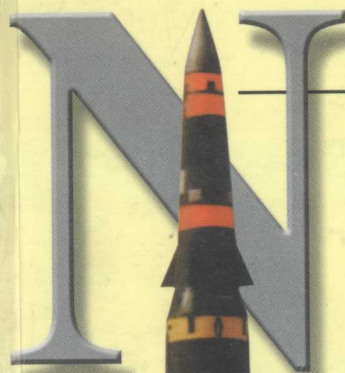


# 导弹控制和制导的 非线性设计方法



Nonlinear  
Design Approaches  
for Missile Control  
and Guidance

张友安 胡云安 著

国防工业出版社

TJ76

1002

TJ76  
1002-1

本书由“军队 2110 工程”经费资助出版

# 导弹控制和制导的非线性 设计方法

Nonlinear Design Approaches  
for Missile Control and Guidance

张友安 胡云安 著



200335489

国防工业出版社

·北京·

200335489

图书在版编目(CIP)数据

导弹控制和制导的非线性设计方法/张友安,胡云安  
著. —北京:国防工业出版社,2003.7

ISBN 7-118-03165-8

I.导... II.①张... ②胡... III.①导弹控制-非  
线性-设计 ②导弹制导-非线性-设计 IV.TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 043054 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 5 $\frac{1}{2}$  149 千字

2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:12.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 前 言

现代作战环境要求未来战术导弹具有高机动作战性能。为了提高导弹的机动作战性能,导弹需要大攻角飞行,以便充分利用导弹的机动过载能力,这样,小扰动线性化的基本假设将不再成立。另一方面,为了充分利用导弹的机动过载能力,也常采用倾斜转弯(BIT)控制技术,但由于BIT导弹存在大的滚动速率,其各个通道之间存在较强的耦合,这也将使导弹系统成为一个同时具有非线性、快时变性以及模型不确定性的复杂的多变量对象。对于导弹制导问题,即使不考虑导引头动力学和弹体动力学,导弹与目标相对运动的动力学和运动学模型也是一个复杂的非线性模型。因此,导弹系统实际上是一个同时具有非线性、时变性和模型不确定性的多变量对象。显然,对于导弹控制和制导,采用基于古典控制理论的传统设计方法和基于现代控制理论的线性设计方法已难以适应,有必要寻求新的更为有效的非线性设计方法。

反馈线性化方法和反演设计方法是在非线性导弹控制和制导系统中用得较多的非线性设计方法。而微分几何方法和动态逆方法是实现反馈线性化的两条有效途径。但反馈线性化方法依赖于系统精确的非线性模型,对建模误差敏感,且不能处理动态系统的未知变化。为增强对建模误差的鲁棒性,可以进一步将反馈线性化方法与自适应控制和鲁棒控制方法结合起来。20世纪90年代提出的反演设计方法是一种非线性系统的递推设计方法,这种方法易于处理系统中的不确定性和未知参数。近年来,反馈线性化方法和反演设计方法都已被应用于飞行器控制系统的设计。微分几何方法和变结构控制方法也被用于制导算法的设计。

本书主要介绍作者在导弹控制和制导的非线性设计方法上所

取得的研究成果,包括:基于FCMAC神经网络的自适应反馈线性化(NNBAFL)方法及其在BTT飞航导弹自动驾驶仪设计中的应用;基于全调节RBF神经网络和反演设计思想的鲁棒自适应控制方法;基于神经网络自适应逆的重设计方法;基于飞航导弹分块模型的组合控制算法;基于经典微分几何曲线论、变结构控制和李雅普诺夫稳定理论的平面/三维制导算法设计等。

本书反映了本领域的研究前沿和主流方法,书中给出的设计方法在现代国防建设中具有一定的应用前景,可供工程技术人员参考。对于有关的理论问题,书中给出了详尽的推导和证明,某些方法可以直接被借用或者推广,适合于博士生、硕士生在学位论文研究中学习、参考和使用。

本书第6章和第7章由胡云安编写,其余各章均由张友安编写,张友安对全书的内容作了统编及详细审定与修改。

作者要特别感谢作者的博士导师杨涤教授和崔平远教授,没有他们对我们的辛勤培育和精心指导,就难以取得本书的成果。

海军航空工程学院301教研室的顾文锦教授对书稿进行了仔细审阅,提出了许多宝贵意见和建议,在此特表感谢!

本书在编辑出版过程中得到了海军航空工程学院训练部、三系、301教研室和国防工业出版社的各位领导和老师的热情支持。

感谢“军队2110工程”经费资助出版本书。

由于作者水平有限,时间仓促,不妥或者错误之处恳请读者批评指正。

作者

2003年4月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导弹控制和制导中的非线性设计问题	1
1.2 非线性系统控制	2
1.3 导弹控制和制导的非线性设计方法	4
1.4 本书的主要内容	5
第 2 章 反馈线性化与反演设计方法基础	8
2.1 反馈线性化基本理论	8
2.2 反演设计方法基础	17
第 3 章 局部逼近神经网络	24
3.1 径向基函数神经网络	24
3.2 小脑模型神经网络	28
3.3 FCMAC 神经网络	31
第 4 章 神经网络自适应反馈线性化	38
4.1 无标称模型情况下的神经网络自适应 反馈线性化	39
4.2 有标称模型情况下的神经网络自适应 反馈线性化	52
第 5 章 NNBAFL 理论在 BTT 飞航导弹控制中的应用	60
5.1 BTT 飞航导弹数学模型的建立及相关 问题研究	61
5.2 NNBAFL 设计方法及其在 BTT 飞航 导弹中的应用	71
第 6 章 具有广义不确定性的导弹非线性自适应控制 系统设计	78

6.1	全调节 RBF 神经网络 .....	78
6.2	控制系统神经网络自适应设计 .....	81
6.3	控制系统鲁棒自适应设计 .....	94
6.4	神经网络自适应逆重设计 .....	103
<b>第 7 章</b>	<b>基于飞航导弹分块模型的组合控制器 .....</b>	<b>113</b>
7.1	飞航导弹的块对角数学模型 .....	113
7.2	基于块对角模型的组合算法 .....	115
7.3	仿真研究 .....	132
<b>第 8 章</b>	<b>二维平面制导规律设计 .....</b>	<b>134</b>
8.1	经典微分几何曲线论 .....	135
8.2	二维平面制导的鲁棒几何方法 .....	136
8.3	基于变结构控制的鲁棒制导 .....	142
<b>第 9 章</b>	<b>三维空间制导规律设计 .....</b>	<b>149</b>
9.1	基于微分几何理论的三维制导规律 .....	149
9.2	自适应变结构制导和增广比例导引 .....	154
<b>附录 A</b>	<b>三维空间导引运动建模 .....</b>	<b>166</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>170</b>

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Nonlinear Design Problems in Missile Control and Guidance .....	1
1.2 Nonlinear System Control .....	2
1.3 Nonlinear Design Approaches for Missile Control and Guidance .....	4
1.4 Main Contents of the Book .....	5
<b>Chapter 2 Fundamentals of Feedback Linearization         and Backstepping Design</b> .....	8
2.1 Fundamentals of Feedback Linearization .....	8
2.2 Fundamentals of Backstepping Design .....	17
<b>Chapter 3 Local Approximation Neural Networks</b> .....	24
3.1 Radial Basis Function (RBF) Neural Network .....	24
3.2 CMAC Neural Network .....	28
3.3 FCMAC Neural Network .....	31
<b>Chapter 4 Neural Networks Based Adaptive Feedback         Linearization (NNBAFL)</b> .....	38
4.1 NNBAFL without Nominal Model .....	39
4.2 NNBAFL with Nominal Model .....	52
<b>Chapter 5 The Application of NNBAFL in BTT Winged         Missiles</b> .....	60
5.1 Modeling of BTT Winged Missiles and Study on Related Problem .....	61
5.2 NNBAFL Design Method and Its Application in	



BTT Winged Missiles .....	71
<b>Chapter 6 Nonlinear Adaptive Control for Missile with Generalized Uncertainties .....</b>	<b>78</b>
6.1 Global Tuning RBF Neural Network .....	78
6.2 Neural Networks Based Adaptive Control Design .....	81
6.3 Robust Adaptive Control System Design .....	94
6.4 Neuro-Adaptive Inverse Redesign .....	103
<b>Chapter 7 Combined Controller Design Based on Block Model for Winged Missiles .....</b>	<b>113</b>
7.1 Block Model for Winged Missiles .....	113
7.2 Combined Controller Design Based on Block Model .....	115
7.3 Simulation Study .....	132
<b>Chapter 8 Two-Dimensional Guidance Law Design .....</b>	<b>134</b>
8.1 Classical Differential Geometry Curve Theory .....	135
8.2 Robust Geometric Approach for Planar Missile Guidance .....	136
8.3 Robust Guidance Law Based on Variable Structure Control .....	142
<b>Chapter 9 Three-Dimensional Guidance Law Design .....</b>	<b>149</b>
9.1 Three Dimensional Guidance Law Based on Classical Differential Geometry Curve Theory .....	149
9.2 Adaptive Variable Structure Guidance and Augmented Proportional Navigation Guidance .....	154
<b>Appendix A Modeling for Three-Dimensional Guidance .....</b>	<b>166</b>
<b>References .....</b>	<b>170</b>

# 第1章 绪 论

本章扼要引出导弹控制和制导中的非线性设计问题,分别简要概述其设计方法,并介绍本书的主要内容。

## 1.1 导弹控制和制导中的非线性设计问题

众所周知,导弹系统实际上是一个非线性时变系统。一直使用并延续至今的传统的导弹控制系统设计方法的基础是小扰动线性化理论和系数冻结基本假设。这种非线性问题的处理方法是在小动态范围内把基于定常气动力条件下的描述导弹运动的非线性方程直接线性化,使得原先交叉耦合的三个通道运动分解成相互独立的“俯仰”、“偏航”和“滚转”运动,从而把一个非线性时变系统设计问题简化和变换为典型状态下的三个线性回路的综合问题。大动态范围内的系统品质和实际存在的通道耦合问题解决的好坏,则取决于选取不同飞行状态进行初步设计之后的对系统进行校正与完善的程度<sup>[1]</sup>。

随着未来战场环境的日益恶化,空袭兵器种类越来越多,机动性能越来越高,这要求未来战术导弹具有高机动作战性能。为了提高导弹的机动作战性能,导弹需要大攻角飞行,以便充分利用导弹的机动过载能力,小扰动线性化的基本假设将不再成立。另外,为了充分利用导弹的机动过载能力,也常采用倾斜转弯(Bank-to-Turn, BTT)控制技术<sup>[2,3]</sup>,但由于 BTT 导弹存在大的滚动速率,其各个通道之间存在较强的耦合,这也将使导弹系统成为一个同时具有非线性、快时变性以及模型不确定性的复杂的多变量对象。

对于导弹制导问题,即使不考虑导引头动力学和弹体动力学,导弹与目标相对运动的动力学和运动学模型也是一个复杂的非线性模型。

综上所述,未来的导弹控制和制导系统实质上是一个同时具有非线性、时变性和模型不确定性的多变量对象。采用基于古典控制理论的传统设计方法和基于现代控制理论的线性设计方法显然难以解决导弹控制和制导的实际问题。因此,有必要寻求新的更为有效的非线性系统的设计理论和方法。

## 1.2 非线性系统控制

关于古典非线性方法(如相平面法和描述函数法),已有很多著作对此进行了深入论述,故本书不再赘述。本书只对导弹控制和制导系统中用得较多的几种主流的非线性设计方法,如反馈线性化方法和反演设计方法等进行研究。

反馈线性化方法的基本思想是先用代数变换将一个非线性系统的动态特性变换成线性的动态特性,再用熟知的线性控制理论进行设计<sup>[4-6]</sup>。微分几何方法和动态逆方法是实现反馈线性化的两条有效途径。

微分几何方法是在线性系统几何方法的状态空间概念基础上,引入微分几何的数学概念而发展起来的,它是非线性控制理论的一条重要分支。

动态逆系统方法从函数与反函数、矩阵与逆矩阵等这些具有普遍意义的逆概念出发,认为一个具有动态过程的力学系统,也有相应的动态逆系统。如果撇开系统的具体可逆条件不谈,系统的输入信号先后经过原来过程和对应的逆过程的两次作用之后,其结果将等价于经历了一个单位映射,使实际输出等于期望输出。它具有明显的物理含义,并由此得到“动态逆系统方法”的基本思想:对于给定的力学系统,先用对象的模型生成一个可用反馈方法实现的原系统的“ $\alpha$ 阶积分逆系统”,作为控制律串接在原系统的

前面,将原系统补偿为具有线性传递关系,且已经解耦的一种规范化系统——伪线性系统,然后再用线性系统的设计理论来完成伪线性系统的综合<sup>[6]</sup>。

但反馈线性化方法依赖于系统精确的非线性模型,对建模误差敏感,且不能处理动态系统的未知变化。为了增强对建模误差的鲁棒性,又出现了自适应的和鲁棒的反馈线性化方法<sup>[7-11]</sup>。

反馈线性化的一般控制结构可以表示为  $u = D(x)^{-1}N(x)$ , 当我们应用自适应算法近似计算上述控制时,要求  $D$  的估值  $\hat{D}$  (它是估计参数  $\hat{\theta}_D$  的函数)不能接近于 0,换言之,  $\hat{D}$  的绝对值应大于某一规定的界值。正因为这一要求,现有的这类控制问题的解通常都是局部给定的,或对系统假定了附加的先验知识。Yesildirek 和 Lewis 针对一类单输入单输出(SISO)状态反馈可线性化的具有可控标准型的连续时间未知非线性系统,提出了一种基于多层前向神经网络的反馈线性化控制器,用于使系统获得要求的跟踪性能<sup>[7]</sup>,并根据李雅普诺夫稳定性理论证明了闭环系统内的所有信号均为一致最终有界(UUB)。Ge<sup>[12]</sup>将多层前向神经网络用于一类 MIMO(多输入多输出)仿射非线性系统的鲁棒自适应反馈线性化。通过引入“GL”矩阵及其相应的算子,使神经网络 MIMO 系统中的分析变得非常简洁。Jagannathan 等基于小脑模型(CMAC)神经网络研究了一类非线性系统的神经网络自适应反馈线性化<sup>[13]</sup>。

对非线性控制,20 世纪 90 年代突破性地提出了一种反演设计(backstepping design)方法<sup>[14]</sup>,这种方法易于处理系统中的不确定性和未知参数。它是一种非线性系统的递推(recursive)设计方法,这里的非线性不必具有线性界,它是从离控制输入最远的那个标量方程开始(其间被数目最多的积分器分开)向着控制输入“步退”(step back)的方法。基本的反演设计工具首先被用于确定性系统,然后被用于不确定性系统。最基本的积分器反演工具先发展到针对一类严格反馈(strict feedback)系统,进而,由级联系统的镇定结果推广到“块反演”(block backstepping)。对于确定性系统,

反演可以用于迫使一个非线性系统具有以一组新坐标表示的线性系统那样的运动现象。然而,这种形式以及其它形式的反馈线性化(feedback linearization)需要对消系统中的非线性,即使这些非线性对于系统的镇定和跟踪是有用的。反演的一个主要优点是,它在避免对消系统中的有用的非线性方面具有灵活性,以镇定和跟踪为追求的目标,而不是以线性化为追求的目标。

在有不确定性时,非线性设计的任务更具有挑战性。当不确定性为匹配(matched)不确定性时,即当不确定性和控制输入出现在同一个方程中时,即使不确定性的界未知,具有非线性阻尼(nonlinear damping)的设计保证了有界性。当不确定性为非匹配(unmatched)不确定性时,即当不确定性出现在控制输入所在方程的前面的方程中时,一种更先进的反演工具被用于获得有界性。具有一般形的界未知的有界不确定性的反演,是不需自适应就能够获得有界性的关键工具。当不确定性为未知常值时,自适应反演(adaptive backstepping)是一种更合适的反演形式。

非线性设计的目标是产生具有期望的稳定性质的闭环系统,而不是分析给定系统的性质,为此,可以扩展李雅普诺夫函数的概念,称为控制李雅普诺夫函数(Control Lyapunov Function, CLF)。在2.2节,我们将对非线性系统的反演设计方法进行比较全面的概述,并通过简单的示例,介绍几种常用的反演设计方法的基本概念和原理。

### 1.3 导弹控制和制导的非线性设计方法

有关导弹制导的非线性设计方法的论述将集中放在第8章和第9章予以介绍。这里只简单介绍导弹控制的非线性设计方法。Kim等将BTT导弹动力学从时间尺度上分成两部分:快变的体系角速度动力学和慢变的纵向加速度与角度动力学,然后分别对快变动力学和慢变动力学进行非线性动态逆控制设计<sup>[15]</sup>,为了保证动力学解耦,设计中必须使快变动力学的带宽高于慢变动力学的

带宽。文献[16,17]讨论了类似的设计。为了增强飞行器控制系统的鲁棒稳定性,文献[8~11]进一步研究了飞行器控制系统的鲁棒反馈线性化(动态逆)控制方法。Sadhukhan<sup>[18]</sup>等将神经控制和动态逆结合起来,但他们的研究仅限于F8飞机纵向动力学的线性化模型。Botrots<sup>[19]</sup>提出利用不同的优化目标训练神经网络,以逼近非线性动态逆,并利用径向基函数(RBF)逼近了模拟的高性能飞机的动态逆。McFarland<sup>[20]</sup>提出了利用神经网络的直接自适应轨迹控制结构理论,重点强调了在飞行器反馈线性化飞行控制结构中的神经网络的使用,提出的飞行控制结构中应用了两种神经网络,一种神经网络通过标称数学模型离线训练,用于建立飞行器逆动态模型,另一种神经网络具有在线学习能力,用于补偿动态逆误差,文中还基于李亚普诺夫稳定性原理指出闭环系统的所有信号都是有界的,并且推导了神经网络在线学习规则。

近年来,反演技术也被应用于飞行器控制系统的设计。1995年, Richard 首先将导弹纵向控制模型化成级联的形式,然后运用这种递推设计技术设计了导弹纵向运动控制器<sup>[21]</sup>。2001年, Taeyoung 运用神经网络和反演技术设计了飞行器非线性自适应控制器,取得了较好的控制效果,但收敛残集的确定比较繁琐<sup>[22]</sup>。应用反演控制技术设计的控制系统可以解决导弹控制系统中存在的非匹配不确定性问题,因此,反演控制已成为导弹控制系统设计的一个很有应用潜力的研究方向。

## 1.4 本书的主要内容

本书围绕导弹控制和制导中的非线性设计问题,在简单介绍理解本书必备的一些理论基础之后,着重介绍了作者在这一研究领域所取得的一些成果。全书共分9章,分别介绍如下:

第1章扼要提出导弹控制和制导中的非线性设计问题,并综述其设计方法。

第2章阐述了反馈线性化和反演设计方法的一些基本概念和

基本原理。

第3章介绍了几种局部逼近神经网络的结构特点、基本原理和训练算法,包括径向基函数(RBF)神经网络,小脑模型(CMAC)神经网络和模糊CMAC(FCMAC)神经网络。

第4章将反馈线性化与FCMAC神经网络相结合,针对一类连续时间MIMO仿射非线性系统,分未知标称系统模型和已知标称系统模型两种情况,分别提出了一种新的神经网络自适应反馈线性化(NNBAFL)控制方法。在很弱的假设条件下,应用李雅普诺夫稳定性理论和Gronwall不等式等数学工具,严格地证明了整个闭环系统内的所有信号均为一致最终有界(UUB)。在已知标称系统模型的情况下,所得到的控制器具有自适应反馈线性化控制律并联一个鲁棒控制项的更简单的结构,并且充分利用了已有的模型知识,更便于工程实现。

第5章将NNBAFL理论用于BTT飞航导弹自动驾驶仪的设计。提出了将通常用于寻的导弹控制的BTT技术用于飞航导弹惯性制导段的有关制导与控制理论和方法。为此,在考虑地球曲率和地球自转的情况下,在东北天系建立了BTT飞航导弹的动力学、运动学方程;提出了一种航迹制导BTT飞航导弹制导和控制系统控制命令生成方法。6DOF数学仿真结果证明,用NNBAFL所设计的BTT导弹控制系统具有强的鲁棒性和自适应能力,能够有效实现三通道间的解耦,能够有效克服模型不确定性问题。该方法同样适合于控制导弹做大空域飞行。

第6章研究具有广义不确定性的BTT导弹非线性自适应控制系统的设计问题,提出一种基于全调节RBF神经网络和反演设计思想的自适应控制系统设计方法;提出了一种导弹鲁棒自适应设计方法,通过引入一种鲁棒函数,采用自适应反演设计的改进型设计了自适应控制系统,该方法大大放宽了现有文献对不确定性的要求;提出了一种基于神经网络自适应逆的重设计方法,应用两个RBF神经网络来抵消输入未建模动态的影响,该方法对输入未建模动态没有严格的假设,具有广泛的适用性。

第7章基于飞航导弹分块模型,将导弹作为一个整体考虑,同时又将导弹分为几个低阶的子系统,物理概念清晰,便于设计;提出了组合算法的思想,即针对每一个子系统的不同情况,采用不同的控制策略以达到最佳的控制效果;在控制方法上,综合采用了神经网络控制技术、变结构控制技术、模糊控制技术和解析逆解技术。

第8章和第9章研究非线性导弹制导规律设计方法。

第8章研究平面制导规律。将基于微分几何的导弹制导与基于李雅普诺夫稳定理论的鲁棒控制方法结合起来,提出一种新的鲁棒制导算法——鲁棒几何制导;选择导弹和目标之间的相对速度矢量与导弹—目标视线之间的夹角作为将要被控制到零的输出,将与目标运动的加速度和速度方位信息有关的量视为干扰量,基于变结构控制理论设计了另一种鲁棒制导算法。

第9章研究三维制导规律。在考虑导弹速度和目标速度均为时变的情况下,将微分几何方法与李雅普诺夫稳定理论结合起来,提出了一种导弹三维导引规律设计新方法;建立了三维空间导引运动模型,在此基础上,提出了三种新的三维导引律:自适应变结构制导、增广比例导引和鲁棒制导。



## 第2章 反馈线性化与反演设计方法基础

本章主要介绍在下面各章中将要用到的有关反馈线性化与反演设计方法的一些基本概念和基本原理。

### 2.1 反馈线性化基本理论

反馈线性化是近年来引起人们极大研究兴趣的一种重要的非线性控制设计方法。这种方法的基本思想是通过状态变换,将一个非线性系统的动态特性全部或部分地变换成线性的动态特性,从而可以应用熟知的线性控制的方法<sup>[4~6]</sup>。这种方法与通常的线性化(例如雅可比线性化)完全不同,不同之处在于反馈线性化是通过严格的状态变换与反馈来达到的,而不是借助于动态特性的线性近似。这种方法也能够用于鲁棒或自适应非线性控制器的设计。然而这种方法在实际应用中仍受到很大限制,原因是这种方法依赖于精确的非线性模型。

#### 2.1.1 数学工具

**定义 2.1** 矢量函数  $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$  称为  $\mathbf{R}^n$  上的一个矢量场。若矢量函数  $f(\mathbf{x})$  具有要求的任意阶连续偏导数,则称之为平滑的矢量场。

**定义 2.2** 一个平滑的标量函数  $h(\mathbf{x})$  的梯度定义为  $\nabla h = \partial h / \partial \mathbf{x}$ , 它是以  $(\nabla h)_i = \partial h / \partial x_i$  为元素的一个行矢量。其中,  $\mathbf{x}$  为  $n$  维空间中的状态变量。

**定义 2.3** 一个平滑的矢量场  $f(\mathbf{x})$  的雅可比矩阵定义为  $\nabla f = \partial f / \partial \mathbf{x}$ , 它是以  $(\nabla f)_{ij} = \partial f_i / \partial x_j$  为元素的一个  $n \times n$  矩阵。