

反临近空间高速机动目标策略研究

刘晓慧, 聂万胜

(装备学院, 北京 101416)

摘要: 临近空间高速机动目标作为争夺空间战略优势的新型作战领域的武器装备, 在世界军事斗争中发挥着重要作用; 为应对来自临近空间的威胁, 分析了高速机动目标特性, 总结了各种反临近空间策略的研究现状, 提出了一种使用高超声速再入飞行器进行拦截的反临近空间高速机动目标策略, 分析该策略的优势, 并详细论述了该策略中探测、再入和制导控制等关键技术, 分析了其技术可行性与难点。

关键词: 空间防御; 反临近空间; 高超声速; 机动目标; 再入飞行器

本文引用格式: 刘晓慧, 聂万胜. 反临近空间高速机动目标策略研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017(1): 75-78.

Citation format: LIU Xiao-hui, NIE Wan-sheng. Strategy for Interception of Near Space High-Speed Maneuvering Target[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(1): 75-78.

中图分类号: TJ765; E926

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2017)01-0075-04

Strategy for Interception of Near Space High-Speed Maneuvering Target

LIU Xiao-hui, NIE Wan-sheng

(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Near space and high speed maneuvering target are new operation field and new weaponry equipment of the space attack-defense confrontation in the future, playing an important role in the military struggle in the world. To deal with the threat of near space, the characteristics of the high-speed maneuvering target were analyzed, and the research status of other anti-near-space strategies was summarized, and a strategy for its interception using the hypersonic reentry vehicle was provided. The advantages of the strategy were analyzed, and the key technologies, such as detection, reentry, guidance and control were discussed in detail, and the feasibilities and difficulties of this strategy were analyzed.

Key words: space defense; anti-near-space; hypersonic; maneuvering target; maneuvering target

临近空间以其特殊优势逐渐成为空间力量竞争的焦点, 近年来, 以美、俄为代表的世界军事强国已先后投入巨资用于有关临近空间高超声速飞行器的研究^[1], 并开展了技术方案的相关论证试验, 争取尽快占领这一战略制高点, 这更加剧了来自空天的威胁。因此, 发展临近空间高速机动目标拦截系统有着重要意义。目前, 针对临近空间高速机动目标的拦截方式, 主要包括前置射击导弹拦截、空射高超声速导弹拦截以及使用激光武器或微波武器拦截等方式^[1]。本文通过分析临近空间高速机动目标特性和现有反临近空间策略, 提出一种使用高超声速再入飞行器进行拦截的反临近空间

高速机动目标策略, 与其他拦截方式相比具有“由上打下”、“发现即拦截”和“跟踪打击”的一体化优势。并详细论述了该策略中的综合探测技术、再入飞行器技术和制导控制技术等关键技术, 分析了其可行性和面临的问题与难点, 对高速机动目标的拦截和临近空间的防御具有重要意义。

1 临近空间概念及其高速机动目标特性

1.1 临近空间概念

临近空间, 通常定义为距地面 20~100 km 的空域, 处于

收稿日期: 2016-08-23; 修回日期: 2016-09-30

作者简介: 刘晓慧(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事高超声速飞行器总体技术研究。

传统航空器活动空域的上限与卫星等航天器运行空间的下限之间的过渡空域^[2],因此部署在临近空间的军事装备,既可以向下攻击航空器和地面目标,又可以向上威胁到航天器,还可以进行通信侦察、快速运输和发射运载等,是国家安全体系中的一个重要环节,对抢占临近空间制高点具有重要的战略意义。

1.2 临近空间高速机动目标特性分析

临近空间高速机动目标,主要是指以高马赫数和强机动性在临近空间(集中在30~60 km高度范围内)做跳跃滑翔或巡航飞行的高超声速飞行器^[5]。其航速快,马赫数通常高于5;响应迅速,机动能力强,法向过载可达2~4倍的当地重力加速度^[1];航程远,打击范围广,可以在1~2 h内攻击全球任何范围^[3];打击动能大、精度高,能够精确打击任何深层坚固目标,在特定条件下对于混凝土的侵彻深度可达18 m,因而适合攻击地面加固目标、深入地下的指挥中心和工事等敌方坚固目标^[3]。

2 反临近空间策略的研究现状

2.1 探测手段的研究现状

对于临近空间高速机动目标的探测,目前的研究中主要有以下几种手段:

一是借助现有的防空预警网络,依靠预警机和地面雷达组网进行早期探测^[4]。但是由于雷达的截获距离有限、预警时间极短,而目标飞行速度极快,相对于雷达的视角速度较大,雷达需要较长的时间积累目标信号进行识别、解算,因此只能进行被动防御。

二是使用针对于弹道导弹的地面或舰载大型相控阵预警雷达,其功率大、分辨率高、作用距离远,既可以探测弹道导弹弹头这种小目标,也能发现高超声速飞行器目标^[4]。但是其机动能力有限,加上地球曲率的遮挡作用,目标可以凭借其优越的机动性能选择雷达监视盲区进入。

三是使用在弹道导弹防御系统中已经实用化的红外预警手段,利用目标的红外辐射特征,既可以发现发射的弹道导弹,也能发现巡航飞行的高超声速目标^[5]。其不足之处,就是无法提供目标精确的三维坐标。

总的来说,由于临近空间目标的高超声速和强机动性特点,存在一定的探测难度,应综合利用多种探测手段为拦截系统提供可靠的预警信息。

2.2 拦截方式的研究现状

传统防空导弹由于射高较低且速度也低于临近空间目标速度,无法实现追踪拦截;反导导弹虽然速度高射程远,但对于弹道较弯曲的高速机动目标,阻力较大、过载加大,无法达到足够的末端速度和理想的射程。借鉴防空反导的技术途径,出现了多种拦截方式,其中比较有代表性的是前置射击和空射反导两种拦截方式。

前置射击拦截,是将拦截导弹置于目标预测飞行弹道的前方,对目标进行迎击拦截,这样导弹飞行速度可以低于目标速度^[6]。由于目标可以轻易进行机动,而要求的前置区会

随之发生剧烈变化,且迎击相对速度极大,容易导致较大的误差。

空射反导拦截,是通过载机将高超声速导弹、激光武器或微波武器运送到空中拦截来袭目标,具有较大的机动范围^[7]。载机火控雷达必须足够强劲,才能在数百乃至上千千米的距离截获来袭目标。

3 再入拦截的反临近空间策略

3.1 总体策略及其优势

通过对临近空间目标特性和现有反临近空间策略的分析,本文提出了基于高超声速再入飞行器的反临近空间高速机动目标的策略:

采用红外探测系统对临近空间进行大范围实时连续的快速扫描,同时配合使用空中和地面雷达探测系统,当锁定高速机动目标后,快速反馈给指挥中心,拦截系统进入预警状态,对目标进行连续跟踪,预测弹道轨迹。收到作战指令的高超声速再入飞行器,凭借综合探测系统提供的引导数据和高精确的复合制导控制技术以及自身良好的机动性能,从再入段开始就对目标进行同射向地跟踪飞行。由于目标在滑翔过程中飞行时间较长、速度稳定在2 000~3 000 m/s、高度维持在20~40 km,拦截窗口较大^[7],因此可以在滑翔段与目标保持较小的相对速度,寻找最佳时机最后直接攻击目标或分离投放动能载荷进行拦截。

与其他反临近空间策略相比,使用高超声速再入飞行器拦截临近空间高速机动目标的主要特点及优势有:以红外探测系统为主,空地雷达相配合,由上向下预警监测,探测范围广、探测速度快、跟踪精确;高超声速再入飞行器响应迅速,一般不到10 min即可击中1 000 km外的目标^[7],可以在短时间内实现覆盖全球的对临攻击;对目标的同射向跟踪从再入段就开始,增大了拦截末制导的作用距离,提高了拦截精度;在临近空间空域飞行,高度自主,不受领空、领土的限制^[8];与目标保持较小的相对速度,并直至通过目标上空避开或外层烧毁后才会漏出动能载荷,具有良好的隐蔽性。该策略大大降低了防御临近空间高速机动目标的难度,实现“由上打下”、“发现即拦截”和“跟踪打击”的探测打击一体化效果。

3.2 关键技术分析

3.2.1 综合探测技术及其可行性分析

拦截临近空间高速机动目标,前提就是探测系统必须尽早发现目标,为拦截系统争取时间。由于目标以高马赫数在高层大气中飞行时,表面与空气剧烈摩擦产生大量热,使其表面温度随马赫数的增加急剧升高至1 600~2 400 °C,释放出强烈的红外辐射,在海陆空天背景下红外辐射特征显著(图1)^[3]。因此,可以首先采用红外探测系统,搭载先进高灵敏的可见光学电视像机、红外扫描探测器和凝视探测器等探测设备,对目标进行早期预警^[5]。平时工作时使用扫描探测器对地球背景进行快速阵列扫描,探测到异常信号后,锁定目标并调用凝视探测器放大分辨率,继续进行跟踪,预测

出目标的弹道轨迹和攻击落点位置,直接向再入飞行器提供目标导引数据^[9],尤其针对飞行中段和再入段的目标。在目标脱离红外探测范围后,可以配合使用空中预警雷达接力和地面相控阵雷达组网进行补盲,形成全方位立体网络化探测。对于临近空间高速机动目标要想“早看见”“早打到”,需要综合利用各种探测手段,为拦截系统提供更加可靠灵活的预警信息。

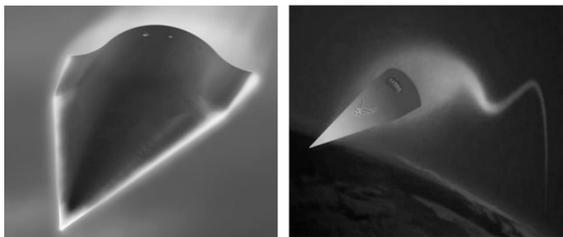


图1 高超声速目标表面气动加热现象

在红外探测技术的应用上,美国和俄罗斯已拥有实用型的红外预警卫星,其中较有代表性的是美国的天基红外系统(Space-Based Infrared System, SBIRS)预警卫星。据报道该系统的高轨部分已投入使用并成功在战术弹道导弹上升到15~18 km时探测到其尾焰的高分辨率红外图像^[6]。另外该系统在建的低轨部分完成后能够在15 min内将南北纬65°范围内的任何目标图像直接传给指挥中心^[10]。

3.2.2 再入飞行器技术及其可行性分析

虽然传统的弹道式再入方式也能实现远程高速打击,但是其机动能力差,无法适用于临近空间高速机动目标的拦截。随着航天科技的不断进步,出现了采取非弹道式再入的高超声速飞行器,其气动外形结构特殊,一般采取尖前缘和大后掠的“乘波体”构型^[11],具有高升阻比特性,再入后可以通过调整自身倾侧角进行较长时间的无动力滑翔飞行,能够实现大范围机动飞行,其外壳还可以用来隐蔽携带的动能载荷,直到指定位置才释放载荷,射程远且具有很好的突防能力,适用于全球范围的远程高速精确打击^[12]。

在众多的高超声速再入飞行器概念中,以美国提出的通用航空飞行器(Common Aero Vehicle, CAV)概念最具代表性。2011年8月美国成功进行了CAV验证机HTV-2的试飞试验,如图2所示,米诺陶IV运载火箭将HTV-2发射升空,与运载火箭分离后进入再入飞行段,成功拉起并进入了滑翔段,实现了在稳定控制下以马赫数20的速度飞行^[13],为再入飞行器技术提供了重要的试验数据。

3.2.3 制导控制技术及其可行性分析

探测系统一旦截获高速机动目标,即可利用拦截系统进行拦截,高精度制导控制技术的实现是影响拦截临近空间高速机动目标可行性的关键技术。如图3的制导控制流程所示,首先需要在飞行器计算机内生成相应的参考轨迹坐标,再实时解算探测系统获得的目标数据并与参考轨迹进行比较求出误差,根据这一误差进行实时修正,满足热流密度、机动过载和动压的约束条件^[14-15],为了与目标保持较小的相对速度,需要对飞行器的速度进行约束,为了实现以最佳碰

撞角击中目标,还需增加终端状态约束,最终转换为控制指令输入到计算机中,按照规定的导引规律对飞行器的姿态进行复合控制,改变升力方向以控制飞行轨迹,实现对目标的拦截^[16-17]。

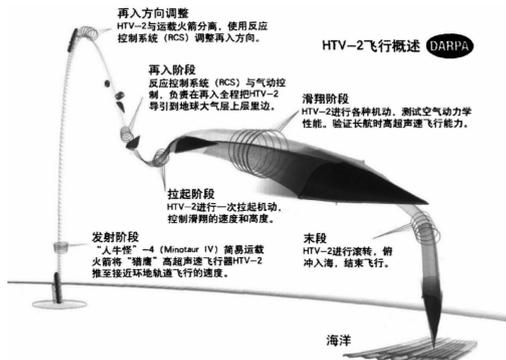


图2 CAV技术验证机HTV-2飞行试验示意图

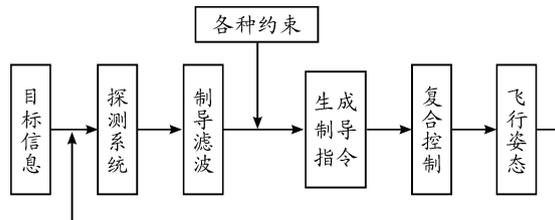


图3 制导控制流程

有关制导律的理论研究在20世纪八九十年代就已经取得了很大的进展,比例导引律作为经典的制导律之一,对于弱机动目标的拦截具有良好的制导性能,在弹道式导弹中得到广泛工程实际应用。随着临近空间高速机动目标的出现,比例导引拦截的终端视线角速率将不再稳定,脱靶量较大^[18-19]。于是为改善其缺陷,各种新型的制导律相继出现:引入优化性能指标的最优制导律,可以更好地控制脱靶量为零^[20];增加目标加速度补偿项的扩展比例导引律,可以应对常值机动的目标^[21];添加时变偏置项的偏置比例导引律,可以有效消除视线方向的偏差以约束碰撞角,实现最佳角度命中目标^[22-24];引入变结构理论或编写模糊原则的非线性导引律,增强了抗不确定性和抗外界干扰能力^[25-26]。这些都为拦截高速机动目标提供了行之有效的理论研究基础。

3.3 面临的问题及难点分析

对于红外探测技术,目前面临的主要难点是,红外探测器的灵敏性极高,会受到激光束的干扰和红外诱饵的误导。

对于制导控制技术,一方面由于高超声速条件下极小的制导误差就可能造成极大的脱靶量,因而需要极高的制导精度预测目标轨迹;另一方面在高速复杂大气环境下存在直接力与拦截器流场互相干扰,需要使用火箭控制和气动力控制相结合的复合控制技术满足需要的过载能力,提供快速响应^[1]。这都给制导控制技术的实现带来一定难度。

4 结论

临近空间高超声速飞行器作为新型军事装备,在军事斗争和空间防御中具有至关重要的作用。以美国为代表的一些军事强国积极研发临近空间高超声速飞行器,对各国空间安全形成新的威胁,因此探索反临近空间高速机动目标策略,建立临近空间防御系统,具有重要的意义。

本文分析了临近空间高速机动目标的特性,总结了现有反临近空间策略中探测手段和拦截方式的研究成果,分析了各自的优势和局限性,提出了一种使用高超声速再入飞行器进行拦截的反临近空间策略,分析了该策略的优势,详细论述了该策略中探测、再入、制导控制等关键技术的可行性与面临的难点,为临近空间高速机动目标防御技术的发展提供了一种思路。

参考文献:

[1] 许惠丽,李军显. 临近空间高超声速飞行器防御技术研究[J]. 飞航导弹,2014(5):43-47.

[2] 赵杰,王君,张大元,等. 反临近空间高超声速飞行器中末交接视角研究[J]. 飞行力学,2015,33(3):253-256.

[3] 白宏,张廷政,周亚红. 抗击临近空间高超声速飞行器对策研究[J]. 现代防御技术,2014,4(6):22-26.

[4] 刘彬,李为民,别晓峰,等. 高超声速巡航导弹目标的拦截策略探析[J]. 飞航导弹,2014(1):22-27.

[5] 梁海燕. 反临近空间高超声速飞行器导引头及关键技术分析[J]. 飞航导弹,2013(3):61-63.

[6] 王还乡,李为民,上官强,等. 高超声速飞行器巡航段拦截作战需求分析[J]. 战术导弹技术,2012(2):36-40.

[7] 刘旭,李为民,任晓虹. 高超声速巡航导弹及其拦截策略研究[J]. 飞航导弹,2011(4):47-50.

[8] 张晓岚,张云,王海涛,等. 临近空间高超声速目标及其防御[J]. 上海航天,2013,30(1):48-52.

[9] 张乐伟,陈桂明,薛冬林. 导弹预警卫星概述[J]. 战术导弹技术,2011(4):117-121.

[10] 聂万胜,冯必鸣. 高速再入精确打击飞行器及其发展趋势[J]. 装备学院学报,2013,24(4):1-4.

[11] 甄华萍,蒋崇文. 高超声速技术验证飞行器 HTV-2 综述[J]. 飞航导弹,2013(6):7-13.

[12] 祝彬,陈莹. 基于天基信息系统的远程精确打击(下)[J]. 中国航天,2007(4):35-40.

[13] 陈洪波,杨涤. 升力式再入飞行器离轨制动研究[J]. 飞行力学,2006,24(2):35-39.

[14] 冯必鸣,聂万胜,李柯. 再入飞行器多约束预测-修正末导引律研究[J]. 弹道学报,2013,25(1):5-9.

[15] DARBY C L, HAGER W W, RAO A V. A Preliminary Analysis of a Variable-Order Approach to Solving Optimal Control Problems Using Pseudo Spectral Method [C]// AIAA. Astrodynamics Specialist Conference. Toronto, Canada; AIAA, 2010:2010-8272.

[16] 张海林,周林,张琳,等. 临近空间高超声速导弹弹道特性分析[J]. 飞航导弹,2015(3):18-21.

[17] 张大元,雷虎民,邵雷,等. 临近空间高超声速目标拦截弹弹道规划[J]. 国防科技大学学报,2015,37(3):91-96.

[18] 张建伟,黄树彩,韩朝超. 基于 Matlab 的比例导引弹道仿真分析[J]. 战术导弹技术,2009(3):60-64.

[19] 黄烽,王坤,于卫刚. 比例导引率三维模型实现方法[J]. 电子信息靶场,2013,23(4):36-39.

[20] 韦宏强,阚虎,吴红权,等. 地空导弹增量式比例导引弹道仿真研究[J]. 兵器试验,2014(3):14-18.

[21] 任鹏杰,侯明善,杨文学. 模糊扩展比例导引研究[J]. 火箭与制导学报,2010,30(3):5-7.

[22] 马冬柏,张颀. 基于偏置比例导引的模型研究[J]. 战术导弹技术,2015(3):90-94.

[23] 闫梁,赵继广,沈怀荣,等. 带碰撞角约束的三维联合偏置比例制导律设计[J]. 航空学报,2014,35(7):1999-2009.

[24] 周鲁,宋建梅,黄岚. 带落角约束的圆弧比例导引律和偏置比例导引律的研究[J]. 导航定位与授时,2014,1(3):11-17.

[25] 王华吉,简金蕾,雷虎民,等. 拦截机动目标的模糊变结构导引律[J]. 电光与控制,2014,21(10):42-46.

[26] 杨昆,吴庆宪,姜长生. 比例导引原理的三维模糊导引律设计[J]. 电光与控制,2007,14(6):48-52.

[27] 董鹏曙,向龙,谢幼才,等. 高速机动目标信号多普勒频移补偿方法[J]. 探测与控制学报,2016(3):66-70.

(责任编辑 周江川)