



高等院校精品课程系列教材

JINGPIN
KECHENG

自动控制理论

卢子广 林靖宇 周永华 编著



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校精品课程系列教材

自动控制理论

卢子广 林靖宇 周永华 编著



机械工业出版社

本书基于系统的输入/输出响应,论述反馈控制原理及其改善系统动态过程和处理系统不确定性的方法。为适应信息时代的控制科学与工程的需要,本书在课程体系与内容上作了较大幅度的更新。全书以控制系统的稳定性为主线,围绕“动态、建模、互联和不确定性”4个重要概念展开。全书共7章,包括绪论、动态系统模型、连续时间线性系统的时域分析、线性控制系统的频域分析、线性控制系统的综合与校正、非线性控制系统分析、离散控制系统的基本理论。

本书可作为高等院校自动化、电气工程与信息技术专业本科生的教材,也可作为理工科其他专业学习自动控制理论的本科生、研究生和科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/卢子广,林靖宇,周永华编著. —北京:机械工业出版社, 2009.10

(高等院校精品课程系列教材)

ISBN 978-7-111-28361-4

I. 自… II. ①卢…②林…③周… III. 自动控制理论—高等学校—教材
IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第170479号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:时 静

责任编辑:时 静 吴超莉

责任印制:李 妍

北京汇林印务有限公司印刷

2009年11月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·382千字

0001-3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-28361-4

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页,倒页,脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

自动控制理论是自动化技术的理论基础。它提供了设计物理系统和信息系统的原理和方法,使这些系统可以自动地适应环境的变化以保持期望的性能。在过去的 50 多年里,随着控制理论取得突破性进展,以及传感技术和计算技术的改善,使得自动化技术能更广泛地服务于经济和国防需求。如今,在工程系统中,自动控制已成为不可或缺的使能技术(Enabling Technology)。

近 20 年来,随着计算机、通信和传感器技术的发展,控制原理和方法的应用机遇快速增长。自动化设备的价格日渐低廉并且无所不在,拥有嵌入式处理器、传感器和网络硬件的设备越来越多,这使开发具有一定智能和高性能的机器成为可能,并将大大影响我们生活的每一方面,不但包括各种生活必需品,而且包括我们生存的环境。

2000 年,美国空军科研部(Air Force Office of Scientific Research)邀请世界各国一些著名控制专家成立了一个委员会,研讨 21 世纪控制科学的未来方向,于 2002 年 6 月发布了一份 104 页的报告——《信息爆炸时代的控制——关于控制、动力学和系统未来方向的专家小组报告》(Control in an Information Rich World: Report of the Panel on Future Directions in Control, Dynamics and Systems)。该报告提出了 21 世纪控制科学的发展机遇与挑战。针对控制工程教育的未来发展,专家小组建议统一和压缩过去 40 年所积累的资料和体系,为专业和非专业人士开发新的课程和教科书,使控制成为大学理工专业的必修课,以满足未来控制教育的新要求。

与此同时,我国逐步实施创新人才培养的教育改革。为培养具有创新能力的自动化人才,需要构建适应时代需求的控制科学与工程学科基础教育及课程体系。自 2003 年以来,我们在自动控制理论课程的教学,进行了重要的改革与尝试,以控制系统的稳定性为主线,围绕“动态、建模、互联和不确定性”4 个重要概念,在参考国外同类最新教材的基础上,重新编写自动控制理论讲义和组织教学,取得了良好的效果。

2008 年 2 月,由中国自动化学会组织国内自动化领域著名专家编写的《控制科学与工程学科发展报告(2007-2008)》正式发布,报告中指出了控制科学与工程学科基础教育及课程体系改革的重要性。

基于已有的教学实践和自动化技术的现实需求,作者将多年来的讲义加以整理和扩充,写成本书。

本书较全面地论述了自动控制的基本理论,使学生清晰地建立起反馈控制系统的基本概念,学会利用控制理论的方法分析和设计自动控制系统,掌握控制系统的定性分析、定量估算和仿真实验方法。

以下是本书不同于国内已出版教材的地方。

(1) 问题导向:全书对控制理论的诸多基本原理的论述采用了“问题背景→启发式求解→严格的数学证明→工程应用”处理方式。

(2) 时效性与工程化:为与实际工程更紧密地结合,除了考虑通常的“稳、快、准”技术指标,还考虑模型不确定性的稳定鲁棒约束、执行器饱和的控制信号约束(带宽限制)、测

IV

量传感器噪声的能量约束、非最小相位系统的带宽约束及二自由度控制设计等内容。

(3) 易用性原则: 针对所有重要理论和方法内容的讲授, 都能给出详尽的分析或设计范例, 并把 MATLAB 计算软件合理地融入其中。

全书共 7 章, 各章讲解的内容如下。

第 1 章是绪论, 讲述自动控制的发展历程并阐明控制系统的一般概念。

第 2 章是动态系统模型, 介绍了建立数学模型的一般原理和方法, 包括动态系统的因果性、微分方程描述、卷积、Laplace 变换与传递函数、系统互联运算、灵敏度函数等。

第 3 章是连续时间线性系统的时域分析, 在介绍稳定性概念和系统性能指标后, 重点讲解了典型系统的时域分析、暂态和稳态性能指标、零极点分布与系统动态响应的对应关系、根轨迹图解法。

第 4 章是线性控制系统的频域分析, 在介绍频率特性的基础上, 重点论述了 Nyquist 稳定性判据、稳定裕度、Bode 图、最小相位系统及非最小相位系统、鲁棒性能指标的概念或方法。

第 5 章是线性控制系统的综合与校正, 论述了满足系统“稳、快、准”和鲁棒性指标的频域校正方法, 以及极点配置的时域控制设计方法。

第 6 章是非线性控制系统分析, 介绍了研究非线性控制系统的两种常用方法——相平面法和描述函数法, 并分析了改善非线性系统性能的措施及非线性特性的利用。

第 7 章是离散控制系统的基本理论, 在论述信号的采样与保持、 z 变换理论之后, 基于差分方程与脉冲传递函数, 对离散系统进行暂态和稳态分析, 并简要介绍了线性离散系统的校正。

书中每章都适量配备了全新的习题。

本书的执笔人为卢子广 (第 1、2、4、5 章), 林靖宇 (第 3、6 章), 周永华 (第 7 章), 最后由卢子广统稿。在撰写本书期间, 得到了学生郭元彭、韩彦、黄绿橙、谢钦和杨本和的帮助, 在此对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限, 书中难免有不足之处, 殷切希望广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1	2.6 闭环系统的特性	29
1.1 引言	1	2.7 小结	32
1.2 自动控制理论的建立和发展	1	2.8 习题	32
1.3 自动控制系统的基本概念	3	第 3 章 连续时间线性系统的时域分析	36
1.3.1 自动控制问题	3	3.1 典型输入信号及其 Laplace 变换	36
1.3.2 控制系统的基本术语	4	3.1.1 阶跃函数	36
1.3.3 自动控制系统的构成和要素	5	3.1.2 斜坡函数	36
1.3.4 开环控制与反馈控制的特点	6	3.1.3 抛物线函数	37
1.3.5 对控制系统的要求	6	3.1.4 脉冲函数	37
1.3.6 控制系统的分类	7	3.1.5 正弦函数	37
1.4 自动控制理论的基本概念及主要内容	7	3.2 线性时不变系统的时域响应	38
1.5 小结	8	3.2.1 用线性微分方程理论分析	38
1.6 习题	8	3.2.2 用 Laplace 变换分析	39
第 2 章 动态系统模型	9	3.3 线性系统的稳定性	40
2.1 引言	9	3.3.1 稳定性的概念	41
2.2 系统的时域模型	9	3.3.2 线性时不变系统稳定的条件	42
2.2.1 常微分方程模型	9	3.3.3 Routh-Hurwitz 判据	44
2.2.2 非线性系统的局部线性化模型	11	3.4 控制系统的性能指标	47
2.2.3 “黑箱”模型	15	3.4.1 暂态性能	47
2.3 复频域模型与传递函数	17	3.4.2 稳态性能	48
2.3.1 Laplace 变换	17	3.5 典型一阶系统	49
2.3.2 传递函数	20	3.5.1 单位阶跃响应	49
2.3.3 典型环节	21	3.5.2 单位斜坡响应	50
2.3.4 传递函数的两个标准式	21	3.5.3 单位加速度响应	50
2.4 结构图及系统互联	23	3.6 典型二阶系统	50
2.4.1 结构图	23	3.6.1 二阶系统的数学模型	51
2.4.2 系统互联结构	24	3.6.2 系统的特征根与参量 ζ 、 ω_n 的关系	52
2.5 信号流程图及 Mason 增益公式	27	3.6.3 单位阶跃响应	53
2.5.1 信号流程图	27	3.6.4 单位斜坡响应	56
2.5.2 Mason 增益公式	28	3.6.5 改善二阶系统的性能	57

3.7 高阶系统的响应	59	4.5.5 Bode 幅相关式与最小相位系统	106
3.7.1 高阶系统单位阶跃响应	59	4.5.6 稳定裕度的计算	108
3.7.2 闭环主导极点	60	4.6 利用开环频率特性分析系统的性能	112
3.8 线性系统的稳态性能	60	4.6.1 低频渐近线与系统稳态误差的关系	112
3.8.1 基本概念	60	4.6.2 交越区的频率特性与系统动态性能的关系	112
3.8.2 系统类型与稳态误差的关系	62	4.6.3 高频段频率特性对系统性能的影响	115
3.8.3 典型输入的系统稳态误差	63	4.7 闭环频域分析	116
3.8.4 扰动稳态误差	63	4.7.1 闭环频率特性	116
3.9 根轨迹法	65	4.7.2 用 MATLAB 程序求闭环频率特性	117
3.9.1 基本概念	65	4.7.3 闭环频率特性的几个特征量	118
3.9.2 根轨迹的幅值条件及相角条件	66	4.7.4 闭环频域指标	119
3.9.3 根轨迹的作图规则	67	4.8 小结	122
3.9.4 参数根轨迹	71	4.9 习题	123
3.10 小结	72	第 5 章 线性控制系统的综合与校正	126
3.11 习题	72	5.1 引言	126
第 4 章 线性控制系统的频域分析	76	5.1.1 校正方式	126
4.1 频率特性	76	5.1.2 校正目标	127
4.1.1 频率响应	76	5.1.3 校正的基本思路	127
4.1.2 Fourier 变换和广义频率特性	78	5.1.4 性能指标	127
4.2 频率特性曲线	79	5.2 环路整形	128
4.2.1 典型环节的频率特性曲线	79	5.3 串联校正	131
4.2.2 开环系统的频率特性曲线	84	5.3.1 串联超前校正	132
4.3 系统稳定性的环路分析	85	5.3.2 串联滞后校正	136
4.3.1 环路分析	85	5.3.3 串联滞后-超前校正	142
4.3.2 相对稳定性与稳定裕度	87	5.4 复合校正	152
4.4 Nyquist 稳定性判据及其应用	89	5.5 局部反馈校正	157
4.4.1 幅角原理	89	5.6 控制系统的动态性能约束	159
4.4.2 Nyquist 稳定性判据	91	5.6.1 过程输入信号幅值与模型摄动边界	159
4.4.3 Nyquist 稳定性判据的应用	94	5.6.2 非最小相位系统的性能约束	162
4.4.4 模型扰动的稳定鲁棒性	96	5.6.3 非最小相位系统的稳定补偿器的存在条件	165
4.5 Bode 图及其应用	97		
4.5.1 Bode 图的概念	97		
4.5.2 典型环节的 Bode 图	99		
4.5.3 复杂系统开环 Bode 图的渐近线描图法	103		
4.5.4 对数稳定判据	105		

5.7 极点配置设计	166	第7章 离散控制系统的基本理论	203
5.8 小结	173	7.1 引言	203
5.9 习题	173	7.2 信号的采样与保持	204
第6章 非线性控制系统分析	175	7.2.1 采样过程	204
6.1 非线性控制系统概述	175	7.2.2 理想采样信号的数学描述	205
6.1.1 控制系统中的典型非线性特性	175	7.2.3 采样定理及采样周期的选取	207
6.1.2 非线性控制系统的特殊性	177	7.2.4 信号的保持	210
6.1.3 非线性控制系统的分析方法	178	7.3 z 变换理论	212
6.2 相平面法	178	7.3.1 z 变换定义	212
6.2.1 相平面的基本概念	178	7.3.2 z 变换的基本定理	213
6.2.2 绘制相平面图的等倾线法	181	7.3.3 z 变换的求法	217
6.2.3 二阶线性系统的奇点和相轨迹	182	7.3.4 z 反变换及其求法	219
6.2.4 非线性系统的相平面分析	184	7.4 离散控制系统的数学描述	222
6.2.5 相平面法分析小结	187	7.4.1 差分方程与离散传递函数	222
6.3 描述函数法	188	7.4.2 脉冲传递函数	225
6.3.1 描述函数的基本内容	188	7.5 离散控制系统的分析	228
6.3.2 典型非线性特性的描述函数	190	7.5.1 s 域到 z 域的映射	228
6.3.3 非线性特性的合并	193	7.5.2 离散控制系统的响应	228
6.3.4 用描述函数法分析非线性系统	194	7.5.3 离散控制系统的稳定性判据	229
6.4 改善非线性系统性能的措施及运用非线性特性	198	7.5.4 离散控制系统的暂态响应	231
6.4.1 改善非线性系统性能的措施	198	7.5.5 离散控制系统的稳态误差	232
6.4.2 运用非线性特性	199	7.6 线性离散控制系统的校正	234
6.5 小结	200	7.6.1 最少拍控制	234
6.6 习题	200	7.6.2 有限拍控制	236
		7.6.3 离散 PID 控制	236
		7.7 小结	237
		7.8 习题	238
		参考文献	240

第1章 绪 论

1.1 引言

自动控制是人类的一项极其重要的智慧与工程成就。在我们的日常生活中，随处可见自动控制的例子，如家用电冰箱和空调器的温控器、全自动洗衣机的控制器，这些自动控制装置的普及使用极大地提高了人们的生活品质。但自动控制更重要的应用是在工程领域，在那里已成为不可缺少的关键技术，如飞机和卫星的导航与控制、汽车电子控制、化工生产过程控制、Internet 流量控制、电力系统的稳定控制等。

1.2 自动控制理论的建立和发展

自动控制的方法可以追溯到久远的古代，但人们普遍认为，自动控制技术的第一项重大成果是 J. Watt 的离心调速器。早在 1769 年，Watt 就发明了蒸汽机，但由于最初的蒸汽机的转速受负荷变化的影响很大，工作效率极低，应用并不广泛。Watt 于 1788 年对蒸汽机进行改良，设计出具有反馈控制功能的离心调速器，解决了蒸汽机的速度控制问题，极大地提高了蒸汽机的工作效率，并促使以蒸汽机为动力的工业革命迅速发展。在此后很长一段时间内，由于没有科学理论指导，蒸汽机自动调速系统的设计纯粹是一门手艺，完全凭借工程师的直觉和经验。

1868 年，英国物理学家 J. C. Maxwell 为离心调速系统建立了线性常微分方程（Ordinary Differential Equations, ODEs）模型，指出系统的稳定性取决于 ODEs 特征方程的根是否具有负实部，并采用特征方程的系数建立三阶线性系统稳定性条件，解释了蒸汽机离心调速系统中出现的不稳定现象，开创了控制理论研究的先河。英国数学家 E. J. Routh 和瑞士数学家 A. Hurwitz 把 Maxwell 的结果加以推广，分别在 1877 年和 1894 年独立地建立了判定高阶系统稳定性的代数准则。20 世纪初期，ODEs 模型及稳定性代数准则普遍被机械工程师接受和应用，成为经典控制理论中时域法的基础。

20 世纪 30 年代，应用于电信系统的电子放大器往往包含数十个以上的微分方程，难以直接获得系统的 ODEs 模型。针对这些技术难题，电信学家另辟蹊径，注重系统外部变量（输入信号和输出信号）的行为特性，而不深究系统的内部结构和内部变量的特性，采用了“黑箱”模型，并把 Laplace 变换和 Fourier 变换广泛应用于线性时不变（Linear Time Invariant, LTI）系统的研究。

为克服长距离电话信号传输中继放大器的失真和消噪问题，Bell 实验室的工程师 H. S. Black 于 1927 年提出了将放大器输出信号经倒相变换后回送到输入端的负反馈电路原理，使放大器的许多性能得以改善，但负反馈放大电路极易发生自激振荡。为有效地解决反馈电子放大器的稳定分析与设计问题，1932 年，Bell 实验室的物理学家 H. Nyquist 运用复变函数的

幅角原理, 依据开环系统的幅相频率特性建立了反馈系统的频域稳定性准则, 使反馈放大器的设计迅速实用化。Nyquist 稳定性判据的重要性在于, 它指明了如何调整系统参数以改进系统的稳定性, 为利用低性能电子器件构造高性能电子系统提供了技术途径。

第二次世界大战期间, Bell 实验室的科学家 H. W. Bode 领导了美国火炮控制研究小组的工作, 进一步将频域方法加以发展, 使用对数频率特性图和稳定裕度定量地估算闭环系统的性能, 奠定了现代形式的频域控制基础。与此同时, 美国麻省理工学院 (MIT) 学者把传递函数、方框图和频域响应等重要概念应用于伺服机构和雷达天线控制系统的分析设计, 并取得极大成功。此外, 频域法还被拓展应用于非线性系统、采样系统以及平稳随机控制系统的研究, 促使了自动控制许多新见解和方法的产生。

1948 年, MIT 的数学家 N. Wiener 的专著《Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine》出版, 该专著把反馈确立为普遍性的科学概念, 标志着控制作为一门独立学科的正式诞生。同年, 美国学者 W. R. Evans 提出闭环系统特征根在 s 平面分布的根轨迹 (Root Locus) 法, 为分析系统性能随系统参数变化规律性提供了有力工具, 由此重新唤起控制界对时域法的重视。20 世纪 50 年代早期, 根轨迹法的极大成功引起人们了对系统时域响应法研究的热情。

至 20 世纪 50 年代中期, 已有多本经典控制科学名著相继出版, 包括 Ed. S. Smith 的《Automatic Control Engineering》(1942), H. W. Bode 的《Network Analysis and Feedback Amplifier》(1945), H.M.Jame, N.B. Nichols 和 R.S. Phillips 的《Theory of Servomechanisms》(1947), 以及钱学森的《Engineering Cybernetics》(1954)。至此, 以 LTI 系统为研究对象, 以输入/输出模型为工具, 以 Routh 判据和根轨迹 (时域法)、Nyquist 图和 Bode 图 (频域法) 为主要分析和设计方法的经典控制理论构建完毕, 为指导控制工程实践发挥了极大的作用。时至 21 世纪的今天, 经典控制理论在控制工程中应用仍然十分广泛, 也是所有控制课程的基础。

20 世纪 50 年代末期, 由于数字计算机的出现及空间技术发展的需求, 以时域法为主的多变量控制理论的研究得以迅猛发展, 重要的成就包括: 1957 年美国数学家 R. Bellman 提出的动态规划 (Dynamic Programming); 1958 年前苏联数学家 L.S. Pontryagin 提出的求解控制受约束的极大值原理 (Maximum Principle); 1960 年美籍匈牙利科学家 R. E. Kalman 引入的状态空间描述模型、能控性、能观测性、最佳滤波、Lyapunov 稳定性等概念和方法。这些工作奠定了现代控制理论的基础。现代控制理论基于系统状态方程模型 (内部描述), 利用计算机作为系统建模、分析和控制设计手段, 在航空、航天系统的制导与控制中取得辉煌的成就。

1967 年, 瑞典学者 K. J. Astrom 提出在线最小二乘辨识算法, 解决了 LTI 系统参数估计和定阶问题, 6 年后, 他又提出了自校正调节器, 将现代控制理论和方法成功地应用于工业生产过程。1976 年, 美国学者 R. Brockett 提出用微分几何研究非线性控制系统的方法, 经过意大利学者 A. Isidori 等人的完善和发展, 至 20 世纪 80 年代中期, 建立了较为完整的非线性控制理论体系。至此, 以多变量、非线性、时变和随机系统为研究对象, 以状态空间法为主要分析和设计工具的现代控制理论基本构建完毕。

1979 年, 加拿大学者 G. Zames 从早期的频域控制理论中借鉴了一些关键思想, 基于严格的现代数学理论, 提出求解最佳扰动抑制问题的频域 H^∞ 优化控制理论, 显式地求解干扰和系统不确定性的控制问题, 控制理论步入了鲁棒控制的发展阶段, 为解决现代控制理论应用中

被控对象精确模型不易建立、合适的最优性能指标难以构造、所得最优控制器过于复杂等问题开辟了新的途径。此后，经过众多学者的努力，又相继建立了时域线性鲁棒控制和非线性鲁棒控制理论。

20 世纪 70 年代中期以来，基于模糊逻辑（源于控制科学家 L. Zadeh 在 1965 年提出的模糊数学理论）、神经网络模型和遗传优化算法等智能控制方法也得到充分的研究，并取得成效。1983 年，哈佛大学的华裔学者 Y.C Ho 等还提出离散事件系统控制理论。

在信息日益丰富的今天，控制理论又有新的发展，重要的进展有网络化控制、量子控制。未来的自动控制理论将在重要的发展领域，如航空与航天、信息与网络、机器人与智能机器、生物技术与医学工程、纳米材料制备与加工、交通运输、环境保护等工程领域，以及社会、经济管理等非工程领域得到广泛应用。

1.3 自动控制系统的基本概念

1.3.1 自动控制问题

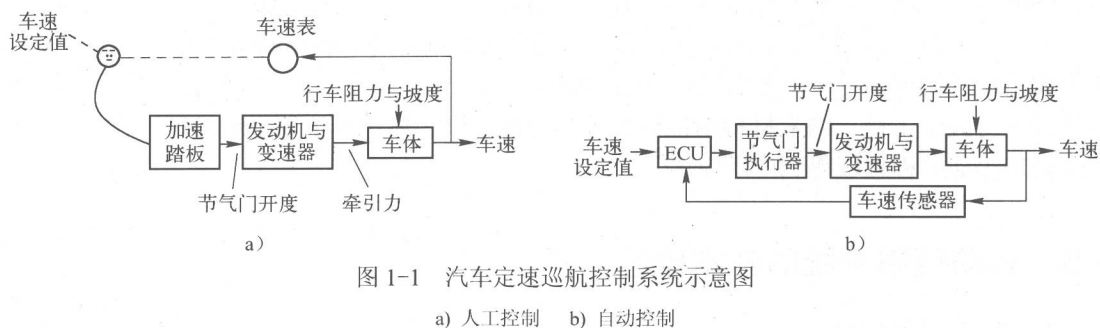
在许多过程或设备运行中，为了保证正常的工作条件，往往需要对某些物理量（如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等）进行控制，使其尽量维持在某个数值附近，或使其按一定规律变化。要满足这种需要，就应该对设备进行及时的操作，以抵消外界干扰和设备内部参数变化的影响，这种操作通常称为控制，用人工操作称为人工控制，用自动装置来完成称为自动控制。

图 1-1a 是驾驶员人工控制车速保持恒定的过程。车速是被控制的物理量，简称被控量。汽车是控制的对象，简称被控对象。当发动机输出转矩与行车阻力相等时，它处于匀速状态。当车辆上坡时，受重力的影响，车速下降，坡度变化等效为负载扰动。驾驶员用眼看车速情况，用脑比较实际车速与期望车速的差异，并根据经验做出决策，用脚操作加速踏板调整节气门开度，改变发动机的输出功率和转速。只要车速偏离了期望值，驾驶员便要重复上述踏下或松抬加速踏板，调整车速，这是驾驶员参与其中的车速控制过程。

图 1-1b 是汽车定速巡航控制系统（Cruise Control System）的车速自动控制的示意图。图中车速传感器代替人的眼睛，用来检测汽车的行驶速度；另用电子控制单元（Electronic Control Unit, ECU）和节气门执行器代替人的大脑和脚的功能，用来进行比较、计算误差并实施控制。电子控制单元将实际车速与设定车速进行比较，当实际车速高于设定车速时，节气门执行器将节气门适当关闭；当实际车速低于设定车速时，节气门执行器将节气门适当开启，从而使车速保持恒定。整个过程中无须驾驶员直接参与，车速的控制过程是自动进行的。当汽车在高速公路上长时间行驶时，打开定速巡航控制系统的自动操纵开关后，无论是上坡、下坡，还是行车阻力的变化，巡航控制系统都将自动增减节气门开度，无须驾驶员踩加速踏板，可保证汽车以预先设定的速度行驶，驾驶员只要把住转向盘就可以了，从而大大减轻了驾驶员的疲劳强度，改善了汽车燃料经济性和发动机的排放性能，同时还能提高行车的安全性。

由此可见，自动控制和人工控制极为相似，两者都利用期望的车速与实际车速信号相比较，利用两者的偏差来进行控制，使产生的偏差越来越小，这种控制方法称为负反馈控制。自动控制系统只不过是把某些装置有机地组合在一起，以代替人的职能而已。图 1-1 中的车

速传感器相当于人的眼睛，对行车速度进行测量；电子控制单元的功能类似于大脑，完成比较运算，给出偏差的大小和极性；节气门执行器的功能相当于人的脚，调节节气门开度，对车速实施控制。这些装置相互配合，承担着控制的职能，通常称为控制器。任何一种控制器，主要组成都可分为信号测量单元、电子控制单元和执行单元 3 部分，被控对象和控制器组成完整的控制系统。



1.3.2 控制系统的基本术语

在研究控制理论和控制技术时，常遇到如下一些专用术语。

被控量和控制量 (Controlled Variable and Controlling Variable)：被控量是指被测量和被控制的量，如车速。控制量是一种由控制器改变的量，它将影响被控量的值，如节气门开度。被控量通常称为系统的输出量，而控制量则是被控制系统的输入量。

对象 (Plant)：在工程中，对象一般是一个设备，通常由一些机器零件有机地组合在一起，以完成一个特定的任务。通常将被控物体称为对象，如汽车发动机、加热炉、精馏塔、机床、电梯。

过程 (Process)：通常将任何被控制的运行状态称为过程，如化学过程、经济学过程、生物学过程。在控制理论中，“对象”与“过程”经常被等同地使用。

系统 (System)：系统是指由相互关联、相互制约、相互影响的若干个组成部分结合而成的具有某种功能的有机整体。

控制 (Control)：控制是指为了改善系统的性能或达到特定的目的，通过信息的采集和加工而施加到系统的作用。

参考值 (Reference)：参考值用于指定被控量随时间的变化规律，也称为指令值或设定值。

扰动 (Disturbance)：扰动是指一种对系统的输出产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统内部，则称为内扰，如半导体元件由于温漂所致的参数变化和热噪声；如果扰动产生在系统外部，则称为外扰，如汽车行驶过程中的上坡、下坡和风速引起行车阻力的变化。外扰也是系统的一种输入量。

信息 (Information)：信息是指信号或消息所包含的内容，用来消除扰动引起系统的不确定性，如误差信号或输出量中的噪声信号。

反馈 (Feedback)：反馈是指将两个（或两个以上）系统互联，使系统 1 影响系统 2，系统 2 影响系统 1 的作用过程，整体上系统输出信号对控制作用有直接影响，形成闭环系统，如图 1-2 所示。

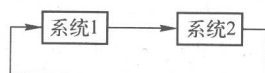


图 1-2 闭环系统示意图

反馈控制 (Feedback Control)：反馈控制能够在存在扰动的情况下，力图减小系统的输出量与参考值之间的偏差，而且其工作正是基于这一偏差及其函数的基础之上。

反馈控制系统 (Feedback Control System)：反馈控制系统对控制结果进行检测，对输出量与参考输入量进行比较，并力图保持两者之间的既定关系的系统，它利用输出量与输入量的偏差来进行控制。若反馈的信号与输入信号相减，使产生的偏差越来越小，则称为负反馈或非再生反馈；反之，则称为正反馈或再生 (Regeneration) 反馈，本书着重研究负反馈。

调节 (Regulation)：调节是指通过反馈信号自动校正系统的误差，使诸如速度、压力、温度、流量等变量保持恒定或在给定范围之内过程。

开环控制 (Open-Loop Control)：系统的输出量与输入量之间不存在反馈的通道，这种控制方式称为开环控制系统，如图 1-3 所示。开环控制系统的控制方式比较简单，系统只根据指令信号对被控量进行控制，而控制结果对其控制过程没有影响。

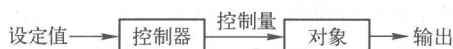


图 1-3 开环控制系统示意图

前馈控制 (Feedforward Control)：前馈控制将预知的或可测的扰动施加于系统的输入端，对控制量的大小进行补偿。由于控制没有形成闭环，所以是一种开环控制。在实际工程中，常常在反馈控制的基础上使用前馈控制，构成复合控制系统。

1.3.3 自动控制系统的构成和要素

一个自动控制系统主要由以下 3 个基本单元构成。

1. 测量单元

测量单元 (Sensing Unit)是指各种传感器，用于检测被控量的大小，如速度传感器、电流传感器、流量传感器、压力传感器、位置传感器、温度传感器等，给出系统的反馈信号。

2. 控制单元

控制单元 (Control Unit)提供参考指令，接受传感器的反馈信号，计算给定值与被控量之间的误差，进行存储、计算和分析处理后向执行器发出指令，完成系统控制功能，即完成如图 1-4 所示的比较和算法的功能。目前，一般采用嵌入式数字控制器构成控制单元，如汽车上的电子控制单元 (Electronic Control Unit, ECU)。

在图 1-4 中，“ $\otimes$ ”表示比较运算（综合单元），“-”代表减运算，“+”代表加运算（“+”也可以不标出）。信号沿箭头方向从输入端到达输出端的传输通路称为前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称为反馈通路。前向通路与反馈通路共同构成环路。

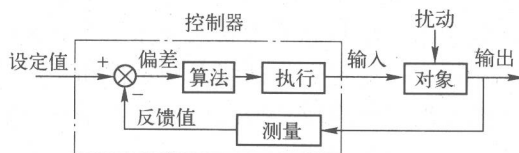


图 1-4 自动控制系统构成示意图

3. 执行器

执行器 (Actuator) 对控制命令进行功率放大, 推动被控对象, 如电磁阀、节气门控制电动机、液压缸、气压缸。

反馈是自动控制系统的要素, 扰动引起系统的不确定性是采用反馈控制系统的主要原因之一。自动控制理论把反馈看做是处理不确定性的工具。即使不知道系统准确的工作状态, 或者外部干扰使系统偏离正常的工作状态, 通过测量系统的输出量与参考量相比较, 调整可用的控制变量, 就能够使系统恢复到正常的工作状态。

测量、计算和执行构成的反馈环路是自动控制的基本结构。控制器通过参考输入值和系统输出值计算出校正值, 并作用于被控系统使其产生期望的变化。控制的关键是采用反馈方法消除或减少系统的不确定性, 不确定性包括传感器的测量噪声、系统负载扰动及系统本身的不确定性 (参数变化、模型简化引起的误差)。

反馈控制可以使互联系统的整体性能高于子系统, 当系统存在不确定性时, 反馈控制将提供高性能、高可靠以及可重复的工作状态。例如, 电子系统利用反馈机制补偿元件或参数的变化。

1.3.4 开环控制与反馈控制的特点

反馈控制具有修正偏差的能力, 可以克服参数变化和负载扰动、测量噪声的影响, 提高系统的动态响应速度、使非线性环节线性化、使不稳定的系统变成为稳定系统等。但反馈控制使控制系统结构及其分析和设计复杂化, 可能出现系统稳定性降低、执行器饱和、测量噪声在环路中传播等不利情形。相比之下, 开环控制则不会改变系统的稳定性, 控制结构简单、系统调整方便、成本低, 但开环控制没有修正偏差的能力, 它的抗扰动性能较差。

充分利用开环控制和闭环控制的优点的典范是 TCP/IP 协议。Internet 能连接各种各样的计算机, 它使用了 IP 和 TCP 两种控制机制。其中, IP (Internet Protocol) 负责传送路径的建立, 并将传输的信息切成小段信息, 打包为数据包 (Packet), 然后在网络中传出, 各数据包可选择不同的路径到达接收端, 到达接收端后再重组起来, 实现数据通信的低成本化。TCP (Transmission Control Protocol) 具有流量控制能力, 依照对方回应已收到几个数据包后再送出新的数据包, 以保证传输的数据包个数不超过一定的数目, 在接收端发现数据有误时, 也可要求重新传送。IP 采用了开环控制和非连接式的传送方式, 无法将传送网络产生的异常状况回报, 因此, 并不能保证正确无误的数据传送每次都成功; TCP 则采用了反馈控制和连接式的传输机制, 用于实现数据传输的稳定性和可靠性, 保证数据包正确送达目的地。

1.3.5 对控制系统的要求

控制理论把系统满足物理约束条件下的负载扰动抑制、测量噪声衰减、指令跟踪、系统结构及参数变化的不确定性问题, 归结为求解反馈系统的稳定性、快速性、准确性和鲁棒性。

稳定性是受扰系统偏离期望的工作状态后重新恢复原工作能力的能力。不稳定的系统是无法使用的, 其他性能也无从谈起。稳定性包括绝对稳定性和相对稳定性, 前者表明系统是否稳定, 后者表明系统稳定的程度。使用反馈控制可以改善系统的稳定性, 但如果反馈控制使用不当, 也可能引起系统振荡和设备损坏。

快速性是对系统动态性能的要求。它使系统尽快进入稳态, 要求系统运动到新的平衡状

态所需要的时间较短。使用反馈控制可以提高控制系统的快速性,但受执行器饱和(功率限制)与延时(系统惯性)的影响,实际系统的快速性是受限的。

准确性是对系统稳态性能的要求。对一个稳定的系统而言,暂态过程结束后,系统输出量的实际值与期望值的差称为稳态误差,它是衡量系统指令跟踪精度、负载扰动抑制和测量噪声衰减性能的重要指标。稳态误差越小,表示系统的准确性越好,控制精度越高。使用反馈控制可以提高控制系统的准确性。但受传感器精度的影响,实际系统的控制精度也是受限的。

鲁棒性(Robustness)是指系统参数或结构发生变化后,系统原来所具有的性能品质可以保持的特性。如果是保持系统的稳定性,则称为稳定鲁棒性;如果是保持系统的控制性能品质,则称为性能鲁棒性。使用反馈控制可以改善控制系统的鲁棒性。

在许多情况下,对鲁棒性的要求与对稳定性、快速性和准确性的要求是一致的。

1.3.6 控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的,用不同的标准划分,就有不同的分类方法。常见的分类有:按被控量的给定值是否随时间变化,可分为定值调节系统和随动系统;按系统输入/输出关系是否满足叠加原理(叠加性和齐次性),可分为线性系统 and 非线性系统;按系统参数是否随时间变化,可分为时不变系统和时变系统;按系统的运动性质,可分为连续时间系统、离散时间系统、离散事件系统和混合系统;按输入信号和输出信号的数目,可分为单输入/单输出(Single Input Single Output, SISO)系统和多输入/多输出(Multi Input Multi Output, MIMO)系统;按系统信号是否具有统计特性,可分为确定性系统和随机系统;按系统是否依赖于空间分布特性,可分为集总参数系统和分布参数系统,等等。

1.4 自动控制理论的基本概念及主要内容

控制是一门工程科学,与自然科学不同,工程科学的目的在于理解和发展造福人类的新系统,如交通系统和通信系统。工程科学的重要成果是发现了能够作为分析和设计复杂系统的反馈控制理论,它对工程系统产生了深远的影响。

自动控制理论提供了分析和设计控制系统的原理、方法和工具,使这些系统可以自动地适应环境的变化,并保持期望的性能。控制理论有4个重要概念:动态、模型、互联和不确定性,这4个概念是系统分析和设计的关键。

动态是所有控制系统重要的特性。实际系统一般都具有惯性,即系统的输出量总是滞后于输入量的变化,当输入量发生变化时,输出量从原工作状态变化到新的工作状态要经历一定时间,称这样的输入和输出为因果关系。在变化输入量的作用下,系统的输出变量由初始状态达到最终稳态的变化过程称为动态过程。动态过程结束后的输出响应称为稳态响应。

模型是动态系统分析与设计的基础,与此同时,控制理论为系统建模提供了新的途径,如实验建模技术。面向控制的建模和其他学科的建模的主要区别在于系统间相互作用的表示方式不同。依据独特的输入/输出建模方法,控制理论以新的角度考察系统行为,如干扰抑制、模型降阶、系统的鲁棒连接。

互联概念普遍应用于控制理论。若已知实际系统的模型,直接求解十分烦琐或不得要领。控制理论采用的方法是将系统分解为若干个典型的基本单元,如果熟知各单元性能,将它们组合构成复杂系统,求解过程将得以简化,而且获得构造良好系统的方法。这种将复杂系统分解成简单系统,然后相互连接起来就比较容易计算。利用系统分解与互联的概念,不但简化了系统分析,而且也有助于从系统分析过渡到系统设计。系统的特性不仅取决于各基本单元的动态,也与这些单元间的互联结构密切相关。反馈系统的研究是利用分解与互联概念而获得成功的典型范例。

不确定性是控制理论的最显著特征。基于反馈原理,控制理论为解决系统的不确定性问题提供了基本方法。当存在干扰和参数不确定性因素时,应用传统动力学和动态系统理论是难以解决的。控制理论分析动态系统是否可以到达新的或恢复原来的工作状态,以及改变系统动态过程的方法。通过反馈可以改变系统的动态过程,使不稳定的系统变得稳定,使响应迟缓的系统加快响应速度,使工作点漂移的系统保持恒定的性能。

本课程论述反馈控制及其改变系统动态和处理不确定性的方法,内容为动态系统的输入/输出建模、互联和不确定性分析,重点是系统的稳定性、快速性、准确性和鲁棒性,以及为改善系统性能的设计(校正)方法,所使用的基本工具是线性时不变系统的相关概念与理论,包括传递函数、阶跃响应、频率特性和灵敏度函数等。

1.5 小结

测量、计算和执行构成反馈环路,是自动控制的基本结构。

反馈是处理不确定性的工具。控制理论把求解系统的不确定性问题,归结为求解反馈系统的稳定性、快速性、准确性和鲁棒性。

控制理论是围绕动态、模型、互联和不确定性这4个重要概念展开的。

1.6 习题

- 1-1 简述自动控制的发展。
- 1-2 简述开环控制系统和闭环控制系统的特点。
- 1-3 试列举几个日常生活中的自动控制装置及其工作原理。
- 1-4 简述控制系统的不确定性因素。
- 1-5 简述自动控制系统的组成。

第2章 动态系统模型

2.1 引言

科学的每一个分支都有自己的一套“模型”理论，在模型的基础上可以运用数学工具进行研究。为了便于对动态系统进行分析，同样需要建立动态系统的模型。所谓模型，是指系统物理特性的数学抽象，以数学表达式或具有理想特性的符号组合图形来表征系统特性。对于不同的物理系统，经过抽象和近似，可以得到形式上完全相同的数学模型，这为不同领域的系统提供了统一的分析与设计方法。在控制工程中，一般基于物理概念，将系统分解为若干典型的基本环节，然后将它们互联组合成复杂系统，以简化分析过程。分解与互联的概念使人们容易理解反馈系统的本质，也有助于从系统分析过渡到系统设计。

在本书的论述中，采用的是输入/输出描述方法，即着眼于系统外部输入与输出的行为特性，并不关心系统内部变量的情况。许多系统可以抽象或近似为确定性、集总线性时不变（Linear Time Invariant, LTI）系统。本章论述连续时间 LTI 系统模型，包括微分方程、传递函数，以及描述系统互联关系的结构图和信号流程图。

2.2 系统的时域模型

2.2.1 常微分方程模型

一个函数的导数描述了因变量对自变量的变化率。含有一个未知函数及其一阶或更多阶导数的方程，叫微分方程。在自然过程中，有关变量及其变化率之间，根据制约该过程的一些基本原理之间是彼此有联系的，这些联系用数学语言表达出来，往往都是微分方程。微分方程源于力学领域。Newton 基于万有引力和力学第二定律（作用力等于质量乘以加速度），对天体的运行轨道呈椭圆形的现象进行了解释，在此过程中，还发明了微积分和微分方程。

对于集总参数系统，只含一个自变量——时间 t ，系统的描述模型为常微分方程（Ordinary Differential Equations, ODE）。在给定外作用及初始条件下，求解 ODE 可以得到系统输出随时间的变化过程，即输出响应。在对系统运行机理清楚，且系统所含的元部件数不多的情况下，可以应用解析法建立系统的 ODE 模型。

下面举例说明建立系统 ODE 模型的步骤和方法。

【例 2-1】 电阻 R 、电感 L 、电容 C 为常数的无源网络，如图 2-1 所示。求描述输入电压 u_i 与输出电压 u_o 之间的微分方程。

解 根据 Kirchhoff 电压定律可写出

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (2-1)$$

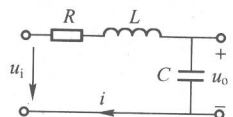


图 2-1 R-L-C 无源网络