

研究生教学用书

先进控制理论及其应用

葛宝明 林飞 李国国 编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

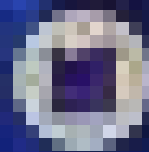


中国工程教育学会
中国机械教育协会
中国航空教育协会
中国航海教育协会
中国航海教育协会

先进控制理论及其应用

周金明 林飞 李国海 编著

中国工程教育学会
中国机械教育协会
中国航空教育协会
中国航海教育协会



研究生教学用书

先进控制理论及其应用

葛宝明 林 飞 李国国 编著
杜继宏 主审

机械工业出版社

为了满足读者对控制理论的需求,使其全面了解、掌握当前在工程应用中成功或颇具前景的控制方法,本书在较详细地介绍控制理论发展历史的基础上,阐述了目前在工程技术领域倍受关注的控制理论分支,如线性系统理论、自适应控制、鲁棒控制、预测控制、非线性系统分析与控制、变结构控制、模糊控制、神经网络控制等。本书内容融入了作者的研究心得,在分析各种控制理论各自特点的同时重点着眼于对它们的理解与应用,力求浅显易懂,避免深奥枯燥的纯理论证明与论述;注重联系实际,突出实践应用,以实例给出各控制理论在工程领域的应用效果,引导读者灵活应用书中理论进一步实现自己的应用目标。章后习题是本书必不可少的组成部分,它有助于引导读者正确理解各种控制方法,为读者提供了实践各种控制方法的平台。本书内容全面、广泛,体现了应用中最先进的理论与技术前沿。各章节内容相辅相成,连贯有序,言简意赅,尽量以最简洁的语言涵盖最丰富的内容,辅以丰富的图表和仿真结果,深入浅出、易于理解。

本书适合作为控制相关领域的工科研究生教材,亦适合各科研院所从事控制相关工作的技术人员和科学工作者自学、参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进控制理论及其应用/葛宝明等编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 6

研究生教学用书

ISBN 978-7-111-21385-7

I. 先... II. 葛... III. 现代控制理论—研究生—教材
IV. 0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 059929 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:贡克勤 版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2007 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·8.5 印张·450 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-21385-7

定价:24.00 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) 88379725

封面无防伪标均为盗版

前言

当今是知识相互渗透和大融合的时代,许多行业与控制理论存在着密切的关系。例如,在电气工程领域内,电力系统自动化、电力电子与电力传动、电机电器等专业都离不开控制理论的支撑;在其他领域,如机械、化工及航天工程等也是如此。这使得这些行业的工作者需要对各种控制理论有一定的了解与掌握,以便于应用。

另一方面,随着本科生的扩招,研究生队伍在大规模壮大,研究生已经是学校与研究所科研工作的生力军,由于科研项目或今后工作的需要,他们对控制理论有迫切的需求。尤其是非控制科学与工程学科的研究生在控制理论方面较薄弱,需要较全面了解控制理论的现状、发展前沿及其工程应用。本书内容正是在这样的背景下产生的。

本书首先全面地介绍了控制理论的发展历史及推动其发展的动力源泉,介绍了目前在工程技术领域倍受关注的控制理论分支,如线性系统理论、自适应控制、鲁棒控制、预测控制、非线性系统分析与控制、变结构控制、模糊控制、神经网络控制等。结合作者的研究心得,分析其各自特点及前沿问题,着眼于对各种控制理论的理解与应用,力求浅显易懂,避免深奥枯燥的纯理论证明与论述。同时,以实例给出各控制理论在工程领域的应用效果,引导读者灵活应用书中理论知识进一步实现自己的应用目标。本书内容已经在北京交通大学电气工程学院的研究生教学中讲授过5遍,取得了较好的效果,这些教学实践为提高本书的质量提供了保障。

本书体现了如下特点:

- 1) 内容全面、广泛,体现了应用中最先进的理论与前沿技术。
- 2) 各章节内容相辅相成、连贯有序,言简意赅,尽量以最简洁的语言涵盖最丰富的内容。
- 3) 力求深入浅出、易于理解,辅以丰富的图表,以便于理解内容。
- 4) 注重联系实际,突出实践应用,提供了各种实际应用例子。

鉴于上述情况,本书适合作为工科研究生教材,亦适合各科研院所从事控制相关工作的技术人员和科学工作者自学、参考。学习本书所需要的基础是微分方程和矩阵运算基本知识,若先修过“经典控制”,则更好。应用本书从事研究生教学时,可以根据学时与学生知识结构的需要灵活掌握。下面给出几种建议,仅供参考:

1) 对于已具有状态空间法基础的研究生而言,第2章的2.1~2.4可略去,第2章的2.5~2.7节应当作为教学内容。

2) 第3~9章可以根据教学需要进行独立选取,各章所占学时比重可按需分配。

3) 每种控制方法以介绍基本原理与应用为主,可以结合应用示例讲授原理,解释清楚正确内涵、直观意义和需要满足的条件即可。

4) 若学时少,应根据不同的需要组织不同的教学内容,以完成一学期课程的教学。可以选取几种控制方法进行详细讲授,或选取本书介绍的全部控制方法进行概略讲授,或精讲几种控制方法而概略讲授其他几种控制方法。例如,课程安排有32学时,期望为学生介绍各种控制方法及其应用,则可挑选各章代表性的控制方法展开教学,通过介绍各控制方法的基本思想、特点与应用,以概论的形式讲授。

本书由葛宝明负责统筹、规划,并完成了第1、3、4、5、6、7、9章的撰写;第2章由葛宝明、李国国撰写;林飞撰写了第8章,并对第2章和第3章的应用举例进行了计算机建模、仿真;陈乐负责完成了第9章恒温箱控制系统的仿真。

本书由清华大学自动化系杜继宏教授主审,并提出许多宝贵意见;北京交通大学电气工程学院范瑜教授和北京工业大学电子信息与控制工程学院乔俊飞教授对本书内容进行了审阅,并提出许多宝贵意见。作者对专家们的辛勤审阅致以衷心的感谢,他们严谨的治学态度,渊博的学识,令作者钦佩,并表示由衷的感谢!

本书参阅了许多国内外论文、论著,主要的都已列举于参考文献部分中,如有遗漏深表歉意!并在此向所有作者们表示深深的谢意!

机械工业出版社贡克勤总策划及其相关工作人员为本书的出版付出了辛勤的劳动,提出了很多极好的意见和建议,在此致以诚挚的谢意!

北京交通大学电气工程学院为本书出版给予了极大的支持,作者的家人、朋友和同事都以不同的方式给予了关怀与帮助,在此一并表示感谢!

由于本书涉及范围广,作者学识有限,加之时间仓促,难免会有疏漏或不当之处,恳请读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 控制系统的构成	1
1.2 控制理论发展简况	2
第 2 章 线性系统理论	9
2.1 基本概念	9
2.2 状态空间表达式的建立	11
2.2.1 直接根据系统机理建立状态空间表达式	11
2.2.2 由微分方程求状态空间表达式	12
2.2.3 根据传递函数列写状态空间表达式	14
2.3 线性变换	15
2.3.1 等价系统方程	15
2.3.2 线性变换的基本特性	16
2.3.3 化系数矩阵 A 为标准型	17
2.4 运动分析	18
2.4.1 定量分析	18
2.4.2 定性分析	21
2.5 综合问题	34
2.5.1 极点配置问题	35
2.5.2 镇定问题	37
2.5.3 跟踪问题	37
2.6 状态重构与状态观测器	42
2.6.1 全维状态观测器	43
2.6.2 降维状态观测器	44
2.6.3 引入观测器的状态反馈控制系统	47
2.7 最优控制	50
2.7.1 基于二次型性能指标的最优控制	50
2.7.2 有限时间二次性能指标调节问题的最优解	51
2.7.3 无限长时间状态调节问题	52
2.7.4 输出调节器问题	53
2.7.5 跟踪问题	55
2.8 卡尔曼滤波理论	56
2.8.1 基础概念	56

2.8.2 卡尔曼滤波的基本思想	56
2.9 工程应用	60
2.9.1 从线性变换角度看电动机的建模过程	60
2.9.2 永磁同步电动机的转速无静差跟踪控制	63
习题	66
第3章 自适应控制	69
3.1 概述	69
3.2 模型参考自适应控制	70
3.3 自校正控制	73
3.4 自适应技术的思考	75
3.5 电动机转速的模型参考自适应控制	76
习题	78
第4章 鲁棒控制	79
4.1 基本概念	79
4.2 H_∞ 优化与鲁棒控制	80
4.3 标准 H_∞ 控制	82
4.4 H_∞ 控制的求解	83
4.4.1 状态反馈设计	84
4.4.2 输出反馈设计	85
4.5 跟踪控制	88
4.6 参数不确定系统的鲁棒控制	89
4.6.1 二次稳定	90
4.6.2 鲁棒镇定系统 I	90
4.6.3 鲁棒镇定系统 II	91
4.6.4 干扰抑制	92
4.7 鲁棒稳定与干扰抑制问题	93
4.8 永磁同步电动机的鲁棒控制	99
习题	105
第5章 预测控制	106
5.1 基本原理	106
5.1.1 预测模型	106
5.1.2 滚动优化	107
5.1.3 反馈校正	107
5.2 典型的预测控制算法	108
5.2.1 动态矩阵控制	108
5.2.2 模型算法控制	112
5.2.3 广义预测控制	117
5.3 永磁同步电动机的 DMC	122

5.3.1 同步电动机步进控制基础	123
5.3.2 同步电动机速度模态的 DMC	124
5.3.3 同步电动机 DMC 位置控制	129
习题	135
第 6 章 非线性系统的分析与控制	136
6.1 非线性系统与线性系统	136
6.2 基本概念	137
6.2.1 仿射非线性系统	137
6.2.2 Lie 导数	138
6.3 非线性系统的线性化标准形	138
6.3.1 单输入/单输出非线性系统的相对阶	138
6.3.2 标准形	139
6.4 非线性系统反馈线性化控制	143
6.4.1 相对阶为 n 时的反馈线性化控制	143
6.4.2 相对阶小于 n 时的反馈镇定控制	143
6.4.3 干扰解耦问题	147
6.5 非线性内模控制	150
6.5.1 非线性内模控制的内部模型	150
6.5.2 滤波器	150
6.5.3 非线性内模控制器	151
6.5.4 关于非线性内模控制的进一步分析	152
6.6 开关磁阻电动机的非线性控制	153
6.6.1 SRM 数学模型	153
6.6.2 基于单相导通的 SRM 非线性速度控制	154
6.6.3 基于重叠导通的 SRM 非线性速度控制	157
6.6.4 SRM 非线性内模控制	160
习题	164
第 7 章 变结构控制	166
7.1 相平面基础	166
7.2 结构的定义	167
7.3 变结构控制与开关控制	168
7.4 变结构控制系统中的滑动模态	174
7.5 滑模变结构控制	176
7.5.1 滑模运动	176
7.5.2 滑模变结构控制的基本问题	177
7.5.3 滑模变结构控制的基本方法	183
7.6 永磁同步电动机的离散时间趋近率控制	184
7.6.1 基于内模控制的电流环设计	184

7.6.2 基于离散时间趋近率控制的速度环设计	186
习题	191
第8章 模糊控制	193
8.1 模糊数学基础	193
8.1.1 模糊集合	193
8.1.2 模糊推理	196
8.2 模糊控制的基本原理	203
8.2.1 模糊控制器的基本结构	203
8.2.2 精确量的模糊化	204
8.2.3 知识库设计	204
8.2.4 非模糊化	207
8.3 模糊控制系统	208
8.3.1 离散论域模糊控制	208
8.3.2 模糊 PID 控制	211
8.3.3 PID 参数整定的模糊系统方法	212
8.3.4 自适应模糊控制	215
8.4 电动机转速的模糊 PI 控制	216
习题	220
第9章 神经网络控制	222
9.1 神经网络理论基础	222
9.1.1 神经元	223
9.1.2 Sigmoid 函数	223
9.1.3 前馈神经网络结构	225
9.1.4 BP 学习算法	225
9.1.5 几个问题	226
9.2 柔性神经网络	228
9.2.1 柔性单极性 Sigmoid 函数	228
9.2.2 柔性双极性 Sigmoid 函数	229
9.2.3 柔性 Sigmoid 函数的进一步演化	229
9.2.4 学习算法	230
9.3 神经网络控制	234
9.3.1 神经自校正控制	234
9.3.2 神经 PID 控制器	236
9.4 基于神经网络的 SRM 建模与控制	241
9.4.1 SRM 非线性特性建模	241
9.4.2 基于神经网络的 SRM 转矩控制	246
9.5 恒温箱的柔性神经自校正 PID 控制	251
9.5.1 基于柔性神经网络的自校正 PID 控制	252

9.5.2 学习算法	253
9.5.3 仿真结果	254
习题	257
参考文献	258

第 1 章 绪 论

1.1 控制系统的构成

“控制”这个词在日常生活中经常应用。具体的控制系统在结构、规模、作用、功能、应用场合等方面千差万别，但它们中间存在着共同适用的、一般的方法论——那就是，它们的组成和运行的普遍机制是控制论的反馈控制原理。无论是单回路控制系统、多回路控制系统，还是迅速发展的集传感器、控制、执行和网络于一体的现场总线控制系统，从信息处理和控制的角度看，这些控制系统都可以看成由施控系统和被控系统两部分组成，并运行于一定的扰动和环境中，如图 1-1 所示。施控系统产生控制作用，控制被控系统的物质流、能量流、信息流和资金流在规定的条件下以期望的或最优的方式运行。这里，“控制”的含义是广泛的，既包括通常意义下的闭环调节、伺服控制，也包括操作、指导、诊断、监督、优化、调节、计划、组织和管理等。

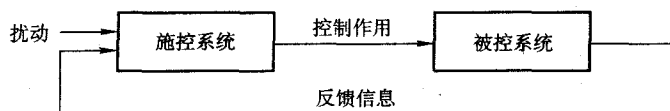


图 1-1 控制系统的组成

施控系统和被控系统的划分应根据实际情况而定，由所考察的重点确定。被控系统包括单台机械或设备、生产线、生产过程，以及整个工厂和企业等，它们是接受物质流、能量流、信息流和资金流的对象，也称控制对象。施控系统应包括传感、控制和执行三部分。传感是获得被控系统的状态、输出和环境等方面信息的各种手段的总和，包括测量物理变量的传感器，为获得某些不能用测量仪表测量的变量的软测量技术，以及多传感器信息融合技术等。执行是产生施控系统最终输出信息的各种手段的总和，它可能是驱动部件（如调节阀、电动机、继电器等）、信息转换和通信部件（如与下级计算机的接口）、显示、记录以及图、文、声、多媒体输出部件等。控制则以计算机为主体，完成控制问题的求解，形成控制算法和控制策略，产生控制规律，它是系统的核心。抽象化后的控制系统结构如图 1-2 所示。

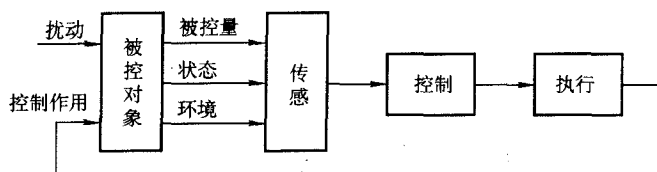


图 1-2 控制系统结构

当着重研究控制策略而不关心信息的获取以及控制输出的实现时，将传感简化为求差器，将控制、执行合称为控制器，如图 1-3 所示。

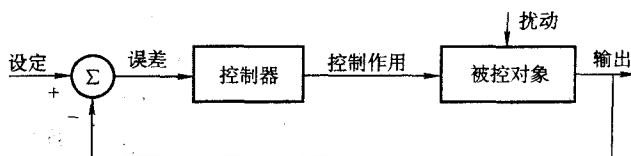


图 1-3 简化的控制系统

控制策略（狭义也称控制算法）是控制器的核心，是控制理论研究的重点。

1.2 控制理论发展简况

在工业应用和理论研究中，控制理论的发展过程大体上可分为三个阶段：经典控制理论、现代控制理论及智能控制理论。这种阶段性的发展过程是由简单到复杂、由量变到质变的辩证发展过程，是现代科学技术迅速发展对自动控制的程度、精度、范围及其适应能力的需求越来越高，从而推动控制理论发展的结果。

理论来源于实践，反过来指导实践，控制理论的发展过程证明了这个真理。

控制理论未形成之前，人们对反馈就有了认识，反馈是控制理论中最为重要的概念，人们利用反馈创造一些装置或机器。

1765 年，瓦特（J. Watt）发明了蒸汽机离心调速器，但使用中某些条件下蒸汽机速度有可能产生剧烈振荡。

1868 年，物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell）通过对线性常微分方程系数、对应代数方程根的关系，推导出一简单的代数判据，揭示了那种不稳定现象，并提出了避免这种现象的调速设计规则。

1877 年、1895 年两位数学家罗斯（Routh）和赫尔维茨（Hurwitz）各自独立地提出了对于高阶微分方程描述的复杂系统的稳定性代数判据，并沿用至今。

1892 年，俄国数学家李亚普诺夫发表论著《论运动稳定性的一般问题》，用严格的数学分析方法全面论述了稳定性理论及方法，为控制理论奠定了基础。

在这一时期，控制工程中稳定性问题较多，用的数学工具是常系数微分

方程。

1927年布莱克(H. S. Black)发明负反馈放大器,使用中放大器在某些条件下会不稳定而变成振荡器。

1932年奈奎斯特(H. Nyquist)提出频域稳定性判据,它不仅可判别系统稳定与否,而且给出稳定裕量,解决了布莱克放大器的稳定性问题。

1940年博德(H. W. Bode)引入对数坐标系,使频率法更适合工程应用。

1942年哈里斯(H. Harris)引入传递函数概念。

1945年,博德发表了《网络分析和反馈放大器设计》,奠定了自动控制理论的基础。

1948年,依万斯(W. R. Evans)提出根轨迹法,指出如何靠改变系统中的某些参数去改变反馈系统动态特性的方法,是对奈奎斯特频率法的补充。

期间,尼科尔(N. Nichol)和菲利浦(R. Philips)介绍了随机噪声对系统性能的影响,理论基础建立于维纳(Wiener)滤波理论之上,而雷加基尼(Ragazzini)和查德(Zadeh)领导40多人研究了线性采样系统。

至此,以单输入/单输出(单变量)线性定常系统为主要研究对象,以传递函数作为系统基本的描述,以频率法和根轨迹法作为系统分析和设计方法的自动控制理论建立起来,常称为经典控制理论。

有了理论指导,这时期的工业生产发展很快,尤其是二战期间军事上的应用(飞机自动导航,炮位跟踪等)。

20世纪50年代,世界进入和平发展时期,在发展核反应堆控制、航空航天控制过程中,对精度与性能要求更高,而且控制参数多,这时经典控制理论显示出它的局限性,难以解决复杂的控制问题。而此期间,计算机发展很快,高速、高精度的数字计算机相继出现,为控制理论发展提供了强有力的工具。

1956年前苏联数学家庞德里亚金提出了极大值原理,1957年美国学者贝尔曼(Bellman)提出动态规划法,为最优控制奠定了理论基础。

1959年在美国达拉斯(Dallas)召开的第一次自动控制年会上,卡尔曼(Kalman)与伯策姆(Bertram)严谨地介绍了非线性系统的稳定性。论文中,用基于状态变量的系统方程描述系统。随后,卡尔曼又发表了《控制系统的一般理论》、《线性估计和辨识问题的新结果》,奠定了现代控制理论的基础。

现代控制理论以状态空间模型为基础,研究系统的内在规律,包括线性系统分析与综合、最优控制理论、系统辨识和最优估计理论等,有能控性、能观测性等主要概念。

20世纪60年代出现的各种空间技术,很大程度上依赖于最优控制问题的解决,例如使运载火箭达到耗燃料最少、送入轨道时间最短等。但工业控制中现代控制理论却遇到很多问题:①直接用最优控制方法设计的控制器过于复杂,不便

于应用；②对象的数学模型很难精确得到，而现代控制理论所用的各种分析、综合方法都是以对象数学模型为基础的，数学模型的精确程度对控制系统性能影响很大，对象参数变化时，系统性能不能达到期望指标。

为解决这些问题，自适应控制、鲁棒控制成为控制理论研究的热点。自适应控制是针对对象特性的变化、漂移和环境干扰对系统的影响提出的，它的基本思想是通过在线辨识使这种影响逐渐降低，以至消除。控制系统运行中，根据对象或扰动的动态性能，可以通过改变控制律的参数或结构，以保证控制质量，各种自适应系统大体可归纳为两类：模型参考自适应控制和自校正控制。20世纪50年代末，美国麻省理工学院提出第一个自适应控制方案，但由于实现上困难、计算上复杂，没能得到充分发展。70年代后，计算机技术（尤其是微型机）的发展和普及，随机控制和系统辨识等的成熟，使自适应控制的研究又活跃起来。现已形成了较完整的理论，已有许多成功的应用。

鲁棒控制是20世纪70年代初针对模型的不确定性问题提出的，基本思想是在设计中设法使系统对模型误差扰动不敏感，使系统不但能保持稳定，品质也保持在工程所能接受的范围内。具体就是，在控制系统设计中就考虑对象参数的变化，使所设计的控制器不改变自己的参数或结构，即使对象参数在一定范围内变化，仍能够保证控制系统的控制性能不变。模型的不确定性包括模型不精确、降阶近似、非线性的线性化、参数和特性随时间变化或漂移等。由于所有的工业系统不可避免地存在各种不确定性，因此鲁棒控制问题一直很重要，系统的鲁棒性是它能否可靠用于工业现场的关键，这也是对其研究经久不衰的原因。尽管这一领域的理论研究十分热烈，取得了一系列成果，但应用却都不尽如人意，主要是缺乏良好的设计方法，设计的控制器过于复杂，难以实现。

预测控制是20世纪70年代人们为克服控制理论与应用中的不协调而提出的，当时的不协调现象是：科学技术生产的迅速发展，对大型、复杂、不确定性系统实行自动控制的要求不断提高，现代控制理论的局限性日益明显。具体表现为：①难于建立精确的数学模型（针对非线性、时变性、不确定性的对象）；②即使能建立数学模型，但结构复杂，难于设计并有效控制。初步发展的自适应控制、鲁棒控制算法由于复杂、计算量大，应用范围受到限制。这种情况下，人们一方面加强建模、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制的研究，另一方面开始打破传统控制思想的束缚，试图面对工业过程的特点，寻找各种对模型要求低、在线计算方便、控制综合效果好的算法，加之当时数字计算机的发展，也为预测控制这个新型计算机优化控制算法提供了物质基础。

预测控制不是某一种统一理论的产物，而是在工业实践过程中独立发展起来的，最初提出的预测控制有模型算法控制（MAC）和动态矩阵控制（DMC）。它不要求对模型的结构有先验知识，不必通过复杂的辨识过程便可设计控制系

统,它吸取了现代控制理论中的优化思想,但用不断的在线有限优化(即滚动优化),取代了传统的最优控制,优化过程中利用实测信息不断反馈校正,一定程度上克服了不确定性的影响,增强了控制的鲁棒性,在线计算比较简易。这些特点适合工业过程控制的要求,所以它很快在石油、电力和航空等领域获得了应用,并引起了工业控制界广泛的兴趣。此后,又出现广义预测控制(GPC)等其他算法。它的基本思想类似于人的思维和决策,根据头脑中对外部世界的了解,通过快速思维不断地比较各种方案可能造成的后果,从中择优予以实施。其机理包括:预测模型、滚动优化和反馈校正。现在,预测控制的研究已由线性领域进入非线性领域,称为非线性预测控制。

非线性控制系统的发展几乎与线性系统平行。严格而言,非线性是普遍存在的,非线性系统才是最一般的系统,线性系统只是其中的特例。

对于非线性系统,传统的线性控制理论已很难满足各种实际需要,采用近似的线性模型虽然有时可以使我们更全面和容易地分析系统的各种特性,但很难刻画出系统的非线性本质,线性系统的动态特性不足以解释非线性现象。非线性系统较线性系统复杂许多,它本身包含的现象十分丰富,迄今对它的了解还不够,目前的数学工具也远远不够。例如,在线性系统中,系统的稳定性只取决于系统的结构和参数,对常参量线性系统,只取决于系统特征方程根的分布,而和初始条件、外加作用没有关系。如果系统在一定外作用和初始条件下的解是稳定的,则线性系统中可能的全部运动都是稳定的,于是我们可以说某个线性系统是稳定的或不稳定的。但对于非线性系统,叠加原理不再适用,不存在系统是否稳定的笼统概念,必须具体讨论某一运动的稳定性问题。它的稳定性,除了和系统的结构形式、参数大小有关外,和初始条件也有密切的关系。所以,非线性控制系统的研究方法,是从针对一个个具体的非线性控制系统而发展起来的,是由简单到复杂,由特殊到一般的发展过程。

尽管非线性系统是普遍存在的,线性系统只是一个特例,但决不能贬低线性系统理论的重要性,线性系统理论仍是系统理论的基础,许多非线性系统的分析方法要借助于线性系统理论的成果。

研究非线性控制系统的方法很多,具代表性的有:①线性化法;②描述函数法;③相平面图法;④变结构控制法;⑤从严密非线性模型推导出的精确线性化法;⑥神经网络法;⑦模糊信息分析法;⑧李亚普诺夫法等。

线性化法适合于工程实际中存在线性工作区域的非线性系统,或非线性不严重的准线性系统,经线性化方法处理,然后在线性分析的基础上加以修正,但对于根本不存在线性区域的非线性,则线性化方法无能为力。

描述函数法是二战以后在1947~1950年间发展起来的近似方法,原始思想是英国的P. J. Daniel教授1940年首先提出的,是线性系统频率响应概念的推

广,是将非线性元件的输入输出关系着眼于其输入端施加正弦波信号时相应稳定的输出上,以此表现非线性系统内在的线性特征。但非线性系统的描述函数与线性系统不同,描述函数一般为依赖于频率与振幅两者的复变函数,而且描述函数法忽略了输出的谐波,只使用了基波。但是,描述函数法不受系统阶数限制,实质是谐波分析法,是仅用基波近似描述非线性特性的一种线性化方法,简单且便于工程应用,但有限制条件:

1) 非线性特性具有奇对称,即 $f(x) = -f(-x)$, 正弦输入下,输出无恒定分量。

2) 所讨论的非线性系统内包含有线性部分,具有较好的低通滤波性能。

相平面法能很好地补充描述函数法的不足,采用非线性方法处理非线性系统,它可对非线性系统的作用直接评价,能对非线性系统特有的现象进行分析。它不近似非线性系统,而是用状态变量表示运动的方程,是一种作图法。它泛称相位空间法(或状态空间法),是 Poincare 于 1885 年首次提出的一种求解常微分方程的图解方法,是将系统的动态过程在相空间内用运动轨迹的形式绘成图形,然后根据运动轨迹的全局几何特性,来判定系统所固有的稳定性、稳态精度、过渡过程等各项特性。它原则上适用于各种系统,但是一般只限于求解一阶或二阶常微分方程,尤其是分析求解非线性特性比较显著的二阶非线性系统,或具有一个以上非线性元件的非线性控制系统,因为这种系统的一切运动轨迹均可完整地相平面上显示出来。其特点是可以不必具体求解二阶微分方程的解,而直接用表征系统特性的函数和函数的一阶导数来描绘系统随时间演变的动态过程。与描述函数法相比,相平面法具有不受非线性强弱限制和输入信号限制的特点,能解决一些特殊的非线性控制问题,帮助理解非线性系统中的基本特征。

变结构控制以相平面法为基础,与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,具有结构随时变化的开关特性。“结构”不是控制系统的物理结构,也不指系统框图形式的结构,它是一种定性概念,能反映系统内在性质。本质上,状态轨迹描述了系统的内在特性。系统的所有可能的状态轨迹的全体,完全描述了系统动态行为的一些性质,在状态空间的一定范围内,系统的状态轨迹有一定的几何性质,它代表了控制系统在状态空间中的几何结构特点。

精确线性化法,是通过适当的非线性反馈变换,使非线性系统实现状态或输入/输出的精确线性化,将复杂非线性系统综合问题转化为线性系统综合问题。它没有忽略任何高阶非线性项,这种线性化方法不仅是精确的,而且是整体的,线性化对变换有定义的区域都适用。

智能控制是针对现代控制理论的不足提出的,现代控制理论的局限表现为

- 1) 依赖理想化的精确对象数学模型。
- 2) 控制算法较理想化。