



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书

航天科学与工程专著系列

INTELLIGENT GUIDANCE

— Intelligent Adaptive Guidance Laws for Homing Missile

智能制导

——寻的导弹智能自适应导引律

● 李士勇 章钱 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TJ765.3
LSY



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书
航天科学与工程专著系列

INTELLIGENT GUIDANCE
— Intelligent Adaptive Guidance Laws for Homing Missile

智能制导

——寻的导弹智能自适应导引律

● 李士勇 章钱 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书是系统研究智能制导——寻的导弹智能自适应导引律的学术专著,反映了作者近年来取得的最新研究成果。所设计的智能制导律具有实时性好、适应能力强、脱靶量小、易于实现等优点,可以满足拦截高速大机动目标的需要。全书共7章,主要包括:绪论;导弹导引系统运动学模型;传统导引律分析;解析描述自适应模糊制导律设计;神经网络优化的自适应模糊导引律;模糊变结构制导律;神经网络滑模制导律。

本书可供从事导弹智能制导与控制、智能自动化等相关领域科研人员及工程技术人员使用,也可供高等院校教师及研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能制导:寻的导弹智能自适应导引律/李士勇,章钱著.
—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.12
国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书
(航天科学与工程专著系列)
ISBN 978-7-5603-3245-1

I. ①智… II. ①李…②章… III. ①导弹制导
IV. ①TJ765.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第038391号

责任编辑 田新华
封面设计 高永利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 10.5 字数 250千字
版 次 2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3245-1
定 价 48.00元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

导弹在现代化战争中发挥着越来越大的作用,而提高导弹的制导精度是有效拦截目标、提高命中率的关键。据报道,导弹命中精度提高 1 倍相当于战斗部提高 8 倍的杀伤效果。可见,提高导弹制导精度至关重要。它不仅增强攻击效率,还可以减轻导弹的重量,提高导弹的机动性和突防能力。随着科学技术的高度发展,使得拦截目标的速度和机动性能力不断提高,导弹导引系统已成为一个具有非线性、时变性和模型不确定性的复杂系统,传统的末制导律已不能满足拦截高速、大机动目标的要求。因此,研究新型的导弹精确制导律受到世界上许多国家的高度重视。

本书首先建立了导弹运动的数学模型,分析了导引律仿真系统,对传统导引律进行了简要的介绍,并从理论上对盲区所引起的脱靶量进行分析。为了满足导弹拦截高速、大机动目标精确制导的需要,我们将模糊控制理论、神经网络控制理论和变结构控制理论同制导理论相结合,研究设计了几种智能末制导律。通过大量的仿真对比结果表明,这些智能制导律具有适应目标机动能力强、拦截精度高、易于实时实现的优点。

应该指出,将模糊控制理论应用于制导国内外已有一些研究。但几乎毫无例外地采用在线模糊推理形式/自组织模糊制导,或采用查询表式的模糊制导。这两种形式的模糊制导律都存着一些问题:前者一是在线推理时间较长,难于满足实时性的要求,二是基于模糊规则推理的制导律对目标大机动的适应能力有限,三是受模糊规则数目限制,导致制导精度不高;后者虽然推理实时性较好,同样存在适应能力和制导精度有限的缺点。

针对已有的基于模糊规则的模糊制导律推理时间长、制导规则不能自适应调整、制导精度不够理想的缺点,我们设计了一种控制规则在全论域范围内可调整的、解析描述的自适应模糊制导律。将比例制导律指令及其微分作为模糊控制器的输入量,将制导律设计问题转化为反馈控制问题,控制目标是使视线角速率为零。该模糊制导律的模糊控制规则及模糊推理用一解析式表达,易于计算与调整,适于实时在线控制。该导引律能够根据目标加速度和目标速度的变化自适应地改变模糊控制规则,因此具有较强的鲁棒性。对拦截高速大机动目标的大量仿真结果表明,所提出的导引律在脱靶量、拦截时间等指标方面明显优于传统的比例导引律。

模糊逻辑推理系统自身缺少学习能力,而神经网络却具有自学习的能力。于是通过神经网络和模糊制导律相结合,我们设计了两种基于神经网络的自适应模糊导引律。一种是基于 RBF 神经网络调整的自适应模糊导引律,通过对 RBF 神经网络自调整因子增量式公式的推导,得到了 RBF 神经网络调整的自调整因子递推公式;另一种导引律是基于模糊 RBF 神经网络辨识的自适应模糊导引律,即用模糊 RBF 神经网络去辨识自调整因子。这两种制导律的自调整因子都能够实时在线获得,能够根据目标的加速度及速度

的变化而自适应地调整,因此鲁棒性强。仿真结果表明,这两种导引律拦截精度高,拦截时间短,并且对拦截大机动目标有很强的自适应性,是一种具有实用价值的高精度末制导律。

由于变结构控制设计比较简单,便于理解和应用,且具有很强的鲁棒性,因此采用变结构控制是解决导弹制导问题较好的途径。近些年在该方面的研究较多,设计出了很多制导律,但几乎都是基于线性系统。我们在非线性系统变结构控制理论的基础上,设计出一种新型变结构制导律,并针对变结构控制存在抖振的缺陷,应用模糊控制来削弱其抖振。

变结构导引律的最大缺点是需要对目标机动性大小进行估计,从而调整变结构项的强度。若变结构项强度过大,一方面会造成视线角速率抖动,影响弹上机构的正常工作,另一方面也使脱靶量增加;若变结构项强度过小,不能有效拦截目标。CMAC 神经网络与 RBF 神经网络及一般的神经网络相比,具有更好的非线性逼近能力、快速学习能力,适合于复杂动态环境下的非线性实时控制。因此,我们将变结构控制与神经网络相结合,设计了三种神经网络滑模制导律:一是基于 CMAC 神经网络与变结构复合控制的制导律。首先通过变结构制导律的输出指令来训练 CMAC 神经网络,逐步减小变结构制导律的输出并同时增加 CMAC 神经网络的指令输出,达到一定精度后,制导指令完全由 CMAC 神经网络输出。二是自适应 RBF 神经网络滑模制导律。控制策略是设计特定的滑模面,然后将滑模面作为 RBF 神经网络的输入变量,输出量即为导弹加速度。采用自适应算法实时在线调整 RBF 神经网络的连接权值,从而使得系统最终到达滑模面,完成制导。三是基于 RBF 神经网络调节的变结构制导律,采用 RBF 神经网络调节变结构制导律的增益,以减小变结构制导律的抖动,提高制导精度。

本书内容是对作者所研究设计的上述 7 种形式的新型智能自适应制导律的系统介绍。全书共 7 章,第 1 章绪论;第 2 章导弹导引系统运动学模型;第 3 章传统导引律分析;第 4 章解析描述自适应模糊制导律设计;第 5 章神经网络优化的自适应模糊导引律;第 6 章模糊变结构制导律;第 7 章神经网络滑模制导律。书中给出了大量的仿真结果,并将 7 种导引律的性能对比情况在附录中给出。

参与本书编写和提供素材的还有李研、袁丽英、李巍、单宝灯、龙建睿、杨丹、李浩、魏丽霞、腾飞。书中绝大部分内容都是作者的研究成果,也有少量内容参考了一些文献,尤其是有关导弹导引系统运动学模型、传统导引律部分的经典内容引用了钱杏芳等的著作《导弹飞行力学》,在此谨向被引文献的作者致以诚挚的谢意!

由于书中内容涉及知识面较广,存在不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2011 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 精确制导律的研究背景及其意义	(1)
1.2 精确制导技术发展概况	(2)
1.2.1 精确制导技术与制导武器	(2)
1.2.2 精确制导技术在现代战争中的地位及其发展趋势	(4)
1.3 国内外末制导律研究现状及分析	(4)
1.3.1 经典导引律	(5)
1.3.2 现代制导律	(7)
1.3.3 智能制导律	(8)
1.4 本书的主要内容及结构	(10)
第 2 章 导弹导引系统运动学模型	(12)
2.1 导弹的动力学基本方程	(12)
2.2 常用坐标系和坐标系间的转换	(13)
2.2.1 导弹导引系统坐标系的定义	(14)
2.2.2 坐标系之间的转换关系	(16)
2.3 导弹运动方程组	(21)
2.3.1 导弹质心运动的动力学方程	(21)
2.3.2 导弹质心运动的运动学方程	(22)
2.3.3 质量变化方程	(23)
2.3.4 导弹运动学描述	(23)
2.3.5 目标运动学描述	(25)
2.3.6 拦截几何和导弹目标相对运动	(25)
2.4 导引系统仿真框图	(26)
2.5 本章小结	(27)
第 3 章 传统导引律分析	(28)
3.1 导引飞行概述	(28)
3.1.1 导引方法分类	(28)
3.1.2 自动瞄准的相对运动方程	(29)
3.2 追踪法	(31)
3.2.1 弹道方程	(31)

3.2.2	直接命中目标的条件	(33)
3.2.3	导弹命中目标所需的飞行时间	(33)
3.2.4	导弹的法向过载	(34)
3.2.5	允许攻击区	(35)
3.3	平行接近法	(38)
3.3.1	直线弹道的条件	(39)
3.3.2	导弹的法向过载	(40)
3.3.3	平行接近法的图解法弹道	(41)
3.4	比例导引法	(41)
3.4.1	比例导引法的相对运动方程组	(42)
3.4.2	弹道特性	(42)
3.4.3	比例系数 K 的选择	(46)
3.4.4	比例导引法的优缺点	(47)
3.4.5	其他形式的比例导引规律	(47)
3.5	三种速度导引方法的关系	(50)
3.6	脱靶量分析	(51)
3.7	本章小结	(51)
第4章	解析描述自适应模糊制导律设计	(52)
4.1	模糊控制	(52)
4.1.1	模糊控制的基本原理	(52)
4.1.2	模糊控制器的基本设计方法	(53)
4.1.3	解析描述控制规则可调整的模糊控制器	(60)
4.2	导弹-目标三维运动描述	(63)
4.3	解析描述模糊末制导律	(65)
4.3.1	解析描述模糊末制导律原理	(65)
4.3.2	模糊制导律设计	(66)
4.3.3	模糊制导律参数的确定	(67)
4.3.4	仿真结果及分析	(68)
4.4	本章小结	(75)
第5章	神经网络优化的自适应模糊导引律	(76)
5.1	神经网络	(76)
5.1.1	神经网络技术的发展与现状	(76)
5.1.2	RBF 神经网络简介	(79)
5.1.3	RBF 神经网络学习算法	(80)
5.1.4	RBF 神经网络的优点及问题	(84)
5.1.5	RBF 神经网络在控制中的应用	(84)
5.2	基于 RBF 网络调整的自适应模糊导引律	(86)

5.2.1	RBF 网络的学习算法	(86)
5.2.2	RBF 网络调整 α 的公式推导	(87)
5.3	基于模糊 RBF 神经网络辨识的自适应模糊导引律	(88)
5.3.1	模糊 RBF 神经网络结构	(89)
5.3.2	基于模糊 RBF 神经网络的辨识算法	(90)
5.4	仿真结果及分析	(91)
5.4.1	RBF 神经网络调整的模糊导引律	(91)
5.4.2	模糊 RBF 神经网络辨识的模糊导引律	(93)
5.4.3	三种导引律的对比分析	(95)
5.5	本章小结	(96)
第 6 章	模糊变结构制导律	(97)
6.1	变结构控制的基本原理	(97)
6.1.1	变结构系统的定义	(97)
6.1.2	变结构系统的一般性质	(98)
6.1.3	切换面和滑动模态不变性条件	(99)
6.1.4	可达模态可达条件和可达空间	(101)
6.1.5	滑动模态的抖振	(103)
6.1.6	切换函数的设计方法	(107)
6.1.7	控制律的设计	(109)
6.2	变结构制导律的研究现状	(110)
6.2.1	滑模制导律	(110)
6.2.2	切换偏置比例导引律	(110)
6.2.3	SWAR 制导律	(111)
6.2.4	具有终端约束的变结构制导律	(112)
6.2.5	最优滑模制导律	(113)
6.2.6	全局滑模变结构控制	(113)
6.2.7	变结构制导律的发展方向	(114)
6.3	模糊变结构制导律的设计	(114)
6.3.1	变结构控制在非线性系统中的应用	(115)
6.3.2	目标-导弹相对运动模型	(116)
6.3.3	制导律的设计	(117)
6.3.4	模糊变结构制导律	(119)
6.4	仿真结果及分析	(119)
6.5	本章小结	(120)
第 7 章	神经网络滑模制导律	(121)
7.1	CMAC 神经网络简介	(121)
7.1.1	引言	(121)

7.1.2	CMAC 神经网络的优越性	(122)
7.1.3	CMAC 神经网络的结构	(123)
7.1.4	CMAC 学习算法	(124)
7.1.5	CMAC 神经控制	(124)
7.1.6	需要解决的问题	(128)
7.2	神经网络滑模变结构控制	(129)
7.2.1	引言	(129)
7.2.2	常规神经网络和滑模变结构控制的结合	(129)
7.2.3	自适应神经网络滑模变结构控制	(133)
7.2.4	基于模糊神经网络的滑模变结构控制	(134)
7.2.5	基于滑模变结构系统理论的神经网络自适应学习	(134)
7.2.6	关于神经网络滑模变结构控制的其他问题	(135)
7.3	CMAC 与滑模变结构复合控制的新型制导律	(135)
7.3.1	滑模变结构制导律	(136)
7.3.2	CMAC 与 VSG 复合控制制导律	(136)
7.4	自适应 RBF 神经网络滑模制导律	(138)
7.4.1	导弹-目标运动方程	(138)
7.4.2	ARBFSM 制导律设计	(139)
7.4.3	稳定性分析	(140)
7.5	基于自适应 RBF 网络切换增益调节的变结构制导律	(141)
7.6	仿真对比及分析	(143)
7.6.1	CMAC-VSG 制导律	(143)
7.6.2	ARBFSM 制导律	(144)
7.6.3	基于自适应 RBFNN 切换增益调节的变结构制导律	(146)
7.7	本章小结	(147)
附录	7 种智能导引律的性能对比	(148)
参考文献	(150)

第 1 章 绪 论

1.1 精确制导律的研究背景及其意义

导弹导引系统的功能是引导并控制导弹以最高精度接近目标,使导弹引信与战斗部有良好的配合,并以最大的命中概率击中目标。在导弹的制导系统研究中,导引规律的研究占有重要地位,它不仅关系到导弹的动力学特性,同时直接影响到导弹导引系统的设计和作战空域的指定^[1]。据有关资料报道,导弹命中精度提高 1 倍相当于战斗部提高 8 倍的杀伤效果。可见,提高导弹导引精度是非常重要的,它不仅可以增强攻击效率,还可以减轻导弹的重量,提高导弹的机动性和突防能力。因此,导弹导引律的研究就显得特别重要^[2]。

导引律是指根据导弹和目标运动信息,控制导弹按一定的飞行弹道去截击目标。因此,导引律要解决的问题是导弹拦截目标的飞行弹道问题。导弹导引规律的研究从二次世界大战以来一直是各国政府和军队关注的热门课题。自寻的导弹一般通过弹载设备完成对目标信息的搜索、跟踪,并通过形成导引信号,控制导弹机动飞行。导引的目的是使导弹飞向目标,并最后命中目标。同时要求导弹的弹道性能较好(如弹道平直),对导弹的机动过载要求不大^[3]。

随着技术的进步,战争的高科技成分逐渐占有较大比重,导弹打击的目标也越来越复杂。近十几年来,世界多次局部战争,特别是海湾战争、伊拉克战争的结局证明,精确制导武器是重要的攻防手段。保证导弹准确命中目标的因素是多方面的,而导引控制律犹如一个人的大脑,对武器的拦截和命中目标起着举足轻重的作用。

在目前导弹制导技术中,最常用的导引律是比例导引律和现代导引律,但这些都是假定目标机动是常数基础上得到的。随着目标的运动变得越来越复杂,制导环境越来越复杂,传统的导引律已经不能满足高精度的要求,并且人们对导弹的导引律精度和应用范围的要求也越来越高。

导弹导引问题,即使不考虑导引头动力学和弹体动力学,导弹与目标的相对运动的动力学和运动学模型也是一个十分复杂的非线性模型。未来的导弹导引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系统,采用基于经典控制理论和基于现代控制理论的线性化设计方法显然难以解决导弹控制和制导的实际问题。因此,要寻找新的更为有效的非线性设计理论和方法。智能控制理论的诞生,给导引律的发展和探索提供了新的方向。

智能控制是控制理论发展的高级阶段,它是建立在众多新兴学科基础上的。模糊控制的形成和发展,以及与人工智能专家系统思想的相互渗透,对智能控制理论的形成起到了十分重要的推动作用。

1965年,美国著名自动控制专家 Zadeh 创立了模糊集合论,为解决复杂系统的控制问题提供了强有力的数学工具;20世纪70年代中期,以模糊集合论为基础,从模仿人的控制决策思想出发,智能控制在规则控制上取得了重要进展。1975年, Mamdani 和 Assilian 创立了模糊控制器的基本框架,并把成果应用到工业生产控制中。从理论角度来说,模糊系统和模糊控制在20世纪80年代至90年代发展迅速,对一些基本问题都给出了理论证明,例如, L. X. Wang(王立新)和 J. M. Mendel(1992)证明了一类模糊系统是万能逼近器,为模糊控制的工程应用提供了理论依据。

本书主要研究不基于系统精确模型的智能导引律及其应用,旨在增强导弹制导对于干扰的鲁棒性,并提高制导精度。

1.2 精确制导技术发展概况

自从二次世界大战第一枚导弹出现以来,导弹技术得到飞速发展。作为现代战争克敌制胜的尖端武器,世界各国都在积极开展导弹的研制和生产。据有关报道,目前世界上已有30多个国家拥有导弹武器,还有许多中小国家正在积极地研制和发展导弹武器。因此,导弹防御问题引起世界各国的普遍关注,对导弹防御系统的研究已成为各国军事战略研究的重点。2001年,美国把发展导弹防御系统提上了议事日程,并且已进行实质性的部署阶段,形成了高、中、低空和远、中、近程的导弹防御系统。近来,俄罗斯在战术导弹防御方面,也研制了中高空反战术弹道导弹和反飞机的 S-300W 防空系统。我国周边国家与地区也相应开展了主要以反战术弹道导弹为目的的导弹防御计划研究^[4]。随着导弹技术的进一步扩散,我国已经处于多种弹道导弹的射程以内。我国目前的防空防导形势严峻,与技术先进国家相比有一定的差距。在防空导弹系统的配置中,尚未形成远中近程、高中低空的防御体系,加强反导弹和反飞机防御系统研究,是我国今后防御系统迫在眉睫的任务。

1.2.1 精确制导技术与制导武器

精确制导武器的定义是:采用精确制导技术,直接命中概率在50%以上的武器。主要包括精确制导导弹、制导炮弹、制导地雷等。直接命中指制导武器的圆概率误差(也叫圆公算偏差,用符号 CEP 表示,即英文 Circular Error Probable 的缩写)小于该武器弹头的杀伤半径。

导弹防御系统的关键技术是精确制导技术。精确制导这一术语产生于20世纪70年代中期。1972年,美国在越南战争中使用了26000多枚激光和电视制导炸弹,炸毁了约80%的被攻击目标,同无制导的普通炸弹相比战斗效能提高了近百倍。1973年10月第

四次中东战争中,埃及使用苏制雷达制导的“SA26”地空导弹和有线制导的“AT23”反坦克导弹,以色列使用美制电视制导的“小牛”空地导弹和有线制导的“陶”式反坦克导弹,也均在战争中取得了不菲的战绩。随着科学技术的发展和精确制导技术的进一步成熟,精确制导技术越来越广泛地被采用。

精确制导武器已成为高技术信息化战争中物理杀伤的主要手段,并在战争中发挥关键作用^[1]。在1991年的海湾战争中,以美国为首的多国部队用9%的精确制导武器击毁了80%的目标,显示了精确制导武器的威力;在1998年的“沙漠之狐”战争中使用的精确制导武器已上升到70%;在1999年以美国为首的北约对南联盟科索沃的战争中主要使用的是精确制导武器,其用量已占到全部使用武器的98%。精确制导武器在高技术局部战争中的作用更加突出。

精确制导技术^[5]研究的主要内容包括精确导引技术和精确控制技术。研究的重点是确保精确制导武器在复杂战场环境中精确命中目标乃至目标易损部位的寻的末制导技术。随着高新技术的发展,精确制导武器的制导技术有多种类型。按照不同控制导引方式可概括为自主、寻的、遥控和复合等四种制导。

1. 自主制导

自主制导是引导指令由弹上制导系统按照预先拟定的飞行方案控制导弹飞向目标,制导系统与目标、指挥站不发生任何联系的制导。属于自主制导的有:惯性制导、方案制导、地形匹配制导和星光制导等。自主制导由于和目标及指挥站不发生联系,因而隐蔽性好、抗干扰能力强,导弹的射程远、制导精度高。但飞行弹道不能改变的特征,使之只能用于攻击固定目标或预定区域的弹道导弹、巡航导弹。

2. 寻的制导

寻的制导或称自寻的制导、自动导引制导、自动瞄准制导,是利用目标辐射或反射的能量制导导弹去攻击目标。由弹上导引头感受目标辐射或反射的能量,测量导弹-目标相对运动参数,形成相应的引导指令控制导弹飞行,使导弹飞向目标的制导系统,称为寻的制导系统。包括:

(1) 主动寻的制导。照射目标的能源在导弹上,对目标辐射能量,同时由导引头接收目标反射回来的能量的寻的制导方式。它具有“发射后不用管”的优点,能从任何角度攻击目标,命中精度较高,缺点是易受干扰。

(2) 半主动寻的制导。照射目标的能源不在导弹上,弹上只有接收装置,能量发射装置设在导弹以外的制导站、载机或其他载体。这种制导方式可减少弹上设备,增大作战飞行距离,但不能自主寻的,而且制导站易受敌人攻击。因此,主要用于攻击空中目标。

(3) 被动寻的制导。目标本身就是辐射能源,不需要能源发射装置,由弹上导引头直接感受目标的辐射能量,导引头以目标的特定物理特性作为跟踪的信息源。该种制导方式的作用距离与目标的辐射的能量强度有关,典型的制导系统是红外寻的制导系统。

3. 遥控制导

由导弹以外的制导站向导弹发出导引信息的制导系统,称为遥控制导系统。根据导引指令在导引系统中形成的部位不同,又可分为波束制导和遥控指令制导。这种制导系统的制导精度高,作用距离比寻的制导系统大得多,弹上设备简单。但其制导精度随导弹和制导站的距离增大而降低,且易受外界干扰。

4. 复合制导

复合制导是一种高制导精度的制导体制,已成为导弹制导技术发展的重要趋势。所谓复合制导是指在导弹飞向目标的过程中,采用两种或多种制导方式,相互衔接、协调配合共同完成制导的一种新型的制导方式。在同一武器系统的不同飞行段,不同的地理和气候条件下,采用不同的制导方式,扬其所长,避其所短,组成复合式精确制导系统,以实现更准确的制导。常用的复合制导技术有:自主制导+寻的制导;自主制导+指令制导;自主制导+指令制导+寻的制导;指令制导+寻的制导。以上这些复合制导技术在地对空、空对地、地对地战术导弹中均被采用。除上述分类方法外,制导技术还可根据所用物理量的特性进行分类,如无线电制导、红外制导、激光制导、雷达制导、电视制导等^[1]。

1.2.2 精确制导技术在现代战争中的地位及其发展趋势

精确制导技术以无可争辩的事实,确立了它在现代高技术战争中的地位。在越南战场,美国为了炸毁河内附近的清化桥,曾出动600架次飞机,投弹数千吨,付出了18架飞机的重大代价,但仍未能炸毁该桥。后来,美国把刚刚研制成功的激光制导炸弹投入实战,F-4战斗机仅出动12次,就炸毁了此桥,飞机却无一架损伤。在1973年的第四次中东战争期间,埃及和以色列之间展开了一场第二次世界大战以来最大的坦克战。开战后前3天,以军在西奈半岛损失坦克约300辆,其中77%是被精确制导反坦克导弹击毁的。海湾战争被称做高技术武器的试验场,多种精确制导武器纷纷登场。如“战斧”巡航导弹、“爱国者”防空导弹、“斯拉姆”空对地导弹、“哈姆”反辐射导弹、“海尔法”反坦克导弹,以及“小牛”、“渔叉”、“响尾蛇”、“麻雀”等各种机载精确制导导弹和激光制导炸弹上场亮相。据统计,多国部队在海湾战争中使用的精确制导武器多达20余种。目前,精确制导武器系统注重向超远程、隐形、智能化方向发展^[3]。

1.3 国内外末制导律研究现状及分析

导弹的攻防能力在现代战争中的作用越来越突出,而导弹的制导能力特别是末制导律的作用尤为重要。对导引律的研究可以追溯到20世纪30年代^[6]。1932年法国学者布格就开始研究纯追踪法,并在目标做匀速运动的情况下得到了解析解。20世纪40年代,美国在海军和空军开始了导弹的预研。经过了一些年的研究,Locke在1955年系统地总结了前人研究制导律的成果,但他主要讨论了平面内导弹拦截目标的情况。1956年,

Adler^[7]又提出三维制导律。从那以后,许多学者提出了很多制导律的研究方法。制导律大致可以分为以下几类:经典导引律,基于现代控制理论的现代制导律,以及正处于发展阶段的非线性制导律和智能制导律。

1.3.1 经典导引律

导弹的经典制导律有多种,有追踪法、三点法、前置角法、平行接近法和比例导引法等^[1]。它们以质点运动学研究为特征,不考虑导弹和目标的运动学特性。导引规律的选取随着目标飞行特性和制导系统的组成不同而不同。1943年,美国科学家 Spatch 等人提出了比例导引法并在系数为2的情况下得出了解析解。此后有很多人探索不同比例导引系数下求解解析解的可能途径。

1. 追踪法

追踪法是指导弹在向目标飞行的过程中,导弹运动的速度向量每时每刻都指向目标。这种导引规律的最大优点在于制导系统结构较为简单,但缺点是当导弹迎击目标或攻击近距离高速飞行目标时,弹道弯曲的程度很严重,因此导弹飞行时所需的法向加速度大。这对导弹的空气动力、结构强度、制导系统等各方面提出了较高的要求。另外,应用这一导引规律攻击目标时,对导弹飞行速度和目标加速度之间的比值有较严格的要求;否则,在命中点附近造成弹道的过分弯曲。近年来将追踪法与其他方法融合可以克服它本身的缺点。如 Becan^[8]将模糊控制引入追踪法中以克服弹道弯曲的缺点。

2. 三点法

三点法是指导弹在向目标飞行的过程中,导弹、目标和制导站始终在一条直线上。这种导引规律的缺点是弹道弯曲比较严重,需要的法向加速度比较大。特别是当地对空导弹用三点法迎头攻击低空高速飞行的目标时,这一缺点更为严重。但在技术上实现比较容易,抗电子干扰的能力较好。

3. 前置角法

前置角法是指在导引站导引导弹向目标飞行的过程中,使导弹位于目标视线前方的某一位置上,也就是使导弹和导引站的连线与目标和导引站的连线之间有一定的夹角。这一角度按照一定规律变化可以保证弹道比较平直。但它的抗干扰能力差一些,实现起来也相对复杂。

4. 平行接近法

平行接近法是指导弹在接近目标的过程中,目标视线在空间始终保持平行。就是说,导弹接近目标的过程中,目标视线的转动角速率应为零。这种导引规律使导弹飞行过程中的法向需用加速度为零,所以平行接近法的弹道“平直”是它的突出优点。但需要精确地测量导弹和目标的位置及速度等信息,实现起来相当复杂而且十分困难,故目前在导弹上实际使用比较少见。

直接法、追踪法、平行接近法等对制导系统提出严格的要求,它们要求制导系统在每个瞬间都要准确地测量目标、导弹速度以及前置角,因此算法很难实现,使得制导系统复杂化;而比例导引律具有需要信息量小,结构简单,易于实现的优点。在经典导引律中,比例导引是很有效的,因此对它的研究也最充分。

5. 比例导引法

比例导引法是指导弹在接近目标的过程中,使导弹速度向量的转动角速率正比于目标视线的转动角速率。这种导引规律下飞行弹道比较平直,而且制导系统技术上容易实现。传统的比例导引分为纯比例导引(PPN)、真比例导引(TPN)和广义比例导引(GPN)。

在纯比例导引中,拦截指令加速度方向垂直于拦截者的速度方向。Guelman 定性研究了 PPN 的有关性质^[9],并推导出了拦截非机动目标的闭环形式解。Hu 推导出导弹纵向平面和侧向平面具有终端约束角要求的比例导引律,使得导弹能够以垂直的形式击中固定目标,为了增强制导律的鲁棒性,利用自适应律来调节制导参数^[10]。

在真比例导引中,拦截者的指令加速度方向垂直于导弹与目标的视线方向。Li 和 Jing^[11]应用微分几何方程研究了纯比例导引和真比例导引能够捕获到目标的条件。Guelman^[12]推导了 TPN 的闭环形式解,在指令加速度中得到了形式固定的闭环解。Yuan 和 Chern^[13]经过推导得到指令加速度变比例系数的闭环解析解。

广义比例导引是指导弹指令加速度作用与视线的法线成某一固定角的方向。Yang 和 Yeh 首先获得了 GPN 的闭环形式解,而 Yuan 和 Hsu 则给出了 GPN 的精确闭环形式解^[14]。

上述研究的是二维空间导引律,在三维空间导引方面,Alder^[7]首先研究了三维空间的比例导引律。Roddy^[15]设计了倾斜转弯控制(BTT)视线角命令导引律,此导引律属于三点法和前置法导引。一般的理想比例导引(GIPN)是一种状态反馈控制器,主要是利用线性化方法来研究。Tyan 和 Shen^[16]改善了 GIPN,设计出自适应理想比例导引律(AIPN),使得导航比能够自适应地改变,而且 AIPN 实现也较简单。OH 和 HA^[17]研究了三维纯比例导引的捕获目标能力的标准。Zhao、Zhang 和 Yu^[18]基于 Lyapunov 稳定性理论提出了一种扩展比例导引(EPNG),可以满足脱靶量及终端约束角的要求,针对反舰导弹的三维仿真研究表明了该制导律的有效性。Song 采取了视线角指令导引(CLOS)与红外末制导复合的方法来跟踪目标^[19]。

比例导引律概念明确且易于实现,对元部件精度要求不高;缺点是仅适于攻击小机动目标,前向攻击能力差,对制导增益选择比较敏感,当对付高性能的大机动目标时,尤其是在目标采用各种干扰措施的情况下,比例导引律不再适用。

针对经典导引律存在的缺点,随着控制理论进一步发展,人们又研究了许多现代制导律。目前研究较多的有最优制导律、微分对策制导律和自适应制导律等。现代制导律要求获得目标较充分的运动状态信息。

1.3.2 现代制导律

现代战争的发展使得导弹要攻击的目标越来越复杂,传统的比例导引律不再适用,人们需要寻找新的制导律设计方法。随着计算机技术和现代控制理论的发展,人们开始将现代控制理论应用于拦截器的导引规律设计。建立在现代控制理论和微分对策理论基础上的导引规律,通常称为现代制导律。现代制导律包括线性最优制导律、自适应制导律、微分对策制导律等。

1. 线性最优制导律

线性最优制导律^[3,6]是利用最优控制理论把制导看做带有终端约束的控制器设计。最早的离散最优制导策略是由 Tung 和 Templeman 给出的;Stallard 利用线性化模型和终端约束提出最优制导律。Asher 和 Matuyesk 在假设目标加速度为外界干扰时,获得最优线性制导律。Stockum 和 We 等人研究了近距离格斗的最优制导律。Guelman 和 Shinar 在假设加速度命令垂直于导弹速度向量和目标运动信息已知的条件下,通过椭圆积分和求解非线性代数方程,获得平面内拦截机动目标的最优制导律。Rusnak 和 Meir 研究了高阶加速度制导律。Nesline、Menon 和 Imado 等人分别研究了中距离导弹的最优导引问题。Kumar 等人研究了中距离导弹的三维次最优导引问题。Ford 等人研究了带有约束的三维制导律,将制导律设计转化为应用动态规划解法解决连续系统最优终止控制决策问题。最优制导律结构多变且制导信号多,对目标加速度的估计误差、剩余飞行时间估计误差灵敏度,对测量元件也提出很高的要求。当剩余飞行时间估计误差较大时,精度急剧下降。Hexner、Shima^[20]利用数学方法推导随机最优问题,提出了一种带有终端约束的随机最优控制制导律(SOCGL),仿真结果表明除非目标机动特别大,否则 SOCGL 的拦截性能优于古典的最优制导律。Hexner、Shima 和 Weiss^[21]推导出了—种带有加速度值受约束的 LQG 制导律,该制导律依赖于状态估计的概率密度函数,与古典的最优制导律(OGL)相比,有效导航比的最大值能够在制导过程中获得,而 OGL 却只能在拦截时间的末端才能获得。

2. 自适应制导律

为了消除系统模型及外界环境条件的不确定因素,发展了自适应制导律。这种制导律,使每发导弹的实际制导作用随实际参数和外界条件变化而变化,因而可以大大提高制导精度。

Liang 和 Ma^[22]提出了一种非线性自适应制导控制律,当目标的机动角度为未知分段常值时,该制导律可以保证拦截目标,实现较容易,控制光滑。

Chwa^[23]提出了基于目标不确定性和控制回路动态特性自适应制导律,类似地,Kim 也应用自适应控制理论设计了使视线角按照给定路线飞行的制导律和自动驾驶仪控制方案。自适应制导系统的制导作用,是基于一定的数学模型和一定的性能指标综合出来的,和最优导引律不同的是,自适应制导所依据的系统数学模型允许存在不确定性,需要在系

统运行中去提取模型的有关信息。

3. 微分对策制导律

最优导引律都是在假设目标的运动已知的前提下得到的,而实际导弹攻击敌机这类问题是研究双方最优策略问题,即符合微分对策理论,因此产生了微分对策导引律。微分对策导引律是以微分对策理论为基础的最优导引律。Hsueh、Huang 和 Fu^[24] 在微分对策理论的基础上提出零滑动制导律(ZSGL),相对速度选为代价函数。在能够获得理想的目标信息的情况下,这种制导律能够有效对付机动目标和不机动目标。值得指出的是,若导弹和目标均为变速运动,微分对策导引律求解中遇到了两点边值问题,难以得到解析解^[25]。

现代制导律的优点是它能考虑导弹和目标的动力学问题,并可以考虑起点和终点约束条件以及其他约束条件,根据给出的性能指标寻求最优导引规律。然而它也有不足。首先,经典导引律和现代制导律都是根据导弹标称模型设计的,而实际模型往往存在不确定性和未建模动态,随着高性能导弹的出现,导弹模型中的非匹配和不确定性的特点越来越突出。其次,由于通道间耦合和气动力非线性的缘故,导弹是一个高度非线性时变系统,在参数未知或摄动时,导弹控制系统通常会性能变坏或出现不稳定。此外,随着航天技术的发展,导弹要拦截的目标也在不断变化,高速大机动性能的目标也对导弹的战术指标提出新的要求。对于以上要求,基于古典导引律和现代制导律设计的导弹控制系统已经很难满足性能指标的要求。

1.3.3 智能制导律

智能控制理论是20世纪70年代发展起来的,其中的模糊控制、神经网络控制等形式的智能控制理论是对传统控制理论的发展,基本出发点是利用仿人的智能推理算法实现对复杂的、不确定性系统有效地控制。智能控制理论研究领域非常广泛,目前应用到制导领域的有模糊控制、神经网络控制、变结构理论等。下面分别进行介绍。

1. 模糊制导律

模糊逻辑控制器具有不依赖精确对象模型、能够对高度非线性对象进行控制的能力和好的鲁棒性能,许多模糊控制理论已经应用到导弹制导和导弹控制过程中,基于模糊逻辑的智能制导律受到广泛关注。以模糊逻辑控制为基础的制导律大致分为基于模糊规则的制导律、自组织模糊制导律和与其他智能理论融合的模糊制导律等几种类型。

Mishra^[26] 等人最先将模糊控制应用到导弹末制导律设计中,完成以模糊逻辑为基础的制导律性能计算和分析。Gonsalves 设计了空-空导弹模糊制导律,将传统的比例导引律转化为具有模糊逻辑形式的导引律。Shieh^[27] 设计了以模糊逻辑为基础的末制导规则,并应用 Lyapunov 理论验证了制导系统的稳定性。Lin^[28] 针对波束扫描技术提出基于导弹目标视线的模糊导引律,此导引律是对特定类型目标的拦截,对拦截不同目标的灵活性不高。Lin 和 Chen^[29] 提出一种模糊拦截轨道的制导律,该制导律基于模糊推理系统能