

高等学校教材

控制理论与机械系统控制

竺长安 张屹 主编

高等教育出版社

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》。行为人将承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

现公布举报电话及通讯地址:

电 话: (010) 84043279 13801081108

传 真: (010) 64033424

E - mail: dd@hep.com.cn

地 址: 北京市东城区沙滩后街55号

邮 编: 100009

责任编辑	韩颖
封面设计	于文燕
责任绘图	黄建英
版式设计	王艳红
责任校对	康晓燕
责任印制	

内容简介

本书从工程应用的角度出发,全面地介绍了自动控制的基本概念、理论及其在具体机械工程问题中的应用。全书共分八章,包括自动控制系统的构成、控制对象的建模、控制系统的时域分析、根轨迹法、控制系统的频域分析、控制系统的设计与校正等基础理论以及控制系统的计算机辅助设计、自动控制理论在机械工程中的应用等专题,并给出了工程应用实例。

本书的特点是:书中分析的为机械、仪表专业的研究对象,理论推导比电类教材简单;本书含有理论和应用两方面的内容,适合于没有后续控制课的机械、仪表专业。书中利用先进的软件进行分析计算,将自动控制方法与机械设计、机械系统控制等具体问题结合起来,使学生在掌握理论的同时可以分析解决本专业的问题。

本书可作为工院校机械、仪器仪表类专业本科生、专科生的教材,也可供机械自动化方面的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制理论与机械系统控制 竺长安,张屹主编. —北京:高等教育出版社,2002.12
ISBN 7 - 04 - 011593 - X

. 控 竺 ... 张 自动控制理论 - 高等学校 - 教材 自动控制理论 - 应用 - 机械系统 - 高等学校 - 教材 .TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 097154 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100009	网 址	http: www. hep. edu. cn
传 真	010 - 64014048		http: www. hep. com. cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787 × 960 1 16	版 次	年 月第 版
印 张	22.25	印 次	年 月第 次印刷
字 数	410 000	定 价	27.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是为适应高等学校机械、仪表专业教学需要而编写的。全书以讲述经典控制理论为主,全书共分为八章,包括:绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、根轨迹法、控制系统的频域分析、控制系统的设计与校正、控制系统的计算机辅助设计以及自动控制理论在机械工程中的应用。

虽然现代控制理论取得了很大的发展,但在实际中大量应用的仍是经典控制部分。书中没有提及非线性和采样控制等内容,因为泛泛地介绍既难以让学生建立基本概念,又与现代控制理论、计算机控制的内容重叠。本书完全以经典控制理论和应用为主,在内容编排上力求精练、易于自学,从点开始、逐步展开,并把重点放在基本概念的建立及实际应用的阐述上。为适应工科专业的需要,在讲述基本理论的过程中,适当联系工程实际,注意培养学生如何运用理论解决实际问题的能力。

目前国内机械、仪表专业的‘自动控制原理’教材,大多是借用自动控制或电子专业教材,书中一般以电子系统为讲解对象,应用的数学基础也较深,理论介绍多、实际应用少,不太适用于机械、仪表专业的学生。这样对机械、仪表专业的学生而言,仅靠教材内容的学习,就很难用自动控制原理来解决具体问题。本书的特点是以机械、仪表专业的问题为分析对象,数学推导简单,并采用了先进的计算方法,做到控制基础理论与机械工程应用有机结合。

与电器系统、化工过程控制等比较,机械系统控制有自己的特点。具体为:机械系统动力学模型只有质量、弹簧、阻尼器这三个基本元件,相对简单;机械系统的输出量仅为位移、速度、力(加速度),而且它们为导数关系;牛顿力学、拉格朗日法等分析方法发展相当完善,所以机械系统能得到较为精确的数学模型;在机械控制系统中,机械运动量的时间常数远大于控制部分电气量的时间常数,可以分开处理。这些都决定了机械系统控制的独特性。

针对上述问题,本书在讲述中多以机械系统为对象,利用先进的软件进行分析计算,并将自动控制理论与机械设计等结合起来,使学生可以分析解决机械、仪表专业的问题。在本书最后,还特意列出一章对自动控制理论在机械工程中的应用进行单独讲解。

针对较早的自动控制理论教材中分析、计算多以图解法为主(如根轨迹、Bode 图等大多用手工绘制),MATLAB 软件等先进的计算手段利用较少的现象,本书第七章以 MATLAB 语言为例,专门对自动控制系统的计算机辅助设计进行

前 言

了介绍。第八章讲述自动控制理论在机械工程中的应用,介绍利用自动控制理论指导机械设计,与机械系统控制结合,解决具体问题。

本书讲授总时数约为 60~80 学时,实验、计算机仿真约 10~16 学时。

本书由王卫荣教授审稿,王教授仔细审阅了全书并提出了宝贵的修改意见;在本书的编写过程中,得到了吕盼粮、曾议、吕达昱等人的帮助与支持,在此一并表示感谢。

限于编者水平,书中一定存在不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2002 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 自动控制的基本概念	1
1.2 自动控制的发展过程	4
1.3 控制系统与名词解释	6
1.4 控制理论及机电一体化	7
第二章 控制系统的数学模型	9
2.1 物理系统的微分方程	10
2.2 传递函数	19
2.3 系统框图及其简化	25
2.4 典型环节分析	32
2.5 信号流图	40
2.6 线性系统的状态方程	50
习题	67
第三章 控制系统的时域分析	70
3.1 典型输入信号及性能指标	70
3.2 一阶系统的时域分析	75
3.3 二阶系统的时域分析	79
3.4 高阶系统的单位阶跃分析	97
3.5 控制系统的稳定性	106
3.6 系统稳态误差分析	116
习题	126
第四章 根轨迹法	130
4.1 根轨迹与根轨迹方程	130
4.2 根轨迹绘制法则	134
4.3 参数根轨迹及非最小相位系统	147
4.4 附加零、极点的作用	151
4.5 闭环零、极点分布与系统性能之间的关系	158
习题	166
第五章 控制系统的频域分析法	169
5.1 频域特性的基本概念	169
5.2 典型环节的频率特性	174
5.3 频域稳定性判据	185
5.4 闭环频率特性分析	198

目 录

5.5 开环频率特性分析	201
习题	210
第六章 控制系统的设计与校正	213
6.1 系统的设计与校正问题	213
6.2 串联校正	217
6.3 反馈校正	240
6.4 控制系统的根轨迹法校正	248
习题	261
第七章 控制系统的计算机辅助设计及 CAI 软件	264
7.1 MATLAB 软件介绍	265
7.2 利用计算机对系统进行时域分析	267
7.3 利用计算机绘制系统的根轨迹	293
7.4 利用计算机对系统进行频域分析	301
习题	308
第八章 自动控制理论在机械工程中的应用	310
8.1 机械系统控制	310
8.2 控制理论在机械设计中的应用	312
8.3 直流调速系统	318
8.4 随动系统	332
习题	342
附录: 拉普拉斯变换	344
参考书目	348

第一章 绪 论

所谓自动控制,就是采用控制装置使被控对象的受控物理量能够在一定的精度范围内,按照给定的规律变化,达到控制的目的。

自动控制理论的发展与应用,不仅改善了劳动条件,把人类从繁重的劳动中解放出来,而且由于自动控制系统往往能以某种最佳方式运行,可以提高劳动生产率,提高产品质量,节约能源,降低成本。自动控制理论的应用是实现工业、农业、国防等方面科学技术现代化的有力工具。

经典控制理论和现代控制理论构成全部控制理论。控制理论的发展进一步促进自动控制技术和其它学科的发展。现在自动控制技术及理论已经普遍应用于机械、冶金、石油、化工、电力、航空、航海、宇航、核反应堆、工业管理及生物学等各个科学领域,并为各学科之间的相互渗透起到了促进作用。

“自动控制原理”是自动控制学科的基础理论,是一门理论性较强的工程科学。本课程的主要任务是研究与讨论控制系统的一般规律,从而设计出合理的自动控制系统,满足工业生产和各种工程上的需要。

1.1 自动控制的基本概念

一、自动控制理论(Automatic Control Theory)

自动控制理论是关于自动控制系统的构成、分析和设计的理论。自动控制理论的任务是分析自动控制系统中变量的运动规律和如何改变这种运动规律以满足需求,为设计高性能的自动控制系统提供必要的理论手段。自动控制理论的形成远比人类对自动控制装置的应用要晚,它产生于人们对自动控制技术的长期探索和大量实践,它的发展得到了数学、力学和物理学等其它学科的推动,近期更是受到计算机科学的大力促进。

人们通常把自动控制理论划分为经典控制理论和现代控制理论两部分。经典控制理论是20世纪30年代初开始形成,到50年代已经发展成熟的部分,它的研究对象是只有一个输入变量和一个输出变量的系统,而且它的参数不随时间变化即单变量定常系统,它的数学基础是拉普拉斯变换。在经典控制理论中,通常采用输入与输出间的数学关系(特别是传递函数)作为系统的数学模型,分析和综合系统的基本方法是频率响应法和根轨迹法。经典控制理论对于解决简单的自动控制系统的分析和规划问题是很有成效的,在第二次世界大战期间及

战后年代的火力武器和工业自动化方面发挥过重要作用,至今仍不失应用的价值。现代控制理论是指从 60 年代前后发展起来的部分,它建立在状态空间的基础之上。现代控制理论的研究对象要广泛得多,包括单变量系统和多变量系统,定常系统和时变系统。现代控制理论中,基本的分析和综合方法是时间域方法,各类系统数学模型的建立及其理论分析涉及现代数学的大部分分支。现代控制理论的主要分支有线性系统理论、最优控制理论、随机控制理论等。现代控制理论的出现丰富了自动控制理论的内容,也扩大了所能处理的控制问题的范围。

在自动控制理论发展的早期阶段,它的主要应用领域是工程技术领域中的各类控制问题,尤其是生产过程、航空和航天技术、通信技术、武器控制等方面。70 年代中期以来,自动控制的理论和方法已应用于交通管理、生态环境、生物和生命现象、经济科学、社会系统等领域。自动控制理论的建立和发展,不仅促进了自动控制技术向广度和深度发展,也对其它邻近学科的科学和技术的发展,乃至对人类的日常生活都产生着深刻的影响。自动控制理论被认为是 20 世纪在科学技术上所取得的重大成就之一。

二、经典控制理论(Classical Control Theory)

经典控制理论是自动控制理论中建立在频率响应法和根轨迹法基础上的一个分支。经典控制理论的研究对象是单输入、单输出的自动控制系统,特别是线性定常系统。经典控制理论的特点是以输入输出特性(主要是传递函数)为系统数学模型,采用频率响应法和根轨迹法这些图解分析方法,分析系统性能和设计控制装置。经典控制理论的数学基础是拉普拉斯变换,占主导地位的分析和综合方法是频率域方法。经典控制理论主要研究系统运动的稳定性、时间域和频率域中系统的运动特性、控制系统的设计原理和校正方法。早期,经典控制理论常被称为自动调节原理,随着以状态空间法为基础和以最优控制理论为特征的现代控制理论的形成(在 1960 年前后),开始广为使用现在的名称。

本书主要介绍经典控制理论。

三、自动控制系统(Automatic Control System)

自动控制系统是在无人直接参与下使受控过程按期望的规律或预定的程序进行工作的控制系统,自动控制系统是实现自动化的主要手段。来自系统之外、对系统施加控制作用的变量称为输入变量,可以从系统测量到的用于描述系统行为的变量称为输出变量,两者构成因果关系。例如,在飞机的驾驶过程中,气流的扰动会使飞机的实际航向发生偏离,在没有实现自动控制的情况下,通常由驾驶员通过仪表观测飞机的航向,操纵飞机的控制部件,使实际航向尽可能与期望航向一致;若采用自动驾驶仪,则控制飞机航向的过程就可不需要驾驶员直接参与而自动地进行。其中,作为被控制量的输出变量是飞机的实际航向,作为指令的输入量是期望航向。在这个例子中,自动控制系统由驾驶仪与飞机构成(见

图 1 - 1)。

图 1 - 1 飞机航向自动控制系统

四、自动控制系统的分类

按控制原理不同,自动控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。开环控制系统和闭环控制系统是控制系统中两种最基本的形式。如图 1 - 2 中(a)、(b)所示。

图 1 - 2 开环控制系统与闭环控制系统

(a) 开环控制系统 (b) 闭环控制系统

开环控制是最简单的一种控制方式。在开环控制系统中,系统输出只受输入的控制。其中基于按时序进行逻辑控制的开环控制系统称为顺序控制系统。由于开环控制系统结构简单、维护容易、不存在稳定性问题,因此应用于许多控制设备中。开环控制系统的缺点是:控制精度取决于组成系统的元件的精度,因此对元件的精度要求较高。由于输入量不能通过反馈影响控制量,所以输出量受扰动信号的影响比较大,系统抗干扰能力差。根据上述特点开环系统适用于输入量已知、控制精度要求不高、扰动作用不大的情况。开环控制系统一般是根据经验来设计的。

闭环控制系统是建立在反馈原理基础之上的,利用输出量与期望值的偏差来对系统进行控制,可获得比较好的控制性能。通常大多数重要的自动控制系

统都采用闭环控制方式,闭环控制系统又称为反馈控制系统。按控制和测量信号的不同,控制系统又可分为连续控制系统和离散控制系统。控制信号连续作用于系统的,称为连续控制系统。控制信号断续地作用于系统的,称为离散控制系统或采样控制系统。此外,在工程问题中,自动控制系统也常按所控制的物理属性进行分类,如温度控制系统、流量控制系统、压力控制系统、速度控制系统等。闭环控制系统在控制上的特点是:由于输出信号的反馈量与给定的信号作比较产生偏差信号,利用偏差信号实现对输出量的控制或调节,所以系统的输出量能够自动地跟踪给定量,减小跟踪误差,提高控制精度,抑制扰动信号的影响。除此之外,负反馈构成的闭环控制系统还具有其它特点:引进反馈通路后,使得系统对前向通路中元件的精度要求不高;反馈作用还可以使得整个系统对于某些非线性影响不灵敏等等。

综上所述,闭环控制系统的自动控制或者自动调节作用是基于输出信号的负反馈作用而产生的,所以经典控制理论的主要研究对象是负反馈的闭环控制系统,研究目的是得到系统的一般规律,从而可以设计出符合设计要求、满足实际需要的、性能指标优良的控制系统。

1.2 自动控制的发展过程

直到 18 世纪中叶才出现自动控制系统。第一个自动控制系统是 1770 年由瓦特发明的控制蒸汽发动机速度的离心调速器。

图 1 - 3 示出了用飞球调节器的速度控制系统的原理图。调节器直接用齿轮与输出轴连接,以使飞球速度正比于发动机的输出速度。通过改变调速杆的位置达到所希望的速度。杠杆在枢轴上转动如图 1 - 3 所示,来自飞球的离心力传送到弹簧下面座子的底部。在稳定情况下,飞球的离心力与弹簧力平衡,并且流量控制阀的开度恰好足够将发动机速度保持在期望值上。

若发动机的速度降到期望值以下,飞球的离心力减小,因而减小了施加到弹簧底部的力,引起 x 向下运动。由于杠杆的作用,产生较大的控制阀的开度,因而供给的燃料增多,使发动机的速度增大,直到重新建立平衡为止。若速度增加过大,则产生相反的作用。

通过调整调节杠杆的整定位置,可以改变发动机的期望速度。欲整定较高的速度时,向上移动调节杠杆,又引起 x 向下移动,结果使燃料控制阀的开度更大,跟着发生速度的增大。通过相反的作用达到较低速度的设定。

大约一百年以后,麦克斯威尔(Maxwell)才从理论上分析了飞球调节器的动态特性,于 1868 年发表了对离心调速器进行理论分析的论文,其后奈奎斯特、波德等人建立了控制系统的稳定性理论,经典控制理论才逐渐形成。

图 1 - 3 离心调速器控制系统的原理图

在 1940 年以前,自动控制理论没有多大发展,但对于多数情况,控制系统的设计的确是一门技巧。40 年代后的十年期间,发展和实践了数学和分析的方法,并确定控制工程为具有独立特色的一门工程科学。第二次世界大战期间,为了设计和建造自动飞机驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统和其它的基于反馈控制原理的军用装备,给自动控制理论一个很大的促进。至此,自动控制理论相对发展完善。

二战以来,自动控制在工业上的应用有了惊人的进展。现代工业过程诸如化学制品及机械加工制造等都大量应用了自动控制。

从技术角度来看,自动控制经历了三个阶段,机械控制、电子控制和计算机控制。从构成控制系统的几个主要环节来看,它们的主要特点如表 1 - 1 所示。

表 1 - 1 自动控制发展的三个阶段

内容 阶段	指令方式	轨迹产生	系统量形式	驱动形式
机械控制	点位信号	凸轮为主	机械量(位移、速度等)	同步电机等
电子控制	连续信号	函数发生器	模拟电量(电压、电流等)	步进电机等
计算机控制	可变信号	计算机软件	模拟、数字量(连续或脉冲量)	机、电、液、气等

1. 机械控制:早期的控制系统几乎全是机械控制,它的指令通常是由离合器发出,只能给出希望点的值,而中间过渡点的信号则无法给出。一般用同步电机驱动,轨迹靠凸轮产生,不仅控制性能无法保证,要改变轨迹实现不同功能也很困难。但它由于系统简单、运行可靠、成本低廉而得到一定应用。常见的有离心调速系统、水箱液位控制系统等。

2. 电子控制:与机械控制相比,电子控制的指令不仅能给出最终值,而且还能给出中间信号,这样保证了被控对象可以按期望的规律趋于目标。大多数离

线控制系统属于电子控制。

3. 计算机控制:与电子控制相比,计算机控制的指令及调节参数可以按需要改变,可以实现在线控制。

1.3 控制系统与名词解释

无论多么复杂的控制系统,都是由一些基本元件组成的。图 1 - 4 表示组成反馈控制系统的基本元件,其中包括控制元件、反馈元件、比较元件、放大变换元件、执行元件、被控对象。

控制元件 控制元件的作用是产生控制信号;

反馈元件 它产生与被控量有一定函数关系的反馈信号;

比较元件 它产生偏差信号,该信号反映控制信号与反馈信号的差值;

放大变换元件 把偏差信号放大并对信号的能量形式(电气、机械、液压等)进行变换的元件;

图 1 - 4 控制系统的组成

执行元件 直接对被控对象进行控制的元件;

被控对象 就是控制系统进行控制的对象,它的输出量即为系统的被控制量。

反馈控制系统中的各种信号:

控制信号(或输入量) 它是控制输出量变化的信号,用 r 或 u 表示。

被控信号(或输出量) 它的变化规律是要加以控制的。应保持它与控制信号之间有一定的函数关系,用 c 表示。

偏差信号(或偏差) 它是控制信号与主反馈信号之差,用 e 表示。

误差信号(或误差) 它是输出量的实际值与希望值之差,用 ϵ 表示。

干扰信号(或干扰) 除控制信号外,对系统输出量产生影响的因素都叫干扰,用 n 表示。

反馈信号(或反馈) 从系统(或元件)的输出端取出信号,经过变换后再加到系统(或元件)的输入端,这就是反馈信号,用 h 表示。当它与系统(或元件)的输入信号符号相同时叫正反馈,符号相反时叫负反馈。除了主反馈外,有的系统还有局部反馈,这往往是为了对系统进行补偿、线性化而设的,有些局部反馈是元件所固有的。

1.4 控制理论及机电一体化

今后,单纯的机械产品会越来越少了,机械一般是要和相应的计算机控制电路结合在一起,才能构成一个高性能的产品。像这样的机电产品设计、开发就必须采用机电一体化技术。

机电一体化的技术构成如图 1 - 5 所示,上半部为机械技术,下半部为电子技术,自动控制技术将它们有机地结合在一起。机械相当于执行部分,计算机控制电路为指挥部分,让机械如何按计算机的指令运动,这就是自动控制要做的工作。由此可见,自动控制技术对于机械专业的重要性。

图 1 - 5 机电一体化的主要技术

除此之外,自动控制系统还被广泛应用于人类社会的各个领域。在工业方面,对于冶金、化工、机械制造等生产过程中遇到的各种物理量,包括温度、流量、压力、厚度、张力、速度、位置、频率、相位等,都有相应的控制系统。在此基础上通过采用数字计算机还建立起了控制性能更好和自动化程度更高的数字控制系统。在农业方面的应用包括水位自动控制系统、农业机械的自动操作系统等。在军事技术方面,自动控制的应用实例有各种类型的伺服系统、火力控制系统、制导与控制系统等。在航天、航空和航海方面,除了各种形式的控制系统外,应用的领域还包括导航系统、遥控系统和各种仿真器。此外,在办公室自动化、图书管理、交通管理乃至日常家务方面,自动控制技术也都有着实际的应用。随着控制理论和控制技术的发展,自动控制系统的应用领域还在不断扩大,几乎涉及生物、医学、生态、经济、社会等所有领域。

在前面,我们讨论了许多自动控制在工程中的应用,这些应用强调处理各种

工程问题的自动控制可能性。虽然控制理论最初是由于工程学科而发展起来的,由于所包含的原理的普遍性,就现在的技术状态而论,并没有只限于工程范围,在经济学、社会学和生物学也广为应用。

第二章 控制系统的数学模型

自动控制系统的种类很多,它可以是物理的也可以是非物理的,如生物的、社会经济的等。对于一个具体的系统来讲,其最终目的是能够完成某些规定的任务,达到一定的要求,如建造一个室内调温系统,或是造纸机稳速系统,或是火箭制导系统等。为了能较好地利用控制系统为我们服务,就必须掌握其内在规律。研究一个自动控制系统,单是分析系统的作用原理及其大致的运动过程是不够的,必须同时进行数量上的分析,才能做到深入的研究并将其有效地应用到实际工程中去。

对控制系统特性的分析与综合,通常根据系统所包含各种物理现象的数学模型来进行,所谓系统的数学模型就是描述系统的数学表达式。控制系统的数学模型是根据系统的动态特性,即通过决定系统特性的物理学定律,如机械、电气、热力、液压等方面的基本定律而写成。它代表系统在运动中各变量之间的相互关系,既定定性又定量地描述整个系统的动态过程。

建立数学模型有两种基本方法:机理分析法和实验辨识法。机理分析法是通过理论推导得出,这种方法是根据各环节所遵循的物理规律(如力学、运动学、电磁学、热学等)来编写;实验辨识法是由实验求取,即根据实验数据通过整理编写出来。在实际工作中,这两种方法是相辅相成的。

由于控制系统是由各种功能不同的元件组成的,因此要正确推导系统的数学模型,首先必须研究各类元件的数学模型,以及这些元件在控制系统中互相联系时的彼此影响等问题。一般来说,推导系统数学模型的步骤是:

依据题目的要求,确定待研究系统的输入量和输出量;

根据相应的物理定律,写出组成系统各部分的微分方程;

消去中间变量,得到输入量和输出量之间的方程式;

将该方程式写成标准形式(即将与输入量有关各项放在方程式的右边,与输出量有关各项放在方程式左边,各导数项按降幂排列),方程式中的系数通过系统的参数变成具有一定物理意义的参数的一种表示形式。

系统的动态特性可由线性微分方程来描述的系统称为“线性系统”,如果必须由非线性微分方程来描述,则称为“非线性系统”。对于线性系统可以应用叠加定理,先分别考虑各个输入,作为单输入和单输出系统来处理,求出单个输入、输出关系,最后对各输出进行叠加,这样便于分析和计算。严格地讲,实际物理系统都是非线性系统,只是非线性的程度有所不同而已。例如,机械系统中的间