



西北工业大学现代国防科技学术文库

DEFENCE

TECHNICAL BASES

SCIENCE



弹道导弹精确制导与控制技术

杨军 等 编著

西北工业大学出版社

西北工业大学现代国防科技学术文库

弹道导弹精确制导与 控制技术

杨 军 朱学平 张晓峰 张义广 编著



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书介绍了弹道导弹的精确制导与控制技术。全书共 10 章,包括精确制导弹道导弹制导控制系统组成原理、弹道导弹动力学建模、弹道导弹飞行控制系统设计、精确制导弹道导弹中制导系统、精确制导弹道导弹末制导系统、弹道导弹先进制导控制技术、自动目标识别技术、制导系统抗干扰技术、气动光学效应问题等内容。

本书是作者以长期从事的精确制导与控制技术这一领域的理论研究为基础,同时结合作者多年在弹道导弹制导控制系统设计的工作实践,参考国内外相关资料编写而成的。本书内容丰富,具有工程应用特色,可供从事弹道导弹精确制导与控制技术研究、设计的技术人员使用,也可供大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

弹道导弹精确制导与控制技术/杨军等编著. —西安:西北工业大学出版社,2012. 11
ISBN 978-7-5612-3526-3

I. ①弹… II. ①杨… III. ①弹道导弹—导弹制导②弹道导弹—导弹控制 IV. ①TJ761.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 276068 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:14.25

字 数:213 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

前 言

精确制导武器自 20 世纪 40 年代诞生以来,随着高新技术的发展和战争的需求,在命中精度、制导方式、射程等方面均取得了飞速发展。精确制导技术是精确制导武器的技术核心,也是现在国内外制导技术发展的热点之一。精确制导技术一般是指采用各种探测方式的末制导技术,它正向着智能化、微型化和多模化的方向发展。目前,精确制导技术主要以红外成像制导、微波(厘米波和分米波)制导、毫米波制导、多模复合制导、激光制导以及智能化信息处理技术为主要发展方向。这些技术可以支持精确制导武器远距离高精度作战、全天时作战、全天候作战和复杂战场环境下作战。

弹道导弹既是政治上的威慑力量,又是军事上的一种打击力量。提高弹道导弹的命中精度及抗干扰性能是导弹研制的重要目标之一。近年来,随着现代战争作战背景的复杂化、对抗技术和作战目标自身性能的不不断提高,弹道导弹制导技术特别是精确制导技术发展迅速,已引起各主要武器国的特别关注。

从国外众多的弹道导弹型号的研制过程来看,未来的弹道导弹要具有高精度、远距离、强突防、高生存和高可靠性的特点。随着现代战争中作战双方的侦察能力、进攻能力以及防卫能力的不断发展,精确制导技术必然成为新一代弹道导弹制导技术发展的热点,精确制导弹道导弹在未来现代化战争中将占有重要地位,在打击地面重要目标、海上舰船目标、空中重要运动目标中将发挥极为重要的作用。

笔者以长期从事的导航、制导与控制领域的理论研究为基础,同时结合多年在制导控制系统设计领域的实际工程经验并参考国内外相关资料,完成了本书的编写。全书共分 10 章。第 1 章为概论,主要介绍工程应用背景与意义、国内外研究动态和发展趋势以及本书的主要内容和特色。第 2 章介绍精确制导弹道导弹的制导控制系

统组成原理。第3章介绍弹道导弹的动力学建模。第4~7章介绍了精确制导弹道导弹制导控制技术。其中,第4章介绍弹道导弹飞行控制系统设计,第5章和第6章分别介绍了精确制导弹道导弹的中制导系统和末制导系统设计,第7章介绍了弹道导弹先进精确制导技术。第8~10章介绍了弹道导弹精确制导技术的工程实际问题。其中,第8章介绍了自动目标识别技术,第9章介绍制导系统抗干扰技术,第10章介绍了气动光学效应问题。

全书由杨军教授负责统稿。杨军负责编写第1,2,8章,朱学平负责编写第3,5,6,7章,张晓峰负责编写第4,9章,张义广负责编写第10章。在本书的成稿过程中,袁博、朱苏朋、许涛、刘琦、席杰、张晨等同志付出了辛勤的劳动,在此表示感谢!本书借鉴参考了国内有关学者的研究成果,在此向有关专家、学者致以衷心的感谢!

由于水平有限,书中难免有不足之处,欢迎读者批评指正。

编者

2011年12月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 精确制导弹道导弹在未来战争中的地位和作用	1
1.2 精确制导弹道导弹武器系统组成	5
1.3 精确制导弹道导弹制导控制关键技术	7
1.4 精确制导弹道导弹未来发展趋势	9
第 2 章 弹道导弹制导控制系统组成原理	11
2.1 弹道导弹制导控制系统概述	11
2.2 弹道导弹中制导系统组成原理	16
2.3 弹道导弹末制导系统组成原理	17
2.4 弹道导弹稳定控制系统组成原理	17
2.5 弹道导弹典型控制方法	21
第 3 章 弹道导弹动力学模型	32
3.1 坐标系定义及坐标系转换关系	32
3.2 气动力控制弹道导弹动力学模型	39
3.3 气动力/推力矢量组合控制弹道导弹动力学模型	45
3.4 气动力/喷流组合控制弹道导弹动力学模型	47
3.5 弹体动力学模型简化	48

第 4 章 弹道导弹飞行控制系统	56
4.1 概述	56
4.2 飞行控制系统设计的基本方法	57
4.3 倾斜运动稳定与控制	67
4.4 姿态稳定与法向过载控制系统	73
4.5 静不稳定弹体控制问题	76
4.6 飞行控制系统变参问题	83
4.7 伺服气动弹性控制问题	86
4.8 弹道导弹解耦控制问题	93
4.9 法向过载限制及舵面权限分配问题	100
第 5 章 精确制导弹道导弹自主制导系统	103
5.1 天文导航系统	103
5.2 惯性导航系统	106
5.3 地图匹配制导系统	108
5.4 卫星导航系统	112
5.5 弹道导弹组合导航系统	114
第 6 章 精确制导弹道导弹自动寻的制导系统	121
6.1 精确制导弹道导弹自动寻的制导系统的基本要求	121
6.2 精确制导弹道导弹典型自动寻的制导系统	122
6.3 末制导寻的装置——导引头	134
6.4 精确制导弹道导弹末制导律	146
6.5 末制导系统性能精度分析	156
第 7 章 弹道导弹先进制导控制技术	162
7.1 弹道导弹捷联制导技术	162

7.2	多模复合制导系统数据融合技术	166
7.3	弹道导弹大攻角控制技术	170
7.4	弹道导弹倾斜转弯控制技术	178
7.5	弹道导弹双翼舵控制技术	182
第 8 章	自动目标识别技术	184
8.1	自动目标识别技术概述	184
8.2	自动目标识别的基本方法	186
8.3	红外成像制导自动目标识别	188
8.4	反辐射制导目标识别	190
8.5	SAR 成像制导自动目标识别	192
8.6	多模制导自动目标识别	196
第 9 章	制导系统抗干扰技术	199
9.1	红外成像制导系统抗干扰技术	199
9.2	反辐射制导系统抗干扰技术	205
第 10 章	红外成像末制导气动光学效应问题	209
10.1	气动光学效应影响机理	209
10.2	气动光学效应影响分析	211
10.3	气动光学效应试验方法	212
10.4	气动光学效应试验结果及分析	213
参考文献	216

第 1 章 概论

1.1 精确制导弹道导弹在未来战争中的地位和作用

1.1.1 常规弹道导弹的任务及制导方式

弹道导弹按作战任务分类可分为战略弹道导弹和战术弹道导弹两大类。战略弹道导弹一般装有核弹头,通常射程在 3 500 km 以上,包括洲际弹道导弹(ICBM)、远程弹道导弹(IRBM)、潜射弹道导弹(SLBM),主要用于打击敌方的政治、经济中心,重要军事基地,核武器库,交通枢纽等重要战略目标;战术(战役)弹道导弹通常装有常规弹药(或小当量核弹头或生化武器弹头),除少数中程战术弹道导弹射程达到 3 000~3 500 km 外,大部分射程在 1 000 km 以内。多数近程弹道导弹主要用于打击战役战术纵深目标和部分战略目标,如集结的军队、坦克、飞机、舰船、雷达、指挥所、机场、港口、交通枢纽等。

早期液体弹道导弹的制导系统采用无线电-惯性制导系统,制导律采用摄动制导,导弹沿标准弹道飞行。由于惯性制导是自主制导,抗干扰能力强,更具军事优势,因而在随后的型号研制中发展迅速,其制导精度为千米级。20 世纪七八十年代,弹道导弹命中精度显著提高,主要采用了惯性平台制导系统加末助推修正、工具误差补偿及重力异常补偿等,精度达到百米级。

1.1.2 精确制导弹道导弹的地位和作用

弹道导弹既是政治上的威慑力量,又是军事上的一种打击力量。提高弹道导弹的命中精度是导弹研制的主要目标之一,因而加大弹道导弹精确制导系统和技术的

研制力度是发展弹道导弹的重点任务之一。近年来,随着现代化战争作战背景的复杂化、对抗技术和作战目标自身性能的不不断提高,弹道导弹制导技术,特别是精确制导技术发展迅速,已引起各主要武器国的特别关注。

精确制导武器自 20 世纪 40 年代诞生以来,随着高新技术的发展和战争的需求,在命中精度、制导方式、射程等方面均取得了飞速发展。精确制导技术是精确制导武器的技术核心,也是现在国内外制导技术发展的热点之一,一般是指采用各种探测方式的末制导技术,正向着智能化、微型化和多模化的方向发展。目前,精确制导技术主要以红外成像制导、微波(厘米波和分米波)制导、毫米波制导、多模复合制导、激光制导以及智能化信息处理技术为主要发展方向。这些技术可以支持精确制导武器远距离高精度作战、全天时作战、全天候作战和复杂战场环境下作战。

从国外众多的弹道导弹型号研制过程来看,未来的弹道导弹要具有高精度、远距离、强突防、高生存和高可靠性的特点。随着现代化战争中作战双方的侦察能力、进攻能力以及防卫能力的不断发展,精确制导技术必然成为新一代弹道导弹制导技术发展的热点,特别是复合制导技术已成为必然的发展途径。

精确制导弹道导弹在未来现代化战争中将占有重要地位,在打击地面重要目标、海上舰船目标、空中重要运动目标(如预警机)中将发挥极为重要的作用。

1. 陆基反辐射弹道导弹^[6]

雷达被誉为现代高技术战场的“千里眼”,当代各种高技术武器装备作战效能的发挥、战场的监视与警戒、联合作战的联络和指挥都离不开雷达。因此,信息化战争条件下,对雷达的摧毁与反摧毁是作战双方围绕制信息权而展开的重要作战行动。它已经成为决定电子战成败、关系战局胜负的关键一环。竞相发展的反雷达武器已成为提高军队电子战能力,实现武器装备跨越式发展的重要环节。

反辐射导弹利用敌方雷达辐射的电磁波进行导引并攻击雷达及其载体,因其命中精度极高,被公认是雷达的“克星”。反辐射导弹的出现为夺取战场电磁优势、充分发挥武器装备效能提供了有力保障。全球近期发生的几场局部战争,特别是海湾战争、科索沃战争和伊拉克战争表明,战争初期使用反辐射导弹摧毁敌方雷达夺取制电磁权,进而夺取制空权和制海权,已经成为现代信息化战争的通用模式。

美国等军事强国之所以鲜有弹道式反辐射导弹,一是因为弹道导弹的造价相对昂贵,在已拥有明显空中优势的条件下,用较廉价的机载或舰载反辐射导弹同样可以命中目标达到目的;二是因为弹道导弹从发射到命中目标耗费时间较长,对方雷达一旦得到预警情报,可以采取关机、变频等对抗手段来提高自身生存能力。虽然如此,在是否研制陆基弹道式反辐射导弹的问题上还是应根据各国军队的实际情况进行考虑。

首先,研制陆基弹道式反辐射导弹非常适合于海空力量相对较弱的国家。机载、舰载反辐射导弹射程短,在没有取得绝对海上和空中优势的情况下,难以对敌方纵深雷达进行有效攻击。研发陆基弹道式反辐射导弹则可弥补这一不足。实战时,可以根据战役进程的发展,交替使用陆基弹道式反辐射导弹与其他机载、舰载反辐射导弹,使其互为补充,发挥最大作战效能。如在交战初期,可充分发挥陆基弹道式反辐射导弹射程远、突防力强、威力大等优势,弥补空海反辐射能力的相对薄弱,一举摧毁对方对我威胁较大的雷达目标;在获得一定的电子战优势后,则以机载、舰载反辐射导弹打击为主,以弥补陆基弹道式反辐射导弹数量上的不足,避免浪费。

其次,陆基弹道式反辐射导弹同样具有很多优点:

- (1)射程远,可以对敌实施全纵深攻击。
- (2)飞行速度快,突防力强,可以提高对雷达突袭的成功率。
- (3)威力大。

按弹道式反辐射导弹的作战性能,结合作战任务分析,选择打击目标时,宜选择打远程地面预警雷达,主要包括战略相控阵雷达和超视距雷达。

相控阵雷达是集多功能于一身的新型雷达。它既可用于远程警戒,又可对不同目标进行引导、跟踪、制导,多项任务可同时进行,是地面预警系统中的主要探测设备。

超视距雷达是指能监视远在地平线以下目标的地面雷达,主要工作在短波波段。它的作用距离一般在1 000~4 000 km之间,主要作为低弹道洲际导弹、潜地导弹、低轨道卫星和战略轰炸机的早期预警手段。对洲际导弹的预警时间可长达30 min。超视距雷达除雷达本身外,尚需配备电离层监测站等辅助设施,整个设备显得相当庞

大,无法实施机动。

这两类雷达对导弹实施突防作战威胁最大,在敌方的战场情报侦察体系中地位重要、作用显著。利用精确制导弹道导弹摧毁这两类雷达可以显著改善导弹部队战场环境,并提高对敌目标的打击能力。

2. 反航母弹道导弹^[7]

航空母舰作为最重要的海上威慑力量,在“由海向陆”的战略指导下,其大洋作战的使命已逐步转向对陆攻击,成为强国干涉他国事务的强有力工具。作为濒海大国,为了维护海洋权益,保护海上交通线和海岸不受航母编队的威胁与侵犯,我们必须发展反航母武器,其中最重要的是要发展对航母有致命威胁的导弹武器,以形成我们的反航母作战的“杀手锏”。

依据反航母作战的迫切需求,需要发展具有大射程、高速度和高隐身性能、能对航母造成致命打击的新型导弹,其中最具有发展前途的有两类导弹:一是高隐身性能的战术巡航导弹,二是精确制导的战术弹道导弹。

精确制导弹道导弹是一种全新概念的导弹武器,在继承弹道导弹的基本特性基础上增加了两项功能:

(1)弹道中段变轨功能,即增加变轨发动机,在外层弹道中段可改变导弹飞行轨迹,使导弹具有机动再入能力。

(2)末段精确制导功能,即增加导弹末制导,采用毫米波雷达、红外焦平面成像、反辐射雷达或两种以上组成的复合末制导头,当导弹机动再入飞临目标上空时,末制导系统开始搜索目标,锁定跟踪目标后,以数马赫的速度灌顶飞向目标。

美海军权威咨询报告《2000—2035年美国海军技术》中预测认为,海射精确制导弹道导弹将成为海军未来主要进攻性武器,尽管巡航导弹会不断改善性能并将存在很长一段时间,但最终基本上将被精确制导战术弹道导弹代替,精确制导战术弹道导弹将是其航母编队的首要威胁。因此,精确制导弹道导弹可满足反航母的重大需求。

3. 反预警机弹道导弹

空中预警机已由早期仅有的监视、预警功能发展成兼备监视、跟踪、指挥、控制功能的完善系统,成为C⁴ISR系统的重要一环,是迅速获得有关战场态势并据此做出正

确决策的不可缺少的关键系统。空中预警机的主要作用为:

- (1)防空预警。
- (2)大规模空战中的指挥调度。
- (3)防空作战中的统一协调。

各国都非常重视预警装备的发展,以期提高探测高空和低空目标的能力,提高对付复杂电磁环境的能力,提高防空导弹的攻击能力和反隐身能力。

鉴于预警机在现代战争中的重要作用,压制和摧毁敌方的预警机成为取得制空权、制电磁权的重要手段。研究攻击预警机的平台及制导方式已成为重要课题。装配了寻的制导的弹道导弹,可以用在反预警机上以破坏敌信息链系统的侦察环节、预警环节,从而削弱对方的信息优势。

有学者指出^[8],地空导弹与弹道导弹的技术融合正在促使这两类导弹产生突破性的发展。融合弹道导弹射程远、地空导弹射击高速机动目标精度高的特点,采用精确制导弹道导弹攻击预警机便具备了可行性。

1.2 精确制导弹道导弹武器系统组成

精确制导弹道导弹武器系统的基本组成如图 1.1 所示。该系统由精确制导弹道导弹、地面设备系统、目标信息获取系统和指挥控制系统 4 部分组成。

1.2.1 精确制导弹道导弹

精确制导弹道导弹是整个武器系统的核心,它主要由弹头、弹体结构、动力系统、制导与控制系统和初始对准系统组成,有的弹道导弹还装有战斗遥测系统。

1. 弹头

战略弹道导弹的弹头一般由壳体、战斗部装药(一般为核弹头,其威力用 TNT 当量表示)、引爆装置和保险装置组成。后期先进的战略弹道导弹装有用于投放多弹头或突防装置的末助推制导系统。分导式多弹头的弹头母舱根据预定弹着点情况在助推段与弹体分离后的末助推段分别释放子弹头;机动式多弹头可使弹头机动变轨;突防

装置用于释放轻、重诱饵,使它们与真弹头一起在自由飞行段飞行,再入大气层后重诱饵将对导弹防御系统起诱骗的干扰作用。战术弹道导弹的弹头多为常规弹头,如攻击坦克、舰艇、桥梁等硬目标的穿甲高爆弹头或攻击集群装甲目标的聚能炸药子母弹头。

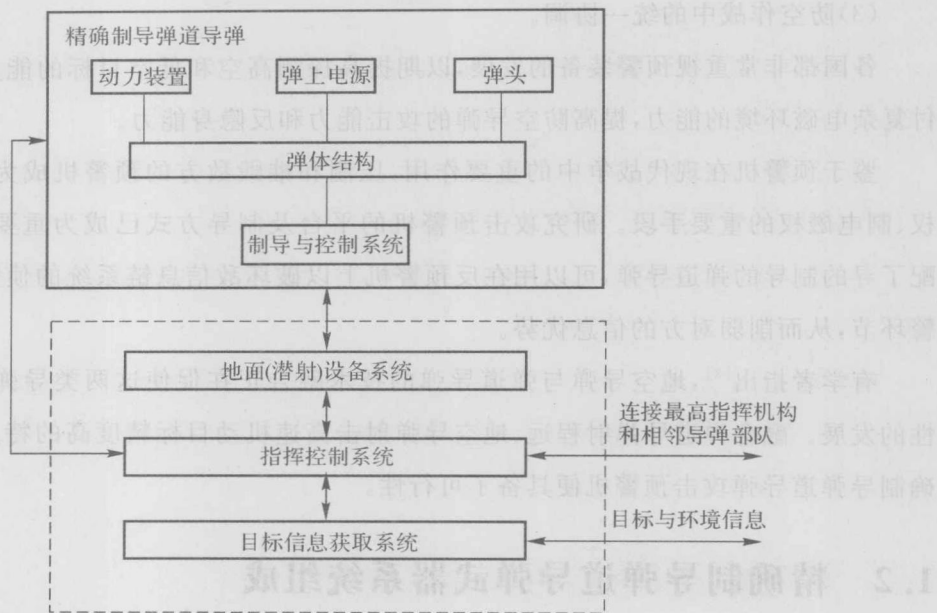


图 1.1 精确制导弹道导弹武器系统基本组成框图

2. 弹体结构

弹体结构是指导弹的各个受力和支撑构建。固体导弹的弹体结构一般包括仪器舱、级间段和尾段。对于装有多弹头的弹道导弹,一般在头部有整流罩,其作用是在大气层内飞行时保护有效载荷,承受气动载荷和热流,并使导弹保持良好的气动外形。

3. 动力装置

动力装置主要指火箭发动机,其推进剂有固体和液体两种,目前使用较多的是固体火箭发动机。近程弹道导弹多用单级发动机,中远程和洲际弹道导弹采用多级火箭发动机。发动机上装有柔性摆动喷管和推力矢量控制系统,在制导与控制系统控

制下工作。

4. 制导与控制系统

制导与控制系统是引导导弹克服各种干扰,按一定规律自动飞向目标的整套设备,包括制导系统、稳定系统等。制导系统由测量装置和制导计算装置组成,其功能是测量导弹状态参数或与目标相对运动参数,按预定规律加以计算处理,形成制导指令,通过导弹稳定系统控制导弹,沿预定弹道稳定飞行,直到命中目标。精确制导弹道导弹制导系统可采用 GPS/惯导复合制导或自寻的制导。

1.2.2 地面(潜射)设备系统

弹道导弹武器系统的地面设备系统包括用于导弹储存、运输、测试和发射等的地面设备和后勤保障设备。

战略弹道导弹武器系统的地面(潜射)设备系统根据发射平台不同可细分为地下井发射阵地、陆地机动发射阵地、潜射弹道导弹设备系统。战术弹道导弹武器系统多为地面机动型发射系统,能作纵深机动,快速展开,通常配置有运输、起竖发射(三用车,试验设备车和弹体装载车等。有的系统已由一辆自行式多功能车完成运输、检测、发射等任务,实现了武器系统指挥、控制、瞄准和发射自动化。

1.2.3 目标信息获取系统

该系统包括综合利用侦察卫星、测地卫星等手段获取的目标信息,汇总其他军事、经济、情报成果,最后确定欲打击目标的准确坐标,装定导弹的运动参数值(高度、速度、倾角等)和飞行中导弹的运作程序(包括采用的各种突防措施)。

1.2.4 指挥控制系统

该系统连接包括最高军事指挥在内的相关指挥机构、相邻导弹部队等,主要功能为作战指挥、辅助决策和效能分析。

1.3 精确制导弹道导弹制导控制关键技术

弹道导弹欲在复杂战场环境下实现“外科手术”式的精确打击,须解决如下关键

技术问题。

1.3.1 复合制导技术

惯性制导的制导误差随飞行时间和射程的增加而积累,且与发射点的位置和方位误差有关,采用复合制导方式对惯导误差进行修正以弥补单纯惯导的不足是进一步提高导弹命中精度的有效途径。

采用惯性+星光制导、惯性+GPS+星光制导、惯性+图像匹配制导、惯性+GPS+图像匹配制导以及智能制导技术将能大大提高导弹的命中精度。惯性+星光制导复合制导是一种几乎完全自主的制导方式,美国和俄罗斯在战略导弹上使用了该技术,我们应该加大该技术的研究力度。

1.3.2 寻的末制导技术

根据不同的打击目标选择不同的寻的末制导技术——如主/被动雷达末制导、毫米波雷达末制导、红外成像末制导、可见光末制导以及上述末制导的双模和多模复合等,将有助于提高导弹的制导精度和抗干扰能力。

弹道导弹寻的末制导的实现需要与高精度惯性制导或者其他合适的中制导相结合,如被动雷达中制导等。

1.3.3 自动目标识别技术

自动目标识别技术是中制导技术、末制导技术的核心,是精确制导导弹实现发射后不管的基础。无论是雷达目标的自动识别、红外图像自动识别、可见光图像自动识别、SAR 雷达图像自动识别,还是其他谱段的目标自动识别技术都要给予足够的重视。特别是红外图像自动识别技术更需要重点发展,因为红外成像制导有许多特点是其他末制导技术所没有的,如灵敏度高、抗干扰能力强、适应性强、打击目标种类多等。

1.3.4 多传感器信息融合技术

未来战争仅靠单一传感器获取信息是远远不够的,必须运用多传感器提供观测数据,实时进行目标发现、优化综合处理,来获取状态估计、目标属性、行为意识、态势

评估、威胁分析和辅助决策等作战信息。单模导引头有其固有的弱点,而多模导引头可以进行优势互补,获得单模导引头无法获得的优势。这就需要研究多传感器信息融合技术,研究其理论、模型、算法及应用,进一步提高弹道导弹命中精度和抗干扰性能。

1.3.5 弹道导弹突防技术

弹道导弹突防技术是弹道导弹能够使用并获得高命中精度的保障。如果没有高生存能力,再高的命中精度也是徒劳无功的。要对抗各种反导系统、保证弹道导弹有效作战性能,需要研究其本身的雷达隐身、红外隐身以及全程突防技术,以多弹头技术、机动变轨技术、抗核加固技术、抗激光技术等为基础的反拦截突防技术,发展以反卫星技术、反雷达技术等为基础的体系对抗突防技术,同时还需要发展导弹发射阵地的隐身技术,以提高弹道导弹的生存能力。

1.3.6 超高速多种类导引头技术

超高速多种类导引头及其应用技术是地地弹道导弹精确打击技术的基础。宽带被动雷达导引头可用于攻击敌方配有雷达系统的目标;毫米波导引头可用于攻击敌方几乎所有的金属目标;红外成像导引头可用于攻击任何具有明显的红外辐射特性的目标;还有合成孔径雷达成像导引头、电视导引头等。上述导引头的两种或多种复合可以获得综合性能。但是要使这些导引头能够在弹道导弹上应用,还必须研究各类导引头的应用技术。

1.4 精确制导弹道导弹未来发展趋势

在现代战争中,弹道导弹是以高精度攻击所选定的敌方目标并在受到攻击时进行有效反击的一种重要武器。弹道导弹的攻防对抗在未来高技术局部战争中将不可避免,因此,高精度、高可靠性、快速发射、射程远、突防能力强是现代弹道导弹应该具备的特点。为此,制导技术的发展也必须满足高命中概率、自主制导、强抗干扰、全天候、成本低的要求。