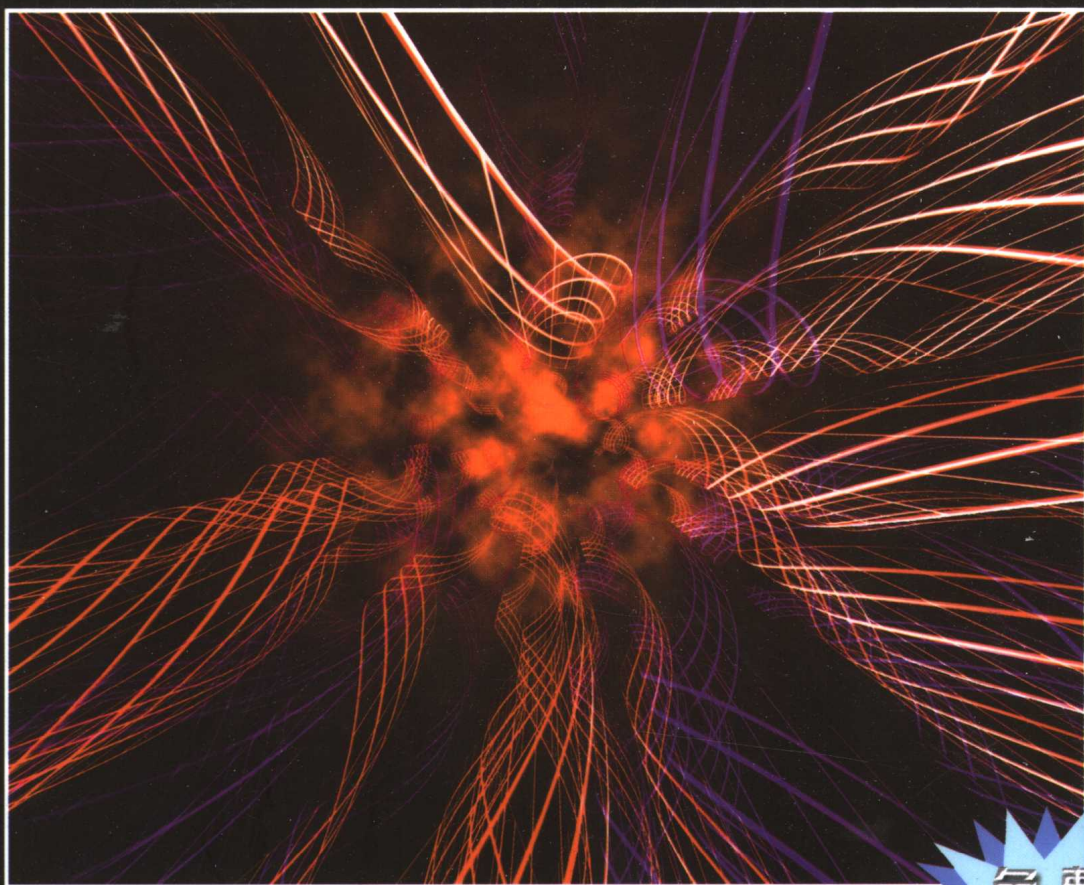




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代控制理论基础

李先允 主编



免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代控制理论基础

主 编 李先允
副主编 杨志超 陈 刚
参 编 陈黎来 郝思鹏
主 审 王恩荣 赵 涛



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书系统地介绍了现代控制理论的基础知识。全书共分6章。第1章介绍了控制理论的发展以及现代控制理论的主要内容；第2章介绍了控制系统的状态、状态空间和状态空间模型等基本概念，以及建立状态空间模型的方法；第3~5章分别讨论了控制系统状态空间模型的时域分析、能控能观测结构性分析和稳定性分析；第6章介绍了基于状态空间分析的系统综合，包括状态反馈与极点配置、系统镇定、系统解耦、状态观测器等内容。

全书结构合理、层次分明。通过本书的学习，读者能打下扎实的理论基础，并掌握控制系统分析与设计的技能。本书还专门讨论了应用 MATLAB 软件解决现代控制理论相关问题的方法。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化等相关专业的教材，也可作为经济管理类专业动态经济系统课程的教学参考书，还可供从事控制理论与控制工程研究、设计和应用的技术人员参考。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本教材的教师索取，电子邮箱：yu57sh@163.com。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代控制理论基础/李先允主编. —北京：机械工业出版社，2007.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-21832-6

I. 现… II. 李… III. 现代控制理论—高等学校—教材
IV. 0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 102874 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：于苏华 版式设计：冉晓华 责任校对：樊钟英
封面设计：张 静 责任印制：杨 曦
北京四季青印刷厂印刷 (三河市兴旺装订厂装订)
2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 19 印张 · 445 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-21832-6
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
销售服务热线电话：(010) 68326294
购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话：(010) 88379727
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是自动化、电气工程及其自动化专业教学计划中所列“现代控制理论”课程的教材。学习本课程的目的是使学生获得现代控制理论的基础知识，掌握控制系统的状态空间分析方法，熟悉控制系统综合与控制方法，并为后续课程的学习和实际运用打下扎实的基础。现代控制理论研究范围广、内容多，因为受学时和教材篇幅的限制，难以做到面面俱到。考虑到线性系统理论是现代控制理论的基础，全书覆盖了线性系统理论最基本的分支，内容包括线性系统的状态空间表示与运动分析、线性系统的能控性与能观性分析、控制系统的李亚普诺夫稳定性分析、系统综合。

本书从工程应用出发，讲述了现代数学与控制理论的基本概念和方法，为读者进一步学习控制理论与控制工程设计及应用奠定了基础。本书编者多年从事控制理论系列课程的教学工作，潜心研究控制理论课程的教材内容和教学方法，积累了丰富的经验。在撰写过程中充分考虑了学习过程的教与学两个环节的特点，以增强教学过程的可操作性，在编写中强调状态空间控制理论与工程实践问题紧密结合，注重学生分析问题和解决问题能力的培养。本书具有如下特色：

(1) 结构清晰，便于学生从整体上掌握现代控制理论的基本方法。注重物理概念，避免繁琐的数学推导，突出现代控制理论的工程应用背景，便于指导学生运用理论解决实际问题。

(2) 充分利用 MATLAB 的图形化工具直观性强和符号计算工具揭示系统规律深刻的特点，在 MATLAB 平台上介绍控制系统仿真分析、设计问题的计算方法与软件开发。为不破坏控制理论知识的系统性和严谨性，编者将 MATLAB 相关内容放在各章的最后一节，既与本章内容相呼应，又自成体系。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，由南京工程学院李先允副教授担任主编，各章节编写分工如下：李先允编写第 1 章，郝思鹏编写第 2 章，陈刚编写第 3 章、第 4 章，陈黎来编写第 5 章，杨志超编写第 6 章。本书由李先允进行统稿和修改，由南京师范大学教授王恩荣博士和南京工程学院赵涛博士审稿，感谢他们对本教材的编写所提出的宝贵意见。本书可作





为自动化、电气工程及其自动化等专业本科生的教材，也可供相关领域的工程技术人员参考。

本书编写得到南京工程学院电力工程学院有关教师的大力支持和帮助。本书的编写参考了许多同行及前辈编写的专著和教材。在此一并表示衷心感谢。

鉴于时间仓促，水平有限，书中错漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 控制理论发展历史简介 1
- 1.2 现代控制理论的基本内容 3
- 1.3 现代控制理论与经典控制理论的对比 4
- 1.4 本书的内容和特点 5

第 2 章 控制系统的状态空间描述 7

- 2.1 引言 7
- 2.2 状态空间模型 8
 - 2.2.1 状态空间的基本概念 8
 - 2.2.2 系统的状态空间表达式的一般形式 10
 - 2.2.3 状态空间模型的图示 15
- 2.3 状态空间表达式的建立 17
 - 2.3.1 由系统的机理建立状态空间表达式 17
 - 2.3.2 由系统微分方程建立状态空间表达式 21
 - 2.3.3 由传递函数建立状态空间表达式 29
- 2.4 系统状态方程的线性变换 37
 - 2.4.1 系统状态的线性变换 37
 - 2.4.2 将状态方程变换为对角线标准型 39
 - 2.4.3 将状态方程变换为约当标准型 42
 - 2.4.4 线性变换的基本性质 44
- 2.5 由状态空间表达式求传递函数(阵) 45
 - 2.5.1 传递函数(阵) 45
 - 2.5.2 组合系统的传递函数矩阵 48
- 2.6 离散时间系统的状态空间表达式 50

2.7 利用 MATLAB 进行系统数学模型的

转换 54

2.7.1 系统的模型 54

2.7.2 系统模型的转换 54

小结 58

思考题与习题 58

第 3 章 线性控制系统的动态分析 60

- 3.1 引言 60
- 3.2 线性定常系统状态方程的求解 61
 - 3.2.1 线性定常系统齐次状态方程的解 61
 - 3.2.2 状态转移矩阵的性质及其计算方法 63
 - 3.2.3 线性定常系统非齐次状态方程的解 78
- 3.3 线性时变连续系统状态方程的求解 80
 - 3.3.1 线性时变连续系统齐次状态方程的解 80
 - 3.3.2 线性时变连续系统的状态转移矩阵 81
 - 3.3.3 线性时变连续系统非齐次状态方程的解 84
- 3.4 线性离散时间系统状态方程的求解 87
 - 3.4.1 线性连续系统状态方程的离散化 88
 - 3.4.2 线性离散系统状态方程的解 92
- 3.5 MATLAB 在线性控制系统动态分析中的应用 97
 - 3.5.1 矩阵指数函数的计算 97
 - 3.5.2 基于状态空间模型的线性定常系统时域响应分析 100
 - 3.5.3 连续系统的离散化 102
- 小结 103





思考题与习题	104	4.9 系统的实现问题	164
第4章 线性系统的能控性和能观测性	106	4.9.1 定义和基本特性	164
4.1 引言	106	4.9.2 能控标准实现和能观测标准实现	165
4.2 线性连续系统的能控性	107	4.9.3 最小实现	168
4.2.1 能控性的直观讨论	107	4.10 MATLAB 在能控性和能观测性分析中的应用	171
4.2.2 状态能控性的定义	109	4.10.1 系统能控性、能观测性分析的 MATLAB 函数	171
4.2.3 线性定常连续系统的状态能控性判别	110	4.10.2 用 MATLAB 进行系统能控性和能观测性分析举例	172
4.2.4 线性定常连续系统的输出能控性	118	小结	174
4.2.5 线性时变连续系统的状态能控性	119	思考题与习题	175
4.3 线性连续系统的能观测性	122	第5章 控制系统的稳定性分析	178
4.3.1 能观测性的直观讨论	122	5.1 引言	178
4.3.2 状态能观测性的定义	124	5.2 李亚普诺夫稳定性的基本概念	179
4.3.3 线性定常连续系统的状态能观测性判据	126	5.2.1 平衡状态	180
4.3.4 线性时变连续系统的状态能观测性	133	5.2.2 范数和球域	181
4.4 线性定常离散系统的能控性和能观测性	134	5.2.3 李亚普诺夫稳定性定义	181
4.4.1 线性定常离散系统的状态能控性与能达性	135	5.3 李亚普诺夫稳定性定理	183
4.4.2 线性定常离散系统的能观测性	139	5.3.1 李亚普诺夫第一法	183
4.4.3 离散化线性定常系统的状态能控性和能观测性	141	5.3.2 预备知识	184
4.5 能控标准型和能观测标准型	142	5.3.3 李亚普诺夫第二法	187
4.5.1 能控标准型	143	5.4 线性系统李亚普诺夫稳定性分析	192
4.5.2 能观测标准型	146	5.4.1 线性定常连续系统的稳定性分析	192
4.6 系统能控性和能观测性的对偶原理	149	5.4.2 线性时变连续系统的稳定性分析	196
4.7 线性系统的结构性分解	151	5.4.3 线性离散系统的稳定性分析	197
4.7.1 能控性分解	151	5.5 非线性系统李亚普诺夫稳定性分析	200
4.7.2 能观测性分解	155	5.5.1 克拉索夫斯基法	201
4.7.3 能控能观测分解	158	5.5.2 变量梯度法	202
4.8 能控性和能观测性与传递函数(阵)的关系	162	5.5.3 阿依捷尔曼法	205
4.8.1 单输入单输出系统	162	5.6 MATLAB 在系统稳定性分析中的应用	208
4.8.2 多输入多输出系统	163	5.6.1 线性定常连续系统的李亚普诺夫稳定性	208
		5.6.2 线性定常离散系统的李亚普诺夫稳定性	209
		小结	210





思考题与习题	210	6.5.1 前馈补偿器解耦	231
第 6 章 线性系统的综合	212	6.5.2 状态反馈解耦	233
6.1 引言	212	6.6 状态观测器	236
6.1.1 问题的提出	212	6.6.1 全维状态观测器及其设计 方法	237
6.1.2 性能指标的类型	213	6.6.2 降维状态观测器及其设计 方法	242
6.1.3 研究综合问题的主要内容	213	6.7 采用状态观测器的状态反馈 系统	246
6.1.4 工程实现中的一些理论问题	213	6.8 MATLAB 在极点配置及状态 观测器设计中的应用	248
6.2 状态反馈与输出反馈	214	6.8.1 用 MATLAB 实现极点配置	248
6.2.1 状态反馈	214	6.8.2 用 MATLAB 实现状态观测器 设计	250
6.2.2 输出反馈	215	6.8.3 用 MATLAB 实现带状态观测 器的闭环状态反馈系统	252
6.2.3 反馈控制对能控性与能观测性的 影响	216	小结	253
6.3 极点配置	218	思考题与习题	254
6.3.1 状态反馈极点配置定理	219	思考题与习题答案	256
6.3.2 系统状态反馈极点配置的 算法	222	参考文献	295
6.3.3 输出反馈极点配置	224		
6.4 系统镇定	225		
6.4.1 状态反馈镇定	226		
6.4.2 输出反馈镇定	228		
6.5 系统解耦	230		



绪 论

1.1 控制理论发展历史简介

自动控制思想及其实践可以说是历史悠久。它是人类在认识世界和改造世界的过程中产生的，并随着社会的发展和科学水平的进步而不断发展。早在公元前 300 年，古希腊就运用反馈控制原理设计了浮子调节器，并应用于水钟和油灯中。在图 1-1 所示的水钟原理图中，最上面的蓄水池提供水源，中间蓄水池浮动水塞保证恒定水位，以确保其流出的水滴速度均匀，从而保证最下面水池中带有指针的浮子均匀上升，并指示出时间信息。

同样早在 1000 多年前，我国古代先人也发明了铜壶滴漏计时器、指南车等控制装置。首次应用于工业的控制器是瓦特 (J. Watt) 于 1769 年发明的用来控制蒸汽机转速的飞球控制器，如图 1-2 所示。而前苏联则认为，1765 年珀尔朱诺夫 (I. Polzunov) 的浮子水位调节器最有历史意义。

1868 年以前，自动控制装置和系统的设计还处于直觉阶段，没有系统的理论指导，因此在控制系统的各项性能（如稳、准、快）的协调控制方面经常出现问题。19 世纪后半叶，许多科学家开始基于数学理论的控制理论的研究，对控制系统的性能改善产生了积极的影响。1868 年，麦克斯威尔 (J. C. Maxwell) 建立了飞球控制器的微分方程数学模型，并根据微分方程的解来分析系统的稳定性。1877 年，罗斯 (E. J. Routh) 提出了不直接求解系统微分方程根的稳定性判据。1895 年，赫尔维茨 (A. Hurwitz) 也独立提出了类似的霍尔维茨稳定性判据。

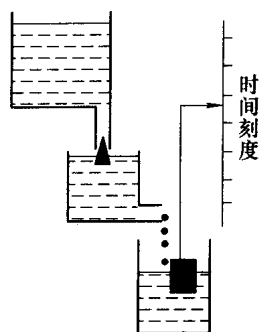


图 1-1 水钟原理图

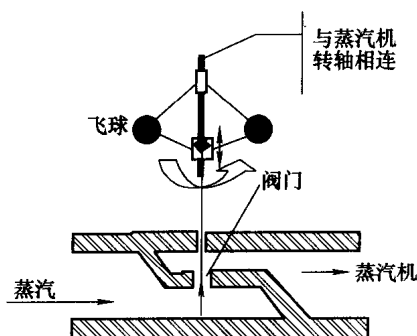


图 1-2 飞球控制器原理图

第二次世界大战前后，由于自动武器的需要，对控制理论的研究和实践提出了更大的要求，从而大大推动了控制理论的发展。1948年，数学家维纳（N. Wiener）的《控制论》（CYBERNETICS）一书的出版，标志着控制论的正式诞生。这个“关于在动物和机器中的控制和通信的科学”（维纳给出的经典定义）经过了半个多世纪不断发展，其研究内容及其研究方法都有了很大的变化。图 1-3 所示为控制理论的主要发展历史。

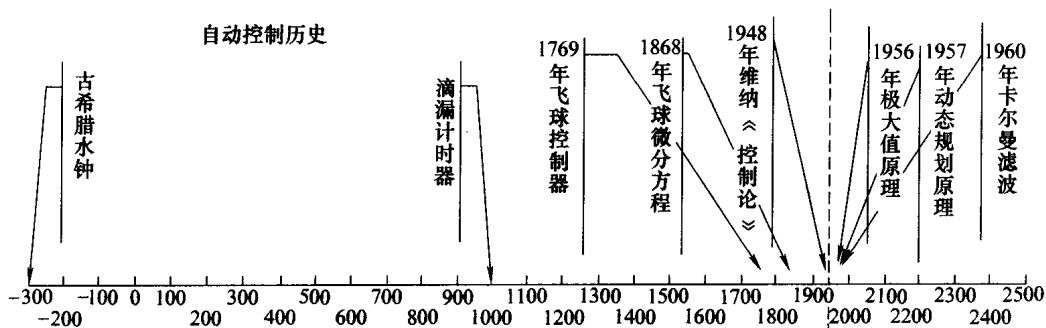


图 1-3 控制理论发展简史

概括地说，控制论发展经过了三个阶段：

第一阶段：20世纪40年代末~50年代的经典控制理论时期，着重研究单机自动化，解决单输入单输出（Single Input and Single Output, SISO）系统的控制问题；它的主要数学工具是微分方程、拉普拉斯变换和传递函数；主要研究方法是时域法、频域法和根轨迹法；主要问题是控制系统的快速性、稳定性及其精度。

第二阶段：20世纪60年代的现代控制理论时期，着重解决机组自动化和生物系统的多输入多输出（Multi-Input and Multi-Output, MIMO）系统的控制问题；主要数学工具是一次微分方程组、矩阵论、状态空间法等；主要方法是变分法、极大值原理、动态规划理论等；重点是最优控制、随机控制和自适应控制；核心控制装置是电子计算机。

第三阶段：20世纪70年代之后的大系统理论时期，着重解决生物系统、社会系统这样一些众多变量的大系统的综合自动化问题；方法是以时域法为主；重点是大系统多级递阶控制；核心装置是网络化的电子计算机。





从控制论的观点看,人是最巧妙、最灵活的控制系统。它善于根据条件的变化而做出正确的处理。如何将人的智能应用于实际的自动控制系统中,这是个有重要意义的问题。从20世纪70年代开始,人们不仅为解决社会、经济、管理、生态环境等系统问题,而且为解决模拟人脑功能,形成了新的学科——人工智能科学,这是控制论的发展前沿。计算机技术的发展为人工智能的发展提供了坚实的基础。人们通过计算机强大的信息处理能力来开发人工智能,并用它来模仿人脑。在没有人的干预下,人工智能系统能够进行自我调节、自我学习和自我组织,以适应外界环境的变化,并作出相应的决策和控制。

1.2 现代控制理论的基本内容

科学在发展,控制论也在不断发展。所以“现代”两个字加在“控制理论”前面,其含义会被人误解。实际上,我们讲的现代控制理论指的是20世纪50~60年代所产生的控制理论,主要包括:

(1) 系统辨识 基于动态系统在状态空间的数学模型进行分析和控制是现代控制理论的特点之一。因此,系统辨识和建模是现代控制理论重要的研究范畴之一。当系统较复杂时,解析法建模不再适用,而需采用实验研究的方法即系统辨识方法。在基于实验前的知识所提出的被辨识系统模型的类型中,根据在输入实验信号作用下对被辨识系统输出响应的观测,估计被辨识系统等价数学模型的结构参数和模型参数,并进行模型校验。其中,参数估计是系统辨识中最重要和发展最快的研究领域,已出现很多参数估计的计算方法,如基于脉冲响应的脉冲响应法、相关函数法、局部辨识法;基于最小二乘法的加权最小二乘法、递推最小二乘法、广义最小二乘法等;基于似然函数的极大似然法等。

(2) 线性系统理论 线性系统理论是现代控制理论中应用最广泛的独立分支,也是现代控制理论的基础。其采用状态空间法对线性动态系统进行定量分析(即确定在不同输入控制作用下系统状态的动态响应)和定性分析(即稳定性、能控性、能观测性分析),并采用状态反馈配置闭环极点的方法改善系统状态的动态响应。因此,线性系统理论主要包括动态系统的状态空间描述、状态方程的求解、能控性、能观测性和稳定性分析、状态反馈及状态观测器设计等内容。低阶线性定常系统的稳定性分析,既可采用李亚普诺夫稳定性判据的第一法(间接法),即求系统微分方程的解,根据解的性质判断系统稳定性;也可采用李亚普诺夫稳定性判据的第二法(直接法),即不求解系统微分方程,而是构造“李亚普诺夫函数”,并根据该标量函数的正定性及其导数的负定性直接判别系统稳定性。李亚普诺夫直接法提供了判别任何复杂系统稳定性的方法,在高阶线性定常系统、非线性系统、时变系统稳定性分析中有显著优势,应用广泛。

(3) 最优控制 最优控制是现代控制理论的核心。最优控制问题就是在多种约束条件下寻找使系统某个性能指标泛函取极值的控制规律,故其数学本质是求某泛函的条件极值问题,即变分问题。针对经典变分法只适用于求解无约束或容许控制属于开集的最优控制问题的局限,20世纪50年代,庞特里亚金提出“极小值原理”,发展了经典变分





原理，以处理容许控制属于闭集的最优控制问题。与此同时，贝尔曼为解决多级决策问题，提出“动态规划”。“极小值原理”和“动态规划”是研究最优控制问题最重要的两种方法。随着控制理论的发展，最优控制也有很大发展，如分布参数的最优控制、随机最优控制、大系统的最优控制等。

(4) 最优滤波(最佳估计) 最优控制规律是被控系统内部状态向量的函数，但由于被控系统和测量装置存在随机干扰和测量装置的限制，一般难以精确地测量出系统全部状态的信息。故基于已建立的系统数学模型，从夹杂着随机噪声的系统输入输出的量测数据中，采用统计方法，针对一定统计规则(如最小方差估计、极大似然估计、最小二乘估计等)求出系统状态的最优估计，即最优滤波是闭环系统最优控制工程实现的前提。基于最小方差准则的维纳滤波和卡尔曼滤波是得到广泛应用的两种最优线性滤波方法。20世纪40年代提出的维纳滤波方法开创了应用统计方法研究随机控制问题的新领域，但仅是对平稳随机过程最优滤波的方法；20世纪60年代提出的卡尔曼滤波理论克服了维纳滤波理论的局限性，适用于非平稳随机过程，已在通信、控制、导航及其他具有随机信号处理的很多领域得到广泛应用。对非线性系统，由于在理论上难以找到严格的递推滤波公式，目前一般采用非线性滤波线性化的近似方法(如连续型和离散型线性化卡尔曼滤波、推广的卡尔曼滤波)处理非线性滤波问题。

(5) 自适应控制 系统的不确定性(如被控对象参数未知或工作状态改变和环境变化引起系统参数改变)是对基于数学模型的传统控制的挑战，自适应控制正是为解决环境和被控对象参数有较大变化时系统仍能自动保持在接近某种意义下最优运行状态这一问题提出的。“自适应控制”基于在线辨识系统数学模型，将系统当前性能与最优性能比较，实时调整控制器的结构、参数，即修改最优控制规律，以保证系统适应环境和被控对象参数变化，保持最优性能。模型参考自适应控制系统和自校正控制系统是自适应控制系统的两种基本形式。目前，自适应控制理论仍在迅速发展之中，这反映了现代控制系统向智能化、精确化方向发展的总趋势。

1.3 现代控制理论与经典控制理论的对比

经典控制理论与现代控制理论是在自动化学科发展的历史中形成的两种不同的对控制系统分析、综合的方法。经典控制理论适用于单输入单输出(单变量)线性定常系统；现代控制理论适用于多输入多输出(多变量)、线性或非线性、定常或时变系统。现代控制理论与经典控制理论比较如表1-1所示。

经典控制理论本质上是(复)频域方法，以表达系统外部输入输出关系的传递函数为动态数学模型、根轨迹和博德图为主要工具，系统输出对特定输入响应的“稳”、“快”、“准”性能为研究重点，常借助图表分析设计系统。综合方法主要为输出反馈和期望频率特性校正(包括在主反馈回路内部的串联校正、反馈校正和在主反馈回路以外的前置校正、干扰补偿校正)，而校正装置由能实现典型控制规律的调节器(如PI、PD、PID)构成，所设计的系统能保证输出稳定，且具有满意的“稳”、“快”、“准”性能，但并非某种意义上的最优控制系统。





表 1-1 现代控制理论与经典控制理论比较

理论项目	经典控制理论	现代控制理论
对象	单输入单输出线性定常系统	线性与非线性、定常与时变、单变量与多变量、连续与离散系统
方法	频域法	时域矩阵法
数学工具	拉氏变换	矩阵与向量空间理论
数学模型	传递函数	状态方程与输出方程
基本内容	时域法、频域法、根轨迹法、描述函数法、相平面法、代数与几何稳定判据、校正网络设计、 z 变换法	线性系统基础理论（包括系统的数学模型、运动的分析、稳定性分析、能控性与能观测性、状态反馈与观测器）、系统辨识、最优控制、自适应控制、最佳滤波及鲁棒性控制
主要问题	稳定性问题	最优化问题
控制装置	无源与有源 RC 网络	数字计算机
着眼点	输出	状态
评价	具体情况具体分析，适宜处理较简单系统的控制问题	具有优越性，更适合处理复杂系统的控制问题

现代控制理论本质上是时域方法，以揭示系统内部状态与外部输入输出关系的状态空间表达式为动态数学模型、状态空间法为主要工具、在多种约束条件下寻找使系统某个性能指标泛函取极值的最优控制律为研究重点，借助计算机分析设计系统。综合方法主要为状态反馈、极点配置、各种综合目标的最优化。所设计的系统能运行在接近某种意义下的最优状态。

现代控制理论与经典控制理论虽然在方法和思路上显著不同，但这两种理论均基于描述动态系统的数学模型，是有内在联系的。经典控制理论以拉普拉斯变换为主要数学工具，采用传递函数这一描述动力学系统运动的外部模型；现代控制理论以矩阵论为主要数学工具，采用状态空间表达式这一描述动力学系统运动的内部模型，而描述动力学系统运动的微分方程则是联系传递函数和状态空间表达式的桥梁。

从某种意义上说，经典控制理论中的微分方程只能描述系统输入与输出的关系，却不能描述系统内部的结构及其状态变量，它描述的只是一个“黑箱”系统。而现代控制理论中的状态空间法不但能描述系统输入与输出的关系，而且还能完全描述内部的结构及其状态变量的关系，它描述的是一个“白箱”系统。由于能够描述更多的系统信息，所以可以实现更好的系统控制。

1.4 本书的内容和特点

尽管现代控制理论的内容极其丰富，但是作为电气信息类专业的本科生的基础课程，本教材目的是使学生掌握现代控制理论的基础知识和基本方法，为进一步学习和提高打下基础。

全书共分6章，着重讲授线性系统理论的状态空间分析方法，目的是让读者结合线性





系统理论的学习,掌握状态空间分析和综合方法,学会运用状态空间分析这一现代控制理论中的基本工具。现代控制理论研究范畴较广,线性系统理论、最优控制、系统辨识、最优估计理论、自适应控制均是现代控制理论的重要内容,但受学时和教材篇幅的限制,难以做到面面俱到。考虑到线性系统理论是现代控制理论的基础,本书从工程应用角度出发,以线性系统理论的时域分析为主线,介绍现代控制理论的基本方法。主要阐述状态空间分析法和综合法的基本内容,包括动态系统的状态空间描述、动态系统的定量分析(状态方程的解)和定性分析(能控性、能观测性、李亚普诺夫稳定性)、动态系统的综合(状态反馈与状态观测器设计)。

近年来,科学计算与仿真分析软件 MATLAB 得到迅猛发展并已经深入到控制领域的分析计算、仿真与工程设计各个环节,成为控制领域专业人员的必备工具。

针对本书讨论的现代控制理论的各种计算、分析、设计与仿真问题,在各章的最后一节介绍了基于 MATLAB 语言的程序设计与计算机仿真。

本书内容仅限于现代控制理论中最基本的部分。由于控制理论学科本身处于不断的发展中,新的方法和理论不断涌现,在有限的讲授时间内,不可能对所有现代控制理论的知识作细致介绍。相信读者在掌握了本书的基本内容之后,对有关的问题和新的方法,可以通过自我提高等途径加以解决。

为了突出现代控制理论的工程应用背景,避免使现代控制理论的概念、方法仅仅停留在数学表达式上,本书编者作了一些努力,试图形成如下特色:本书贯穿了动态系统在状态空间数学模型基础上的定量分析、定性分析、极点配置、最优反馈控制这一结构主线。整体结构清晰,便于学生从整体上掌握现代控制理论的基本思路和方法。特别注重物理概念,避免繁琐的数学推导,突出工程应用,便于指导学生运用理论解决实际问题。在阐述现代控制理论的基本方法时,注意与经典控制理论基本方法的联系与比较。每章均有较丰富的例题、习题,便于学生对所讨论的问题有更为深入的理解,并有利于学生自学能力、计算机应用能力和研究能力的提高。

学习本课程的方法如下:

1) 认真复习和巩固提高数学基础知识及相关知识。

线性代数:比如矩阵的引入,是现代控制理论能处理 MIMO 系统、处理状态空间/状态变量问题的关键;又如矩阵运算、矩阵求逆、行列式、向量运算、向量的线性无关性、矩阵的秩、线性空间的基底及基底变换、相似变换、特征值、特征向量及意义,矩阵的定号性(正定与负定等);

常微分方程:比如,定系数线性常微分方程求解;

积分变换:比如,拉氏变换(连续系统)和 z 变换(离散系统);

电气信息专业需具备的物理学、电路、力学与机械等学科的基本知识,以及经典控制理论知识。

2) 认真复习和巩固提高相关的控制概念和知识。要善于将抽象的概念和理论知识与工程实际结合,建立空间概念。

3) 认真听好每一堂课,独立完成老师布置的每一项教学任务。

4) 多思、多想、多读、多练。



控制系统的状态空间描述

2.1 引言

一个复杂系统可能有多个输入和多个输出，并且以某种方式相互关联或耦合。为了分析这样的系统，必须简化其数学表达式，借助于计算机来进行各种大量而乏味的分析与计算。从这个观点来看，状态空间法对于系统分析是最适宜的。

经典控制理论以系统的输入输出特性为研究依据，对线性定常连续系统，其基本数学模型为线性定常高阶微分方程、传递函数；对线性定常离散系统，其基本数学模型则为线性定常高阶差分方程、脉冲传递函数。这些模型仅仅描述系统输入、输出之间的外部特性，不能揭示系统内部各物理量的运动规律；若要完全揭示整个系统的全部运动状况，仅研究输入、输出描述是不够的，即系统的输入、输出描述是一种不完全的描述。

20 世纪 60 年代，人们将状态空间的概念引入控制理论，产生了以状态空间描述为基础、最优控制为核心的现代控制理论。系统动态特性的状态空间描述由两个数学方程组成，一个是反映系统内部状态变量和输入变量间因果关系的状态方程；另一个是表征系统内部状态变量及输入变量与输出变量转换关系的输出方程。系统的状态空间描述不仅描述了系统输入、输出外部特性，而且揭示了系统内部的结构特性，能完全表征系统的所有动力学行为，因而是对系统的一种完全的描述。

状态空间法具备如下优点：



- 1) 在数字计算机上求解一阶微分方程组或者差分方程组，比求解与它相当的高阶微分方程或差分方程要容易。
- 2) 状态空间法引入了向量矩阵，大大简化了一阶微分方程组的数学表示法。
- 3) 在控制系统的分析中，系统的初始条件对经典法感到困难的问题，采用状态空间法就迎刃而解了。
- 4) 状态空间法能同时给出系统的全部独立变量的响应，不但反映了系统的输入输出外部特性，而且揭示了系统内部的结构特性，既适用单输入单输出系统又适用多输入多输出系统。
- 5) 状态空间法可利用计算机进行分析设计以及实时控制，所以可应用其求解大量的非线性系统、时变系统、随机过程和采样系统。
- 6) 利用现代空间法进行系统综合时，是非常有利的。

2.2 状态空间模型

2.2.1 状态空间的基本概念

系统的状态空间模型是建立在状态、状态空间概念的基础之上的。为此，首先对系统、状态、状态空间等基本概念进行定义和讨论。

1. 系统的基本概念

(1) 系统 所谓系统，是由相互制约的各个部分有机结合，且具有一定功能的整体。从输入、输出关系看，自然界存在两类系统：静态系统和动态系统。

(2) 静态系统 对于任意时刻 t ，系统的输出惟一地取决于同一时刻的输入，这类系统称为静态系统。该类系统的特征是：任意时刻系统的输出与同一时刻的输入保持确定的关系，而对该时刻以前的输入无任何依赖性，即无记忆，故静态系统亦称为无记忆系统。静态系统的输入、输出关系为代数方程。比如常见的电阻电路就属于静态系统。

(3) 动态系统 对任意时刻 t ，系统的输出不仅与 t 时刻的输入有关，而且与 t 时刻以前的累积有关（这种累积在 $t_0 (t_0 < t)$ 时刻以初值体现出来），这类系统称为动态系统。由于 t_0 时刻的初值含有过去运动的累积，故动态系统亦称为有记忆系统。动态系统的输入、输出关系为微分方程。比如常见的电感电路、电容电路以及各种含有储能元件的电路都是动态系统。

2. 动态系统的两类数学描述

一个动态系统可以用图 2-1 所示的框图来表示。方框以外的部分称为系统环境，环境对系统的作用称为系统输入，系统对环境的作用称为系统输出，输入变量组用 u_1, u_2, \dots, u_r 表示，输出变量组用 y_1, y_2, \dots, y_m 表示，它们均为系统的外部变量。

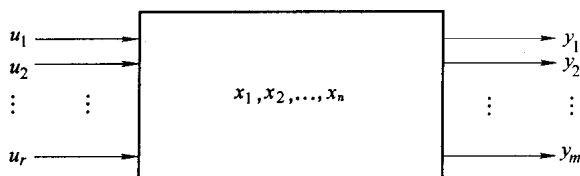


图 2-1 动态系统框图及其变量

描述系统内部每个时刻运动状况的





变量称为内部变量。若内部变量完全地表征系统内部的运动状态，则称为状态变量，状态变量组用 x_1, x_2, \dots, x_n 表示。输入变量、状态变量、输出变量统称为系统变量。

系统动态过程的数学描述实质上就是系统变量间因果关系的一个数学描述式。通常，可把系统的数学描述区分为“外部描述”和“内部描述”两种基本类型。

(1) 外部描述 外部描述通常称为输入、输出描述。这种描述把系统的输出取为系统外部输入的直接响应，显然这种描述回避了表征系统内部的动态过程，即把系统当成一个“黑匣”，认为系统的内部结构和内部信息全然不知，系统描述直接反映了输出变量与输入变量间的动态因果关系。

(2) 内部描述 状态空间描述是内部描述的基本形式，这种描述是基于系统内部结构分析的一类数学模型。其由两个数学方程组成：一个是反映系统内部状态变量 x_1, x_2, \dots, x_n 和输入变量 u_1, u_2, \dots, u_r 间因果关系的数学表达式，称为状态方程。其数学表达式的形式对于连续时间系统为一阶微分方程组，对于离散时间系统为一阶差分方程组；另一个是表征系统内部状态变量 x_1, x_2, \dots, x_n 及输入变量 u_1, u_2, \dots, u_r 与输出变量 y_1, y_2, \dots, y_m 转换关系的数学表达式，称为输出方程，其数学表达式的形式为代数方程。

在本书第4章将会看到，外部描述仅描述系统的外部特性，不能反映系统的内部结构特性，具有两个完全不同内部结构的系统也可能具有相同的外部特性，因而外部描述通常只是对系统的一种不完全的描述。内部描述由于揭示了系统内部的结构特性，因而是对系统的一种完全的描述，它能完全表征系统的所有动力学特征。

3. 状态的基本概念

(1) 状态 动态系统的状态是完全地描述动态系统运动状况的信息，系统在某一时刻的运动状况可以用该时刻系统运动的一组信息表征，定义系统运动信息的集合为状态。例如，由做直线运动的质点所构成的系统，它的状态就是质点的位置和速度。

(2) 状态变量 系统的状态变量是指能完全表征系统运动状态的最小一组变量。所谓完全表征是指：

1) 在任何时刻 $t = t_0$ ，这组状态变量的值 $x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_n(t_0)$ 就表示系统在该时刻的状态。

2) 当 $t \geq t_0$ 时的输入 $u(t)$ 给定，且上述初始状态确定时，状态变量能完全确定系统在 $t \geq t_0$ 时的行为。

状态变量组的最小性体现在：状态变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 是为完全表征系统行为所必需的最少个数的系统状态变量。从物理角度看，减少其中任意一个变量就会破坏对系统运动行为表征的完整性，而增加一个变量又是完全表征系统运动行为所不需要的；从数学角度看，这组状态变量是系统所有内部变量中线性无关的一个最大变量组，即 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 以外的系统内部变量都必和它们线性相关。

很显然，做直线运动的质点，其位置和速度两个变量可用来完全地表征该质点的运动状态，因而可选作为状态变量。

(3) 状态向量 若一个系统有 n 个彼此独立的状态变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ ，用它们作为分量所构成的向量 $\mathbf{x}(t)$ ，就称为状态向量，即

