



普通高等教育“十二五”规划双语系列教材

现代控制理论与分析

(中文版)

王杰 陈陈 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划双语系列教材

现代控制理论与分析

(中文版)

王杰 陈陈 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书将现代控制理论方法与电力工程实践紧密结合,主要介绍了控制系统的状态空间表达式、控制系统状态空间表达式的解、线性系统的能控性与能观性、稳定性与Lyapunov方法、线性定常系统的综合、最优控制等。

本书既可作为高等学校电气工程与自动化专业学生、教师的教学用书,也可作为从事相关专业技术研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论与分析 / 王杰, 陈陈编著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2011. 1

普通高等教育“十二五”规划双语系列教材

ISBN 978-7-5084-8341-2

I. ①现… II. ①王… ②陈… III. ①现代控制理论
—高等学校—教材 IV. ①0231

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第012687号

书 名	普通高等教育“十二五”规划双语系列教材 现代控制理论与分析 (中文版)
作 者	王杰 陈陈 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 12印张 285千字
版 次	2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是高等学校电气工程自动化、自动控制、自动化仪表、工业自动化等专业的教材。它是作者经过多年来的教学经验，参阅国内外优秀教材的基础上编写的。

本书在内容上主要介绍控制理论的概念、方法和应用；研究状态空间表达式解的存在性和唯一性及相关性质，注重给出与解状态空间方程相关的常微分方程基本理论。本书仍保留传统的现代控制理论章节的安排，在关于能控能观方面注重给出时间函数的线性无关性和线性时变系统的最小能量控制概念，以便读者能够较好地掌握能控能观的基本要点。由于现代控制的发展和要求，本书重点增加了稳定性与 Lyapunov 方法的内容，特别注重了非线性时变系统的稳定性方面的内容，为了使读者更好地掌握现代控制理论的内涵和要点，本书也添加了部分有关线性代数和常微分方程的基本知识，对本书中所出现的定理尽可能给出详细的证明以便满足不同层次的读者需要。在稳定性方面，本书增加了 Lyapunov 函数及 Hamilton 能量系统稳定性的定义与方法及其在线性与非线性系统中的应用。

全书共 7 章。绪论阐明了控制理论的发展、系统结构要求、控制特点和非线性控制在电力系统中的应用。第一章给出基本概念、状态空间表达式的建立、传递函数、组合系统、线性变换，最后给出在工程上较常用的离散系统的状态空间表达式。第二章系统地给出线性定常与时变系统齐次与非齐次状态方程的解、方程解的存在与唯一性定理、线性时变系统的几个基本定理、Wronsky 行列式、线性时变非齐次系统的变动参数法、状态转移矩阵及离散时间系统状态方程的解，最后给出连续时间状态空间表达式的离散化方法。第三章系统地给出了单输入单输出和多输入多输出的线性定常和时变、连续和离散系统的能控能观性判据、能控能观性判据的两种形式、线性定常系统的输出能控性、时间函数的线性无关性、线性时变系统的最小能量控制、能控性与能观性的对偶关系、线性定常系统的结构分解，最后给出了能控标准型和能观标准型及系统的实现。第四章首先给出时变系统的稳定性的基本概

念、时变 Lyapunov 函数的基本思想和稳定性方法、渐近稳定性，然后给出构造 Lyapunov 函数的一些常用方法、向量 Lyapunov 函数，研究 Lyapunov 方法在线性系统中和在广义 Hamilton 系统中的应用。第五章给出状态反馈的定义及其性质、极点配置的理论基础和算法、系统的镇定与解耦问题及全维与降维状态观测器。第六章系统地阐述最优控制基本概念及求解最优控制的变分方法，然后给出 Hamilton 函数的确立、波尔札问题、极小值原理和 Bang-Bang 控制，给出工程上常用的连续或离散动态规划法，并研究动态规划与最大值原理及线性二次型最优控制问题。

本书的部分文字和图表整理等工作曾得到硕士生李康和邹彪的帮助，且得到了国家自然科学基金（No. 60674035、No. 61074042）和“十一五”国家科技计划课题（2008BAABB08）的资助，在此，向他们一并表示感谢。

限于作者水平，本书难免存在一些不妥和错误之处，敬请各界同仁和读者给予批评和指正！

作者

2010 年 10 月于上海交通大学

目录

前言

绪论	1
第一节 控制理论的发展	1
第二节 系统结构要求和控制特点	4
第三节 非线性控制在电力系统中的应用	7
第四节 现代控制理论的主要内容	12
第一章 控制系统的状态空间表达式	13
第一节 基本概念	13
第二节 状态空间表达式的模拟结构图	15
第三节 状态空间表达式的建立	16
第四节 由传递函数建立状态空间表达式	20
第五节 传递函数与传递函数矩阵	25
第六节 组合系统的状态空间表达式	26
第七节 线性变换	30
第八节 离散系统的状态空间表达式	31
习题	34
第二章 控制系统状态空间表达式的解	38
第一节 线性定常系统齐次状态方程的解	38
第二节 矩阵指数	38
第三节 线性时变系统齐次解	41
第四节 状态转移矩阵	55
第五节 线性连续系统非齐次状态方程的解	56
第六节 离散时间系统状态方程的解	57
第七节 连续时间状态空间表达式的离散化	58
习题	59
第三章 线性系统的能控性与能观性	62
第一节 定常离散系统的能控性	62
第二节 定常连续系统的能控性	64

第三节	定常系统的能观性	67
第四节	线性时变系统的能控性及能观性	70
第五节	能控性与能观性的对偶关系	77
第六节	线性定常系统的结构分解	77
第七节	能控性和能观性与传递函数矩阵之间的关系	81
第八节	能控标准型和能观标准型	83
第九节	系统的实现	85
习题		87
第四章	稳定性与 Lyapunov 方法	91
第一节	稳定性的基本概念	91
第二节	Lyapunov 函数的基本思想	95
第三节	Lyapunov 函数的稳定性方法	98
第四节	渐近稳定性	101
第五节	构造 Lyapunov 函数的一些常用方法	107
第六节	向量 Lyapunov 函数	117
第七节	Lyapunov 方法在线性系统中的应用	120
第八节	Lyapunov 方法在 Hamilton 系统中的应用	122
习题		131
第五章	线性定常系统的综合	133
第一节	状态反馈的定义及其性质	133
第二节	极点配置	135
第三节	系统的镇定问题	138
第四节	系统解耦问题	140
第五节	状态观测器	143
习题		153
第六章	最优控制	156
第一节	概述	156
第二节	求解最优控制的变分方法	157
第三节	Hamilton 函数	162
第四节	波尔札问题	163
第五节	极小值原理	164
第六节	动态规划法	172
第七节	线性二次型最优控制问题	178
习题		180
参考文献		184

绪 论

第一节 控制理论的发展

自动控制理论的发展主要经过了以下几个阶段：经典（古典）控制理论，20 世纪 30～40 年代进行了频率法和根轨迹法研究。经典控制理论以 Laplace 变换为数学工具，得到系统的传递函数，一般采用反馈控制（闭环控制系统）。50 年代是现代控制理论发展的起点和基础时期。贝尔曼^①（R. Bellman）的寻求最优控制的动态规划法，庞特里雅金^②（Lev Semenovich Pontryagin）的极大值原理（最优控制），鲁道夫·卡尔曼^③（R. E. Kalman）的状态空间法、能控性、能观性。在 60～70 年代中发展了大系统理论和智能控制理论，罗布森诺克^④（H. H. Rosenbrock）的多变量频率域控制理论。80 年代以后出现了微分几何控制法、模糊控制、混沌控制等。

在工程实际应用中大多数控制系统都具有非线性特性。例如传动系统的齿轮传动具有齿隙和干摩擦等特性，许多执行机构都不可能无限制地增加其输出功率，因此，就存在饱和和非线性特性，实际上非线性系统中的这种不完善性是不可避免的。有些非线性是系统动态特性本身所固有的，例如高速运动的机械手各关节之间有哥氏力的耦合，这种耦合是非

① 贝尔曼——美国数学家，美国全国科学院院士，贝尔曼因在研究多段决策过程中提出动态规划而闻名于世。1957 年他的专著《动态规划》出版后对控制理论界和数学界有深远影响。贝尔曼还把不变嵌入原理应用于理论物理和数学分析方面，把两点边值问题化为初值问题，简化了问题的分析和求解过程。贝尔曼对稳定性的矩阵理论、时滞系统、自适应控制过程、分岔理论、微分和积分不等式等方面都有过贡献。

② 庞特里雅金——俄罗斯数学家。13 岁时因爆炸事故双目失明，母亲帮助他自学数学。1925 年进入莫斯科大学数学力学系。1929 年毕业后成为拓扑学家 P. S. 亚历山德罗夫的研究生。两年后在该校任教。1939 年到斯捷克洛夫数学研究所从事数学研究。同年被选为苏联科学院通信院士，1958 年成为院士。他早期研究拓扑学，拓扑群的庞特里雅金对偶定理、庞特里雅金示性类都是十分重要的工作。他的研究领域涉及拓扑学、代数、控制论等。20 世纪 50 年代开始研究振动理论和最优控制理论，以庞特里雅金的极值原理著称于世。

③ 鲁道夫·卡尔曼——匈牙利裔美国数学家，1972 年起任瑞士苏黎世联邦理工学院数学系统理论中心主任直至退休。先居住于瑞士苏黎世和美国佛罗里达州。2009 年获美国国家科学奖章。鲁道夫·卡尔曼所提出的卡尔曼滤波是一种高效率的递归滤波器（自回归滤波器），它能够从一系列的不完全包含噪声的测量中，估计动态系统的状态。卡尔曼滤波已经有很多不同的实现，卡尔曼最初提出的形式现在一般称为简单卡尔曼滤波器。除此以外，还有施密特扩展滤波器，信息滤波器以及很多 Bierman, Thornton 开发的平方根滤波器的变种，最常见的卡尔曼滤波器是锁相环，它在收音机、计算机和几乎任何视频或通信设备中广泛存在。

④ 罗布森诺克——英国自动控制专家，英国皇家学会会员。多变量频域法的奠基人之一。罗布森诺克的主要研究领域是多变量控制系统和计算机辅助设计。发表了近百篇论文以及《状态空间和多变量理论》（1970）、《控制系统的计算机辅助设计》（1974）等 4 本专著。1966 年发表论文《关于线性多变量控制系统的设计》。1969 年提出对角优势的概念和逆奈奎斯特阵列法。20 世纪 70 年代初，对多变量系统的零点问题给出了全面的论述，并引入了称为系统矩阵的一个特殊的多项式矩阵描述。从 80 年代开始，他致力于研究自动化对社会的影响和将控制理论的方法推广应用于量子力学。

线性的, 要研究机械手调整运动的控制就必须考虑非线性耦合因素。电力系统中传输功率与各发电机之间相角差的正弦成正比, 如果要研究电力系统大范围运动时, 就必须考虑非线性特性的影响。还有一类对象虽然本身是线性的, 但为了对它进行有效控制, 常常在控制系统中有意识地引进非线性的控制规律, 例如时间最短控制就要采用非线性 Bang-Bang 控制。非线性现象是自然界中最普遍性的系统, 而线性系统只是其中的特殊情况。由于非线性特性的复杂性, 不可能有统一的普遍适用办法。线性系统可以用线性常微分方程来描述, 解线性常微分方程已有成熟的方法, 因此, 线性系统控制理论取得了很大的成就。然而非线性微分方程只有在个别情况下才有解析解, 这给非线性控制系统的研究带来很多意想不到的困难。

线性控制系统中的运动只可能有几种情况: 如衰减或发散的振荡或不振荡运行, 或临界振荡等。非线性系统中的运动要复杂得多, 可以是振荡的或不振荡的过程, 这种振荡严格表述不一定能用调和函数来表示, 可以是稳定的或不稳定的, 这种稳定可以是全局的, 也可能是局部的; 可能有一个或数个振荡的极限环, 还可能出现混沌现象, 由此可见非线性系统中的拓扑结构更复杂多样化。考虑到许多控制系统的非线性性质对系统运行有害, 故应设法克服它的有害影响。有些非线性性质是有益的, 应在设计时予以考虑。长期以来在非线性的研究方面已经积累了许多经验, 但由于非线性系统的复杂性, 在这方面的研究工作有相当大的困难, 因此, 研究成果还远不能满足实际需要, 有待研究的问题还有很多。近年来, 由于工程实际的需要以及人们对提高控制系统智能化程度的重视, 非线性系统控制理论的研究工作已取得不少新的重要进展。

控制是按照某性能指标用施加特定的输入的方法改造所涉及的各种动力学系统的性能, 使其最大限度地满足特定需要的理论与技术的总称。控制技术的进步总是取决于控制理论的发展。控制理论发展至今, 主要经历了经典反馈控制理论、现代控制理论和非线性控制理论三个阶段。

第一阶段为复数域或频域的经典控制理论。主要是相对于 20 世纪 60 年代初迅速发展起来的新的控制理论体系而言的。这种复数域的控制理论体系, 大体上由建立数学模型的理论 (简称建模理论)、响应分析、稳定性分析与综合校正等四部分内容组成。

经典控制理论主要用于解决反馈控制系统中控制器的分析与设计的问题, 主要研究线性定常系统。经典控制理论中广泛使用的频域法和根轨迹法, 是建立在传递函数基础上的。线性定常系统的传递函数是在零初始条件下系统输出量的 Laplace 变换与输入量的 Laplace 变换之比, 是描述系统的频域模型。传递函数只描述了系统的输入、输出关系, 没有内部变量的表示。典型的经典控制理论包括 PID 控制、Smith 控制、解耦控制、大林控制、串级控制等。经典控制理论尽管原则上只适宜于解决 SISO 系统中的分析与设计问题, 但是, 经典控制理论至今仍活跃在各种工业控制领域中。事实上, 经典控制理论现在仍不失其价值和实用意义, 仍是进一步研究现代控制理论和非线性控制理论的基础。

第二阶段, 一般称之为现代控制理论。更确切地说, 应称为线性多变量系统控制理论。这种体系的理论, 自 20 世纪 60 年代初开始获得迅速发展, 当今在国际上获得了广泛的应用。60 年代以来, 电子计算机技术获得迅猛发展, 为复杂的大规模的数值分析提供了技术条件。这些就成为第二阶段控制理论——线性多变量控制系统理论发展的背景条

件。1960年 R. Bellman 的《矩阵分析导论》一书和 1963年 R. E. Kalman 的《线性动态系统的数学描述》一文，对奠定这种控制理论的基础作出了重要贡献。这种理论体系最主要的特征就是状态空间的建模理论与线性代数的数学方法相结合。

现代控制理论正是为了克服经典控制理论的局限性而逐步发展起来的。现代控制理论本质上是一种“时域法”，它引入了“状态”的概念，用“状态变量”（系统内部变量）及“状态方程”描述系统，因而更能反映出系统的内在本质与特性。从数学的观点看，现代控制理论中的状态变量法，简单地说就是将描述系统运动的高阶微分方程转化为一阶联立微分方程组的形式，或者将系统的运动直接用一阶微分方程组表示。这个一阶微分方程组就称为状态方程。采用状态方程后，最主要的优点是系统的运动方程采用向量、矩阵形式表示，因此，形式简单、概念清晰、运算方便，尤其是对于多变量、时变系统更是明显。特别是在提出可控性、可观测性概念和极大值理论的基础上，现代控制理论被引向更为深入的研究。现代控制理论主要有线性系统理论、最优滤波理论、系统辨识、最优控制和自适应控制分支。

第二阶段的控制理论有以下显著特点：第一，它是以一阶线性自变量为时间 t 的微分方程组来对系统进行描述的，其数学模型与分析方法是时域的；第二，所用到的数学工具主要是线性常微分方程理论与线性代数理论，而不像古典控制理论主要是应用 Laplace 变换与多项式代数方程；第三，它的建模理论与数学方法使得这种控制理论体系适用于线性多输入多输出系统；第四，它建立了一整套最优控制设计原理与方法，使得所求得的控制规律能保证系统性能指标达到极值；第五，对于参数可能在较大范围内变化的线性系统，最优控制设计与线性系统参数辨识技术相合，可得到自适应的或称之为自动寻求最优点的控制系统。以上是第二阶段控制理论——线性多变量系统控制理论发生、发展的背景及主要特点。

现代控制理论从理论上解决了系统的可控性、可观测性、稳定性以及许多复杂系统的控制问题。但是，随着现代科学技术的迅速发展，生产系统的规模越来越大，形成了复杂的大系统，导致了控制对象、控制器以及控制任务和目的的日益复杂化，从而导致现代控制理论的成果很少在实际中得到应用。经典控制理论、现代控制理论在应用中遇到了不少难题，影响了它们的实际应用，其主要原因有：①这些控制系统的设计和分析都是建立在精确的数学模型的基础上的，而实际系统由于存在不确定性、不完全性、模糊性、时变性、非线性等因素，一般很难获得精确的数学模型；②研究这些系统时，人们必须提出一些比较苛刻的假设，而这些假设在应用中往往与实际不符；③为了提高控制性能，整个控制系统变得极为复杂，这不仅增加了设备投资，也降低了系统的可靠性。这就要求寻求新的控制理论和方法。

第三阶段，非线性控制理论。由于大多数工程控制系统都是非线性的，虽然其中有不少部分可以在基本满足工程需要的条件下将其在某一平衡点处加以近似线性化，可应用上述的线性系统理论与方法进行分析与综合。但是也有一些系统，比如电力系统，在分析它的大干扰稳定性与动态品质时，就不宜把它近似地作为线性系统处理，否则控制效果就不会令人满意。再如一些系统，如机械手控制系统、自动驾驶飞机系统和某些化工过程控制系统，要用近似线性化的数学模型进行控制器的设计，其控制精确度难以达到理想要求。

总之,生产和科学技术的发展迫切要求建立非线性控制理论的新体系。

非线性控制系统理论是以非线性系统为被控对象,采用相应的数学工具为基础,结合线性控制技术或其他控制策略来产生相应的控制序列,使系统的输出达到期待的控制目标的理论体系。非线性控制研究的重点在于非线性系统的分析及综合,非线性系统分析通常包括用于描述非线性系统的数学模型的描述函数法和级数展开法及非线性系统的稳定性分析。目前非线性系统的综合通常包括精确线性化法、非线性几何控制法、变结构控制法、近似化法和反步设计法等。精确线性化法通常采用精确反馈线性化、精确输入输出线性化等方法将复杂的非线性系统线性化,再采用线性控制技术,将非线性系统的综合问题化为线性系统的综合问题,从而使复杂非线性系统综合问题简单化;非线性几何控制法通常采用基于微分几何的方法实现对非线性系统的控制方法,其被控对象包括无漂移非线性控制系统和带漂移非线性控制系统;变结构控制法通常以滑动模为核心,构造出合适的切换函数及变结构控制规律,使非线性系统在一定时间内达到预期的控制目标;近似化法常用于无法满足线性化条件的非线性系统,常见的方法包括有伪线性化法、扩展线性化法、线性化族、近似输入输出线性化法和平均法等;反步设计法是一种较新的控制方法,该方法通过逐步修订的算法构造镇定控制器,实现非线性系统全局跟踪或调节,常用于可状态线性化或严参数反馈的不确定性系统。

近20年来,近代微分几何方法与非线性控制系统的设计问题相结合,形成了一门新的学科体系,即非线性控制系统几何结构理论体系。罗马大学教授 A. Isidori 曾指出:正如20世纪50年代前引入 Laplace 变换和传递函数以及60年代引入线性代数方法分别给控制理论在单输入输出及多变量线性系统方面所带来的重大成就那样,微分几何方法引入非线性控制系统中,将会给控制理论带来突破性的进展。从非线性系统的能控性、能观性一直到各种设计方法及算法的一整套新的理论体系已经初步形成,可以预见在不久的将来,多变量线性控制系统理论体系中的一切主要成就都可以相应的在新的非线性控制理论体系中找到。微分几何方法的应用已经遍及航空、机器人、电力系统、化学工程等诸多领域。

第二节 系统结构要求和控制特点

纵观控制理论的发展史,可以看出控制理论领域有下列四个主要特点:

(1) 控制理论的迅速发展,不断受到高科技需求的有力推动。航天、航空、航海、工业过程、社会经济等领域向控制理论提出了许多挑战性问题,例如: Apollo 登月舱沿着最优轨线飞行的导航;在月球上的软着陆;机动性能高、开环不稳定新式战斗机的设计;对抛物面天线、雷达阵、太阳能接收器、空间望远镜等大型空间结构的高精度瞄准及镇定;对机器人的稳健控制及多臂协作控制;对电力系统中包括随机不确定因素的系统的控制;对轧钢的温度控制等生产过程的控制,都对控制理论提出了新课题,并且在这些系统中,控制理论也确实起了关键作用。

(2) 控制理论的发展依赖于数学,同时又推动数学的发展。现代数学中常微分、偏微分和泛函方程、代数、几何、函数论、概率统计、变分法、离散数学、数值计算等分支是

控制理论研究的重要工具。例如，鞅论是建立随机自适应系统理论的关键基础；Lie 代数是刻画非线性系统能控性的重要工具；泛函分析是研究无穷维系统的基本手段等。控制理论的研究又对数学的许多领域产生重要影响。例如，极大值原理的深化就导致许多抽象变分原理；和非光滑最优控制理论联在一起发展起来的非光滑分析，在分析和数学规划中起着重要作用；边界控制及双曲方程的精确能控性导致较弱条件下有关解的正则性的新结果；解的最优随机控制表示法在黏性解理论中有重要作用；对 Riccati 方程和线性多变量系统的研究推动了两点边值问题及算子理论的发展；随机控制对马氏过程大偏差理论以及金融数学的重要影响；稳健控制对算子理论及复变函数提出了有意义的新问题；对非线性控制的研究导致流形上奇异分布可积性的新结果，并发现了系统 Lie 括号结构与变分问题之间的相互作用等，都是控制理论对数学本身发展的有力促进。

(3) 控制理论与其他领域广泛交叉（渗透）的特色将继续保持。控制理论的应用范围已从单纯技术领域，渗透到社会、经济、人口、环境和生命科学等领域的控制问题中，并将继续拓展。例如，控制理论对人们普遍关注的能源环境问题也能作出重要贡献。从节省能源与减少污染到新能源开发（如人工受控热核聚变），再到合理调控自然环境，协调人类与自然关系等都存在对控制理论的需求。此外，随着生命科学的发展及对生物生理学和内部非线性作用的认识的提高，控制理论方法将有助于提高对生物体内部自适应反馈调节规律的认识，并且将给出对各种激素、药物与放射性疗法的更好的设计，并促进新型医疗器械的研制。

(4) 复杂系统控制理论问题将越来越引起人们的重视。复杂系统的主要特征可归纳为动力学模型的不确定性、测量信息的粗糙性和不完整性、动态行为或扰动的随机性、离散层次和连续层次的混杂性、系统动力学的高度非线性、状态变量的高维性和分布性、子系统及层次多样性和各子系统间的强耦合性。复杂系统控制在规模上、复杂性及灵活性上将大大突破传统的自动控制在概念和方法上的局限性。它要求控制系统对被控对象的动力学模型要有学习和识别能力，对环境和扰动的变化要有适应和稳健能力等。

控制理论中各种方法对现代技术的发展具有很大影响。基于经典理论的单回路控制系统，以及第一代自适应控制器已在许多工业生产中得到应用，这些控制器也存在于我们的日常生活设施中。控制系统之所以能得到如此广泛的应用，不但要归功于现代仪表化与电子硬件，还由于控制理论有处理其模型和输出信号所具有的不确定性动态系统的能力。在控制理论中已完善的各种方法得到普遍应用的同时，先进的理论方法和应用却仍然集中在像空间工程那样的高技术方面。当然，由于计算机技术的飞速发展和世界范围内的激烈工业竞争，这种情况将会改变，新的计算机技术提供了实现更精巧的控制算法工具，而要在工业界竞争中保持先进地位的愿望也促进了更精细、高效和可靠的控制。此外，越来越多的具有较强的数学背景的工程技术人员也是造成这种情况的因素。

一般情况，新理论新概念的发展和建立与它们成功地在实际控制问题中得到应用之间都有一定的时延，在有些情况下，今天的应用往往是基于几十年前所创造的理论概念。许多先进的控制技术都是针对某个确定的需要而研究得到的成果。电力生产常受到许多不确定因素的影响，如电力负荷的不确定性和电厂的可能停歇。在水电生产中，有效水量决定于降雨量的波动。法国计算机科学与自动化研究所 INRIA 研究了许多电力生产管理控制

问题,其中有一项是新喀利多利亚的具有八个热电厂和一个水坝的发电系统。研究目标是选择一套可行的生产方案(相当于反馈控制)以可能的最小代价去满足电力需求。模型辨识工作包括一个随机微分方程的漂移和扩散系数的估计。最有反馈的控制是用数字求解微分方程和动态规划中不等式而得到的。大型电厂的控制困难在于维数。而从上述研究可以得到一个概念性的框架使工程师们可以入手解决电力生产控制问题。

一般情况,控制一个动态系统有以下四个基本的步骤。

1. 建模(基于物理规律建立数学模型)

为一个系统选择一个数学模型是控制工程中最重要工作。当系统是不完全清楚的时候,为此系统建立一个数学模型是相当困难的。有些情况下,可以写出一个系统的精确的动力学数学公式,但是它可能是非常复杂的,以致无法在该模型的基础上设计一套控制算法。所幸的是对于不完全清楚的模型还能较好地处理,因为从无数实践中已经学到:一个复杂的系统可以在十分简化的模型上用反馈控制得到成功。因而,控制工程中的模型问题和物理学中的模型问题是完全不同的。在控制理论中,问题的关键是寻找一个合适的数学上精确的模型,它在有效数据基础上可以用系统辨识方法求得。

2. 系统辨识(基于输入输出实测数据建立数学模型)

系统辨识可以定义为用在一个动态系统上观察到的输入与输出数据来确定它的模型的过程。如果模型结构已经给定,只是其参数尚未知道,则系统辨识就变成参数估计。辨识是控制理论中不可分割的重要组成部分,它属于应用数学中的求逆问题。进行系统辨识常需作下列实验:发生输入信号和记录输出信号。有许多统计方法和计算技术可用以处理数据和得到模型。当前系统辨识方面的研究集中在辨识问题的可解性和问题提出的恰当性、对各类模型的参数估计方法等基本问题上。

3. 信号处理(用滤波、预报、状态估计等方法处理输出)

信号处理是控制理论外面的独立的一门学科,但这两学科之间有许多重叠之处,而控制界对信号处理作出了重要贡献,特别是在滤波和平滑的领域。这一领域是研究如何从被噪声污染的观察信号中重构原信息的问题。它们有广泛的应用场合,如通信、从卫星追索数据、语言处理、图像再现等。如果没有这种计算机图像的再现能力,那么从水手号和先锋号等航天飞船探测器传送回来的外层行星图像就毫无用处。

4. 综合控制输入(用各种控制规律综合输入)

控制的综合就是为控制系统生成控制规律,它与模型、辨识、信号处理、控制目标以及所用综合方法有关。

电力系统的运行状态直接影响到电网的实际安全水平,因此,要提高电力系统供电的可靠性,就必须十分注意安全运行的控制问题。电力系统根据运行条件的不同,可将运行状态分成五种:①正常状态;②预警状态;③紧急状态(事故状态);④系统崩溃;⑤恢复状态(事故后状态)。随着运行条件的改变,电力系统将在各种状态之间进行转变。电力系统安全控制就是要积极采取各种控制措施和手段,使电力系统运行处于正常状态。

计算机控制技术在电力系统安全控制中发挥着越来越重要的作用。它的作用主要包括三个方面:一是安全监视,是对电力系统运行状态安全情况进行的监视;二是安全分析,是对电力系统的运行安全水平进行评价并确定系统免遭事故破坏的能力;三是安全控制,

是事故发生瞬间迅速作出判断和控制,使系统故障及早得到抑制和排除,最大程度地提高系统的安全性。随着电力系统中各电气设备与发电厂的组合日益复杂化,以及对控制要求的提高,如果把全系统中所有发电厂及变电所的信息全部采集到中央调度所进行处理,在技术上和经济上都是不合理的。由于计算机技术的发展,可以对较分散的需要监控的大量信息采用分层控制,即设立中心调度所、地区调度所、发电厂控制中心、变电所控制中心等分层控制中心。中心调度所对整个电力系统作出综合判断及控制,负责与地区调度所和发电厂及变电所保持信息交换和控制;地区调度所接受中心调度所的控制指令,对本地区的系统做出综合判断和控制,对发电厂及变电所控制中心进行信息交换和控制。发电厂和变电所控制中心接受中心调度所或地区调度所的指令,直接对所属机组和设备进行监视和控制。为了合理监视日益扩大的电力系统,及时处理影响整个系统的事故和异常现象,电力系统调度中心 SCADA 系统必须采取远方监视和控制以及通信技术手段来掌握电力系统的运行状态和信息,计算机与相应的远动装置组成的系统,主要用来完成电力系统运行状态的监视、远距离开关操作、自动发电控制及经济运行,以及制表记录和统计等功能。调度自动化是多个子系统组成的有机整体,缺一不可,是一项涉及范围广,实现难度大的系统工程。近几年已经出现了把电力系统实时运行的能量管理系统和在配电系统控制中使用的调度自动化系统以及用于管理和规划的管理信息系统结合起来的一个综合自动控制系统,这样把不同层次的电力系统调度自动控制功能和日常的计划管理功能在功能上实现互补配置,将电力系统的安全性、可靠性和经济性提高到一个新的水平。

第三节 非线性控制在电力系统中的应用

电力系统运行的稳定性问题,即动态安全可靠性是电力系统运行的重要问题。如果大型电力系统的稳定性遭到破坏,就可能造成一个或数个大面积停电、使它们一时陷于瘫痪和混乱,严重者甚至危及全国,对人民生活及国民经济造成灾难性损失。因此,改善电力系统运行的稳定性、动态可靠性,仍然是一项迫切而艰巨的任务。改善与提高电力系统稳定性的主要手段是控制。许多年来人们为了改进与发展电力系统控制技术,进行了浩瀚的研究工作。以发电机组的连续性控制为例,在这方面主要有发电机的励磁控制与汽轮机的调速汽门控制。在 20 世纪 70 年代以前的励磁控制技术方面,主要采用单变量反馈方式,即采用发电机端电压偏差作为反馈量的控制方式。属于这种单输入控制方式的有比例式控制方式和比例—积分—微分 (PID) 控制方式两种。这两种控制方式的反馈量都是发电机端电压的偏差。

随着电力系统的发展,人们深感单输入控制方式的不足,于是在 20 世纪 70 年代发明了 PSS (电力系统稳定器) 控制方式,这种控制方式在电压偏差外再增加了一个辅助反馈变量,这个辅助反馈量可以控制发电机转速偏差 $\Delta\omega$, 发电机频率偏差 Δf 或者发电机有功功率偏差 ΔP_e , 这样发电机励磁控制就由单输入控制系统发展成为双输入控制系统。在我国,一方面引入 PSS 励磁控制方式,另一方面又发展了我国自己的线性最优励磁控制方式 (LOEC), 这种控制方式采用电压偏差、转速 (或频率) 偏差以及有功功率偏差作为反馈变量,各反馈变量的增益系数是“线性二次型 Riccati (LQR) 问题”的解,这种

LOEC 励磁控制方式已经在我国一些大型电站中得到成功的应用。

由于电力系统具有高度非线性,当系统的运行点改变时(如负荷大幅度波动或发生严重的故障时),系统的动态特性会显著改变。当实际状态 $x(t)$ 偏离 x_0 较远时,那种近似线性化的数学模型并不能正确表述实际的控制系统,由其根据而设计的控制器也就不能正确有效地工作,这种设计方法与提高电力系统大干扰稳定性的要求不相适应。此时,线性控制器往往不能满足系统稳定性的要求,除非采取切机、电阻制动、甩负荷等紧急控制措施来保证系统的稳定性。因此,有必要基于电力系统的非线性模型设计不依赖系统某一运行点,并同时考虑了系统非线性特性的电力系统非线性控制器,用非线性控制系统理论与方法去设计电力系统控制器。同时,随着柔性交流输电系统的引入,电力系统有了更多的控制资源和手段。电力系统中的控制装置往往要求满足多个控制目标。为了有效地利用系统的控制资源,提高对电力系统振荡稳定、潮流分布、紧急事故及经济运行的控制能力,有必要采用先进的控制原理来设计高效的控制器。

非线性控制系统理论在取得本身长足发展的同时,基于多种控制理论交叉的研究方法悄然发展起来,部分研究人员将鲁棒控制、自适应控制、模糊控制、神经网络和遗传算法与非线性控制技术结合起来,克服非线性控制存在的各种缺陷,以提高非线性系统的控制性能。这其中包括将鲁棒控制、自适应控制与非线性控制方法结合起来,用于机器人或电力系统的控制;将遗传算法、自适应控制、模糊控制结合起来,用于非线性 AC-DC 电力系统的控制;将神经网络结合非线性控制技术来设计电力系统的稳定器。非线性系统控制理论在电力系统的应用得到了大量的研究,按方法主要分为:基于微分几何理论的反馈线性化方法、直接反馈线性化方法、基于 Lyapunov^① 稳定性理论的控制方法、非线性变结构控制(滑动模态控制)方法和非线性自适应控制等。

反馈线性化方法是非线性系统控制理论的一种有效方法,在电力系统的非线性控制中,对基于微分几何理论的反馈线性化方法的研究和应用很多。人们第一次应用输入对状态反馈线性化方法研究同步发电机控制,是这个领域内最早的研究成果。这类方法主要包括基于微分几何理论的反馈线性化方法和直接反馈线性化方法。微分几何方法通过微分同胚映射实现坐标变换,根据变换后的系统设计非线性反馈,实现非线性系统的精确线性化,微分几何方法适合仿射非线性系统。微分几何反馈线性化方法主要有两种方法:输入对状态反馈线性化和输入输出线性化。前者主要用于研究非线性系统的镇定问题,后者用于研究系统的跟踪和调节问题。在系统满足一定的条件下,这两种方法可以互相转化。直接反馈线性化方法可以看做是输入输出线性化的一个特例。它不需要进行复杂的数学推导

① 李雅普诺夫——俄国数学家、力学家。李雅普诺夫是切比雪夫创立的彼得堡学派的杰出代表,他的建树涉及到多个领域,尤以概率论、微分方程和数学物理最有名。在概率论中,他创立了特征函数法,实现了概率论极限定理在研究方法上的突破。李雅普诺夫是常微分方程运动稳定性理论的创始人,他在 1884 年完成了《论一个旋转液体平衡之椭球面形状的稳定性》一文,1888 年,他发表了《关于具有有限个自由度的力学系统的稳定性》。特别是他的 1892 年的博士论文《运动稳定性的一般问题》是经典名著,在其中开创性地提出求解非线性常微分方程的李雅普诺夫函数法,亦称直接法。李雅普诺夫对位势理论的研究为数学物理方法的发展开辟了新的途径。他在 1898 年发表的论文《关于狄利克雷问题的某些研究》也是一篇重要论文。该文首次对单层位势、双层位势的若干基本性质进行了严谨的探讨,指出了给定范围内的本问题有解的若干充要条件。

和坐标变换,在工程应用上有一定的优越性,这种方法在电力系统的非线性控制中得到了大量的研究,是一个主要的研究方向。

变结构控制在电力系统的非线性控制中很早就得到了应用,比如早期的 Bang-Bang 控制。从控制的目的来看,变结构控制主要是解决系统的镇定问题,即寻求控制使原点渐近稳定,而许多课题都可以通过一定的变换使之成为这类调节器设计问题。变结构控制是利用高速开关,将系统的相轨迹引导到一个由设计者所选择的可达到的曲面 $S(x)=0$ 上,这一曲面位于状态空间之中被称为切换面或滑动面。系统在切换面上的运动即滑模运动只取决于被控对象及所选择的切换面。由于变结构控制的设计思想是利用“开关”变更控制律,因而具有不断改变系统结构的特征,其出发点不是基于线性系统,而是针对含有非线性系统在内的一般系统,因而它可被用来处理非线性问题。变结构控制具有对滑模摄动的不变性。当系统到达切换面时,全部滑动模态均位于 $S(x)=0$ 的子空间中,在一定的条件下,不论是系统受到干扰还是参数摄动均对滑模运动无影响。在进行不确定系统的变结构控制时通常有三种方法可供选择:一是以滑动模态为目的的变结构控制;二是以 Lyapunov 方法为基础的变结构控制;三是以超稳定理论为基础的变结构控制。另外,变结构控制理论提供了一套完整的大系统降阶处理方法,它将大的系统分为若干小系统,各小系统的切换面只取局部小系统的状态变量,进而实现局部分散、分散和多层控制。变结构控制主要有两种形式:一种是在微分几何方法的基础上,对线性系统采用线性变结构控制,这一类方法仍然需要非线性控制反馈规律,没有充分地利用变结构控制对参数的鲁棒性;另一种是在非线性系统模型上直接设计变结构控制规律。变结构控制方法(滑动模态控制)是一种有效的非线性控制方法。它具有如下的一些优点:

- (1) 控制系统的响应不依赖系统结构和参数;
- (2) 理论上可以应用到所有类型的非线性系统;
- (3) 对比于其他的非线性控制方法,容易实现;
- (4) 对参数不确定性和外部扰动具有很好的鲁棒性。

当然,它也存在一些缺点,例如,控制规律中存在的高频抖动。此外,电力系统由于其自身的特点,在使用变结构方法时也遇到一些需解决的问题。如开关过程的延迟,磁滞现象均可能引起高频振颤,而这些振颤又对某些未建模部分起到激励作用,给稳定性构成一定的威胁。近年来,采用饱和的切换函数替换理想的切换函数等方法使这一问题得到了一定程度的解决。在变结构控制系统中,控制规律是一个根据在状态空间中定义的超平面上切换的非连续的函数。控制规律迫使处于任何初始条件下的系统状态按一定的趋近率到达并保留在该超平面上,在超平面上系统的动态成为滑动模态。随着变结构理论的不断深入,各种控制技术的相互补充及上述问题的逐步解决,电力系统变结构控制特别是变结构分散控制趋向于实用化。

自适应控制的目标是使控制系统对过程参数的变化和对未建模部分动态过程不敏感。当过程动态变化时,自适应控制系统试图感受这一变化并实时地调节控制器参数或控制策略。自适应控制的研究对象是具有一定程度不确定性的系统,目前自适应研究的重点是研究参数漂移的补偿及自适应控制系统的鲁棒性。目前成熟的自适应控制系统主要有两大类即自校正控制系统和模型参考自适应系统。电力系统自适应控制应用研究始于 20 世

纪 80 年代初期。从电力系统运行的角度来讲,首要的任务就是要确保运行的稳定性,对控制器设计的具体要求就是不论在运行工况、网络结构发生怎样的变化时,其控制总要试图维持系统的稳定性,并避免发生解列。由于自适应控制方法所具有的特点,多年来电力系统自适应控制应用研究一直受到电力行业的重视,在励磁控制、电力系统稳定器控制、无功补偿器控制、负荷频率控制等方面取得了很多成果。大量的研究表明,在电力系统控制的许多领域中自适应控制的控制效果优于固定参数的控制器。但应当指出,由于电力系统的电磁暂态过程变化较快,且其工况又处于不断的变化之中,所谓最佳也只是某种工况下的最佳,因而对自校正技术的实际应用而言必须解决运算速度这一问题,而采用什么样的系统化手段来确定参考模型则是电力系统模型参考自适应控制需解决的问题。目前,鲁棒自适应控制是自适应研究的热点。可以预见,随着自适应理论研究的不断深入,微型计算机地发展,自适应控制在电力系统中应用将会越来越多,控制效果也将越来越好。

H_{∞} 鲁棒控制具有处理多变量问题的能力,而且与线性二次高斯最优控制不同,它可解决具有建模误差、参数不确定和干扰未知系统的控制问题,并直接解决鲁棒控制问题。 H_{∞} 算法具有较好的直观性及严格的数学基础,此外, H_{∞} 控制经过较简单的运算便可使系统具有良好的性能。在 H_{∞} 控制的应用上,目前主要还是线性系统及仿射非线性系统。应当指出,好的鲁棒控制应能对结构方面的问题做出考虑,但 H_{∞} 控制方法不能顾及信息类型,为此许多学者在 H_{∞} 鲁棒控制中引入 μ 综合及自适应控制对 H_{∞} 控制进行修正并取得了较好的结果。电力系统对稳定性有极高的要求,失稳意味着可能出现整个电力系统的瓦解。前已提及电力系统的参数不精确且存在大量未建模动态部分,因而具有强鲁棒性的稳定控制研究极为重要。 H_{∞} 鲁棒控制已成为当代控制理论中一个引人注目的分支。自 20 世纪 80 年代末特别是 90 年代初已有许多学者试图将 H_{∞} 最优控制运用于电力系统的控制中,在电力系统阻尼控制、发电机控制、电力系统稳定器控制、燃汽轮机控制等方面取得了一些有意义的结果。

电力系统的微分几何控制研究始于 20 世纪 80 年代初期。电力系统强非线性是诱发其研究微分几何控制的主要原因,传统的局部线性化方法由于其对大干扰的不适用,使所设计的控制器对工况不具备鲁棒性,而大范围的微分几何控制则克服了这一缺陷,使控制器几乎对所有运行点都起作用。近十几年来许多学者对电力系统微分几何控制进行了大量的研究并取得了许多有意义的成果,已将微分几何控制应用于发电机励磁控制、汽门开度控制、交直流联合输电系统的非线性控制、静止无功补偿器、新型静止无功发生器、电力系统稳定器等方面。我国在电力系统微分几何控制方面居国际领先水平,目前基于微分几何的非线性最优全数字式励磁控制器已在我国的丰满、焦作、渤海湾、沙角及葛洲坝等电厂推广使用,运行良好。有学者提出在进行电力系统微分几何控制时,可考虑将其与变结构或 H_{∞} 鲁棒控制相互结合,这样可解决微分几何设计时的参数鲁棒问题。随着微分几何控制理论地不断深入及与其他控制技术的相互结合使用,微分几何控制理论必将有更广泛的应用前景。

由于电力系统的特点,智能控制技术中的各种控制手段也因具有一定的“智能”特性,如可以引入专家的经验知识、能够处理不确定性问题、具有自学习的能力、适于处理非线性问题等,在电力系统也得到了广泛的关注,获得了大量的研究成果,成为电力系