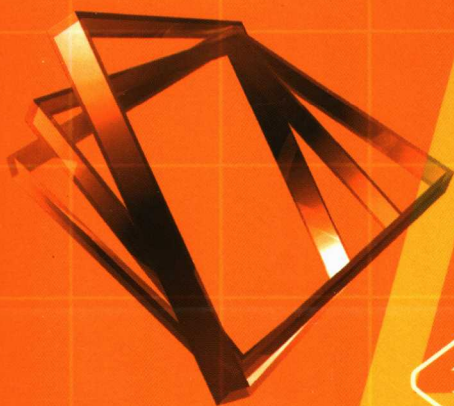


王 杰 著



结构保持

电力系统控制理论

与应用



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

国家自然科学基金资助项目

TM76/16

2007

结构保持

电力系统控制理论与应用

王 杰 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书在经典的非线性系统几何结构理论的发展基础上,系统地介绍了用于控制微分代数系统的反馈线性化技术理论和方法,对具有非线性负荷的电力系统非线性控制的理论及方法进行了深入的研究。全书分七章,主要内容包括电力系统非线性控制研究进展、非线性微分代数控制系统的描述、单输入单输出非线性微分代数系统控制设计、多输入多输出非线性微分代数系统的控制设计、电力系统与非线性负荷模型、具有非线性负荷的电力系统励磁控制、具有负荷及 SVC 的电力系统励磁控制。

本书的主要读者对象是具有常微分方程基础知识和控制理论基础知识的大学生、研究生、教师和电力工程技术人员。本书可以作为高校电气工程专业、电力系统及其自动化专业和从事该领域研究工作的本科生、研究生和教师阅读参考,也可作为从事电气控制理论及其应用的科研工作者、工程技术人员、科研院所、高等学校教师和研究生的教科书或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

结构保持电力系统控制理论与应用/王杰著. —北京:
中国电力出版社, 2007
ISBN 978-7-5083-6318-9

I. 结… II. 王… III. ①非线性控制系统-应用-电力系统②微分代数-应用-电力系统 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 184124 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 12 月第一版 2007 年 12 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 153 千字
印数 0001—2000 册 定价 16.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书在经典的非线性系统几何结构理论的发展基础上,首次提出了用于控制微分代数系统的反馈线性化技术理论和方法,给出了关于微分代数系统的 M 导数和 M 括号等新的运算定义和结果,结合反馈精确线性化、一般控制设计和参数自适应控制,利用非线性微分代数系统几何线性化理论,对具有非线性负荷的电力系统非线性控制的理论及方法进行了深入的研究。其主要内容如下:

针对一般的单输入单输出非线性微分代数系统,对状态反馈精确线性化的设计方法进行了研究探讨,给出有关微分代数系统的 M 导数和 M 括号等新的运算定义,并得到相关的一些新结果,在一定的条件下可将非线性微分代数系统转变为一个完全可控的具有代数方程的线性控制系统。

针对一般的多输入多输出非线性微分代数系统的控制,首先给出了多输入多输出非线性微分代数系统的关系度与线性化标准型,并对不同的关系度讨论对应的线性化标准型的表达式。研究了多输入多输出非线性微分代数系统的参数自适应控制设计,针对多输入多输出非线性微分代数系统的跟踪和系统参数的不确定性,利用多输入多输出反馈线性化技术,当系统的关系度小于系统的阶数及其在指定的条件下,得到微分代数系统模型的标准形式,根据线性系统的控制理论及其跟踪目标的要求,导出相应的控制规律的表达式。在系统参数不确定时,运用 Lyapunov 稳定性的理论方法,求得参数自适应控制的表达式,并实现系统跟踪的控制目的。

针对电力系统与非线性负荷的关系,简述了负荷建模的有关理论和方法,扼要概述了电力负荷基本成分的特性与模型、电力负荷的静态模型、电力负荷的机理动态与非机理动态,并给出包括发电机、网络和非线性负荷的多输入多输出电力系统的基本方程,使得该模型更加符合实际的电力系统。

针对具有非线性负荷的电力系统,首先研究了具有非线性负荷的单机系统励磁控制设计,然后着重研究了非线性负荷的多机电力系统励磁控制设计,给出具有非线性负荷的多机电力系统状态反馈精确线性化的条件。最后研究具有非线性负荷的多机系统参数自适应控制设计,根据线性系统的控制理论及其跟踪目标的要求,导出控制规律的具体表达式,在具有非线性负荷的电力系统中存在参数不确定时,运用 Lyapunov 稳定性的理论方法,求得参数自适应控制的表达式,并实现系统跟踪的控制目的,取得了良好的控制效果。

作者在上海交通大学电气工程博士后流动站工作期间得到导师陈陈教授和电气工程系有关领导和老师们的大力支持和帮助,使研究工作能够得以顺利开展和深入,作者愿借此机会对上海交通大学陈陈教授、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、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和我们在上海交通大学课题组的研究生们表示感谢，他们对本书提出了很多建设性的意见；本书的撰写与校对工作得到了阮映琴硕士的热情支持和帮助，本书的修改增订工作得到了刘高原硕士和刘梦欣硕士的热情支持，作者在此一并致谢！

在撰写修订本书期间，作者得到了国家自然科学基金（No. 60674035）和中国博士后基金的支持，借此机会向有关方面表示感谢！

限于作者水平，本书存在不少不妥和错误之处，还望读者给予批评和指正！

作者

2007 年 10 月于上海交通大学

目 录

前 言

第1章 电力系统非线性控制研究进展	1
1.1 引言	1
1.2 控制理论的发展概述	2
1.3 控制理论的特点及其应用	6
1.4 电力系统的结构和要求	9
1.5 电力系统的控制方式	12
1.6 非线性控制在电力系统中的应用	13
1.7 本书的主要内容	25
第2章 非线性微分代数控制系统的描述	28
2.1 引言	28
2.2 NDAS 解的存在唯一性	32
2.3 M 导数与 M 括号	35
2.4 向量场集合的 M 对合性	37
2.5 NDAS 的 M 关系度	37
2.6 非线性 NDAS 的线性化标准型	38
第3章 单输入单输出非线性微分代数系统控制设计	39
3.1 引言	39
3.2 状态反馈精确线性化的设计原理	41
第4章 多输入多输出非线性微分代数系统的控制设计	48
4.1 引言	48
4.2 M 关系度与线性化标准型	50
4.3 状态反馈精确线性化设计	52
4.4 参数自适应控制设计	56
第5章 电力系统与非线性负荷模型	62
5.1 引言	62
5.2 基本负荷特性的描述	65
5.3 同步发电机模型的建立	67
5.4 具有非线性负荷的电力系统数学描述	69
第6章 具有非线性负荷的电力系统励磁控制	73
6.1 引言	73
6.2 励磁控制的几种方式	75
6.3 具有非线性负荷的单机系统励磁控制设计	76

6.4 具有非线性负荷的多机系统励磁控制设计	79
6.5 具有非线性负荷的多机系统参数自适应控制设计	87
第7章 具有负荷及 SVC 的电力系统励磁控制	93
7.1 引言	93
7.2 计及动态负荷的电力系统 SVC 与发电机励磁控制	94
7.3 提高多机系统暂态稳定的励磁与 SVC 控制设计	101
问题与展望	110
参考文献	112

电力系统非线性控制研究进展

1.1 引言

在工程实际应用中,许多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^[1],这种耦合是非线性的,如果要研究机械手调整运动的控制就必须考虑非线性耦合;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中的大范围运动时,就必须考虑非线性特性的影响;还有一类对象本身虽然是线性的,但为了对它进行有效地控制,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 Bang-Bang 控制,它是非线性的^[2,3]。非线性现象在自然界中是普遍存在的,非线性系统是普遍存在的一般系统,线性系统只是一般系统的特殊情形。由于非线性特性的复杂性,不可能有统一的普遍适用性的处理办法。而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,因此线性控制系统理论取得了很大的成就。而非线性微分方程只有在个别情况下才可能有解析解^[4,5],这给非线性控制系统的研究带来极大的困难和障碍。

线性系统中的运动可能有几种情况:衰减的或发散的振荡或不振荡运行,或临界的振荡等等。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;可以出现振荡的极限环,这种极限环可能有多个;还可能出现混沌现象,既非稳定的极限环,又非无限制的发散,由此可见非线性系统中的现象更复杂多样化^[6]。考虑到许多控制系统的非线性对系统运行不利,故应设法克服它的不利影响。有些非线性性质是有益的,应在设计时予以考虑。多年来在非线性和非线性控制系统的研究方面积累了许多成果。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,非线性系统理论的研究工作已取得不少新的重要进展。

1.2 控制理论的发展概述

控制是用施加某种特定的输入的方法,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^[7]。控制技术的进步总是紧紧依赖于控制理论的发展。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,可称之为复数域或频域的经典控制理论。有的文献也将其称为古典控制理论。其实,这个体系的控制理论并非十分“古典”。它的整个理论体系在20世纪50年代才发展成熟,而且至今也还有一定的发展。在习惯上称它为古典控制理论,主要是相对于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。在实际建模中,一般并不是一次写出整个闭环系统的传递函数,而是首先将整个系统划分为成若干个由一阶或二阶微分方程描述的典型环节,并列出这些典型环节的传递函数,然后将这些典型环节的传递函数按照系统的实际结构,连接成整个闭环系统的传递函数结构图,从而得到全系统的传递函数。因传递函数是复变量的函数,故这种控制理论可称之为复域的控制理论。若只考虑复变量的虚数部分并代入系统传递函数,则得到该系统的频率特性,通常将这种控制理论的分析方法称为频域法。这种传递函数描述法,决定了古典控制理论有如下基本特点及实用范围。第一,这种理论与方法的最大特点是将以时间 t 为自变量的高阶微分方程的求解问题转化为关于复变量的多项式代数问题,因此它所运用数学工具较为简单,主要是拉氏变换和多项式代数方程。第二,传递函数所能描述的,也只能是线性定常的控制系统。第三,由于传递函数所确定的只是输出量与输入量拉氏变换之比,因此这种理论方法主要适用于研究单控制量单输出量的系统。第四,传递函数或频率特性的描述方法,只是从系统的输出量与输入量之间的关系的角度去研究一个系统的,故它难以提示系统内部的动态行为。以上是由古典控制特有的建模方法所决定的这种理论体系的优点、特点及其局限性。

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。所谓线性控制系统是指系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程描述的系统。如果描述该线性系统的微分方程的系数是常数,则称为线性定常系统。描述自动控制系统输入量、输出量和内部量之间关系的数学表达式称为系统的数学模型,它是分析和设计控制系统的基础。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拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比,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。经典控

制理论的特点是以传递函数为数学工具,本质上是频域方法,主要研究单输入单输出(SISO)线性定常控制系统的分析与设计,对线性定常系统已经形成相当成熟的理论。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“单输入—单输出”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,经典控制理论到目前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。随着工程控制系统规模及复杂程度的增大以及对控制精确程度和对系统动态品质要求的不断提高,上述的古典控制理论的局限性愈来愈尖锐地显露出来。生产和科学技术的发展迫切要求发展一种能很好适用于多输入多输出(MIMO)动态系统的新的控制理论与综合方法。另一方面,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,总起来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》^[8]和1963年R. E. Kalman的《线性动态系统的数学描述》一文^[9],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,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叫做状态方程。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。

现代控制理论有几个主要分支:第一分支是线性系统理论,它是现代控制理论的基础,主要研究线性系统状态的运动规律和改变这些规律的可能性与实施方法;建立和揭示系统结构、参数、行为和性能之间的关系。它除了包括系统的能控性、能观测性和稳定性分析之外,还包括状态反馈、状态估计及补偿器的理论和设计方法等内容。第二分支是最优滤波理论,它所研究的对象是由随机微分方程或随机差分方程所描述的随机系统。由于这类系统除了具有描述系统与外部联系的输入、输出之外,还承受不确定因素(随机噪声)的作用,该分支就是研究利用被噪声污染的量测数据,按照某种判别准则,获得有用信号的最优估计。卡尔曼滤波理论用状态空间法设计的

最佳滤波器, 实用性强且可适用于非平稳过程, 是滤波理论的一大突破。第三分支是系统辨识。研究系统的状态, 建立系统在状态空间的数学模型是一项基本的工作。由于系统的复杂性, 并不总是可以通过解析的方法来直接建立其数学模型的。所谓系统辨识就是在系统的输入输出的试验数据的基础上, 从一组给定的模型类中确定一个与所测系统本质特征相等价的模型。当模型的结构已经确定, 只需用输入输出的量测值来确定其参数的, 叫做参数估计。而同时确定模型结构和参数的, 则泛称系统辨识。第四分支是最优控制, 最优控制就是在给定限制条件和性能指标下, 寻找使系统性能在一定意义下为最优的控制规律。这里所说的“限制条件”是指物理上对系统所施加的一些限制, 而“性能指标”是为评价系统优劣性的人为规定的标准, 它是以系统在整个工作期间的性能作为一个整体而出现的。寻找控制规律也就是综合得出所需控制器。在解决最优控制问题中, 庞特里雅金的极大值原理和贝尔曼动态规划法是最重要的两种方法, 它们以不同的形式给出了最优控制所必须满足的条件, 并推出许多定性的性质。第五分支是自适应控制。自适应控制是随时辨识系统的数学模型并按此模型去调整最优控制规律。其基本思想是当被控对象内部的结构和参数以及外部的环境干扰存在不确定性时, 在系统运行期间, 系统自身能对有关信息实现在线测量和处理, 从而不断地修正系统结构的有关参数和控制作用, 使该系统能够处于所要求的最优状态, 得到人们所期望的控制结果。常用的自适应控制器方案大致有: 编程控制、模型参考自适应和自校正控制。自适应理论的发展是自学习、自组织系统理论。

第二阶段的控制理论有以下这些显著特点: 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拉氏变换与多项式代数。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 MIMO 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结合, 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^[10], 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、时变性和非线性等因素, 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系统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,如果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,使系统的输出达到预期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。描述函数法是对非线性系统的数学模型的最优逼近,能描述出非线性系统在时域中输入输出关系;级数展开法常用于推导非线性系统在频域中的输入输出表达式;稳定性分析是研究非线性系统在各种扰动或噪声下保持稳定的条件。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理论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^[11~13]。罗马大学教授A. Isidori曾指出:正如20世纪50年代前引入拉氏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SISO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。他的这一观点,不是没有根据的。从非线性系统的能控性和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地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、电力系统和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。

1.3 控制理论的特点及其应用

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^[14]：

(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、工业过程及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的课题和新的挑战，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，同时又推动数学基础研究的发展。现代数学中常微分方程、偏微分方程和泛函方程，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；李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在较弱的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粘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，并发现了系统李括号结构与变分问题之间的相互作用等等，都是控制理论对数学本身的发展起到了有力的促进作用。

(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，并将继续不断地拓广。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、复杂性及灵活性上将大大突破传统的自动控制理论方法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等。

控制理论中各种方法对现代技术的发展有着很大的影响。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, 这些控制器也遍布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的发展, 还由于控制理论有处理其模型和输出信号具有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愈来愈得到普遍应用的同时, 先进的理论概念的应用仍然集中在空间工程等高技术方面。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, 愈来愈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。

一般来说, 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 10 年或者 20 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现象的影响, 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尼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。最优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。大型电厂控制的困难在于维数的巨大。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。

航天飞机装备包括两部不同的数字自动驾驶仪的精密控制系统, 其中一部驾驶仪专用以控制飞机在轨道上的上升和下降动作, 另一部则控制飞机在轨道上的正常飞行。控制和数控处理功能由五部相同的 IBCAP-101 计算机完成。轨道飞行控制系统用状态估计和开关控制等各种现代控制原理构成控制规律。例如, 反应控制系统依靠在每个转轴上的相平面中预先规划好的切换曲线来控制推进器的正负点火指令。这一设计需要广泛研究飞行体和变动负载间所有可能存在的有利的动态反应。作为预防故

障的手段,要设计能对转动率的极值、推进器的冲力强度给予限制的装备。除此之外,还备有一个更新试验驾驶仪,它具有一个用以选择发动机喷射器的与线性规划算法相结合的三维相空间控制规律。这个自动驾驶仪经飞行试验证明,它对飞机动态变化具有很强的适应性。

一种治疗脑水肿和恶性肿瘤的方法是同时使用加压素和皮质酮两种药。由于人体系统调节这些激素的高度非线性特性,引用这些药的相对速率是非常重要的。法国研究人员把这一问题当作一个 2×2 非线性多变量控制问题,并基于李代数方法采用了非线性去耦合反馈线性化手段,成功地解决了给药速率控制问题。

许多轻型高飞行性能的飞机的最主要部件是数字飞行控制系统。F-16 和削掠翼 X-29 飞机中的机械联动机构已被数字计算机和电线代替,所以又称“以线飞行”系统。为了增强飞行性能,这些飞机被设计得静态(开环)不稳定。数字式的线飞行系统可以被设计得能改变飞机的飞行特性,控制系统全时间工作以镇定飞机运行的稳定性,并支持驾驶发出的各种指令。这种设计由于采用了快到足以反应流体动力学的波动来镇定一个不稳定动态系统的数字控制系统而得到实现。用控制理论去设计这些飞机的确是一个重大的成功。很明显,将来“超性能”飞机的出现将取决于快速稳定控制器的设计研究的进展。

建筑工程界流行对结构进行主动控制。在世界上几座最高建筑物的设计中采用了主动阻尼系统。结构工程师们的理论研究说明:一个设计完善的主动控制和谐调整质量阻尼系统可以减少建筑物承受强风时的动态移动。

工业应用自动控制的范围更广,为简化起见可以用两个例子说明。控制概念得到主要应用的一个领域是石油化工生产过程。化工厂中每一个生产单元都包括有几百个控制器,最常见的是单回路 PID 控制器,也有新型的延迟补偿器、状态估计器、不相关多变量控制器。许多自动化仪表厂家已经供应自校正调节器和自适应控制器。钢铁行业中热轧厂是最早成功地采用计算机控制的工厂。高质量、高产量的生产要求,使它们早在 1961 年就已经采用计算机自动化,从那时起,热轧厂控制技术发展很快,已达到多层次多变量的自适应控制。

简单地说,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好的恰当的数学模型是控制工程中最重要的工作。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特别困难的。在有些情况下,可以写出一个系统的精确的动力学数学模型,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规律。所幸的是对于不完全清楚的模型还能较好地处理,因为从无数实践中我们已经学到: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适当的数学上精简的模型,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。进行系统辨识常需做下列实验：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下列诸基本问题上：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。

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做出了许多重要贡献，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、图像再现等等。如果没有这种计算机化了的图像再现能力，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。

1.4 电力系统的结构和要求

电力系统是指由进行电能生产、变换、输送、分配和消费的各种电气设备按照一定的技术和经济要求有机组成统一系统的总称^[15]。它由发电厂、变电所、输配电线路及各种用电设备组成。电能是现代社会中最重要，也是最方便的能源。电能具有许多优点，它可以方便地转化为别的形式，例如机械能、热能、光能、化学能等等；它的输送和分配易于实现；它的应用规模也很灵活。因此，电能被极其广泛地应用于工农业、交通运输业、商业贸易、通信以及人民的日常生活中。以电作为动力，可以促进工农业生产的机械化和自动化，保证产品质量，大幅度提高劳动生产率。还要指出，提高电气化程度，以电能代替其他形式的能量，是节约总能源消耗的一个重要途径。发电厂把其他形式的能量转化成电能，电能经过变压器和不同电压等级的输电线路输送并被分配给用户，再通过各种用电设备转换成适合用户需要的其他形式的能量。电力系统中的各类发电厂，包括水力发电厂、火力发电厂、核电厂等，将水利、燃料、核能等一次能源转换成电能。火电厂的汽轮机、锅炉、供热管道和热用户，水电厂的水轮机和水库等则属于与电能生产相关的动力部分。发电厂所发出的电能通过高压变电所、输电线路和低压变配电所以及配电线路传送并分配到各用电设

备,从而实现电能的消费过程。电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网,它包括升、降压变压器和各种电压等级的输电线路。由于电工技术的发展,高压直流输电作为一种新的输电方式得到了实际的应用。在交流系统中或者在两个交流电力系统之间嵌入直流输电系统,便构成了现代交直流联合系统,直流输电系统由换流设备、直流线路以及相关的附属设备组成。为了确保电力系统的安全、可靠运行,电力系统还包括继电保护、自动装置、通信、调度自动化及其自动监测和控制系统等设备。

电力系统组成具有它自己独特的特性^[16]:

(1) 电能不能大量存储。电能的生产、变换、输送、分配、消费是在同一时间内进行的,是不能贮藏的,即发电厂每时每刻生产的电能取决于用电设备消费的能量与输送、分配过程中消耗的电能之和。这是电能生产的最大特点。这个特点要求在运行时保持电源和负荷之间的功率平衡。另外,由于发电和用电同时进行,因此电力系统的各个设备环节之间具有十分紧密的相互依赖关系。不论生产和变换能量的原动机、发电机还是输送、分配电能的变压器、输电配电线路以及用电设备等,只要其中的任何一个元件设备发生故障,都会影响电力系统正常的工作。考虑到能量不能存储的特点,电力系统在运行中还要注意经济、有效、合理地使用电能,以节约能源。

(2) 过渡过程十分短暂。电力系统中电和磁是相互联系在一起的,任何一处发生的电磁变化过程,都会以光速传播而影响整个电力系统的正常运行,所以电力系统运行中发生突然变化所引起的电磁方面的变化过程是极其迅速的。电力系统中的正常操作,如变压器、输电线路的投入运行和切除都是在极短时间内完成的;电力系统中出现的故障,如雷击引起线路闪络,导致相间短路或接地故障以及运行人员误操作造成发电机误跳闸等,都是在一瞬间完成的。因此在电力系统中要求进行快速控制和快速排除故障,否则将会危及整个电力系统的安全稳定运行。

(3) 电能生产与国民经济各部门的关系密切。由于电能与其他能量之间转换方便,适宜进行大量生产、集中管理、远距离输送、自动控制,使用电能较使用其他能量具有显著优点。因此,现代工业、农业、交通等各部门都广泛使用电能。电能供应的中断和减少都将影响国民经济的各个部门工作的进行。

电力系统的上述特点以及电力工业在国民经济中的地位和作用,对电力系统提出了下列基本要求:

(1) 保证安全可靠的供电。保证安全可靠的发、供电是对电力系统运行的首要要求。电力系统对用户供电的中断将导致生产停顿,生活发生混乱,甚至会危及人身、设备的安全,造成严重的后果。造成供电中断的原因很多,可能是由于电力系统中某些元件设备发生故障(如绝缘击穿导致的短路、雷击、误操作等),也可能是由于系统中各发电厂之间并联运行的稳定性遭到破坏而引起系统运行的全面瓦解,必须从各个方面采取措施以防止和减少事故的发生。提高供电可靠性的主要措施有:提高电力系统及电气设备的可靠性指标;提高系统运行的稳定性;利用计算机对电力系统运行