

绪 论

在科学技术日新月异的今天,自动控制在工业、农业、国防和科学技术的现代化中起着重要的作用,除了在宇宙飞船系统、导弹制导系统和机器人系统等领域中,自动控制具有关键的作用之外,它已成为现代机器制造业和工业生产过程中不可缺少的组成部分。例如,在制造工业的数控机床的控制中,在航空和航天工业的自动驾驶仪系统设计中,以及在汽车工业的小汽车和大卡车设计中,自动控制都是必不可少的。此外,在过程控制工业中,对压力、温度、黏度和流量等工业操作过程,自动控制也是不可缺少的。

自动控制理论和实践不断发展,为人们提供了获得动态系统最佳性能的方法,提高了生产率,并且使人们从繁重的体力劳动和大量重复性的手工操作中解放出来。因此,自动控制理论是大多数工程技术人员和科技工作者必备的知识。

自动控制理论主要由经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论组成。

经典控制理论是在复数域中以传递函数概念为基础的理论体系,主要研究单输入、单输出、线性定常系统的分析与设计。

现代控制理论是在时间域中以状态方程概念为基础的理论体系,主要研究具有高性能、高精度的多输入-多输出系统的分析与设计。系统可以是线性的或非线性的、定常的或时变的、连续的或离散的、确定型的或随机型的。

智能控制理论是一类无需人的干预就能够独立驱动智能机器实现其目标的自动控制理论体系,主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,主要研究具有不确定性的模型、高度非线性及复杂任务要求的系统。

经典控制理论是自动控制理论的基础。它在工业和运输领域,包括机械、化工、能源、交通、轻工甚至国防等大多数实际工程中有着重要的地位,很多工程问题还需要用它来解决。经典控制理论仍不失为解决工程问题的基本方法,因此本书将主要介绍经典控制理论,即控制工程基础。

现代化工业生产的主要方向是探求最大效益、最低成本、最高产品质量、最低能耗及最大可靠性等最佳状态,对于机械系统和过程(如生产过程、切削过程、锻压、焊接及热处理过程等)也要求最佳控制。因此,控制理论基础在机械系统以及机械工业生产中得到了广泛的应用,从而形成了一门新型科学“机械工程控制理论”。

机械工程控制理论是研究以机械工程技術为对象的控制理论问题。具体地讲,是研究在这一工程领域中广义系统的动力学问题,也就是研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

学习机械工程控制基础要解决两个问题:一是如何分析某个给定控制系统的工作原理、稳定性和过渡过程品质;二是如何根据实际需要来进行控制系统的设计。前者主要是分析系统,后者是综合与设计。

1.1 机械工程控制理论研究的对象与任务

机械工程控制理论实质上是研究机械工程中系统动态特性的一门科学。

所谓系统,是指同类事物按一定的关系组成的整体。就其物理形态来说,可以是机械、电气、液压及光学等工程上的系统,也有可能为社会上的、生物学上的系统。但不管何种形态,它们的动态行为都可以用微分方程描述。这种系统在外界条件作用下所表现出来的动态历程,说明了系统输入、模型与输出的内在关系。

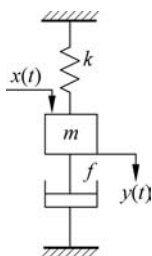


图 1-1 质量-阻尼-弹簧机械系统

下面就以大家熟悉的质量-阻尼-弹簧机械系统为例加以说明,如图 1-1 所示。图中 m 、 k 及 f 分别代表系统的质量、弹簧刚度系数及黏性阻尼系数。如果输入 $x(t)$ 代表系统的外力,而输出 $y(t)$ 代表系统的位移,那么系统的数学模型可由微分方程描述,其关系为

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = x(t)$$

所谓系统的动态性能,主要归为三类:

- (1) 已知系统的 m 、 k 、 f 及输入 $x(t)$, 确定输出 $y(t)$;
- (2) 已知输入 $x(t)$ 及输出 $y(t)$, 确定系统的参数 m 、 k 及 f ;
- (3) 已知系统的参数 m 、 k 及 f , 给定输出 $y(t)$ 时, 确定输入 $x(t)$ 。

因此,就系统及其输入、输出三者之间的动态关系而言,控制工程(即工程控制理论)主要研究并解决如下几个方面的问题:

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

(2) 系统已定,且系统的输出也已给定,要确定系统的输入应使输出尽可能符合给定的最佳要求,即系统的最优控制。

(3) 输入已知,且输出也是给定时,确定系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,即最优设计。

(4) 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,此即系统的识别或系统辨识。

(5) 当系统已定时,以识别输入或输入中的有关信息,此即为系统的预测。

从本质上看,问题(1)是已知系统与输入求输出;问题(2)是已知系统与输出求输入;问题(3)和(4)是已知输入与输出求系统;问题(5)是已知系统求输入与输出。

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1),同时也以适当篇幅来研究其他问题。

1.2 系统的基本概念

1.2.1 自动控制系统工作原理

在各种生产过程和生产设备中,常常需要使其中某些物理量(如温度、压力、位置、速度

等)保持恒定,或者让它们按照一定的规律变化,要满足这种需要,就应该对生产机械或设备进行及时的控制和调整,以抵消外界的扰动和影响。下面介绍自动控制系统如何对这些物理量实现自动控制。

首先研究恒温系统的例子。实现恒温控制有两种方法:人工控制和自动控制。图 1-2 所示为人工控制的恒温箱,恒温箱的温度是通过改变调压器的电压来达到控制温度的目的,箱内温度是由温度计测量的。人工控制恒温的过程可归结如下:

- (1) 观测由测量元件(温度计)测出的恒温箱(被控制元件)的温度。
- (2) 与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向。
- (3) 根据偏差的大小和方向再行比较控制。当恒温箱温度高于所要求的给定温度值时,就调节调压器动触头使电压减小,温度降低;若恒温箱温度低于给定的值,则调节调压器动触头,使电压增加,温度升高。
- (4) 如温度还达不到要求时,要反复进行上面的步骤操作。

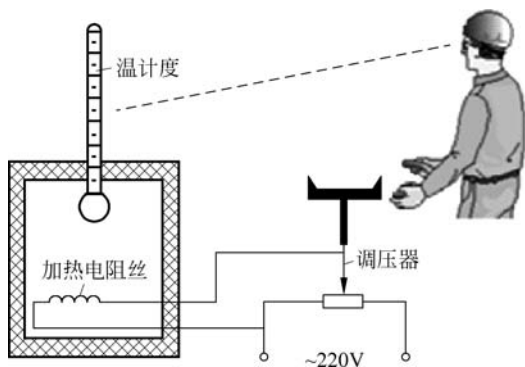


图 1-2 人工控制的恒温箱

以上的人工恒温控制可以用图 1-3 所示的操作框图来分析说明其动作,图 1-3 各部分的意思为:控制对象为恒温箱温度,即实际输出的温度;人通过眼睛观察恒温箱实际输出的温度,与实际要控制的温度进行比较,然后操作调压器,以实现目标温度。

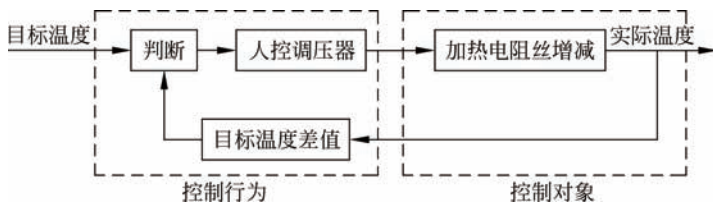


图 1-3 人工控制恒温箱的基本动作分析

因此,人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程,也就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程。

对于这样简单的控制形式,如果能找到一个控制器来代替人的职能,这样人工控制系统就变成自动控制系统了。图 1-4 所示的就是恒温箱自动控制系统。其中,恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制的。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶,把

温度转换成对应的电压信号 u_2 并反馈回去与给定信号 u_1 相比较,所得结果即为温度偏差对应的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。经过电压、功率放大后,用以改变电动机的转速和方向,并通过传动装置带动调压器动触头。当温度偏高时,动触头向着减小电压的方向运动,反之加大电压,直到温度达到给定值为止,即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时,电动机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

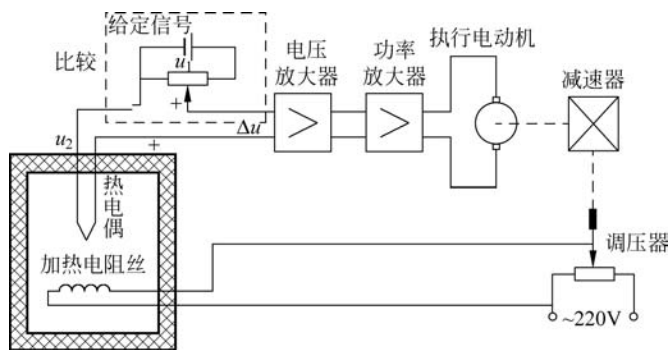


图 1-4 恒温箱自动控制系统

图 1-5 所示为恒温箱温度计自动控制系统职能方块图。“ $\otimes$ ”代表比较元件，“ $\rightarrow$ ”代表作用方向。从图中可以看到反馈控制的基本原理,也可以看到,各职能环节的作用是单向的,每个环节的输出是受输入控制的。总之,实现自动控制的装置可各不相同,但反馈控制原理却是相同的,可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

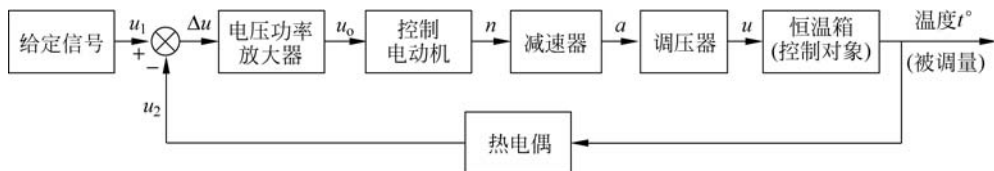


图 1-5 恒温箱温度计自动控制系统职能方块图

图 1-6 所示为发动机的瓦特式速度调节器的基本原理。该系统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。

该系统的工作过程如下: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,使得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,直到达到希望的速度时为止。另外,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小,直至达到希望的速度时为止。

上述例子有一个共同的特点,就是都要检测偏差,并用检测到的偏差去纠正偏差,可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。给定量也叫控制系统的输入量,被控制量称为系统的输出量。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或一部分返回输入端,使之与输入量进行比较,比较的结果叫偏差。因此,基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理,利用反馈控制原

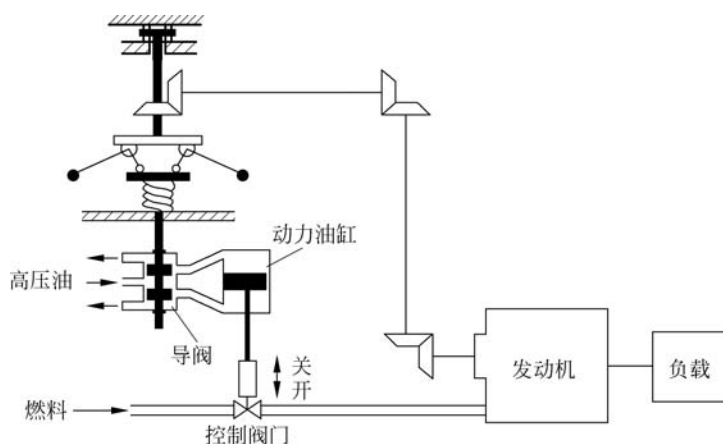


图 1-6 瓦特式速度调节器的基本原理

理组成的系统称为反馈控制系统。实现自动控制的装置可各不相同,但反馈控制的原理却是相同的。可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

1.2.2 系统的分类

工程中的系统,按其物理结构来说,虽属性多种多样,大小与复杂程度也不尽相同,但可以人为地将其分类,以利于研究。

1. 按输入输出的关系分类

工业上用的控制系统,根据有无反馈作用,可分为两类:开环控制系统与闭环控制系统。

(1) 开环控制系统。当构成系统每一环节的输入不受系统的输出影响时,这样的系统称为开环控制系统。如图 1-7 所示的数控机床进给系统采用步进电动机直接驱动时,其系统就属于开环控制系统。这一系统中,系统的输出不对系统的输入有任何影响。

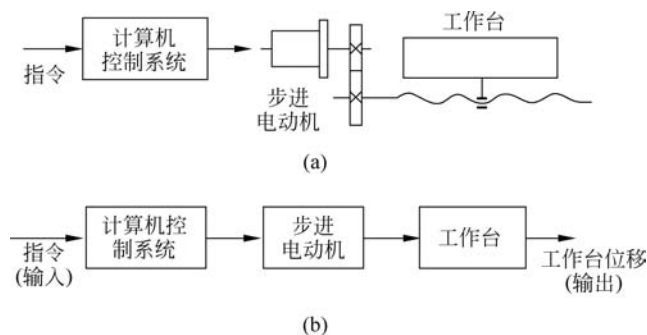


图 1-7 数控机床开环进给系统

(a) 系统原理图; (b) 框图

(2) 闭环控制系统。当构成系统的任一环节的输入受到系统的输出影响时,这样的系

统称为闭环控制系统。如图 1-8 所示的数控机床进给系统采用检测装置控制时,其系统就属于闭环控制系统。

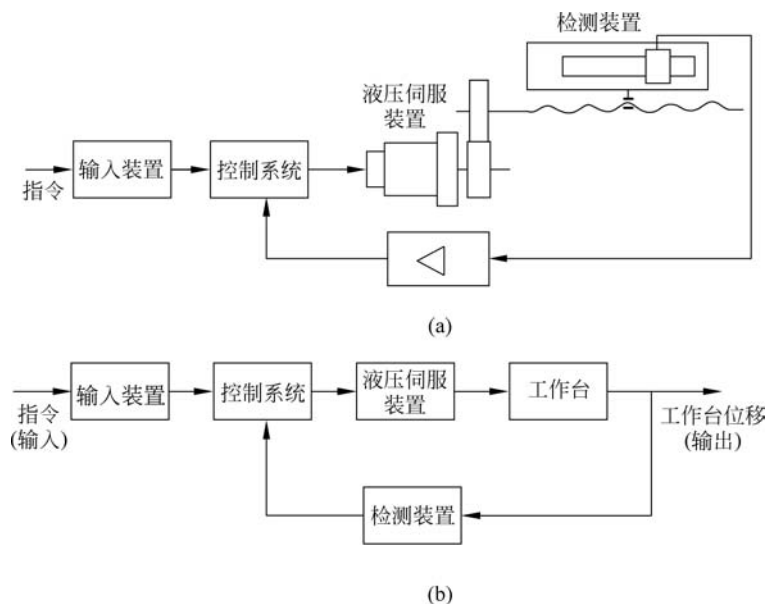


图 1-8 数控机床闭环进给系统

(a) 系统原理图; (b) 框图

这一系统中,由于工作台位移(输出)经检测装置测出实际的位移后与给定的位移指令比较,从而产生控制作用,达到控制工作台位移的目的。因此,如果实际的位移没达到指令要求时,这种控制作用始终作用于工作台,直到工作台达到所要求的位置。图 1-4 和图 1-6 所示的恒温箱自动控制系统和速度控制系统都是闭环控制系统,它们的输出都通过反馈作用到输入端。

开环控制系统的优点是结构简单、调试方便,且造价低廉;缺点是精度较低。

闭环控制系统突出的优点是精度高,不管出现什么干扰,只要被控制量的实际值偏离给定值时,闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。

闭环系统也有它的缺点,这类系统是检测偏差用以纠正偏差,或者说是靠偏差进行控制。在工作过程中系统总会存在偏差,由于元件的惯性(如负载的惯性),很容易引起振荡,使系统不稳定。因此精度和稳定性是闭环系统存在的一对矛盾。

从稳定性的角度看,开环系统比较容易建造,结构也比较简单,因为开环系统一般不存在稳定性问题。

2. 按输出的变化规律分类

(1) 恒值系统。在外界作用下,系统的输出能基本保持为常值的系统称为恒值系统,如恒温、恒压及恒速系统。

(2) 随动系统。系统的输出能相应于输入在广阔范围里按任意规律变化的系统称为随动系统,如仿形车床的液压仿形刀架,其中仿形靠模为给定的系统输入,刀架仿形运动为系

统输出。

(3) 程序控制系统。在外界作用下,系统的输出按预定程序变化的系统称为程序控制系统,如前面介绍过的数控机床的进给系统,都属于程序控制系统。

3. 连续系统与采样系统

如果系统每个环节之间所传递的信息都是时间的连续信号,这样的系统称为连续系统。如果在系统中,计算机参与工作时,环节之间所传递的信息除了有连续信号外,还有离散信号,这样的系统称为采样系统或离散系统。

4. 定常系统与时变系统

描述系统微分方程的系数不随时间而变化的系统称为定常系统,其系数随时间变化的系统称为时变系统。

1.2.3 反馈控制系统的基本组成

图 1-9 所示是一个典型的反馈控制系统,该图表示了这些元件在系统中的位置及其相互间的关系。由图可以看出,作为一个典型的反馈控制系统应该包括反馈元件、给定元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等。

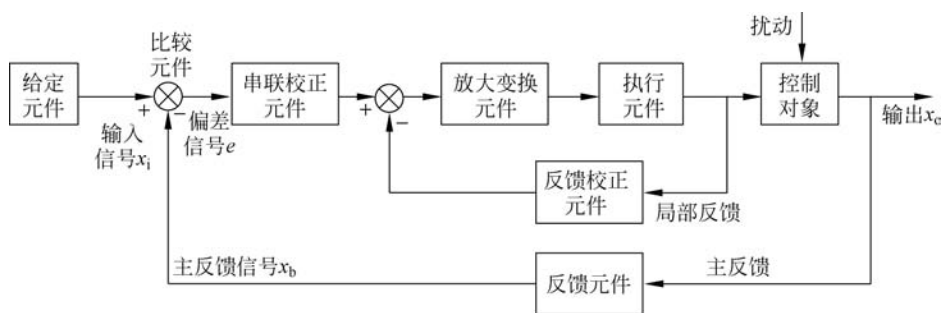


图 1-9 典型的反馈控制系统框图

(1) 给定元件：主要用于产生给定信号或输入信号。例如，恒温系统的给定电位计。

(2) 反馈元件：它测量被控量或输出量，产生主反馈信号，该信号与输出量存在着确定的函数关系（通常为比例关系）。例如，数控机床系统用于位移测速的位移传感器。

(3) 比较元件：用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。可以通过电路实现，它往往不是一个专门的物理元件，有时也叫比较环节；而自整角机、旋转变压器、机械式差动装置都是物理的比较元件。

(4) 放大变换元件：对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件，例如功率伺服放大器、电液伺服阀等。

(5) 执行元件：直接对控制对象进行操作的元件，例如执行电动机、液压马达等。

(6) 控制对象：控制系统所要操纵的对象，它的输出量即为系统的控制量，例如机床工作台等。

(7) 校正元件:或称校正装置,用以提高控制系统动态性能,有反馈校正和串联校正等形式。

1.2.4 名词术语

(1) 输入信号(又称输入量、控制量或给定量):控制输出量变化规律的信号。而输入量则又广义地泛指输入控制系统中的信号,如扰动信号,也包括给定信号。

(2) 输出信号(又称输出量、被控制量或被调整量):它的变化规律是要加以控制的,应保持与输入信号之间有一定的函数关系。

(3) 反馈信号(或称反馈):从系统(或元件)输出端取出信号,经过变换后加到系统(或元件)输入端,这就是反馈信号。当它与输入信号符号相同,即反馈结果有利于加强输入信号的作用时叫正反馈。反之,符号相反抵消输入信号作用时叫负反馈。直接取自系统最终输出端的反馈叫主反馈。主反馈一定是负反馈,否则偏差越来越大,直至使系统失去控制。除主反馈外,有的系统还有局部反馈,这主要是用来对系统进行校正、补偿或线性化而加入的。

(4) 偏差信号(或称偏差):控制信号与主反馈信号之差。有时也称为作用误差。

(5) 误差信号(或称误差):系统输出量的实际值与希望值之差。在很多情况下,希望值就是系统的输入量。

这里要注意,误差和偏差不是同一概念。只有在全反馈系统中,误差才等于偏差。

(6) 扰动信号(又称扰动或干扰):除控制信号以外,对系统输出量产生影响的因素。如果扰动产生在系统内部,称为内扰;产生在系统外部,则称外扰。外扰也是系统的一种输入量。

1.3 对控制系统的基本要求

自动控制系统用于不同的目的,要求也往往不一样。但自动控制技术是研究各类控制系统共同规律的一门技术,对控制系统有一个共同的要求,一般可归结为稳定性、准确性、快速性三个方面。

(1) 稳定性:由于系统存在着惯性,当系统的各个参数匹配不妥时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的能力。稳定性的要求是系统工作的首要条件。

(2) 准确性:是指在调整过程结束后输出量与给定量之间的偏差,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,则加工精度也越高。而一般恒温 and 恒速系统的精度都可在给定值的 $\pm 1\%$ 以内。

(3) 快速性:是在系统稳定的前提下提出的。快速性是指当系统输出量与给定量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快速程度。

综上所述,对控制系统的基本要求是在稳定的前提下,系统要求稳、准、快。

由于受控对象的具体情况不同,各种系统对稳、准、快的要求各有侧重,例如,随动系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定性提出较严格的要求。

同一系统稳、准、快是相互制约的。快速性好,可能会有强烈振荡;改善稳定性,控制过程可能又过于迟缓,精度也可能变坏。分析和解决这些矛盾,也是本学科讨论的重要内容。对于机械动力学系统的要求,首要也是稳定性,因为过大的振荡将会使部件过载而损坏,此外还要降低噪声、增加刚度等,这些都是控制理论研究的主要问题。

1.4 机械工程中的控制问题

机械控制工程是研究控制论在机械工程中应用的科学。它是一门技术科学,也是一门跨控制论与机械工程领域的边缘学科。随着工业生产和科学技术的不断发展,机械工程控制论这门新兴学科越来越为人们所重视。原因是它不仅满足了今天自动化技术高度发展的需要,同时也与信息科学和系统科学紧密相关,更重要的是它提供了辩证的系统分析方法,即不但从局部,而且从整体上认识和分析机械系统,以满足科技发展和工业生产的实际需要。

随着信息化技术的普及,越来越多的事物与信息化技术相结合,引入控制工程的机械学科将抽象、依靠经验的控制概念以具体、可操作的方式展现出来。比如时域分析中二阶振荡环节的时域响应涉及振动频率、系统激励、系统响应、响应幅值的概念,若以汽车的振动现象作为例子,汽车的行走是系统激励,汽车的上下振动就是系统响应,振动的大小是振动幅值。汽车的质量、弹簧和阻尼的不同,其汽车的振动频率和幅值也不同。

无论是经典控制理论,还是现代控制理论,它们都起源于机械工程。控制理论是一门极其重要、极其有用的科学理论,将控制理论同机械工程结合起来,运用控制理论和方法,结合机械工程实际,来考察、提出、分析和解决机械工程中的问题。机械制造是制造业的基础与核心,机械制造技术发展的一个重要方向是越来越广泛而深刻地引入控制理论。控制理论在机械制造领域中主要应用在以下四个方面。

1. 机械制造过程自动化

现代生产的发展向机械制造过程自动化和智能化提出了越来越多、越来越高的要求。现代生产所采用的生产设备与控制系统越来越复杂,所要求的技术经济指标越来越高,这必然导致机械制造过程与自动化、最优化、可靠性的不断相互结合,从而使得机械制造过程的自动化技术从一般的自动机床、自动生产线发展到数控机床、多微机控制设备、柔性制造单元、柔性制造系统、无人化车间乃至设计、制造、管理一体化的计算机集成制造系统。

2. 加工过程研究

现代生产一方面是生产效率越来越高,另一方面是加工质量特别是加工精度要求越来越高。高水平的加工技术以及高质量的机械生产已经成为企业发展过程中追逐的重要目标,高速切削、强力切削技术日益获得广泛应用,因此,加工过程中的“动态效应”必须被高度重视,其过程作为一个动态控制系统应加以研究。

3. 产品与设备的设计

控制理论的发展早已摆脱经验设计、试凑设计、类比设计的束缚,优化设计、并行设计、虚拟设计、人工智能专家系统等新的设计方法不断出现。要在充分考虑产品与设备的动态

特性的条件下,密切结合其制造过程,探索建立它们的数学模型,采用计算机仿真优化设计。

4. 动态过程和参数的测试

以控制理论为基础、以信息技术为手段的动态测试技术发展十分迅速。以控制技术与测试技术紧密结合的测控系统在动态误差与动态机械参数的测试与控制方面获得了长足进展。现代测试和故障诊断技术从基本概念、测试方法、测试手段到数据处理方法等无不同控制理论息息相关。

1.5 本课程的特点及学习方法

本课程是机械类专业的技术基础课,是一门比较抽象、理论性较强的课程,它起着为自动控制的基础理论与专业课程之间搭设桥梁的作用。

没有机械工程控制理论作为基础,机械类专业的一些后续课,如测试技术、液压与气压传动等的一些要求,将无法实现。

本课程用到了本专业所学的全部数学知识,甚至在某些方面还需加深。因此掌握所学的数学知识是十分必要的。但是,不一定要过分地追求数学论证中的严密性。由于本课仅是专业基础课,在结合专业知识时,不应该忽略本课程的系统性与理论性。

本课程主要是研究数学模型的建立方法,并在此基础上分析系统的动态特性。因此,在学习本课程时,注意力要放在基础理论上,而不要过分追求系统的原理与实际工作的情况。

为了对基础理论有较好的理解,必须重视习题与实验环节,以加深理论的理解与深化,培养正确的思维能力与实际解决问题的能力。

习 题 1

1. 单选题

- (1) 经典控制理论是研究系统的()特性的科学。
A. 动态 B. 时变 C. 非线性 D. 多输入多输出
- (2) 下列控制系统中,属于闭环控制系统的有()。
A. 调光台灯 B. 冰箱
C. 自动电子报时钟 D. 普通车床
- (3) 系统的输出信号对控制系统的输入()影响。
A. 开环有 B. 闭环有
C. 开环闭环都没有 D. 开环闭环都有
- (4) 如果系统不稳定,则系统()。
A. 不能工作 B. 可以工作,但稳态误差很大
C. 可以工作,但过渡过程时间很长 D. 可以正常工作
- (5) 自动控制系统的反馈环节中必须具有()。
A. 给定元件 B. 检测元件 C. 放大元件 D. 执行元件