

第 1 章

绪论

学习要点

了解控制工程的发展史，熟悉控制工程的研究对象与任务，掌握控制系统的基本概念及闭环控制与开环控制原理，掌握控制系统的基本分类方法及对控制系统的基本要求。

1948 年，美国数学家 N. 维纳所著的《控制论》一书出版，标志着控制论的正式建立。控制论与系统论、信息论的发展紧密结合，使控制论的基本概念和方法被应用于各个具体科学领域，其研究的对象从人和机器扩展到环境、生态、社会、军事、经济等许多方面，并将控制论向应用科学方面迅速发展。其分支科学主要有：工程控制论、生物控制论、社会控制论和经济控制论、大系统理论、人工智能等。

机械控制工程是工程控制论在机械工程中的应用。

1.1 引言

1.1.1 控制工程发展史

18 世纪，詹姆斯·瓦特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。1922 年，迈纳斯基研制出船舶操纵自动控制器，并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，奈魁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。1948年，美国数学家 N. 维纳所著的《控制论》一书的出版标志着控制论的正式建立。1954年，我国科学家钱学森发表《工程控制论》，将控制论推广到工程技术领域，奠定了工程控制论这一技术科学的基础。

在此期间，频率响应法的诞生，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，频率响应法和 20 世纪 50 年代初提出并完善的根轨迹法共同组成了古典控制论的核心。利用以上两种方法设计出的系统基本上可以满足要求，但不是某种意义上的最佳系统。从 20 世纪 50 年代末开始，人们将控制系统设计问题的研究重点转移到系统的最佳控制上。

另外，古典控制论主要研究单输入、单输出线性系统，随着现代设备变得越来越复杂，出现了多输入、多输出的复杂系统，这样的系统需要大量的方程来描述，计算机的发展为复杂系统的时域分析提供了可能性。因此，1960 年，利用状态变量基于时域分析的现代控制理论应运而生，它主要分析和研究多输入、多输出、时变、非线性等系统的最优控制问题。随着计算机技术和现代应用数学的发展，现代控制理论在最佳滤波、系统辨识、自适应、自学习、智能控制等方面又都有了重要进展，从而满足了军事、空间技术和工业应用领域对精确度、重量、成本等的严格要求。

1.1.2 机械控制工程的研究对象与任务

1. 机械控制工程的研究对象

控制论研究的对象是一个控制系统，这个系统可以是一些部件的组合，这些部件组合在一起完成一定的任务；同时，这个系统也可以是一个比较抽象的动态现象（如经济学中遇到的现象），所以这个系统可以是物理学、生物学、经济学、社会学等各个方面的系统。机械控制工程研究的对象特指机械工程领域的系统（如数控机床、机器人等）。

2. 机械控制工程的研究任务

工程控制论主要研究控制系统与其输入、输出之间的动态关系。其研究内容大致可归纳为如下五个方面。

① 系统分析：当系统已定、输入已知时，求出系统的输出（响应），并通过输出来研究系统本身的有关问题。

② 最优控制：当系统已定、输出已知时，确定输入使得输出尽可能符合给定的最佳要求。

③ 最优设计：当输入已知、输出已知时，确定系统使其输出尽可能符合给定的最佳要求。

④ 滤波与预测：当系统已定、输出已知时，要识别输入或输入中的有关信息。

⑤ 系统辨识：当输入与输出均已知时，求出系统的结构与参数，即建立系统的数学模型。

机械控制工程以古典控制论为核心，主要研究线性控制系统的分析问题，即上面的第①部分内容。

1.2 控制系统简介

1.2.1 控制系统的分类

1. 按系统的结构分类

(1) 开环控制系统

开环控制系统是指系统的输出量对控制作用没有影响的系统，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输入端与输入量进行比较。所以对应于每一个参考输入量，有一个固定的工作状态与之对应，此时，若有扰动信号出现，系统将无法在规定的状态下工作，所以只有在没有扰动或对系统精度要求不高的情况下才用开环系统。如我们熟悉的自动洗衣机就是一个开环控制系统的实例。在洗衣机中，浸湿、洗涤和漂洗过程是按照事先编排好的时序进行的，洗衣机不必对输出信号（衣服的清洁程度）进行测量。

如图 1.1 所示为开环控制系统的又一实例。这是一种简单的数控机床工作台驱动系统，根据待加工工件的图纸要求，编制成控制指令，输入装置将控制指令转换为控制信号输入给驱动电路，驱动步进电机按加工指令要求，控制工作台的运动，从而加工出图纸所要求的工件。

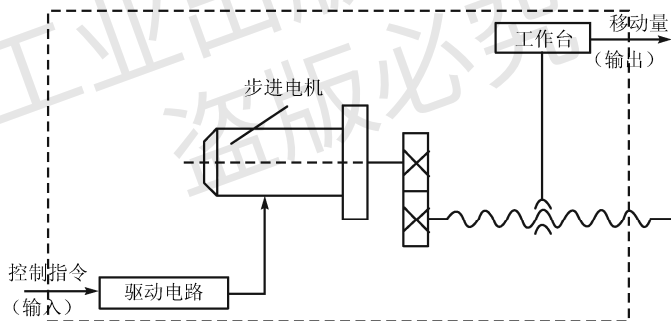


图 1.1 开环控制的数控机床驱动系统

(2) 闭环控制系统

闭环控制系统通常也称反馈控制系统。此种系统是指将输出信号部分或全部通过反馈装置（通常为检测装置）传送到输入端，与输入信号进行比较，将比较的差值送入系统中的控制器，产生控制信号控制系统的输出达到希望的输出值。大部分控制系统都是闭环控制系统。

如图 1.2 所示为闭环控制的数控机床驱动系统，该系统和图 1.1 相比多了比较装置和检测装置，将检测信号反馈到输入端经过比较装置与输入信号进行比较。它的工作原理是检测装置随时测定工作台的实际位置并反馈到输入端的比较器上，将实际位置与输入（控制指令）所给定的位置相比较，若实际位置与给定的希望位置有误差，则将两者之间的差值作为控制信号，驱动伺服电机，使之拖动工作台运动以消除该误差，从而加工出所希望的工件形状。

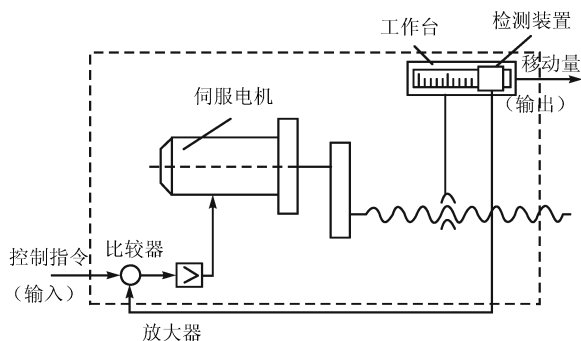


图 1.2 闭环控制的数控机床驱动系统

闭环控制系统不仅仅限于工程系统，在其他非工程领域也存在着闭环控制，如我们人体本身就是一种非常高级的闭环控制系统。人体的体温和血压等都是通过生理反馈的方式保持正常值的，正是人体中的各种反馈作用，使得人类可以在变化的环境中正常地生活。

（3）闭环控制系统与开环控制系统的比较

从开环控制系统和闭环控制系统的实例中可以看出，开环控制系统结构简单、容易维护、相应的成本也较低，因为没有反馈，所以稳定性也不是主要问题。另外，也正是因为没有反馈，使得开环系统无法抑制扰动信号对输出的影响。因此，当输出量难以测量、或测量成本太高、或者没有必要测量（如前面洗衣机的例子），又不存在扰动信号或扰动可以忽略时，才可采用开环控制系统。

闭环控制系统也称反馈控制系统，因输出信号被反馈到输入端，所以使系统的外部干扰和内部参数的变化最终都可以通过输出反馈到输入端，利用差值对系统的输出进行调解，从而抑制干扰对输出的影响。如图 1.3 所示，这是一个汽车客舱温度控制系统工作原理图，要求的温度被转换成电压信号作为系统的输入，客舱的实际温度由传感器检测并转换成电压信号反馈到输入端通过控制器中的比较器与输入进行比较。汽车在行驶的过程中，周围的环境温度和太阳的辐射热量均为干扰信号，假设因干扰信号的作用使得客舱内的温度高于要求的温度，传感器将实际温度转换成电压信号送到控制器与输入比较产生差值。该差值作为控制信号，控制空调器产生冷风，使客舱的温度降到所要求的温度值。反之，若外部环境温度使客舱内的温度低于所要求的温度，同样的过程，会产生一个反向的差值，去控制空调产生热风，使其温度升高到所要求的温度值。若系统内部元器件参数发生了变化，反馈的作用同样可以将温度调节到要求值。由此可见，闭环控制系统可以抑制外部的扰动和内部参数变化对系统输出的影响。

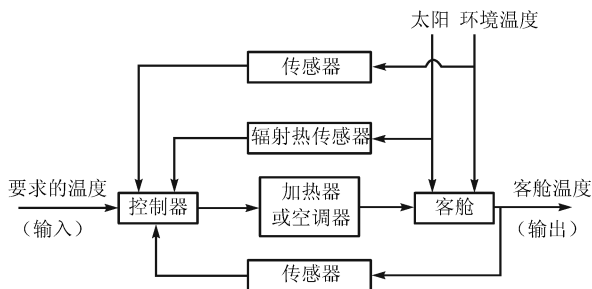


图 1.3 汽车客舱温度控制系统工作原理图

因为闭环控制系统引入了反馈，在调节的过程中，可能引起系统的等幅振荡或发散振荡，所以系统稳定性问题在闭环控制中成为非常重要的问题。另外，与开环系统相比闭环系统控制要复杂一些，所使用的元器件数量要多一些，因此成本要比开环系统高。

2. 按输入量的变化规律分类

(1) 恒值控制系统

恒值控制系统的输入量是一个恒定值，该系统的任务是保证在任何扰动信号的作用下，系统的输出量恒定不变。图 1.3 所示的汽车客舱温度控制系统，就是一个恒值控制系统，它的输入是一个恒定的温度值，其任务是保证在任何环境下输出（客舱温度）恒定不变。

(2) 程序控制系统

程序控制系统的输入量是按已知的规律变化的，将输入量按其变化规律编制成程序，由程序发出控制指令，系统按照控制指令的要求运动。图 1.2 所示的闭环控制的数控机床驱动系统就是一个程序控制系统，它的输入是按已知的图纸要求编制的加工指令，系统按照该指令控制工作台运动，以加工出图纸所要求的工件形状。

(3) 随动系统

随动系统又称伺服系统。该系统输入量的变化规律是未知的，要求输出量能迅速、平稳、准确地复现控制信号的变化规律。

如图 1.4 所示的伺服位置控制系统就是一个随动系统的实例。该系统的任务是控制机械负载的位置与输入的参考位置相协调。系统的工作原理是，用一对电位计作为系统的误差检测装置，它们可以将输入、输出的位置转变成与位置成比例的电信号。图中输入电位计的角位置 r 由输入位置确定，电位计的电位与电刷臂的角位置成比例，输出电位计的角位置 c 由负载输出轴的位置确定，输出位置与输入位置之间的误差就被转换成了电压信号 e_v 。该电压信号被放大倍数为 K_1 的放大器放大，作用在直流伺服电机的电枢电路上，使伺服电机产生力矩拖动负载旋转，控制输出负载的轴位置与输入的参考位置相对应。

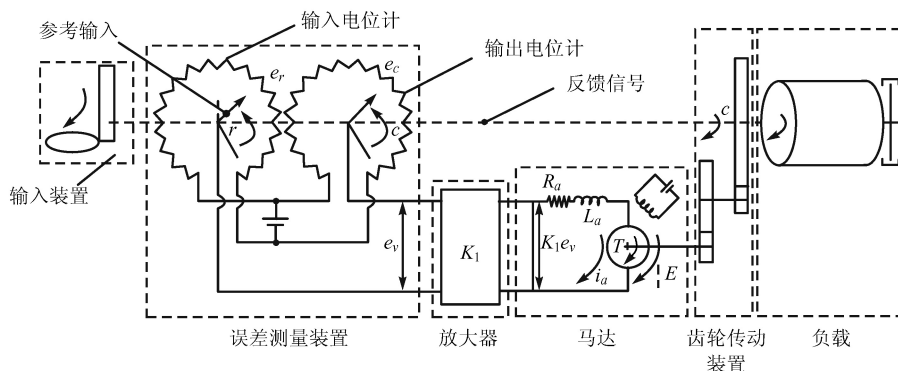


图 1.4 伺服位置控制系统原理图

3. 按系统中传递信号的性质分类

(1) 连续控制系统

连续控制系统是指系统中传递的信号都是模拟信号，控制规律是用硬件组成的控制器实现的。描述此种系统的数学工具是微分方程和拉氏变换。前面所举的实例均为连续控制系统，其

原理框图如图 1.5 所示。

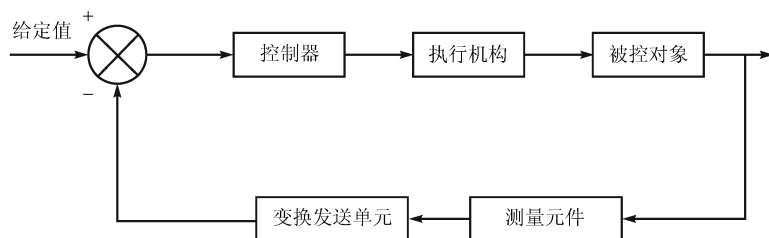


图 1.5 连续控制系统的原理框图

(2) 离散控制系统

离散控制系统是指系统中传递的信号有数字信号，控制规律是用软件实现的，计算机作为系统的控制器。描述此种系统的数学工具是差分方程和 Z 变换。图 1.2 中的控制器如果用计算机实现，输入及反馈信号均被 A/D 转换器转换成数字信号后送入计算机，计算机的输出信号为数字信号，再被 D/A 转换器转换成模拟信号去驱动伺服电机，此时的系统即为离散控制系统。离散控制系统的原理框图如图 1.6 所示。

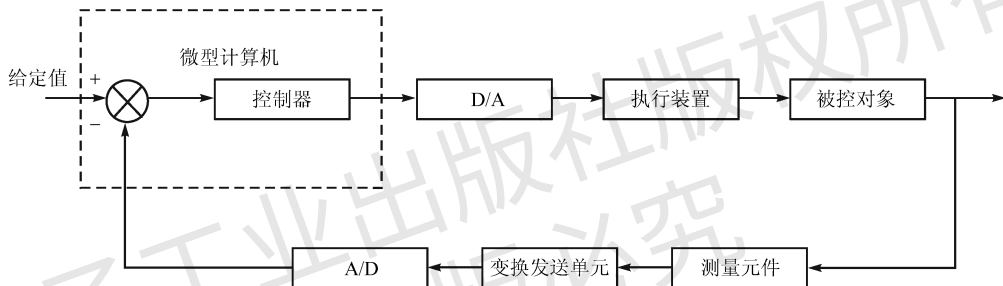


图 1.6 离散控制系统的原理框图

4. 按描述系统的数学模型分类

(1) 线性控制系统

线性控制系统是指可用线性微分方程来描述的系统。上面介绍的系统均为线性系统。

(2) 非线性控制系统

非线性控制系统是指不能用线性微分方程来描述的系统，此种系统包含着变量中具有非线性关系的元器件，实际上真实的物理系统大都是非线性系统，但因非线性系统的数学描述和求解是非常复杂的，所以在工程允许的情况下大部分非线性系统可线性化为线性系统，古典控制论主要研究线性控制系统。

机械控制工程所研究的控制系统主要是线性、连续、闭环控制系统。

1.2.2 闭环控制系统的组成

闭环控制系统的组成原理框图如图 1.7 所示。闭环控制系统主要由给定环节、比较环节、放大运算环节、执行环节、被控对象、检测环节（反馈环节）组成。

① 给定环节：给出输入信号的环节，用来确定被控对象的输出值，图 1.2 所示的数控机床驱动系统中的输入装置就是给定环节。

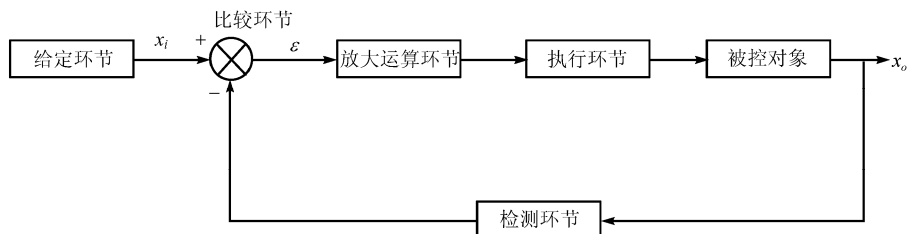


图 1.7 闭环控制系统的组成原理框图

② 比较环节：接收输入和反馈信号并进行比较，输出两者的偏差值。

③ 放大运算环节：将较弱的偏差信号放大，用以驱动执行装置。通常放大运算环节有电气装置，也有液压装置。

④ 执行环节：接收放大装置输出的信号，驱动被控对象按所要求的规律运动。一般该环节有各种电机、液压电动机等。

⑤ 被控对象：完成机械运动的装置，如数控机床中的工作台，以及图 1.4 所示的伺服位置控制系统中的转动负载。

⑥ 检测环节（反馈环节）：检测输出量（或被控制量），并转换成电信号反馈到比较环节，如各种传感器、测速发电机等。

1.2.3 对控制系统的基本要求

评价一个控制系统的指标有很多，但基本要求主要有三点。

1. 系统的稳定性

稳定性是指系统动态过程的振荡倾向及其恢复平衡状态的能力。稳定的系统当输出量偏离平衡状态时，其输出能随时间的增长收敛并回到初始平衡状态。稳定性是保证系统正常工作的前提。

2. 系统的准确性

准确性是指系统的控制精度，一般用稳态误差来衡量，具体指系统稳定后的实际输出与希望输出之间的差值。

3. 系统的快速性

快速性是指输出量和输入量产生偏差时，系统消除这种偏差的快慢程度。快速性表征系统的动态性能。

不同性质的控制系统，对稳定性、准确性和快速性的要求各有侧重。系统的稳定性、准确性、快速性相互制约，应根据实际需求合理选择。



本章小结

(1) 控制论分古典控制理论和现代控制理论，机械控制工程是古典控制理论在机械工程中

的应用。

(2) 机械控制工程主要研究单输入、单输出线性系统中系统与其输入、输出之间的动态关系。

(3) 控制系统可分别按其结构、输入量的变化规律、系统中传递信号的性质以及描述系统的数学模型来分类。

(4) 闭环控制系统主要由给定环节、比较环节、放大运算环节、执行环节、被控对象、检测环节(反馈环节)组成。

(5) 评价一个控制系统的指标主要有系统的稳定性、准确性和快速性。



习题 1

- 1.1 简述机械控制工程的研究对象与任务。
- 1.2 简述控制系统的分类。
- 1.3 对控制系统的基本要求是什么?
- 1.4 试分析开环控制系统与闭环控制系统的优缺点。
- 1.5 试比较连续控制系统与离散控制系统的异同处,并分析各自的特点。
- 1.6 通过各种渠道了解目前我国机械工业领域的自动化程度,并举出两个控制系统实例。