



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

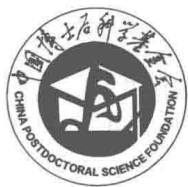
# 柔性交直流输电系统的 非线性控制

王杰 著

非  
外  
借



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 柔性交直流输电系统的 非线性控制

王 杰 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统阐述灵活交直流输电系统的非线性控制理论方法及应用共 8 章, 主要内容包括: 静止无功补偿器基本原理和相应的控制设计方法; 静止同步补偿器的基本结构、工作原理及协调稳定控制; 电池储能系统多指标非线性协调控制; 交直流联合输电系统的鲁棒稳定控制设计; Lagrange 力学化在含晶闸管可控串联电容器电力系统中的应用、基于 Hamilton 能量函数的发电机励磁与晶闸管可控串联电容器和超导储能装置的协调控制; 及时滞影响的发电机励磁与灵活交流输电系统非线性协调控制。

本书可作为具有常微分方程和非线性控制理论知识的高年级本科生、研究生的教材, 也可供电气工程专业、电力系统及自动化专业的研究人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

柔性交直流输电系统的非线性控制/王杰著. —北京: 科学出版社, 2017. 10  
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-054825-2

I. ①柔… II. ①王… III. ①柔性交流输电-电力系统-自动控制  
②直流输电-电力系统-自动控制 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 255131 号

责任编辑: 金 蓉 孙伯元 / 责任校对: 郭瑞芝  
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 10 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 10 月第一次印刷 印张: 20 1/4

字数: 380 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

## 《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

# 前 言

灵活交流输电系统技术最初是因潮流控制的需要而产生的。研究表明,在增强系统阻尼,提高系统小干扰稳定性,抑制次同步振荡以及提高系统的暂态稳定性等方面,灵活交流输电系统技术能起到显著的作用,并有其独到的优越性。电力系统是一个巨维数的强非线性系统,电力电子技术在电力系统中的广泛应用进一步增加了系统的复杂程度。现代互联电网可以用复杂、高度非线性和不连续来描述,因此难以进行数学甚至概念上的建模,这使得输配电网的安全性、性能、传输控制的研究必须在非线性分析的基础上展开。电力系统的暂态稳定性和动态稳定性问题都属于全局性问题,从控制理论出发,电力系统是一个多输入多输出的时变控制系统。早期的控制方法多基于就地量测信息,没有考虑单个控制器多控制目标之间或有共同控制目标的多个控制器之间的协调。在暂态稳定控制中,所取得的控制策略可能并非为全局最优;在动态稳定控制中,独立设计的附加阻尼控制器之间缺少必要的协调,并不能发挥累加性的控制效果,甚至针对特定振荡模式的控制器反而会恶化其他振荡模式下的系统阻尼。随着电力系统中灵活交流输电系统、高压直流设备等各种可控设备的增多,邻近控制器间的交互影响(正面或负面)变得越来越大,各装置间的协调控制有必要纳入考虑范围,从而在整个系统层面进一步提高控制器性能。

随着电力系统结构的日益复杂和规模扩大,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。本书在非线性系统控制理论发展的基础上,进行柔性交直流输电系统的非线性控制研究,对含灵活交流输电系统装置的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。

本书系统阐述灵活交直流输电系统的非线性控制理论及应用,在全面综述该领域国内外研究成果的基础上,主要论述作者近年来从事和参加的国家重点基础研究发展计划项目“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“大型汽轮机组和电力系统耦合的理论研究”(No. G1998020300)及“具有 HVDC 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. 50595412);国家自然科学基金面上项目“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);“基于能量的结构保持复杂动态电力系统稳定性分析与鲁棒控制研究”(No. 61074042),“基于微分代数 Hamilton 系统及其周期解理论的互联电网低频振荡分析与控制”(No. 61374155)及高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(No. 20130073110030)等有关课题所取得的最新成果。

本书共 8 章。第 1 章是绪论,阐明电力系统结构要求和控制特点,介绍灵活交流输电系统、非线性控制在电力系统中的应用和电力系统协调控制的理论与应用;第 2 章介绍微分流形、分岔和极限集,微分方程基本解理论基础,系统的稳定性,非线性微分代数系统的几何线性化;第 3 章系统地研究 SVC 的反步法控制,自适应控制方法在发电机励磁和 SVC 控制设计中的应用,保持结构电力系统 SVC 与发电机励磁协调控制;第 4 章主要介绍 STATCOM 的基本结构与工作原理,STATCOM 与发电机励磁鲁棒非线性协调,计及不确定项的 STATCOM 与发电机励磁鲁棒控制,具有代数约束的 STATCOM 与凸极式发电机控制,凸极式发电机励磁与非理想 STATCOM 的协调控制;第 5 章介绍太阳能光伏并网系统的控制与仿真,BESS 多指标非线性协调控制;第 6 章给出交直流联合输电系统的鲁棒稳定控制,计及发电机励磁的 AC/DC 系统控制,结构保持电力系统的 AC/DC 系统非线性控制;第 7 章专门研究多机电力系统的 Lagrange 力学化与应用,Lagrange 力学化在含 TCSC 电力系统中的应用,多机系统 Hamilton 实现与 Hessian 矩阵正定性,基于 Hamilton 能量理论的超导储能控制器设计,伪广义 Hamilton 理论与多机系统非线性励磁控制,Hamilton 能量函数的发电机励磁与 TCSC 协调控制;第 8 章介绍时滞系统理论,线性多时滞电力系统稳定性及其控制,非线性时滞 Hamilton 理论及其应用,计及时滞影响的发电机励磁与 FACTS 协调控制。

作者从事非线性微分动力系统定性分析和结构保持电力系统稳定控制研究近二十五年,在上海交通大学电气工程博士后流动站工作期间曾经得到清华大学卢强院士、浙江大学韩祯祥院士、清华大学梅生伟教授等的热情指导和协助,作者借此机会对清华大学卢强院士、浙江大学韩祯祥院士、上海交通大学陈陈教授、清华大学孙元章教授、清华大学梅生伟教授、中国科学院系统科学研究所程代展研究员、北京航空航天大学秦世引教授、上海电力学院靳希教授、中国科学院周孝信院士和作者课题组的研究生致以衷心的感谢。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得到了上海交通大学电气工程系博士研究生苏建设、郝晋、徐光虎、石访、古丽扎提,硕士研究生阮映琴、顾丽鸿、刘高原、刘梦欣、李康、朱夏、殷婷、陈毅然、巢睿祺,宁夏大学李世芳教授及浙江树人大学王金铭副教授的热情支持,同时作者也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。

在撰写本书期间,作者得到了国家自然科学基金面上项目(No. 60674035、No. 61074042、No. 61374155)及高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(No. 20130073110030)等有关课题的大力支持,也借此机会向国家自然科学基金委员会、中国博士后科学基金会和科技部等有关部门的支持表示诚挚的谢意。

限于作者水平,本书难免存在一些不足之处,还望读者给予批评和指正。

王 杰



## 主要术语对照表

AC/DC	alternating current/direct current	交直流
ASVG	advanced static var generator	先进的静止无功发生器
AVR	automatic voltage regulator	自动电压调节器
BESS	battery energy storage system	电池储能系统
CSC	current source converter	电流源型变频器
DAS	differential algebraic system	微分代数系统
DIDO	dual input and dual output	双输入双输出
FACTS	flexible AC transmission system	灵活交流输电系统
HVDC	high voltage direct current	高压直流
IGBT	insulated gate bipolar transistor	绝缘栅双极型晶体管
IPC	interphase power controlled	相间功率控制器
LMI	linear matrix inequality	线性矩阵不等式
LOEC	linear optimal excitation control	线性最优励磁控制
LQR	linear quadratic optimal control law	线性二次最优控制律
MIMO	multi-input and multi-output	多输入多输出
MSC	mechanically switched capacitor	机械投切电容器
PID	proportion-integral-differential	比例-积分-微分
PMU	power management unit	电源管理单元
PSS	power system stabilizer	电力系统稳定器
PWM	pulse width modulation	脉宽调制
SISO	single-input and single-output	单输入单输出
SMES	superconductor magnetic energy storage	超导磁储能器
SMIB	single machine infinite bus	单机无穷大
SSG	static synchronous generator	静止同步发电机
SSSC	static synchronous series compensator	静止同步串联补偿器
STATCOM	static synchronous compensator	静止同步补偿器
STATCON	static synchronous condenser	静止同步调相器
SVC	static var compensator	静止无功补偿器
SVG	static var generator absorber	静止无功发生器

SVS	static var system	静止无功系统
TATCON	static condenser	静止调相器
TCBR	thyristor controlled braking resistor	晶闸管可控制动电阻器
TCPS	thyristor controlled phase shifter	晶闸管可控移相器
TCPST	thyristor controlled phase shifting transformer	晶闸管可控移相变压器
TCR	thyristor controlled reactor	晶闸管可控电抗器
TCSC	thyristor controlled series capacitor	晶闸管可控串联电容器
TCSCOM	thyristor controlled series compensator	晶闸管可控串联补偿器
TCSR	thyristor controlled series reactor	晶闸管可控串联电抗器
TCVL	thyristor controlled voltage limiter	晶闸管可控电压限制器
TCC	thyristor controlled capacitor	晶闸管可控电容器
TSR	thyristor switched reactor	晶闸管投切电抗器
TSSC	thyristor switched series capacitor	晶闸管投切串联电容器
TSSR	thyristor switched series reactor	晶闸管投切串联电抗器
TSSCOM	thyristor switched series compensator	晶闸管投切串联补偿器
UPFC	unified power flow controller	统一潮流控制器
VCS	var compensating system	无功补偿系统
VSC	voltage source converter	电压源型变频器
WADC	wide-area damping controller	广域阻尼控制器
WAMS	wide area measurement system	广域测量系统
WATSC	WAN time lag compensation controller	广域时滞补偿控制器

## 符 号 表

$f_0$	同步频率(50Hz)
$\omega_0$	同步角速度( $2\pi f_0$ )
$\delta_i$	第 $i$ 台发电机的功角
$\omega_i$	第 $i$ 台发电机的转速
$P_m$	机械功率(转矩)
$P_e$	电磁功率(转矩)输出
$M_i, D_i$	第 $i$ 台发电机的转动惯量和阻尼系数
$x_{di}, x_{qi}$	第 $i$ 台发电机 $d$ 轴和 $q$ 轴同步电抗
$x'_{di}$	第 $i$ 台发电机 $d$ 轴暂态电抗( $x'_{di} < x_{di}, x_{qi}$ )
$T'_{d0i}$	第 $i$ 台发电机 $d$ 轴暂态开环时间常数
$E'_{qi}$	第 $i$ 台发电机 $q$ 轴暂态电势
$V_{qi}, V_{di}, I_{qi}, I_{di}$	第 $i$ 台发电机 $q$ 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 $\cos[2(\delta_i - \theta_j)]$ , 对于其他角度表示类似
$i \in N_k^n$	表示 $i = k, k+1, k+2, \dots, n$ , 对于其他字母表示类似
$\partial_x f$	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

《博士后文库》序言

前言

主要术语对照表

符号表

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 电力系统结构要求和控制特点 .....	1
1.2 FACTS .....	2
1.3 非线性控制在电力系统中的应用 .....	9
1.4 电力系统协调控制的理论与应用 .....	12
参考文献 .....	13
第 2 章 预备知识 .....	15
2.1 微分流形、分岔和极限集 .....	15
2.1.1 微分流形 .....	15
2.1.2 分岔和极限集 .....	16
2.1.3 流和极限集 .....	18
2.2 微分方程基本解理论基础 .....	22
2.2.1 一般性的线性时变系统 .....	22
2.2.2 Wronsky 行列式 .....	23
2.3 系统的稳定性 .....	23
2.3.1 稳定性的基本概念 .....	23
2.3.2 辛结构与传统 Hamilton 系统 .....	25
2.3.3 广义 Poisson 括号与广义 Hamilton 系统 .....	25
2.3.4 受控耗散 Hamilton 系统 .....	27
2.3.5 广义 Hamilton 实现的定义及性质 .....	28
2.4 非线性 DAS 的几何线性化 .....	30
2.4.1 DAS 的解 .....	30
2.4.2 线性化标准型 .....	33
2.4.3 参数自适应控制理论与方法 .....	36
参考文献 .....	40

<b>第 3 章 SVC 的非线性控制</b> .....	42
3.1 SVC 的反步法控制 .....	43
3.1.1 SVC 基本原理和数学模型 .....	43
3.1.2 耗散系统基本概念和原理 .....	45
3.1.3 反步法控制设计方法 .....	47
3.1.4 无源控制方法在发电机励磁和 SVC 控制设计中的应用 .....	49
3.1.5 仿真分析 .....	53
3.2 自适应控制方法在发电机励磁和 SVC 控制设计中的应用 .....	55
3.2.1 具有 SVC 的电力系统模型 .....	55
3.2.2 SVC 与发电机励磁控制器的设计 .....	56
3.2.3 参数自适应控制器的设计 .....	58
3.2.4 仿真分析 .....	60
3.3 结构保持电力系统 SVC 与发电机励磁协调控制 .....	63
3.3.1 多个 SVC 的多机电力系统模型 .....	63
3.3.2 仿真分析 .....	71
参考文献 .....	74
<b>第 4 章 STATCOM 与发电机励磁协调控制</b> .....	77
4.1 STATCOM 的基本结构与工作原理 .....	77
4.1.1 STATCOM 的基本结构 .....	77
4.1.2 STATCOM 的无功补偿原理 .....	78
4.1.3 STATCOM 与 SVC 的比较 .....	79
4.1.4 含 STATCOM 的电力系统模型 .....	80
4.1.5 STATCOM 与发电机励磁非线性协调控制器设计 .....	82
4.1.6 仿真分析 .....	85
4.2 STATCOM 与发电机励磁鲁棒非线性协调控制 .....	87
4.2.1 计及不确定项的含 STATCOM 的电力系统 .....	87
4.2.2 STATCOM 与发电机励磁鲁棒非线性协调控制器设计 .....	87
4.2.3 仿真分析 .....	89
4.3 计及不确定项的 STATCOM 与发电机励磁鲁棒控制 .....	90
4.3.1 计及不确定项的含 STATCOM 的电力系统数学模型 .....	90
4.3.2 计及不确定项的 STATCOM 与发电机励磁鲁棒控制器设计 .....	93
4.3.3 仿真分析 .....	98
4.4 具有代数约束的 STATCOM 与凸极式发电机控制 .....	100
4.4.1 具有代数约束的 STATCOM 的电力系统数学模型 .....	101
4.4.2 具有代数约束的 STATCOM 与凸极式发电机控制器设计 .....	102

4.4.3	仿真分析 .....	107
4.5	凸极式发电机励磁与非理想 STATCOM 的协调控制 .....	109
4.5.1	非理想 STATCOM 数学模型 .....	109
4.5.2	协调控制器的设计要求 .....	112
4.5.3	控制输入的确定 .....	115
4.5.4	仿真分析 .....	116
	参考文献 .....	119
<b>第 5 章</b>	<b>BESS 多指标非线性协调控制 .....</b>	<b>121</b>
5.1	太阳能光伏并网系统的控制与仿真 .....	121
5.1.1	光伏阵列 .....	121
5.1.2	MPPT 法原理 .....	124
5.1.3	仿真分析 .....	125
5.2	BESS 多指标非线性协调控制 .....	131
5.2.1	BESS 与发电机联立的数学模型 .....	131
5.2.2	BESS 多指标非线性控制规律的设计 .....	136
5.2.3	仿真分析 .....	139
	参考文献 .....	141
<b>第 6 章</b>	<b>AC/DC 联合输电系统的稳定控制 .....</b>	<b>143</b>
6.1	AC/DC 联合输电系统的鲁棒稳定控制 .....	143
6.1.1	基于 AC/DC 动态特性的控制模型 .....	144
6.1.2	线性鲁棒控制器设计 .....	147
6.1.3	仿真分析 .....	150
6.2	计及发电机励磁的 AC/DC 系统控制 .....	153
6.2.1	基于 AC/DC 动态特性的控制模型 .....	154
6.2.2	控制系统的坐标变换 .....	156
6.2.3	计及发电机励磁的 AC/DC 系统控制器设计 .....	159
6.2.4	仿真分析 .....	159
6.3	结构保持电力系统的 AC/DC 系统非线性控制 .....	162
6.3.1	AC/DC 并联系统的非线性 DAS 模型 .....	163
6.3.2	SMIB AC/DC 并联系统的非线性控制 .....	164
6.3.3	单机无穷大 AC/DC 并联系统仿真分析 .....	169
6.3.4	多机 AC/DC 并联系统非线性控制 .....	176
6.3.5	仿真分析 .....	180
	参考文献 .....	183

<b>第 7 章 Hamilton 系统的非线性控制</b> .....	186
7.1 多机电力系统的 Lagrange 力学化与应用 .....	186
7.1.1 问题描述与基本理论 .....	187
7.1.2 电力系统 Hamilton 实现及控制器设计 .....	189
7.1.3 仿真分析 .....	193
7.2 Lagrange 力学化在含 TCSC 电力系统中的应用 .....	196
7.2.1 问题描述与基本理论 .....	197
7.2.2 含 TCSC 的电力系统 Hamilton 实现及控制器设计 .....	198
7.2.3 仿真分析 .....	201
7.3 多机系统 Hamilton 实现与 Hessian 矩阵正定性 .....	203
7.3.1 问题描述 .....	204
7.3.2 一般矩阵正定性的判定方法 .....	205
7.3.3 电力系统模型及 Hessian 矩阵正定性的判断 .....	207
7.3.4 仿真分析 .....	210
7.4 基于 Hamilton 能量理论的超导储能控制器设计 .....	213
7.4.1 问题描述及基本性质 .....	213
7.4.2 含 SMES 电力系统的广义耗散 Hamilton 实现 .....	214
7.4.3 控制器设计 .....	218
7.4.4 仿真分析 .....	219
7.5 伪广义 Hamilton 理论与多机系统非线性励磁控制 .....	220
7.5.1 问题描述及基本性质 .....	221
7.5.2 多机电力系统非线性励磁控制器设计 .....	223
7.5.3 仿真分析 .....	226
7.6 Hamilton 能量函数的发电机励磁与 TCSC 协调控制 .....	230
7.6.1 含 TCSC 的 SMIB 模型 .....	231
7.6.2 广义耗散 Hamilton 实现 .....	232
7.6.3 控制器的设计与实施 .....	232
7.6.4 仿真分析 .....	234
参考文献 .....	237
<b>第 8 章 时滞系统的非线性控制</b> .....	242
8.1 时滞系统理论 .....	242
8.1.1 非线性时滞系统理论与控制方法 .....	242
8.1.2 广域时滞电力系统 .....	243
8.2 线性多时滞电力系统稳定性及其控制 .....	245
8.2.1 多时滞系统的时滞依赖稳定判据 .....	245

---

8.2.2	电力系统多时滞建模	249
8.2.3	计及时滞分量的输出反馈控制器设计	252
8.3	非线性时滞 Hamilton 理论及其应用	256
8.3.1	非线性时滞 Hamilton 系统的时滞依赖稳定性条件	257
8.3.2	电力系统时滞 Hamilton 实现	258
8.3.3	WADC 设计	261
8.3.4	仿真分析	262
8.4	计及时滞影响的发电机励磁与 FACTS 协调控制	273
8.4.1	非线性时滞 Hamilton 系统发电机励磁与 SVC 协调控制	273
8.4.2	非线性时滞 Hamilton 系统发电机励磁与 TCSC 协调控制	285
	参考文献	297
	编后记	303



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 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主要有四个特点<sup>[1]</sup>。

(1) 受高科技需求的有力推动,控制理论发展迅速。航空、航天、工业过程、航海、社会经济等领域给控制理论提出了许多挑战性问题,例如,阿波罗登月舱沿着最优轨线飞行的导航,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,在月球上的软着陆,高机动性能、开环不稳定的新式战斗机的设计,对电力系统这一类包括随机不确定因素系统的控制,对机器人的稳健控制及多臂协作控制,对轧钢的温度控制等生产过程的控制,都给控制理论提出了新课题,在解决这些问题的过程中,控制理论也确实起到了关键的作用。

(2) 控制理论的发展依赖于数学,控制理论的发展又推动数学的进步。现代数学中常微分方程、偏微分方程、泛函方程、代数、概率统计、变分法、函数论、离散数学、几何、数值计算等分支都是控制理论研究的重要工具。例如,Lie 代数是研究非线性系统能控性的重要工具;鞅论是建立随机自适应系统理论的关键基础;泛函分析是研究无穷维系统的基本手段。另外,控制理论的研究对数学的许多领域产生重要影响。例如,边界控制及双曲方程的精确能控性得出在较弱的条件下有关解的正则性的新结果;极大值原理的深化形成许多抽象变分原理;与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的作用;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;解的最优随机控制表示法在黏性解理论中有重要作用;稳健控制对算子理论及复变函数提出了有意义的新问题;随机控制对 Markov 过程大偏差理论以及金融数学产生重要影响;对非线性控制的研究产生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。这些都体现出控制理论对数学本身发展的有力促进作用。

(3) 控制理论与其他领域广泛交叉(渗透)的特色将愈发鲜明。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,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做出重要贡献。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