入、输出及三者之间的动态关系。

(2) 对控制系统的基本要求是稳、快、准。工程中要从稳定性、快速性和准确性三个方面进行综合考虑。

(3) 控制系统的基本控制方式有开环控制和闭环控制两种。开环控制系统结构简单,稳定性好,但抗干扰性能差,控制精度低。闭环控制系统具有反馈环节,抗干扰性能强,控制精度高,但闭环系统的稳定性差、成本高。

## 1.7 习题

思考以下问题:

- (1) 工程控制理论的研究对象什么?
- (2) 组成典型闭环控制系统的主要环节有哪些?它们各起什么作用?试举例说明。
- (3) 自动控制系统按照输出变化规律分为哪几类?按照反馈规律分为哪几类?试举例说明。
- (4) 什么是反馈控制?日常生活中有许多闭环系统和开环系统,试举例说明。
- (5) 分析比较开环控制系统与闭环控制系统的特点、优缺点和应用场合的不同之处,试举例说明。
- (6) 对控制系统的基本要求是什么?
- (7) 举例说明什么是稳定系统和不稳定系统?