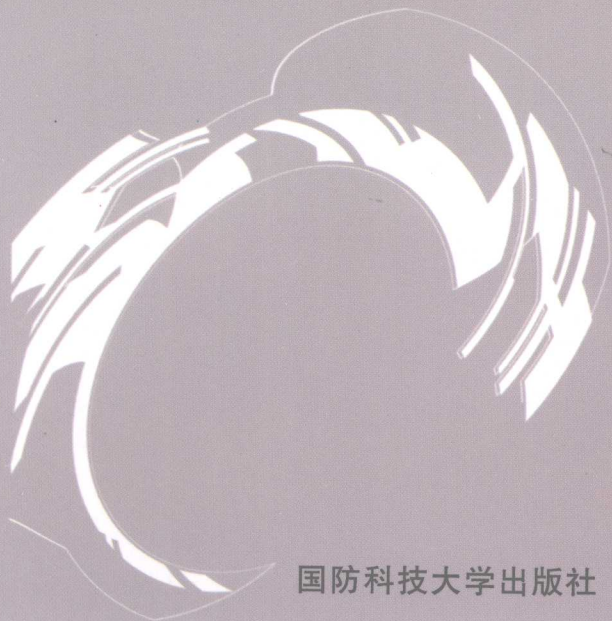


APPLIED NONLINEAR
CONTROL TECHNOLOGY

应用
非线性控制技术

瞿少成 / 著



国防科技大学出版社

应用非线性控制技术

Applied Nonlinear Control Technology

瞿少成 著

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

应用非线性控制技术/瞿少成著. —长沙:国防科技大学出版社,
2008.5

ISBN 978 - 7 - 81099 - 496 - 5

I . 应… II . 瞿… III . 非线性控制系统 IV . TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 060368 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:唐卫葳 责任校对:徐飞

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:6 字数:156千
2008年5月第1版第1次印刷 印数:1-500册

ISBN 978 - 7 - 81099 - 496 - 5

定价:15.00元

内 容 简 介

从实际应用出发,以工程的观点研究非线性系统的控制技术,是关于非线性系统控制技术的一部著作。

全书共分6章,第一章为绪论。第二章系统总结了非线性系统的经典控制方法,并对非线性系统精确线性化方法、非线性系统的近似线性化方法作了介绍。第三章介绍了非线性预测控制方法及其应用。第四章详细讨论了非线性系统的鲁棒控制技术及其应用。第五章研究了非线性系统的滑模变结构控制问题,给出了基于T-S模糊模型设计不确定非线性时滞系统模糊滑模控制器的一般方法。第六章介绍了非线性仿人智能控制技术及其应用。

本书可作为控制与自动化等相关专业研究生和高年级本科生的学习参考书,对从事非线性控制系统理论与应用研究和开发的专业人员也有较高的参考价值。

前 言

自 20 世纪 80 年代以来，非线性科学越来越受到人们的重视，数学中的非线性分析与非线性泛函、物理学中的非线性动力学、认知科学中的人工智能学发展迅速。同时，非线性系统理论也得到了蓬勃发展，越来越多的控制理论专家致力于非线性控制系统的研究，更多的工程师力图采用非线性系统理论构造控制器，并取得了一定的成就。

尽管非线性控制系统的发展与线性控制系统是平行的，但是非线性控制系统本身包含的现象十分复杂，迄今对它的了解仍然还远远不够。近 20 年来，非线性控制技术取得了可喜的进展。以微分几何为工具发展起来的精确线性化方法，有力地推动了经典非线性控制技术的发展；作为本质非线性控制理论，以滑模模态为基础的变结构控制理论得到了充分的发展；通过标称系统和不确定性集合的综合考虑的鲁棒控制技术也得到了广泛的重视；此外，随着计算机技术与人工智能技术的进步，以模糊逻辑、神经网络、遗传算法与仿人控制等技术为代表的智能控制技术及其应用也越来越广泛。

本书的内容是作者近年来所取得研究成果及对国内外最新研究成果的归纳与总结。全书共分 6 章，第一章为绪论，系统总结了非线性控制技术的发展，并评述了非线性控制技术的新发展及其存在的问题。第二章系统总结了非线性系统的经典控制方法，

并对非线性系统精确线性化方法、非线性系统的近似线性化方法作了详细介绍，并给出了应用实例。第三章介绍了非线性预测控制方法及其应用。第四章详细讨论了非线性系统的鲁棒控制技术及其应用。第五章研究了非线性系统的滑模变结构控制问题，给出了基于 T-S 模糊模型，设计了不确定非线性时滞系统模糊滑模控制器。第六章介绍了非线性仿人智能控制技术及其应用。

本书研究内容得到了国家自然科学基金（69974017、60274020）、教育部博士点基金（20070511017）、武汉市科技攻关计划（200810321132）和华中科技大学优秀博士基金（2004）资助。

由于作者水平和研究兴趣所限，书中难免有不妥和错误之处，敬请广大读者批评指正。

瞿少成

2008年3月于武汉桂子山

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 控制系统的类型	(1)
1.2 非线性系统的复杂性及特征	(4)
1.3 非线性系统控制的经典方法及其局限性	(6)
1.4 非线性系统控制技术的新发展及存在的问题	(9)
第 2 章 非线性系统的经典控制技术	(15)
2.1 描述函数法	(15)
2.1.1 描述函数的概念	(16)
2.1.2 典型非线性特性的描述函数	(19)
2.1.3 用描述函数法分析非线性系统	(25)
2.2 相平面法	(28)
2.2.1 相平面的概念及其画法	(29)
2.2.2 用相平面法分析非线性系统	(41)
2.3 非线性系统精确线性化方法	(43)
2.3.1 微分几何基础	(45)
2.3.2 非线性系统的线性化问题	(47)
2.3.3 输入输出精确线性化方法	(49)
2.3.4 状态精确线性化方法	(50)
2.4 非线性系统的近似线性化方法	(52)
2.4.1 伪线性化方法	(52)
2.4.2 近似输入输出线性化方法	(54)
2.5 PMSM 的非线性控制	(56)

第 3 章 非线性系统的预测控制技术	(63)
3.1 预测控制基本原理	(66)
3.2 动态矩阵预测控制	(70)
3.3 一种三区电加热炉的预测控制	(78)
第 4 章 非线性系统的鲁棒控制	(82)
4.1 稳定鲁棒性	(83)
4.1.1 参数不确定系统的稳定鲁棒性	(83)
4.1.2 结构不确定系统的稳定鲁棒性	(85)
4.2 基于频域的鲁棒控制	(88)
4.3 基于线性矩阵不等式的鲁棒控制	(92)
4.4 一类 LPMSM 的鲁棒控制	(94)
第 5 章 非线性系统的滑模变结构控制技术	(99)
5.1 滑模变结构控制的基本概念	(100)
5.2 滑模变结构控制的数学描述	(103)
5.3 不确定系统的滑模变结构控制	(107)
5.3.1 一类 BLDCM 的位置伺服系统	(111)
5.4 滑模控制与模糊控制的相似性研究	(115)
5.4.1 系统描述	(116)
5.4.2 模糊控制与滑模控制相似性研究	(118)
5.5 基于 T-S 模型的不确定非线性时滞系统的滑模控制	(123)
5.5.1 系统描述	(123)
5.5.2 基于 T-S 模型的非线性时滞系统的滑模控制	(125)
5.5.3 仿真举例	(130)

第 6 章 非线性系统的智能控制技术	(137)
6.1 智能控制概述	(137)
6.1.1 智能控制的发展历史与现状	(138)
6.1.2 智能控制与传统控制的关系	(141)
6.1.3 智能控制的主要内容与当前的研究热点	(143)
6.2 仿人智能控制	(148)
6.2.1 专家控制	(148)
6.2.2 仿人智能控制的原理	(156)
6.2.3 仿人比例控制算法	(157)
6.2.4 仿人智能积分控制算法	(160)
参考文献	(165)

第 1 章 绪 论

1.1 控制系统的类型

控制系统的分类方法很多。若按照描述系统的数学模型分类,可将系统分为线性系统和非线性系统。

构成线性系统的所有元件都是线性元件,其动态性能可用线性微分方程描述,系统满足叠加原理。非线性系统是指构成系统的元件中含有非线性元件的系统,它只能用非线性微分方程描述,不满足叠加原理。在实际系统中,理想的线性系统是不存在的,构成系统的元器件中总会或多或少地含有非线性特性。如齿轮传动装置,理想化的齿轮传动,其从动轮与主动轮的关系是比例关系,但如果考虑齿隙的影响,在传动时有死区存在,它就是一个非线性器件了。如果系统的这种非线性特性在一定条件下、或在一定范围内呈线性特性,则可将它们进行线性化处理,这类系统或元件的特性称为非本质非线性特性;反之,称之为本质非线性,只能用非线性理论进行分析研究了。

1. 线性系统

构成线性系统的所有元件都是线性元件,其动态性能可用线

性微分方程描述,若各项系数为常数,则称为线性定常系统。其运动方程一般形式为

$$\begin{aligned} y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y \\ = b_0 u^{(n)} + b_1 u^{(n-1)} + \cdots + b_{n-1} \dot{u} + b_n u \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中: $u(t)$ 为系统的输入量;

$y(t)$ 为系统的输出量。

线性系统的主要特点是具有叠加性和齐次性,即当系统的输入分别为 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时,对应的输出分别为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$;当输入为 $r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ 时,输出量为 $c(t) = a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t)$,其中 a_1, a_2 为常系数。

2. 非线性系统

在构成系统的环节中有一个或一个以上的非线性环节时,则称此系统为非线性系统。它只能用非线性微分方程描述,不满足叠加原理。典型的非线性特性有饱和特性、死区特性、间隙特性、继电特性、磁滞特性等,如图 1-1 所示。

自动控制系统还有其他的分类方法,如按系统输入/输出信号的数量来分,有单输入/单输出系统和多输入/多输出系统;按控制系统的功能来分,有温度控制系统、速度控制系统、位置控制系统等;按系统元件组成来分,有机电系统、液压系统、生物系统;按不同的控制理论分支设计的新型控制系统来分,有最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等等。尽管系统分类的方式多种,不管什么形式,不管什么控制方式的系统,都希望它能做到可靠、迅速、准确。

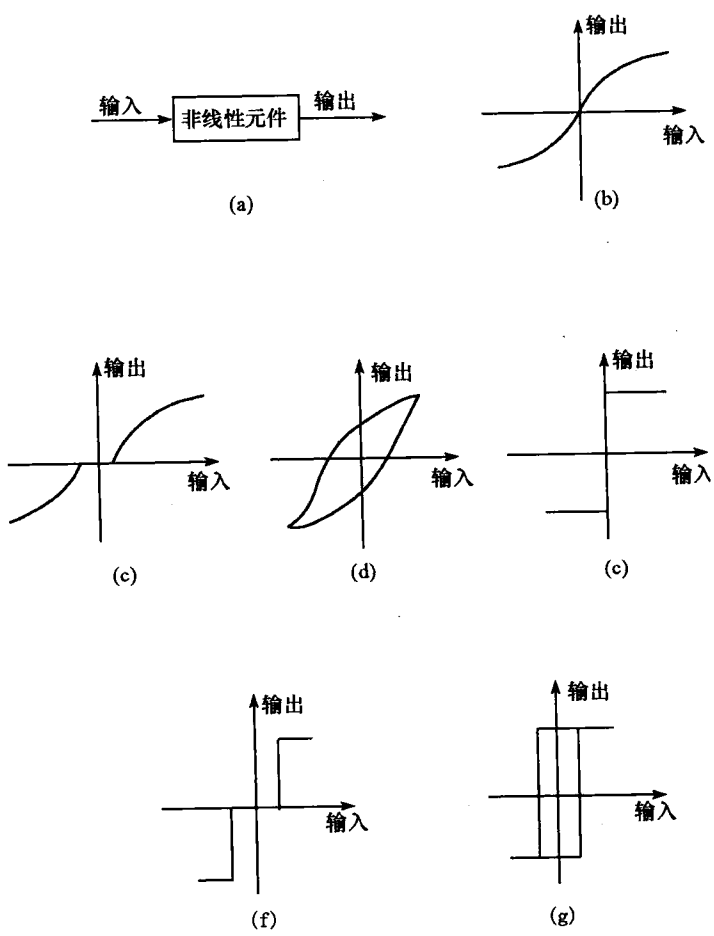


图 1-1 非线性元件静特性举例

1.2 非线性系统的复杂性及特征^[1-3]

线性系统理论自 20 世纪 50 年代以来不仅在理论上已初步完善，也成功地应用于各种国防和工业控制问题。随着现代工业对控制系统性能要求的不断提高，传统的线性反馈控制已难以满足各种实际需要。这是因为大多数实际控制系统都具有非线性特性。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，因此存在非线性饱和，这类非线性是由系统的不完善产生的，这种不完善实际上是不可避免的。有些非线性是系统动态特征本身所固有的。如高速运动的机械手各关节之间有哥氏力的耦合，这种耦合是非线性的，要研究机械手高速运动的控制就必须考虑非线性耦合。还有一类对象本身是线性的，但为了对其进行高质量的控制，常常在控制系统中有意识地引入非线性的控制规律，如时间最短控制就采用 bang-bang 控制它呈非线性的。

严格来说，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殊例子。非线性特性千差万别，不可能有统一的普遍实用的处理方法。线性系统通常可用线性常微分方程来描述，求解线性常微分方程已有成熟的方法。而对应的非线性微分方程只有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。

与线性系统相比，非线性系统的分析要困难和复杂得多，主要表现在：

- (1) 叠加原理可以用于线性系统，但不能用于非线性系统。

对于叠加定理可用的线性系统，小信号和大信号作用的结果是一致的，因此分析一般较为简单。对于叠加定理不能应用的系统，小信号和大信号作用的结果可能大不相同，因而分析更加复杂。对于线性系统，通常根据其解的表达式可以得到一系列定量和定性结果。

(2) 一般来说，对于非线性系统的分析一般不能求得完整的解，且往往涉及到一些比较抽象和繁琐的现代数学工具。即便如此，一般只能对非线性系统的运动情况作一些估计，如对系统的稳定性、动态品质等作出估计。

(3) 非线性系统的许多现象无法用线性系统理论刻画。如多个平衡点或多个操作点、状态变量或极限环的周期变化、分叉及混沌等。

通常，人们用微分方程或非线性算子来描述非线性系统，采用微分方程描述非线性系统

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \quad x(0) = x_0 \quad (1.2)$$

其中， $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态变量；

x_0 为零时刻初始状态；

$u \in \mathbb{R}^m$ 为控制向量。

对于一般非线性系统而言，会出现各种复杂的现象，如系统的解不存在、系统的解不唯一或者解不能延拓到适当大的时间范围等。

如果系统 (1.2) 中 f 函数与 t 无关，则称此系统为自治的，否则称为非自治的；与之对应的系统通常称之为自治系统与非自治系统。

如果系统 (1.2) 中 $u(t) = 0$ ，此时系统的运动通常称为自

由运动。

如果对任意 t ，系统 (1.2) 关于 x 和 u 是线性的，即

$$\dot{x}(t) = A(x, t) + B(x, t)u(t) \quad (1.3)$$

此时系统通常称为仿射系统，它代表相当广泛的一类非线性系统。

1.3 非线性系统控制的经典方法及其局限性^[1-3]

非线性控制系统的研究几乎是与线性系统平行的，并已经提出了许多具体方法。但总的来说，由于非线性控制系统本身所包含的现象十分复杂，这些方法都有其局限性。非线性控制系统早期的研究都是针对一些特殊的、基本的系统（如继电、饱和、死区等）而言的，其理论代表有以下几种。

1. 相平面法

相平面法是由 Poincare 于 1885 年提出的一种求解常微分方程的图解方法。这种方法的实质是将系统的动态过程在相平面内用运动轨迹的形式描绘成相平面图，然后根据相平面图全局的几何特征来判断系统所固有的静态、动态特征。

该方法主要用于奇点、极限环等概念描述相平面的几何特征，并将奇点、极限环分成几种类型，从而总结出系统的特征。但该方法仅适合于二阶系统与简单的三阶系统。

现代控制理论中的状态空间分析可以看成是相平面分析方法的推广。现代控制理论中的滑模变结构控制理论，其基本思想也来源于相平面分析法。

2. 描述函数法

描述函数法是由英国 P.J. Daniel 教授于 1940 年首次提出的。这种方法的实质是采用谐波分析的方法，忽略由于对象非线性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，因此又称谐波线性化法。当系统中的非线性元件用线性化的描述函数替代后，非线性系统就等效成一个线性系统，然后借用线性系统理论中的频域响应法来分析系统的频域特性。

该方法的研究对象可以是任何阶次的系统，可近似分析研究非线性系统的稳定性和自振荡问题，同时还可以用于非线性控制系统的简单综合。

3. 绝对稳定性理论

绝对稳定性的概念是由俄罗斯学者鲁里叶与波斯特尼考夫提出的，所研究的对象是由一个线性环节和一个非线性环节组成的闭环控制系统，并且非线性部分满足扇形条件。通过采用二次型加非线性项积分的李亚普诺夫函数（Lyapunov），得到了判定非线性控制系统绝对稳定性的充分条件。

在此基础上，许多学者进一步提出了不少绝对稳定性条件，其中最有影响的是波波夫判据和圆判据。其基本思想是利用频率特性曲线与某直线或圆的关系来判定非线性系统的稳定性。但这种方法难以推广到多变量系统。

4. 李亚普诺夫（Lyapunov）稳定性理论

Lyapunov 稳定性理论是分析和研究非线性控制系统稳定性的

经典理论，目前仍被广泛采用。其核心是构造合适的 Lyapunov 函数。

许多学者提出了一些构造非线性系统 Lyapunov 函数的方法，如克拉索夫斯基法、变量梯度法等，但每一种方法都只有一定的针对性，还没有一个能适合各种情况的统一构造方法。Lyapunov 方法还可以用于综合渐近稳定系统。

5. 输入输出稳定性理论

输入输出稳定性理论是由 I. W. Sanberg 和 G. Zames 提出的一种判定系统稳定性的方法。其基本思想是将泛函分析的方法应用于一般动态系统的分析，采用反映系统输入函数空间与输出函数空间的非线性算子来判定系统输入输出稳定性。通常输入输出函数空间均选定为 L_p 空间。G. Zames 提出了输入输出稳定性的定义，包括开环系统 L_p 稳定性与闭环系统 L_p 稳定性定义，并以范数的形式给出了系统增益的定义，提出了闭环系统稳定性的小增益定理。

输入输出稳定性理论适用于各类控制系统，包括线性系统、非线性系统、集中参数系统和分布参数系统等，但得到的结论一般是比较笼统的，即只能判断系统是全局稳定的或是全局不稳定的。至于小范围稳定性与稳定性范围的概念，在输入输出稳定性理论中尚未出现。