

非线性系统 自适应控制 理论及应用

郭 晨 等 编著

Adaptive Control
Theory and Applications for
Nonlinear Systems



科学出版社

非线性系统自适应 控制理论及应用

郭 晨 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要讨论非线性系统的自适应输出反馈控制,欠驱动系统的迭代滑模控制,不确定非线性系统的自适应模糊控制设计,基于克隆选择优化的自适应控制,基于广义模糊小脑模型神经网络的自适应控制的基本理论、基本方法和应用技术。

本书可作为船舶与海洋工程、控制科学与工程、交通运输工程等学科的研究生教材,以及自动化专业的本科生教材,还可作为其他相关领域的学者和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非线性系统自适应控制理论及应用/郭晨等编著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034234-8

I. 非… II. 郭… III. 非线性系统(自动化)-自适应控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 088504 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:卢雪娇

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

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>

北京市四季青双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 7 月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—2 000 字数:390 000

定 价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

经过一个多世纪的发展,各种线性控制理论已经逐步发展成熟,特别是近几十年来,线性控制理论已经在多个领域得到了成功的应用,极大地提高了相关领域的生产规模和劳动效率,获得了巨大的经济效益。然而,随着现代社会对于控制系统品质,如系统的快速性、稳定性等要求的不断提高,以及被控对象的日益复杂,这种线性控制方法已经很难完全满足人类的要求。

实际上,一切实际存在的系统都或多或少地具有非线性,大多数工程系统本质上都是非线性的,而线性只是一种近似。随着高新技术的发展,人们需要针对全局问题,并且对控制系统提出更高的精度和性能要求,这使我们必须面对系统的非线性本质。近年来得到快速发展的神经网络系统,更是一个本质非线性的大规模非线性系统。

非线性系统的控制是控制理论中一个重要且比较艰深的组成部分。近 30 年来对于非线性系统控制问题的研究,大大推动了非线性控制理论的发展。微分几何、微分代数等方法被引入非线性动态系统分析后,为非线性控制的研究带来了突破性的进展。但能够实现精确线性化的非线性系统只是极少数,因而滑模变结构控制、自适应控制、神经网络控制等分析与设计非线性系统的方法也得到很大的发展。对于实际动态系统,一般都不可能进行完全精确的建模,在其数学模型中都应考虑不确定性。这些不确定性包含参数不确定性、未建模动态和各种干扰等。因此,不确定非线性系统的鲁棒控制成为控制理论的一个重要、有实用价值且具有挑战性的研究课题。而对于一般化的难以精确描述的非线性系统,其鲁棒控制具有更强的适应能力,这正是近年来人们研究的重点。

鉴于国内外已有多部面向一般通用非线性系统控制理论的专著,本书主要针对船舶工程中的非线性系统,讨论非线性系统的自适应输出反馈控制,欠驱动系统的迭代滑模控制,不确定非线性系统的自适应模糊控制设计,基于克隆选择优化的自适应控制,基于广义模糊小脑模型神经网络(CMAC)的自适应控

制等问题。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(61074053,60774046)和交通应用基础研究项目(2011-329-225-390)的资助,作者在此表示衷心的感谢。

本书各章内容由郭晨(第1章)、郑云峰(第2章)、卜仁祥(第3章)、李铁山(第4章)、胡江强(第5章)、沈智鹏(第6章)编著,由郭晨教授统编全书内容。

限于编著者水平和经验,书中难免存在一些不当之处,殷切希望专家和读者批评指正。

作 者

2011年12月

目 录

第 1 章	绪 论	1
1.1	非线性系统的特点及非线性控制系统概述	1
1.2	非线性控制系统的数学描述	3
1.3	非线性控制系统常用的分析与设计方法	4
1.3.1	相平面分析法	4
1.3.2	描述函数法	5
1.3.3	李雅普诺夫法	5
1.3.4	非线性系统的微分几何方法	5
1.3.5	非线性系统的鲁棒控制	6
1.4	本书简介	7
	主要参考文献	7
第 2 章	非线性系统的自适应输出反馈控制	9
2.1	概 述	9
2.2	带有附加输出导数的参数输出反馈系统	14
2.2.1	系统描述	14
2.2.2	坐标变换	15
2.2.3	滤波器设计	17
2.2.4	自适应控制设计:高频控制增益符号已知	18
2.2.5	自适应控制设计:高频控制增益符号未知	23
2.3	带有未知虚拟控制增益符号(UVCGS)的非线性系统	27
2.3.1	引 言	27
2.3.2	问题的描述	27

2.3.3	坐标变换与参数重定义	28
2.3.4	自适应输出反馈控制器设计	29
2.3.5	仿真结果	33
2.3.6	小 结	35
2.4	带有 UVC GS 和附加输出导数的参数输出反馈系统	35
2.4.1	系统描述	36
2.4.2	坐标变换和参数重定义	36
2.4.3	滤波器设计	40
2.4.4	自适应控制设计	41
2.4.5	仿真实例	44
2.4.6	小 结	47
2.5	带有 UVC GS 的一类三阶非线性系统	48
2.5.1	引 言	48
2.5.2	坐标变换及参数重定义	49
2.5.3	自适应输出反馈控制器设计	51
2.5.4	小 结	56
2.6	一类匹配不确定非线性系统输出反馈控制	57
2.6.1	系统描述	58
2.6.2	自适应观测器设计	59
2.6.3	Backstepping 控制器设计	61
2.6.4	稳定性分析	67
2.6.5	小 结	69
2.7	一类严反馈非线性不确定系统	69
2.7.1	系统描述	69
2.7.2	自适应观测器设计	70
2.7.3	Backstepping 控制器设计	74
2.7.4	稳定性分析	77
2.7.5	小 结	78
	主要参考文献	79

第3章 欠驱动系统的迭代滑模控制	85
3.1 非线性滑模的分解迭代设计	85
3.1.1 传统反馈控制的滑模特性	86
3.1.2 非线性迭代滑模与增量反馈	90
3.2 欠驱动系统的非线性滑模控制设计	96
3.2.1 多变量系统的滑模迭代设计	97
3.2.2 单级倒立摆系统的非线性反馈设计	100
3.2.3 链式系统的时变反馈控制	104
3.2.4 非完整积分器的光滑反馈镇定	109
3.2.5 基于标准形的轮式移动机器人镇定控制	113
3.3 基于虚拟向导的最优路径控制	116
3.3.1 虚拟向导的概念	116
3.3.2 轮式移动机器人虚拟向导控制设计	119
3.3.3 欠驱动船舶定位控制	125
3.4 小 结	131
主要参考文献	132
第4章 不确定非线性系统的自适应模糊控制设计	135
4.1 概 述	135
4.2 相关基础知识准备	139
4.2.1 模糊系统简介	139
4.3 基于动态面控制方法和模糊逼近器的自适应控制设计	148
4.3.1 基于 MLPA 算法与 DSC 方法的自适应模糊控制 设计(一)	150
4.3.2 基于 MLPA 算法与 DSC 方法的自适应模糊控制 设计(二)	166
4.3.3 小 结	177
4.4 本章小结	178
主要参考文献	178

第 5 章 基于克隆选择优化的自适应控制	185
5.1 概 述	185
5.2 全局优化的动态克隆选择算法	186
5.2.1 克隆选择操作算子	187
5.2.2 启发式自适应免疫克隆选择算法	190
5.2.3 分级变异的动态克隆选择算法	190
5.2.4 仿真研究	191
5.3 基于控制器参数优化的克隆选择自适应控制	193
5.3.1 基于控制器参数优化的克隆选择自适应控制系统	193
5.3.2 基于控制器参数优化的克隆选择自适应控制算法	195
5.3.3 仿真研究及结果分析	197
5.4 基于线性化模型辨识的克隆选择自适应控制	199
5.4.1 问题描述	200
5.4.2 不确定非线性系统的克隆选择在线模型辨识	202
5.4.3 不确定非线性系统的克隆选择自适应控制	204
5.4.4 仿真研究及结果分析	206
5.5 小 结	213
主要参考文献	214
第 6 章 基于广义模糊 CMAC 的自适应控制	217
6.1 概 述	217
6.2 CMAC 与广义模糊 CMAC	220
6.2.1 CMAC	221
6.2.2 广义模糊 CMAC	225
6.2.3 函数逼近仿真研究	232
6.3 带参考模型的广义模糊 CMAC 自适应控制	235
6.3.1 带参考模型的 GFAC 自适应控制	235
6.3.2 带参考模型的 FGA-GFAC 自适应控制	237
6.3.3 仿真研究	240
6.4 带资格迹的广义模糊 CMAC 自适应控制	243

6.4.1 资格迹	244
6.4.2 控制系统结构	245
6.4.3 自适应学习控制算法	247
6.4.4 控制算法的实现	250
6.4.5 仿真研究	258
主要参考文献	264

第 1 章

绪 论

1.1 非线性系统的特点及非线性控制系统概述

当系统的运动规律可以用线性微分方程或线性算子来描述时，该系统称为线性系统。线性系统的一个基本性质是它满足叠加原理，由此产生了线性系统理论的基本分析方法，如时域中的卷积、频域和复频域中的传递函数方法等。线性系统的结构相对比较简单，其通解线性依赖于线性系统的初始状态和控制函数，因此讨论起来比较方便。

如果系统中至少含有一个非线性环节或非线性单元时，该系统的运动规律将要由非线性微分方程或非线性算子来表征，称之为非线性系统。与线性系统相比，非线性系统具有如下特点：

- (1) 非线性系统不满足叠加定理。
- (2) 非线性系统的解不一定唯一存在。
- (3) 非线性系统存在平衡状态的稳定性问题。

(4) 非线性系统具有自治系统自激振荡、系统频率响应跳变、系统解的分叉及类似于随机系统出现的混沌等特殊现象。

在实际工程系统中，非线性系统的特性和影响是普遍存在的。例如，由于存在摩擦而产生不灵敏区；由于超出放大元件的线性工作范围而呈现出饱和现象。这些非线性特点是由于系统的不完善而产生的，实际上是不可避免

的。有些非线性是系统动态特性本身所固有的，如电力系统传输功率与各发电机之间相角差的正弦函数成正比，如果要研究电力系统中的大范围运动，就必须考虑非线性特性的影响。

在工程中，有些被控对象本身是线性的，但有时为了改善系统的性能或简化系统的结构，对其进行高质量的控制，可以在系统中引入非线性部件或者非线性控制器。例如，在船舶航向控制自动操舵仪中，就设计了根据海洋扰动的大小，调节船舶航向偏离指令航向灵敏度的功能（天气调节旋钮）。利用调节失灵区非线性（灵敏度）来实现天气良好时提高自动保持航向的准确度（设定较小的失灵区值）；海况恶劣时，设定比较大的失灵区值，以避免操舵动作过于频繁，实现减小舵机磨损、保持有效的船舶运动控制的目的。

在工程实践中，所谓线性系统只是实际系统被忽略了非线性因素后的理想模型，而理想的线性系统实际上是不存在的。实际控制系统大多是非线性系统。

非线性系统最重要的特性之一是：系统的响应取决于输入的幅值和形式。例如，一个非线性系统对不同幅值的阶跃输入可能具有完全不同的响应。另外，叠加原理对非线性系统是无效的，这与线性系统存在本质的区别。周期性振荡、频率和振幅的依赖性、多值响应和跳跃谐振、分谐波振荡、自激振荡或极限环及频率捕捉现象等都是非线性系统的重要特征。

相对于线性控制系统分析与设计理论的成熟方法，非线性特性一般没有统一的、普遍适用的处理方法。描述非线性系统的非线性微分方程只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了极大的困难。

人们期待着非线性控制理论研究能够取得新的重要进展。近 20 多年来，非线性系统理论的建立和发展引起了国内外控制科学工作者的极大兴趣，相平面理论、李雅普诺夫运动稳定性理论都再次受到了极大的重视。非线性控制方法的研究和应用近年来受到诸多科学和工程领域的研究和设计人员的重视，非线性控制理论的重要意义在于：

- (1) 改善控制特性。
- (2) 分析强非线性。
- (3) 处理模型不确定性。
- (4) 简化控制系统设计。

经过 20 多年的发展,非线性系统研究在一些重要方面取得了令人瞩目的成就,建立了一系列非线性系统的分析和设计方法。近年来,包括反馈线性化、滑模控制和非线性自适应控制技术等的非线性控制理论与应用取得了明显的进展。同时,计算机技术的高速发展和相关数学工具的突破进展,也为研究一般的非线性控制理论提供了可能性。

1.2 非线性控制系统的数学描述

非线性控制系统的运动方程式一般可写成

$$f\left(\frac{d^n x}{dt}, \cdots, \frac{dx}{dt}, x, u\right) = 0 \quad (1.1)$$

式中, x 是系统的输出; u 是控制量; f 是某一非线性函数。式 (1.1) 可以化为一个一阶非线性方程组:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n; u_1, u_2, \cdots, u_r; t) \\ \frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n; u_1, u_2, \cdots, u_r; t) \\ \vdots \\ \frac{dx_n}{dt} = f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n; u_1, u_2, \cdots, u_r; t) \end{cases} \quad (1.2)$$

式中, $x_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 是状态变量; $u_i (i=1, 2, \cdots, r)$ 是控制量。如果采用向量表达方式, 上式可简写为

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad (1.3)$$

式中, $x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 是系统的状态向量; $u = (u_1, u_2, \cdots, u_n)$ 是控制向量; $f = (f_1, f_2, \cdots, f_n)$ 是速度向量。

对于一个由式 (1.3) 描述的非线性控制系统, 我们对于每一个输入 $u(t)$, 以下情况都可以成立:

- (1) 至少存在一个解 (解的存在性)。
- (2) 只存在一个解 (解的唯一性)。
- (3) 对于时间半轴 $[0, \infty)$, 式 (1.3) 只存在一个解。

(4) 在 $[0, \infty)$ 轴上, 式 (1.3) 只存在一个解, 而且这个解与初值 $x(0)$ 存在连续变化的关系。

以上条件是相当高的, 只有对函数 f 提出严格的要求才能实现。如果式 (1.3) 有解析形式的解, 这只是非常特殊的情况。一般情况下, 上述微分方程式的解即使存在也不能表达为解析形式, 只能对它进行近似估计或数值计算。

对于多输入非线性系统, 如果 $u(t) = 0$, 则

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t), \quad t \geq 0, \quad x(0) = x_0 \quad (1.4)$$

代表系统的自由运动。

在许多控制系统中, 输入量 $u(t)$ 可以从函数 f 中分离出来, 此时系统方程可写成以下形式:

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (1.5)$$

称这样的系统是仿射的, 它代表相当广泛的一类非线性系统, 这类系统有其自身的特点。

1.3 非线性控制系统常用的分析与设计方法

由于非线性系统通常具有非常复杂的特性, 迄今能够有效用于非线性系统分析和设计的工具并不多。在非线性控制领域, 现有常见的分析方法主要有相平面分析法、描述函数法和系统的稳定性分析等。非线性系统的设计方法主要有精确反馈线性化、微分代数法、滑模变结构控制方法、自适应控制、鲁棒控制、神经网络控制、逆控制、频率方法等。

1.3.1 相平面分析法

相平面分析法是一种研究二阶非线性系统的图解方法。它的实质是用作图的方法而不是寻求其解析解来求解常微分方程。其求解结果是一簇在称为相平面的二维平面上的系统运动轨迹。可根据相平面图全局的几何特征来分析系统所具有的动静态特征。该方法主要用奇点、极限环概念描述相平面的几何特征, 并根据奇点和极限环的不同性质, 将其分成几种类型。该方法仅适用于二阶及简单的三阶系统。现代控制理论中的状态空间分析可视为相平

面法的推广，从相平面法还产生了变结构控制方法。

■ 1.3.2 描述函数法

描述函数法是用谐波分析的方法，忽略由于对象线性化因素所造成的高次谐波成分，而仅使用一次谐波（基波）分量来近似描述其非线性特性。描述函数法的研究对象可以是任意阶次的系统。

当系统中的非线性元件用线性化的描述函数代替以后，非线性系统就等效成一个线性系统，从而可以借用线性系统理论中的频率响应法来对系统进行频域分析。描述函数法的主要用途是预测非线性系统的极限环（自持振荡），研究非线性控制系统的稳定性和对非线性系统进行综合设计。

■ 1.3.3 李雅普诺夫法

俄国科学家李雅普诺夫（Lyapunov）于 1892 年提出的李雅普诺夫法是当前针对非线性系统的一种主要研究方法。该方法包括直接法和间接法两种，最初主要用来分析系统的稳定性。经过发展，近年来李雅普诺夫法已可以用于非线性系统控制器的分析和设计。它已成为当前几种主要的非线性控制策略，如自适应控制、鲁棒控制等的理论基础。该分析方法的基本思路是构造一个类似于系统能量的正定函数（李雅普诺夫候选函数），然后通过研究该函数随时间的变化趋势来分析系统的稳定性。近年来，李雅普诺夫法还被广泛用于构造非线性控制器，由此来控制各类复杂系统。通常，在利用李雅普诺夫法设计控制器时，采用前馈与反馈相结合的设计方法，通过前馈环节来补偿系统的非线性特性，在此基础上，利用反馈环节来控制补偿后的系统。由于补偿系统的非线性特性时，需要利用系统的动态模型，因此这是一种基于模型的控制方法。

■ 1.3.4 非线性系统的微分几何方法

除了上述三种非线性系统方法之外，自 20 世纪 80 年代以来，基于微分几何的非线性控制方法也取得了重大进展，这种方法从几何的角度来分析非线性系统的许多性质，包括可控性、可观性、可逆性等。更重要的是，对于满足某些条件的非线性系统，可以通过非线性状态变换等方法，将其转化为

线性系统,即实现精确线性化。在此基础上,可以应用成熟的线性控制理论来对其进行分析与设计,最终实现期望的控制性能。

对于线性系统,其可控性、可观性以及系统的可控分解和可观测分解是其基本性质,线性控制理论有明显的判别条件来判断系统是否具备这些性质。那么,对于非线性系统是否也具有诸如能控性、能观性这样一些性质呢?近年来发展起来的非线性系统的微分几何方法,从几何的角度,研究了一类具有仿射非线性的控制系统的能控性、能观性等基本性质。这些研究有利于揭示非线性系统的某些本质特性。但目前还没有找到像线性系统那样简明且易于使用的非线性系统能控性、能观性的判别条件。利用微分几何方法研究非线性系统的反馈线性化问题,已取得了很好的结果,并且在一些实际控制系统中得到了应用。由于能够实现反馈线性化的仍然是少量特定的一类非线性系统,因此,当前非线性系统的微分几何方法所能解决的问题是十分有限的。

1.3.5 非线性系统的鲁棒控制

传统控制系统的设计是以被控系统的数学模型为依据的,然而由于多种原因,被控对象总是存在着不确定性或摄动。这些不确定性通常包含参数不确定性、结构不确定性和各种干扰等,而这些不确定性或摄动一般来说是无法确定的。因此,我们的研究对象不应是单一的,而必须用一类系统族来描述实际系统。系统的鲁棒性,就是指所设计的控制系统对于具有不确定性的系统族仍然可以正常工作,如保证稳定性,保持较好的系统动态特性等。随着控制对象的日益复杂,环境的多变,大量的不确定性因素的存在,研究系统的鲁棒控制显得日益重要,成为现代控制理论中的一个重要研究方向。

对于非线性控制系统,已提出了鲁棒性分析和设计的多种方法。李雅普诺夫法是早期研究鲁棒稳定性采用的主要方法,但是其结果偏于保守。近年来,一些学者将基于非线性系统的无源性、耗散性及增益分析等方法应用于非线性控制系统的分析与设计,提出了许多有关鲁棒镇定、鲁棒干扰抑制、鲁棒自适应控制的设计方法。由于非线性系统的复杂性,非线性控制系统的鲁棒性分析和设计还存在许多困难,是一个具有很强挑战性的课题。

1.4 本书简介

本书主要针对船舶非线性工程系统, 讨论非线性系统的自适应输出反馈控制、欠驱动系统的迭代滑模控制、不确定非线性系统的自适应模糊控制、基于克隆选择优化的自适应控制、基于广义模糊小脑模型神经网络的自适应控制五种控制的基本理论、基本方法和应用技术。其中, 第1章为绪论, 介绍非线性控制系统的主要特性和非线性控制系统的常用分析和设计方法; 第2章讨论非线性系统的自适应输出反馈控制; 第3章讨论欠驱动系统的迭代滑模控制; 第4章论述基于通用逼近器的不确定非线性控制系统的鲁棒自适应控制; 第5章讨论基于克隆选择优化的自适应控制方法; 第6章讨论基于广义模糊小脑模型神经网络的自适应控制。

主要参考文献

- [1] 钱学森, 宋健. 工程控制论. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 刘小河. 非线性系统分析与控制引论. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [3] 贺昱曜, 闫懋德. 非线性控制理论及应用. 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [4] Jacques J, Slotine E, Li W P. Applied Nonlinear Control. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1991.
- [5] Marino R, Tomei P. Nonlinear Control Design: Geometric, Adaptive and Robust. London: Prentice Hall, 1996.
- [6] 方勇纯, 卢桂章. 非线性系统理论. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [7] 冯纯伯, 费树岷. 非线性控制系统分析与设计. 北京: 电子工业出版社, 1998.