

# 结构保持电力系统 分岔与稳定控制

王杰 陈陈 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 结构保持电力系统 分岔与稳定控制

王杰 陈陈 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了结构保持电力系统非线性控制理论及其应用,在全面论述该领域国内外研究成果的基础上,重点介绍了作者近年来从事和参加的国家重点基础科研项目、国家自然科学基金重大项目和国家自然科学基金项目等有关课题所取得的最新成果。

全书共9章。主要内容包括:线性微分代数系统控制、可行性域、灵敏度及分岔等基本概念和定义;微分代数系统和结构保持电力系统振荡周期解的存在与唯一性;非线性微分代数系统的几何线性化问题及零动态设计原理和参数自适应控制理论与方法;结构保持电力系统协调控制和参数自适应控制设计原理;结构保持的交直流联合输电系统的鲁棒稳定控制器设计方法;结构保持电力系统的广义 Hamilton 实现与控制原理和电力网络复杂拓扑结构的鲁棒控制方案设计原理。

本书可作为高等院校电气工程专业、电力系统及其自动化专业的本科生、研究生和教师的教学参考书,也可供该领域的科研工作者、工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

结构保持电力系统分岔与稳定控制/王杰,陈陈著.北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025333-0

I. 结… II. ①王…②陈… III. 电力系统:控制系统 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 148249 号

责任编辑:王志欣 汤 枫 / 责任校对:陈丽珠  
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—2 500 字数:329 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈长虹〉)

## 序

近代微分几何方法与非线性系统的控制设计问题相结合,形成了一系列非线性控制系统几何结构理论学科体系。微分几何理论和方法引入非线性控制系统,已经给非线性控制理论带来突破性的进展,特别是在电力系统控制中得到了广泛应用。然而实际电力系统运行要受到负荷等因素变化的影响,由发电机、输电网络和负荷构成了结构保持电力系统。物理电力系统模型是高维微分-代数方程组。因此,关于近代微分几何方法与非线性微分代数控制系统的设计问题便成为结构保持电力系统控制理论的主要问题之一。如上所述,由于模型的特征是微分代数控制系统,如果利用一般的非线性系统几何控制理论进行控制器设计会遇到许多困难,比如对微分代数控制系统求 Lie 导数、Lie 括号、系统的关系度等运算就相当复杂。为了解决这个问题,该书利用非线性微分代数控制系统的  $M$  导数、 $M$  括号和  $M$  关系度等定义和理论结果,并在此基础上,结合非线性微分代数系统几何线性化及反馈精确线性化、部分几何反馈线性化和参数自适应等理论和方法,成功地解决了以上难题,并将这些结果用于具有灵活交流输电系统、交直流输电系统等结构保持电力系统非线性控制中,丰富了非线性控制理论与方法,扩大了其应用领域。

该书的主要内容包括:非线性控制理论的一般方法和线性微分代数控制系统基础理论;非线性微分代数控制系统的分岔分析与几何线性化方法;非线性微分代数控制方法及应用三个部分。其中第一部分概述了电力系统非线性控制研究的进展、结构要求和控制特点及其应用;陈述了隐函数定理、微分流形、子流形及代数流形、分岔、极限集和系统稳定性及其线性微分代数系统的奇异性及分岔的基本知识。论述由浅入深,利于引导读者进入非线性微分代数系统分析与控制领域。第二部分主要表述了该书作者在结构保持电力系统的分岔定性分析、稳定性分析和结构保持多机系统振荡周期解的存在性分析方面的理论研究成果。其内容包含微分代数多机系统平衡点的拓扑结构分析和线性微分代数系统可行域的分析方法,另外给出了非线性微分代数系统的几何线性化的一系列定义和定理,它包括  $M$  导数、 $M$  括号、 $M$  对合性、 $M$  关系度及其线性化标准型的条件和含参数的非线性微分代数系统的参数自适应控制理论与方法。第三部分是作者将一系列的理論研究成果应用于实际的结构保持电力系统的控制设计,主要控制对象是结构保持电力系统的 FACTS 与励磁控制、参数自适应控制设计、交直流系统非线性控制、广义 Hamilton 实现与控制以及基于广义 Hamilton 能量的随机网络结构保持电力系统

鲁棒控制设计。

该书是使读者系统了解微分代数系统控制的基础读物,它的出版对于进一步系统地深入开展研究微分代数系统控制及结构保持电力系统非线性控制的前沿学科有所帮助;对有志于运用微分代数系统控制理论解决实际工程问题的科研工作者有重要参考价值,特别是微分代数系统控制理论的基本思想对于研究混杂系统的控制和复杂随机电力网络的控制等一系列实际问题具有指导意义。该书章节安排合理,内容丰富,其出版将为同行和有关科技工作者提供新知识和新方法。

卢 强

2009年5月于清华大学

## 前 言

众所周知,近代微分几何方法与非线性系统的控制设计问题相结合,形成了一门新的非线性控制系统几何结构理论学科体系。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,微分几何理论方法引入到非线性控制系统,也给非线性控制理论带来一系列突破性的进展。从非线性系统的能控性和能观性一直到各种控制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,凡是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地在新的非线性控制理论体系中找到。微分几何控制方法的应用已经渗入到航空、机器人、电力系统及化学工程等诸多领域中。电力系统是典型的微分方程组和代数方程组的组合,也即是非线性微分代数控制系统,而关于近代微分几何方法与非线性微分代数控制系统的设计问题更是结构保持电力系统控制理论的新学科。

本书在经典的非线性系统几何控制理论的发展基础上,进一步提出了非线性微分代数控制系统的反馈线性化理论基础和一系列几何线性化设计方法,详细地给出了有关非线性微分代数控制系统的  $M$  导数和  $M$  括号等定义和理论结果,结合几何反馈精确线性化、部分几何反馈线性化理论方法及其一般控制设计和参数自适应控制理论方法,并利用非线性微分代数系统几何线性化理论,对结构保持电力系统非线性控制的理论及方法进行了深入的研究探讨。随着电力系统结构日益复杂化和规模的扩大,提高系统的安全运行和动态稳定性特别是暂态稳定性已成为目前主要的研究课题。

本书系统地阐述了结构保持电力系统非线性控制理论及其应用,在全面论述该领域国内外研究成果的基础上,本书主要阐述了作者近年来承担和参加的国家重点基础研究发展规划项目“我国电力大系统灾变防治和经济运行的重大科学问题的研究”的子课题“大型汽轮发电机组和电力系统机网耦合的理论研究”(No. G1998020300)和“具有 HVDC 的 AC/DC 系统的 SSO 问题”(No. G1998020310)、国家自然科学基金重大项目“电力系统广域安全防御体系基础理论及关键技术研究”的子课题“电力系统动态安全分析的广域建模和仿真实理论与方法”(No. 50595410)、国家自然科学基金项目“结构保持随机网络电力系统的非线性鲁棒自适应控制研究”

(No. 60674035)等有关课题所取得的最新进展。

全书共分为 9 章。第 1 章是绪论,阐明研究电力系统非线性控制的进展、结构要求、控制方式特点及其应用;第 2 章给出了有关隐函数定理、流形、分岔、极限集和微分代数系统的相容性等基本知识;第 3 章系统地讨论了线性微分代数控制系统的能控性和能观测性的定义与判据,以及不匹配不确定线性微分代数系统的描述和相关的鲁棒性基本概念;第 4 章主要讨论了线性和非线性微分代数系统的可行性域的基本概念和定义,并分别给出了关于微分代数系统的奇异诱导分岔、鞍节点分岔、Hopf 分岔和中心流形的定义及基本概念,还给出了一般微分代数系统特征值的灵敏度分析,对微分代数系统和结构保持电力系统振荡周期解的存在及唯一性进行了研究分析;第 5 章首先给出了关于非线性微分代数系统的  $M$  导数、 $M$  括号、 $M$  对合性及  $M$  关系度的基本概念与定义,并研究讨论了非线性微分代数系统的几何线性化问题及零动态设计原理,然后系统地研究了非线性微分代数系统的参数自适应控制理论与方法;第 6 章系统地阐述了基本负荷特性和同步发电机模型的基本构造,着重研究了结构保持电力系统 SVC 与发电机励磁协调控制和结构保持电力系统参数自适应控制设计原理;第 7 章专门研究了结构保持电力系统的交直流系统非线性控制,它包括单机无穷大交直流并联系统和多机电力系统交直流并联系统的非线性控制设计及结构保持的交直流联合输电系统的鲁棒稳定控制器设计方法;第 8 章论述了结构保持电力系统的广义 Hamilton 实现与控制原理,首先给出了广义 Poisson 括号与广义 Hamilton 系统的基本概念,然后研究了微分代数系统的广义 Hamilton 实现与控制方案,并分析了控制律对系统渐近稳定域的影响机理,给出了电力系统结构保持模型的广义 Hamilton 实现,研究了结构保持多机系统非线性励磁控制器设计;第 9 章考虑到复杂电力系统网络结构的随机性因素的存在,研究了广义 Hamilton 能量理论的随机网络结构保持多机系统鲁棒控制方案设计原理。

作者从事微分代数系统定性分析和结构保持电力系统稳定控制研究已经将近 20 年,在上海交通大学电气工程博士后流动站工作期间曾得到清华大学卢强院士、浙江大学韩帧祥院士、清华大学梅生伟教授的热情指导和帮助,使作者的研究工作得以顺利地开展和深入,作者愿借此机会向清华大学卢强院士、浙江大学韩帧祥院士、清华大学孙元章教授、清华大学梅生伟教授、中国科学院系统所程代展研究员、北京航空航天大学秦世引教授、上海电力学院靳希教授、中国电力科学研究院周孝信院士和我们课题组的研究生、博士生致以衷心的感谢!他们对本书提出了很多具有建设性的意见和建议。本书的撰写与校对工作曾得到了上海交通大学电气工程系博士生郝晋和徐光虎及硕士生刘高原、阮映琴、刘梦欣和郑方圆的热情

支持。在本书的撰写期间,作者与许多学者进行了愉快的合作探讨研究,在此向他们表示衷心的感谢!

感谢科学出版社工作人员的热情帮助,没有他们的辛勤工作,本书也不可能这样快与读者见面。

在撰写本书期间,作者得到了国家自然科学基金(No. 60674035)和国家重点基础研究发展规划项目(No. G1998020300)的大力支持,作者也借此机会向国家自然科学基金委员会和有关部门表示感谢!

限于作者水平,本书难免存在一些不妥之处,还望读者给予批评和指正!

作 者

2009年3月于上海交通大学



## 符 号 表

$f_0$	同步频率(50Hz)
$\omega_0$	同步角速度( $2\pi f_0$ )
$\delta_i$	第 $i$ 机转矩角
$\omega_i$	第 $i$ 机角速度
$P_{mi}$	机械功率(转矩)
$P_{ei}$	电磁功率(转矩)输出
$M_i, D_i$	转动惯量和阻尼系数
$x_{di}, x_{qi}$	$d$ 轴和 $q$ 轴同步电抗
$x'_{di}$	$d$ 轴暂态电抗( $x'_{di} < x_{di}, x_{qi}$ )
$T'_{d0i}$	$d$ 轴暂态开环时间常数
$E'_{qi}$	$q$ 轴暂态电抗后电势
$E_{Fi}$	同步电抗后电势
$V_{qi}, V_{di}, I_{qi}, I_{di}$	$q$ 轴和 $d$ 轴末端电压和电流分量
$S_{\delta_i - \theta_j}$	表示 $\sin(\delta_i - \theta_j)$ , 对于其他角度表示类似
$C_{\delta_i - \theta_j}$	表示 $\cos(\delta_i - \theta_j)$ , 对于其他角度表示类似
$S_{2(\delta_i - \theta_j)}$	表示 $\sin[2(\delta_i - \theta_j)]$ , 对于其他角度表示类似
$i \in N_k^n$	表示 $i = k, k+1, \dots, n$ , 对于其他字母表示类似
$j \in N_k^n \cup N_l^m$	表示 $j = k, k+1, \dots, n$ 及 $j = l, l+1, \dots, m$
$\partial_x f$	表示 $\frac{\partial f}{\partial x}$ , 对于其他字母表示类似
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	表示内积

# 目 录

序

前言

符号表

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 电力系统非线性控制研究进展 .....	1
1.2 电力系统结构要求和控制特点 .....	4
1.3 非线性控制在电力系统中的应用 .....	8
<b>第 2 章 预备知识</b> .....	18
2.1 隐函数定理、微分流形、子流形及代数流形.....	18
2.1.1 隐函数定理 .....	18
2.1.2 微分流形 .....	19
2.1.3 代数流形 .....	20
2.2 分岔、极限集和稳定性.....	21
2.2.1 奇点分岔 .....	21
2.2.2 Poincaré 分岔 .....	21
2.2.3 Hamilton 系统的扰动与弱 Hilbert 第 16 问题 .....	23
2.2.4 流与极限集 .....	23
2.3 线性微分代数系统的奇异性及分岔.....	28
2.4 微分代数系统的一些基本定义.....	29
<b>第 3 章 线性微分代数控制系统的基本概念</b> .....	31
3.1 线性微分代数控制系统的能控性.....	31
3.1.1 线性定常微分代数连续系统能控性定义 .....	31
3.1.2 线性定常微分代数控制系统能控性判据 .....	31
3.2 线性微分代数控制系统的能观测性.....	33
3.2.1 线性定常微分代数控制系统能观测性定义.....	33
3.2.2 线性定常微分代数连续系统能观测性判据 .....	33
3.3 线性微分代数控制系统的鲁棒性.....	35
<b>第 4 章 微分代数系统的分岔与分类</b> .....	40
4.1 可行域的基本概念和定义.....	40
4.1.1 线性微分代数系统可行域.....	40
4.1.2 非线性微分代数系统可行域 .....	42

4.2	奇异性诱导分岔分析	43
4.2.1	奇异诱导分岔	43
4.2.2	鞍节点分岔	44
4.2.3	Hopf 分岔	45
4.2.4	中心流形	45
4.3	微分代数系统分岔在电力系统中的物理意义	47
4.4	一般微分代数系统特征值的灵敏度	48
4.5	结构保持电力系统的分岔定性分析	49
4.5.1	结构保持多机系统平衡点结构	49
4.5.2	一类多机电力系统的稳定性分析	54
4.6	多机电力系统振荡周期解的存在性	59
4.6.1	经典多机系统振荡周期解的存在性分析	59
4.6.2	结构保持多机系统振荡周期解的存在性分析	65
<b>第 5 章</b>	<b>非线性微分代数系统的几何线性化</b>	<b>78</b>
5.1	微分代数系统解的存在唯一性	79
5.2	$M$ 导数、 $M$ 括号、 $M$ 对合性及 $M$ 关系度	82
5.2.1	$M$ 导数与 $M$ 括号	82
5.2.2	向量场集合的 $M$ 对合性	84
5.2.3	微分代数系统的 $M$ 关系度	84
5.3	线性化标准型	85
5.3.1	$M$ 关系度 $r < n$ 的线性化标准型	85
5.3.2	单输入单输出非线性微分代数系统的控制设计	85
5.3.3	多输入多输出非线性微分代数系统的控制设计	90
5.4	零动态设计原理	95
5.5	参数自适应控制理论与方法	97
<b>第 6 章</b>	<b>结构保持电力系统的 FACTS 与励磁控制</b>	<b>101</b>
6.1	电力系统与非线性负荷模型	101
6.1.1	基本负荷特性的描述	102
6.1.2	同步发电机模型的建立	103
6.1.3	具有结构保持的电力系统数学描述	106
6.2	结构保持电力系统 SVC 与发电机励磁协调控制	109
6.2.1	不含 FACTS 装置的一般结构保持电力系统励磁控制设计	109
6.2.2	提高多机系统暂态稳定的励磁与 SVC 协调控制	115
6.2.3	仿真实例研究	124
6.3	结构保持电力系统参数自适应控制	126
6.3.1	结构保持电力系统参数自适应控制设计	126

6.3.2	仿真研究 .....	132
<b>第 7 章</b>	<b>结构保持电力系统的交直流系统非线性控制</b> .....	<b>134</b>
7.1	AC/DC 并联系统的非线性微分代数系统模型 .....	134
7.2	单机无穷大交直流并联系统非线性控制设计 .....	135
7.2.1	单机无穷大交直流并联系统非线性控制器设计 .....	135
7.2.2	单机无穷大交直流并联系统仿真分析 .....	139
7.3	多机电力系统交直流并联系统非线性控制设计 .....	143
7.3.1	两机交直流并联系统非线性控制器设计 .....	143
7.3.2	两机交直流并联系统仿真分析 .....	147
7.4	交直流联合输电系统的鲁棒稳定控制器设计 .....	149
7.4.1	基于交直流动态特性的控制模型 .....	150
7.4.2	线性鲁棒控制器设计 .....	154
7.4.3	仿真结果分析 .....	156
7.5	结构保持的交直流联合输电系统的鲁棒稳定控制器设计 .....	159
7.5.1	交直流联合输电系统微分代数模型 .....	160
7.5.2	AC/DC 系统模型线性化与控制器设计 .....	163
7.5.3	仿真结果分析 .....	166
<b>第 8 章</b>	<b>结构保持电力系统的广义 Hamilton 实现与控制</b> .....	<b>169</b>
8.1	电力系统的能量函数表示 .....	170
8.1.1	发电机模型 .....	170
8.1.2	能量函数 .....	172
8.2	广义 Poisson 括号与广义 Hamilton 系统 .....	175
8.2.1	辛结构与传统 Hamilton 系统 .....	175
8.2.2	广义 Poisson 括号 .....	176
8.2.3	受控耗散 Hamilton 系统 .....	178
8.3	微分代数系统的广义 Hamilton 实现与控制 .....	179
8.3.1	广义 Hamilton 实现的概念及简单性质 .....	180
8.3.2	微分代数系统的模型及性质 .....	181
8.3.3	微分代数系统的广义 Hamilton 实现 (一) .....	182
8.3.4	微分代数系统的广义 Hamilton 实现 (二) .....	184
8.4	控制律对系统渐近稳定域的影响 .....	186
8.4.1	渐近稳定域的基本概念 .....	186
8.4.2	控制策略对系统渐近稳定域的影响 .....	187
8.4.3	算例分析 .....	188
8.5	不考虑转移电导的结构保持多机电力系统非线性励磁控制器设计 .....	190

8.5.1	电力系统结构保持模型 .....	191
8.5.2	广义 Hamilton 实现 (一) .....	194
8.5.3	广义 Hamilton 实现 (二) .....	197
8.5.4	仿真分析 .....	200
<b>第 9 章</b>	<b>基于广义 Hamilton 能量的随机网络结构保持多机电力系统鲁棒控制</b> .....	<b>204</b>
9.1	复杂网络理论在电力系统中的应用 .....	205
9.1.1	复杂网络理论概述 .....	205
9.1.2	电力系统的复杂网络特性 .....	207
9.2	基于广义 Hamilton 能量的随机网络拓扑结构的多机电力系统控制设计 .....	208
9.2.1	问题描述及基本性质 .....	208
9.2.2	不考虑网络随机变化的多机电力系统非线性励磁控制器的设计 .....	211
9.2.3	考虑网络随机变化的多机电力系统非线性励磁控制器的设计 .....	217
9.3	考虑自导纳和互电纳的结构保持多机系统非线性励磁控制器设计 .....	221
9.3.1	系统模型的建立 .....	222
9.3.2	构造考虑自导纳系统模型的 Hamilton 能量函数 .....	223
9.3.3	结构保持多机系统的非线性励磁控制器设计 .....	225
9.3.4	仿真分析 .....	227
9.4	基于广义 Hamilton 能量理论的随机网络结构保持多机系统鲁棒控制设计 .....	229
9.4.1	问题描述及基本性质 .....	230
9.4.2	不考虑网络随机变化的结构保持电力系统非线性励磁控制器的设计 .....	233
9.5	广义 Hamilton 能量理论的随机网络结构保持多机系统鲁棒控制设计 .....	239
9.5.1	随机网络模型 .....	240
9.5.2	考虑网络随机变化的多机电力系统非线性励磁控制器的设计 .....	240
<b>参考文献</b>	.....	<b>245</b>
<b>附录</b>	.....	<b>258</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电力系统非线性控制研究进展

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,随动系统的齿轮传动具有齿隙和干摩擦等,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<sup>[1]</sup>,这种耦合是非线性的,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的控制,常常在控制系统中有意识地引进非线性的控制规律,比如时间最短控制就要采用非线性 Bang-Bang 控制<sup>[2,3]</sup>。非线性系统是自然界中最普遍的系统,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<sup>[4,5]</sup>,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,这种振荡严格来说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,非线性系统的拓扑结构更复杂多样化<sup>[6]</sup>。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;有些非线性是有益的,应在设计时予以考虑。长期以来在非线性的控制系统的研究方面已经积累了许多成果,但由于非线性系统的复杂性,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来改造所涉及的各种动力系统的性能,使其最大限度地满足特定需要的理论与技术的总称<sup>[7]</sup>。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率法和根轨迹法,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、Dalin 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,应称之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。20 世纪 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。以上这些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 Bellman 的《矩阵分析导论》一书<sup>[8]</sup>和 1963 年 Kalman 的“线性动态系统的数学描述”一文<sup>[9]</sup>,为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,改写成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。特别是在提出能控性、能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;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,最优控制设计方法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能控性、能观测性、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<sup>[10]</sup>,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,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方法和理论。

第三阶段为非线性控制理论。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,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与综合,非线性系统分析通常包括用于描述非线性系统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转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,常见的方法包括伪线性化法、扩展线性化法、线性化簇、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变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<sup>[11~13]</sup>。罗马大学教授 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,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,凡是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。而关于近代微分几何方法与非线性微分代数控制系统的设计问题更是具有非线性负荷的电力系统理论的新学科。

## 1.2 电力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<sup>[14]</sup>:

(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;对电力系统这一类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、偏微和泛函方程,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。另一方面,控制理论的研究又对数学的许多领域产生重要影响。例如,极大值原理的深化产生了许多抽象变分原理;和非光滑最优控制理论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