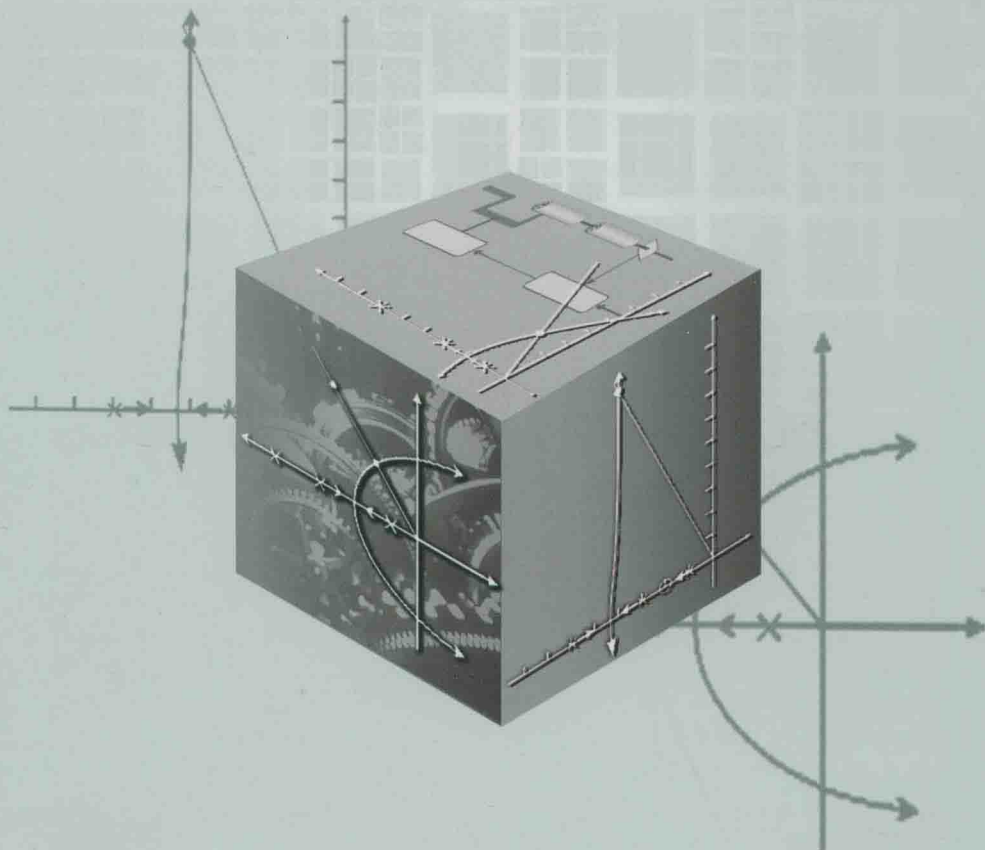




普通高等教育机械类专业“十三五”规划教材

# 机械控制工程基础

王朝晖 编著

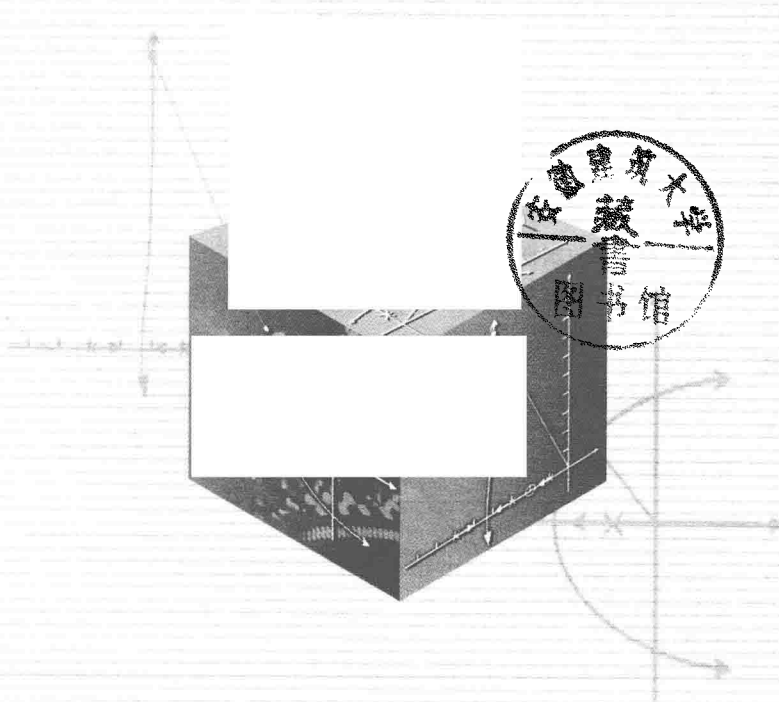


西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

通高等教育机械类专业“十三五”规划教材

# 机械控制工程基础

王朝晖 编著



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

## 内容简介

本书介绍经典控制理论应用于机械传动系统中的基本原理和方法。内容包括机械控制系统的基本概念;典型机电系统在时域和频域中的数学模型;系统的瞬态响应性能指标分析;系统的稳定性分析;系统稳态误差的概念与计算方法;根轨迹曲线的概念;应用根轨迹法 PID 补偿校正系统;系统频率响应分析技术等。本书在引入数学理论时辅以大量的计算实例讲解,学生在学完课程内容后可以按图索骥快速上手解决实际问题。

本书可作为高等院校机械类、仪器仪表类等专业的本科生研究生专业课程教材使用,也可供相关专业技术人员在解决实际工程问题时参考查阅。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

机械控制工程基础/王朝晖编著. —西安:西安  
交通大学出版社, 2018. 6

ISBN 978 - 7 - 5693 - 0700 - 9

I. ①机… II. ①王… III. ①机械工程-控制系统-  
高等学校-教材 IV. ①TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 139894 号

---

书 名 机械控制工程基础  
编 著 王朝晖  
责任编辑 郭鹏飞

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82668280  
印 刷 陕西金德佳印务有限公司

---

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 13.75 字数 332 千字  
版次印次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978 - 7 - 5693 - 0700 - 9  
定 价 39.00 元

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665397

读者信箱:21645470@qq.com

版权所有 侵权必究

# 前 言

自动控制理论伴随着信息技术的迅猛发展,已经成为现代工业技术中不可或缺的基本理论。面向机械工程应用的自动控制理论有其自身的特点,相关的概念和应用技术方法,一般统称为“机械控制工程”或“机械工程控制理论”。1970年末这门课程被引入到机械类本科生专业教学计划中,作为一门技术基础课得到了越来越多的重视,经过几十年的课程建设,现在已经成为很多工科院校机械类本科生和研究生的必修课。

西安交通大学是国内最早开设这门课程的高校。当年阳含和教授(1920—1988)在学习了钱学森先生的《工程控制论》后,认为工程控制论的知识内容对机械类学生非常重要,高校应该开设这门课。1978年起他在西安,武汉和北京为国内部分高校的研究生和青年教师开设“机械控制工程”讲座。后来几位青年教师将听课笔记整理成讲义,进而修订编写成为教材并出版。机械控制工程的相关理论非常丰富,一直是西安交大机械电子工程学科的教学科研重点研究方向。课程内容曾经被划分为机械控制工程基础Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ三部分。第Ⅰ部分就是本教材重点讲授的经典控制理论内容,面向本科生开设;第Ⅱ部分内容重点是现代控制理论;第Ⅲ部分是最新的智能控制理论。后两部分内容主要面向研究生讲授。

随着科学技术的不断进步,自动控制原理的应用技术也发生了很大的变化。例如在用经典控制理论分析设计系统时,频率响应法在过去一直是主流方法,因为这种方法具有手工快捷制图的优势。随着现当代信息产业革命的兴起,电子计算机的性能得以大幅提高。现在借助计算机程序很容易画出闭环控制系统的根轨迹曲线。利用根轨迹法和计算机仿真来分析设计闭环控制系统参数,其直观方便快捷的优势就显现出来了。作为高等院校工科专业开设的技术基础专业课程,教学内容必须要与当代科技发展水平相适应。这也是重新编写出版本教材的初衷。

本书综合了国内外相关教材和专著编写而成。主要内容包含经典控制理论的基本原理以及在机械系统中的应用方法：机械控制系统的基本概念；典型机电系统在时域和频域中的数学模型；系统的瞬态响应性能指标分析；系统的稳定性分析；系统稳态误差的概念与计算方法；根轨迹曲线的概念；应用根轨迹法 PID 补偿校正系统；系统频率响应分析技术等。本书内容安排上注重学以致用，在引入数学理论的同时，给出了大量的计算实例讲解。这样本书读者在面对实际工程问题时，可以按图索骥快速找出相应的解决方案。

在本书编写过程中，得到了教研室李小虎，董霞，要义勇等老师的指点。研究生王敬，程啸鹏，任凯，蔺旋，刘玥，李园等帮助完成了部分算例和课后练习题的收集整理工作，在此一并表示感谢。个人能力所限，书中难免有错讹疏漏。藉此就教于方家，欢迎批评指正。

西安交通大学 王朝晖

2018 年 7 月

# 目 录

第 1 章 绪 论	( 1 )
1.1 自动控制理论简述	( 1 )
1.2 机械控制工程	( 2 )
1.3 机械控制系统基本概念与定义	( 4 )
1.4 课程性质与学习要求	( 8 )
复习思考题	( 9 )
第 2 章 数学建模	( 10 )
2.1 简述	( 10 )
2.2 Laplace 积分变换	( 11 )
2.3 线性时不变系统	( 17 )
2.4 传递函数	( 19 )
2.5 典型机电系统建模	( 21 )
2.6 系统方框图	( 31 )
课后练习题	( 41 )
第 3 章 时域分析	( 45 )
3.1 时间响应与系统极点和零点	( 45 )
3.2 一阶系统的时间响应	( 47 )
3.3 二阶系统的时间响应	( 50 )
3.4 二阶系统时间响应性能指标	( 55 )
3.5 高阶系统时间响应	( 62 )
课后练习题	( 68 )
第 4 章 系统的稳定性	( 70 )
4.1 系统稳定性概念	( 70 )
4.2 Routh 稳定性判据	( 72 )
4.3 Hurwitz 稳定性判据	( 78 )

课后练习题·····	( 79 )
第 5 章 稳态误差·····	( 81 )
课后练习题·····	( 94 )
第 6 章 根轨迹曲线·····	( 98 )
6.1 根轨迹法基本原理·····	( 98 )
6.2 根轨迹曲线·····	(102)
6.3 系统根轨迹曲线应用·····	(113)
课后练习题·····	(117)
第 7 章 根轨迹法 PID 补偿校正系统·····	(120)
7.1 根轨迹法补偿校正系统原理·····	(120)
7.2 串联补偿改善系统稳态误差·····	(122)
7.3 串联补偿改善系统瞬态响应·····	(128)
7.4 串联补偿改善系统稳态误差和瞬态响应·····	(138)
7.5 反馈补偿·····	(147)
课后练习题·····	(154)
第 8 章 频率响应分析技术·····	(157)
8.1 系统频率响应的概念·····	(157)
8.2 Bode 曲线·····	(161)
8.3 Nyquist 曲线与系统稳定性判据·····	(172)
8.4 系统的相对稳定性·····	(186)
8.5 闭环系统频率响应性能指标·····	(191)
8.6 通过系统频率响应实验曲线估算系统传递函数·····	(198)
课后练习题·····	(202)
附录 Laplace 积分变换·····	(206)

## 1.1 自动控制理论简述

自动控制系统是现代工业最为显著的特征之一。文明肇始,人类就有了自动化的梦想。亚里士多德(Aristotle)在其有关“政治学”的论著中就提出:“……如果所有工具,都能够完成自己的工作,服从并预见到人的意志,……倘若织梭能自动织布,琴拨能自动拨弦,那么工匠就不需要帮手了,主人也就不需要奴隶了。”亚里士多德明白无误地说出了我们研究自动化的目的:令人类获得自由、解放和高品质的生活。

自动控制这一现象本身就存在于自然之中。我们身体内就有很多个自动控制系统。人手去抓取桌子上的杯子时,眼睛会一直盯着并将手与杯子之间的距离反馈给大脑,大脑实时计算判断,令手臂调节其运动方向和速度以精确移动到水杯的位置。再比如遇到突发危险状况时,身体里的肾上腺素作用于人的心血管系统和交感神经相关系统,促使心率加快,血管舒张,瞳孔放大,提高身体的警觉性。

在古代就有了自动控制的实例,如古希腊人克特西比乌斯(Ktesibios)设计的水钟是采用浮子来实现水箱液位的恒定,类似于今天抽水马桶的液位控制原理。但真正学术意义上的自动控制理论的提出与发展是第一次工业革命前后的产物。

17世纪随着大航海时代的来临,人们对精密计时技术有了更高的需求。为此惠更斯(Christiaan Huyghens)和胡克(Robert Hooke)在研究钟摆振荡的原理时,已经涉及到了动力学方程、控制系统的数学模型、线性化处理、系统过渡状态、稳定性等控制理论的基本概念。这些研究成果随后被用于风车速度的调节上。其主要机构是基于一个绕风车轴旋转的小球系统。在离心力作用下,小球远离轴的位移正比于风车的旋转速度。当旋转速度加快时,球会远离轴,通过比例机构作用于风车上使其速度慢下来。英国人瓦特(James Watt)据此原理发明了蒸汽机,成为工业革命中的标志性事件。在瓦特的机械装置中,当小球旋转速度增加,一个或几个阀门就会张开令蒸汽逸出,锅炉里的压力降低,速度下降。这样就尽可能地保持速度恒定。英国天文学家艾里(George Biddell Airy)在数学上分析了瓦特发明的调节系统原理。1868年麦克斯韦尔(James Clerk Maxwell)第一次在其著作中给出明确的数学描述。他分析了蒸汽机运行中的一些不稳定的行为,提到了一些控制原理。随后控制理论思想不断丰富。

进入20世纪后,自动控制和设计分析技术取得了重要的进步,应用领域不断扩展。如电话系统中的扩音器,电厂中的分布式系统,航空器的稳定化,造纸业的电子机械,化学、石



油和钢铁工业中的应用等等。国际上的学术机构如美国 ASME 和英国的 IEE 也开始关注自动控制理论的研究。1948 年,维纳(Norbert Wiener)出版了标志性专著《控制论,或动物和机器的控制和通信》(Cybernetics, or control and communication in the animal and machine)。从此自动控制理论与技术日益精进,最终成为了一门重要的学科。

当时有两个新兴的全然不同的控制理论思想或方法:第一种是基于时间域微分方程的分析方法,第二种是基于系统的频率特性,即“输入”与“输出”的幅值和相位分析等概念与方法。在第二次世界大战以及战后很长一段时间,飞机跟踪和弹道式导弹控制和其他防空装备的控制机理得到了充分的研究,极大地促进了频域设计方法的发展。1960 年代以后,这些控制理论和方法被定义为“经典”控制理论的一部分。一般的工业系统,如机床和轧钢机中常用的调速系统、发电机的自动电压调节系统以及冶炼炉的温度自动控制系统等等,这些系统均被当作单输入—单输出的线性定常系统来处理。解决上述问题时,采用频率法、根轨迹法、Nyquist 稳定判据、对数频率特性综合等方法比较方便。这些方法均属于经典控制论范畴。经典控制理论是与生产过程的局部自动化相适应的,它具有明显的依靠手工进行分析和综合的特点。这与 1940—1950 年代工业生产发展的状况以及电子计算机技术的发展水平尚处于初期阶段密切相关。

经典控制理论与系统其精确度不足以描述复杂的真实世界。事实上,我们所面对的“真实系统”通常是非线性和非确定性的,因为他们会被“噪声”影响。这就促使人们在此领域做出新的努力。20 世纪 50 年代中期,由于空天技术发展的需要,提出了诸如把卫星用最少燃料或最短时间准确地发射到预定空间轨道一类的控制问题。这类控制问题十分复杂,采用经典控制理论难以解决。加之计算机技术日益成熟,现代控制理论应运而生。1960 年代初,一套以状态空间法、极大值原理、动态规划、卡尔曼—布什滤波为基础的分析 and 设计控制系统的新的原理和方法得以确立,标志着现代控制理论基本形成。在现代控制理论的推动下,人类在探索自然的进程中迈出了很大的一步。如前苏联相继发射成功洲际弹道导弹和第一颗人造地球卫星,美国的阿波罗 11 号把宇航员阿姆斯特朗送上月球,实现了人类太空探索的重大跨越。

从 1990 年代至今,随着各个工程技术领域的飞速发展和相互之间的交叉融合,现代控制理论又在最优控制、自适应控制、智能控制、最优滤波、系统辨识等方向深入发展。特别是自动控制理论与人工智能二者的天然联系,诞生了模糊控制、神经网络、H 无穷鲁棒控制、深度学习等新的控制理论和技术。也有人将这些学术成就统称为第三代控制理论——智能控制理论。

时至今日,自动控制系统在现代社会中已经无处不在。如空天技术中的火箭发射、卫星姿态调整、飞行器自动导航,制造业中的无人车间、自动化生产线、工业机器人、数控加工系统,现代物流业的智能仓储、无人驾驶等等。随着计算机、互联网、大数据这些信息技术飞跃式的发展,原本只是对机器自动化的控制理论研究,现在已经进入到了研究人机共融控制理论的时代。自动控制理论也已经成为现代工程教育知识体系中不可或缺的组成部分。

### 1.2 机械控制工程

1954 年,钱学森在美国根据控制论的思想和方法,出版了英文版《工程控制论》一书,首

先将控制理论推广应用到了工程技术领域。1970年代,西安交通大学阳含和教授在国内首次开设了机械控制工程课程,主要讲授经典控制理论在机械工程中的应用。机械结构的运动与控制是所有工业领域的基本问题。机械控制工程(也就是机械工程控制论),就是以机械传动(包括液压气动等)系统为对象,研究这一工程领域中的广义系统动力学问题,研究机械系统及其输入、输出三者之间的动态关系,如图1.1所示。输入信号和输出信号亦分别被称为“激励”和“响应”;系统可以是一个机械结构,也可以是一个传动过程。

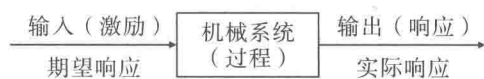


图 1.1 机械控制系统

电梯升降是机械控制系统一个很好的例子。乘客从一楼进电梯,按下要抵达四层的按钮。电梯启动,历经静止—加速—匀速—减速—停止各个阶段后,将乘客送到指定楼层。这个过程中首先要考虑的是电梯的上升速度和抵达目的楼层的位置精度,其次还要考虑上升过程中乘客的舒适度体验。这里乘客按下电梯四层的按钮就是一个输入信号,也表达了想要得到的最终输出信号;如图1.2所示的输入指令信号,这个信号可以表示为一个阶跃函数。图中还绘制出电梯上升过程中的时间—位置曲线(电梯响应),从中就可以看出电梯的性能优劣。

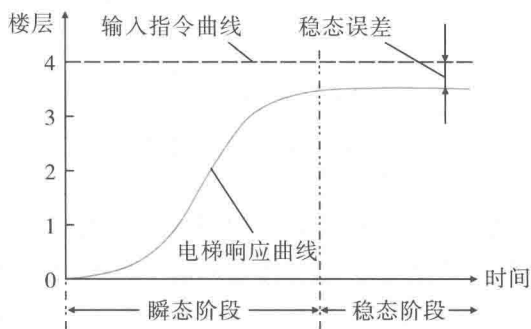


图 1.2 电梯系统时间响应曲线

从图1.2中电梯的时间—位置响应曲线可以看出,电梯上升过程很明显分为两个阶段:瞬态过程与稳态过程。图中曲线的形状表达了瞬态过程的品质和稳态误差两个主要的电梯性能指标。显然,乘客的舒适程度和等待电梯的耐心反映在瞬态过程品质中。如果电梯启停上升的速度过快,乘客就会感到很不舒服;但如果电梯响应速度太慢,乘客等待时间过长就会感到不耐烦。图中曲线标注的稳态误差是机械控制系统另外一个重要的性能指标。设想若电梯没有把乘客送到四层而是到了其他楼层,那电梯就不能用了。

从系统论的角度来看,机械工程控制论主要的研究内容有三个方面:

- (1) 已知机械系统结构和输入信号,研究输出信号有何规律和特点?
- (2) 已知机械系统结构和理想(期望)输出信号,确定输入信号如何施加?
- (3) 已知输入信号和输出信号,确定机械系统应具有何种结构与参数?

也可以简而言之为系统分析和系统设计两大研究内容。系统分析就是确定系统性能的过程。通过分析测试计算等手段,确定系统瞬态响应的品质和稳态误差的大小,判断系统是

否达到所期望的性能指标。系统设计就是构造或改变系统的结构,使系统的输出性能指标达到我们的要求。

在原有机械结构中引入控制系统可以扩充出很多新功能。第一可以实现功率放大,例如通过汽车操控系统,人的手臂和腿脚动作就可以驱动汽车在路面上行驶。第二可以实现远程操纵作业,人们可以远程控制机器人在有毒有害的作业场所搬运材料。第三是可以实现各种输入的物理信号的转换,为作业提供方便。例如,在温度控制系统中,输入是恒温器的旋钮位置,输出是热。一个简单的位置输入信号导出了所需的热量输出。第四是可以实现对干扰的补偿校正。通常在机械传动系统中存在位置和速度波动,在热量控制系统中存在温度波动,在电子系统中存在电压电流频率波动等。工业装置不可避免地要在这些参数变化的干扰中工作,还要保证有正确的输出。这时候就需要控制系统来修正这些干扰带来的运行偏差。如天线系统要瞄准预定的位置,如果强风使天线扭转或者有其他干扰影响,系统必须要能够检测出干扰并且矫正天线的位置。显然,仅靠系统输入的定值信号无法实现矫正功能,控制系统自身必须要能量测出扰动导致的位置偏移量,而后驱使天线回到所要求的位置。在一个机械控制系统中上述四个功能其实是相互关联、互不可分的。

### 1.3 机械控制系统基本概念与定义

#### 1. 机械控制系统的基本定义

我们先给出机械控制系统相关概念的若干基本定义。

系统:能够完成一定任务的一些部件的组合。

机械系统:能够实现一定的机械运动,输出一定的机械能,以及承受一定的机械载荷的系统。

控制系统:系统的可变输出,如果能够按照要求由参考输入或控制输入进行调节的系统。

开环系统:如图 1.3 所示,“变送器”模块将输入信号转换为“控制器”可用的形式;控制器驱动机械系统(过程)。输入信号有时也称为参考值,输出信号称为被控变量。其他信号,诸如干扰信号,通过求和点进入到控制器和系统中。此即开环系统的普遍形式。

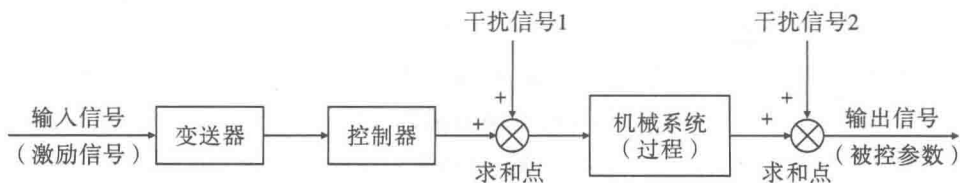


图 1.3 开环控制系统

开环系统的特征是无法校正(补偿)加在控制器驱动信号中的任何干扰(噪声),包括混入控制器中的干扰信号 1,和直接在输出端的干扰信号 2,系统对这两种干扰信号都无法修正。例如普通车床在金属棒料外圆加工时,调整好进给量后刀具持续切削作业。如果棒料材料中有硬质大颗粒状杂质,外圆尺寸加工精度就会受到影响,严重时还有可能引起崩刃。对这种意外(干扰),开环的切削系统就无法修正调整。

反馈:将系统输出信号以一定的方式返回到系统的输入端,并共同作用于系统的过程。

闭环系统(反馈控制系统):如图 1.4 所示,系统的输出量对系统有控制作用,或者说系统中存在反馈回路的,称为闭环系统。

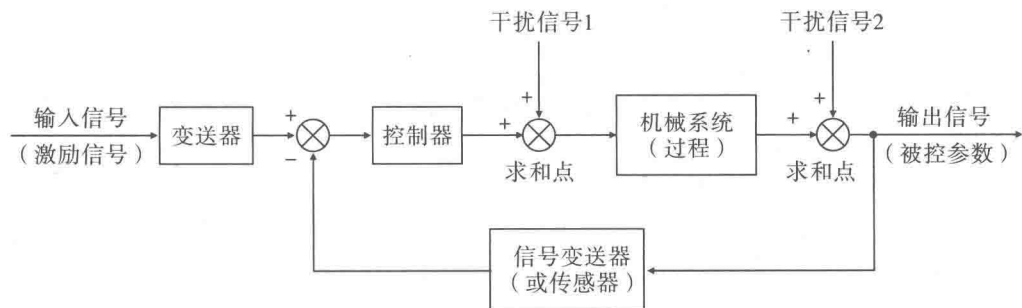


图 1.4 闭环控制系统

在闭环系统回路中,信号变送器(或传感器)模块获得输出信号,并将其变换输送到“控制器”模块中。在第一个求和点处,求取输入输出信号的代数和(称为“作用信号”),再施加到控制器中。

反馈控制系统最经典的例子是贮水槽液面自动调节系统。这种系统在古代文明中很早就出现了,直至今日很多抽水马桶还在采用这种原理。如图 1.5 所示,浮子浮出液面实际高度  $h$  与贮槽内所需液面高度  $H_0$  之差,推动杠杆控制进水阀门放水,一直到  $h = H_0$  时,杠杆施加作用关闭进水阀门。

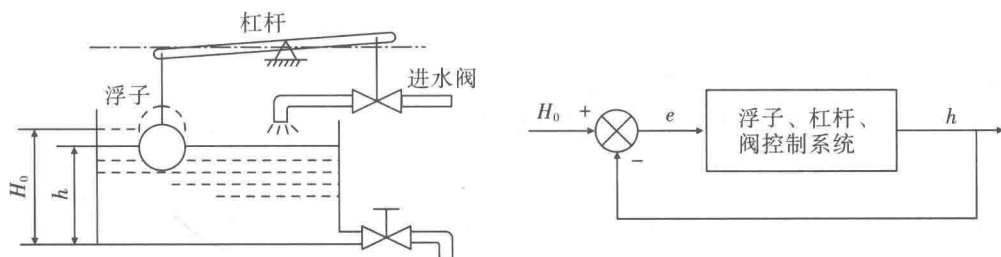


图 1.5 液面自动调节系统及其作用框图

开环系统的缺点,如对外加干扰的敏感以及对这些干扰无法补偿校正,或许可以通过闭环系统加以改善。参见图 1.4,系统测量输出响应,通过反馈通路将此测量信号返回,在求和点处将响应信号与输入信号进行比较。两路信号若有任何差异,则系统通过作用信号驱动被控对象,实施系统校正。整个过程就是一个“测量偏差并用以纠正偏差”的过程,因而闭环控制系统的控制精度一般优于开环控制系统,对噪声、干扰和环境变化的敏感性较小,瞬态响应和稳态误差等性能指标也易于调整。但这里要指出,对于闭环系统而言,由于增加了反馈环节容易造成系统的振荡甚至不稳定,因此其稳定性始终是一个重要问题。在实际分析设计控制系统时,也不能盲目地因为闭环控制系统比开环系统精度高而一定选择闭环控制,还需考虑使用要求和经济成本等因素。

总之,系统具有反馈回路,具有测量和校正功能的称为闭环系统,或者反馈控制系统。系统不具有这些测量和校正功能,则称为开环系统。

现在绝大部分机械控制系统,不论是开环系统还是闭环系统,都选用计算机作为系统回

路中的控制器(或补偿器)。采用计算机作为控制器的优点很多,比如用同一台计算机通过分时技术可以同时控制或补偿多个系统回路;而且,通过软件来调整补偿器的参数以实现系统响应要求,比起更换调整硬件来要方便很多。

## 2. 机械控制系统分类

控制系统的分类方法有很多。如根据系统的功能分类,有温度控制系统、速度控制系统、压力控制系统、流量控制系统等等;按照有无反馈可分为开环系统和闭环系统。如果按照输入信号的特征,可以分为如下三类控制系统:

(1)自动调节系统 这种系统的特征是输入量为一恒值,通常称为系统的给定值,也称为恒值系统。控制系统的任务是尽量排除各种干扰因素的影响,使输出量维持于给定值(期望值)。如工业过程中恒温、恒压、恒速等控制系统。

(2)随动系统(跟踪系统) 该系统的控制输入量是一个事先无法确定的任意变化的量,要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如雷达天线的自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统就是典型的随动系统。

(3)程序控制系统 系统的控制输入信号不是常值,而是事先确定的运动曲线,将其编成程序固化在输入装置中。即输入信号是事先确定的程序信号,控制的目的是使系统的被控参量按照要求的程序作业。如数控车床就属此类系统。

根据系统中传递信号的性质分类,机械控制系统可以分为两类:

(1)连续控制系统 系统中各部分传递的信号为随时间连续变化的信号。连续控制系统通常采用微分方程描述。

(2)离散(数字)控制系统 系统中某一处或多处的信号为脉冲序列或数字量传递的系统。离散控制系统通常采用差分方程描述。

本课程主要以自动调节系统、连续控制系统为例来研究机械控制原理。

## 3. 机械控制系统的性能指标

无论是分析系统还是设计系统,都要先明确判定系统优劣的性能指标。系统对输入信号的响应是一个动态过程:先历经一个瞬态响应过程,而后进入稳态响应状态。通常自动调节系统的稳态响应与系统输入信号相类似。

一般来说,针对机械系统的分析和设计主要考察三项指标:系统的稳定性,系统的瞬态响应品质,系统的稳态响应误差。设计控制系统就是使系统的稳定性达到要求,瞬态响应品质要高,降低系统的稳态误差。

当系统受到外界扰动作用时,其输出将偏离平衡状态;当这个扰动作用去除后,系统恢复到原来平衡状态或者趋近于一个新的平衡状态的能力,就是系统的稳定性。如图 1.6 所示,小球置于拱形顶端的稳定性就不如置于凹槽底部。



图 1.6 系统稳定性示意图

稳定性表征了系统能否正常工作。由于机械系统存在着惯性和储能元件,当系统各个参数设计分配得不恰当时,将会引起系统的振荡而失去工作能力(失稳)。因此具有稳定性是控制系统工作的首要条件。

系统针对某个激励的响应过程分为瞬态和稳态两个阶段。考察瞬态响应阶段的品质,一般是指当系统实际输出量与期望的输出量之间产生偏差时,消除这种偏差的快速程度。但在某些场合“快速”并不一定是唯一诉求。例如前述控制电梯升降的例子,如果电梯速度过快,人的舒适度体验就不好。因此系统的瞬态响应品质应该是综合指标的体现。

系统的瞬态响应结束后就进入稳态响应阶段,此时系统的输出信号应当类似于输入信号。系统的稳态响应与期望的输出量之间的偏差,称为系统的稳态误差。稳态误差又称为系统的静态精度或稳态精度。

不同的机械控制系统,对稳定性、瞬态响应品质、稳态误差的要求并不一样。如随动控制系统要求快,调速控制系统要求稳等。同一个控制系统的稳定性、响应品质、稳态误差各性能指标之间也是相互制约。提高了系统的响应快速性,可能会引起系统大幅振荡;改善了系统的稳定性,响应速度有可能滞缓,甚至导致系统稳态精度降低。控制系统的这些性能指标在设计阶段需要仔细权衡。

在分析与设计控制系统时还要考虑其他一些重要的性能指标,其中之一就是系统的鲁棒性(robust)。在设计系统的瞬态响应曲线、稳态误差和稳定性时,都是假定系统参数不变。但系统在实际运行中,参数都会随着时间的推移而改变。这样系统性能也会随着时间推移而变化,系统也不再保持初始设计的状态。通常系统参数变化与性能改变之间并非呈现线性关系。在某些情况下,即使是同样的系统,参数值的变化导致系统性能的改变也是或大或小。鲁棒性设计就是使系统对参数变化不要过于敏感。

#### 4. 计算机辅助分析与设计

计算机是现当代控制系统设计与分析必不可少的工具。在自控技术发展历史中,控制系统设计属于劳动密集型工作,大量的数据分析和参数调整需要人工计算。能够提高设计效率的也只有图解法等有限的手段。人工计算过程冗长繁琐,计算精度也不高。计算机的引入在自动控制领域兴起了一场意义深远的技术革命,特别是改变了控制理论与技术的工程实现途径。我们可以把现实工程中的非线性等其他因素都纳入考虑范围,利用计算机建立更为精确复杂的数学模型。在PC机上用软件就可以完成控制系统的分析、设计和快速仿真计算工作;可以很方便地改变参数,即时测试对比不同的设计方案。我们可以采用“假设-分析”的方法去试凑各种方案以寻求较好的设计结果。我们在后续章节要学习的根轨迹法,如果不借助计算机程序搜索功能,单凭人工画图计算根本无法完成。

市场上已经有很多适用于控制系统设计分析的商业软件。如Matlab, Labview 和面向不同行业应用的软件等。本教材选用Matlab进行算例分析,包括Matlab Control System Toolbox, Simulink, LTI Viewer, SISO Design, Symbolic Math Toolbox等相关的软件包。有关Matlab的基础知识请参考相关文献。

Matlab作为成熟优秀的控制系统设计分析软件,在业界得到了广泛应用。但在本课程学习过程中,特别是大多数的算例实现,我们强烈建议大家先用手工计算而后再用计算机软件验证。避免简单盲目地将参数代入计算机程序中直接得出结果,而没有真正理解机械控制理论的原理与思想。



## 1.4 课程性质与学习要求

本课程是讲授自动控制理论在机械工程中的应用,是一门应用技术理论课。自动控制理论起源于现代应用学科,是总结了机械、电子、化学、生物、经济、管理、人文社会等学科的学术发展成果,是用数学来描述的技术理论。简言之,自动控制理论是对多个学科实践知识的抽象总结,描述其共性的规律;是将实际问题引入数学领域进行分析推导,然后再将结果应用于指导解决具体的学科实际问题。因此,工程数学知识在现当代自动控制理论中扮演着重要的角色。这也是学习本门课程的一个要注意的特点。

机械控制系统是将自动控制理论运用于机械系统中以实现高品质的机械传动性能。虽然控制对象是机械装置,但实现控制的手段绝对不局限于机械传动的方法。特别是现代科技的发展,控制元器件可以是机、电、液、气、声、光、磁、热等多种物理效应的体现。因此,不论是从控制理论的来源,还是控制系统的实现,都带有多个学科交叉综合的特点。这是本课程的第二个特点。其实在开发大项目的过程中,控制系统工程师全过程不可或缺。在项目的概念设计阶段,要确定或完成整个系统的功能设计,包括系统整体性能指标,各子系统功能,这些功能之间的互连形式,硬件软件设计,确定系统评测方案和流程等等。在工程设计阶段,控制系统工程师要负责硬件选型和设计,确定通信接口,包括设计所有子系统以满足系统性能指标要求,涉及到各种传感器、电机、电子元器件、气动与液压回路等等。所以控制系统工程师要具备多个领域的基本知识,还要具备与这些领域的专业工程师交流的能力。

在学习本门课程过程中同学们将会发现,你们先前学过的课程内容,如高等数学、线性代数、工程力学、热工学、电工电子、测试技术等课程,都有了全新的诠释和意义。其实你已经学会了对那些具体的物理对象进行数学建模的方法和能力,只是没有将其系统化。学完本门课程,理解并掌握了控制系统的思想,可以让所有在工程领域工作的人们用同一种语言来沟通。建立起系统的思维方式,也更容易学习其他学科的知识技能。你将会发现,工程类的各个学科领域分支,在关注的目标和设计实现方法上并无本质差别。

**因为本课程具有这些特点,同学们在学习过程中要注意方式方法。**

首先是要勤于思考,学会举一反三。如课程中以机械装置为例所讲的理论方法,是否可以推广到电气系统中去?

第二是要课后多做练习。虽然本课程所涉及题目内容,现有计算机仿真软件可以非常方便快捷地给出解决方案,但还是建议大家在课后手工计算一些题目,特别要重视图解法这一手工解题方法。将手工练习与计算机仿真结合起来,对于真正理解控制理论的思想大有裨益。

第三是重视课内和课外的实验。一门应用技术理论课程的最终目的,是想教会学生解决实际问题的能力。针对一个具体的机械系统,用课堂所学的理论知识完成分析设计,不仅可以了解那些数学公式对应现实系统的真正含义,加深对理论的理解;而且也会认识到理论解决实际问题的复杂性和局限性。对于工科学生而言,能够深刻理解后一点至关重要。

## 复习思考题

1. 机械控制工程的主要研究对象和任务是什么？
2. 什么是反馈及反馈控制？试列举一个反馈控制的实例。
3. 说明开环控制系统及闭环控制系统，它们的区别是什么？
4. 机械控制系统的性能指标都有哪些？
5. 机械控制系统如何分类？



# 数学建模

## 2.1 简述

对机械控制系统进行分析和设计,首先是要用数学语言描述机械传动(过程)。所谓的“数学模型”就是为了某种目的,用字母、数字及其他数学符号建立起的等式或不等式,以及图表、图像、框图等描述客观事物的特征及其内在逻辑联系的数学结构表达式。数学建模,就是用数学的抽象理论来描述现实问题,在此基础上就可以用数学的概念、方法和逻辑进行深入的分析,从而定性或定量地表达实际问题,并为解决实际问题提供精确的数据或可靠的指导。

用数学语言来描述具体的物理结构或过程,通常要采用很多假设和简化。最后得到的数学模型,既要尽可能地反映真实物理系统的性能,还要保证可用于分析计算。若模型过于复杂导致难以计算那也不行。

用于控制系统设计与分析的数学模型有两种表达方法,一种是在频域中的传递函数法,一种是在时域中的状态方程法。经典控制论主要采用第一种方法。

构建数学模型其实就是科学和工程中的基本物理、化学原理的应用。如对电路系统建模,就是欧姆定理和基尔霍夫定律的应用。研究机械系统时,大多是以牛顿力学为基本原理,建立系统的动力学方程,根据这些物理方程建立系统输入与输出之间的关系。建立数学模型是分析、研究一个动态系统特性的前提,是非常重要的同时也是较困难的工作。一个合理的数学模型应以最简化的形式,准确地描述系统的动态性能。

实际工程中建立控制系统数学模型的方法主要有两种:

(1)理论法 依据系统及元件各变量之间所遵循的物理或化学规律,列写出相应的数学表达式,建立模型。也称为解析法。

(2)实验法 人为地对系统施加某种测试信号,记录其输出响应,并用适当的数学模型进行逼近。也称为系统辨识。

机械系统的动力学方程一般都呈现为微分方程的形式。微分方程的形式和系数,就描述了机械系统内部之间的关系或形态。式(2.1)为  $n$  阶线性时不变微分方程的通用表达式,式中,  $y(t)$  表示系统的输入,  $x(t)$  为输出,二者都是时间域函数。

$$a_n \frac{d^{(n)} y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{(n-1)} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^{(m)} x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{(m-1)} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 x(t) \quad (2.1)$$