

高超声速武器防御装备体系发展 及顶层思考^{*}

刘思彤^{*,1,2} 张占月³ 刘 达^{1,4} 杨 帅⁵

(1. 航天工程大学研究生院,北京 101416;2. 空军西安飞行学院,西安 710306;

3. 航天工程大学太空安全研究中心,北京 101416;4. 中国人民解放军 96793 部队,

德令哈 817000;5. 中国人民解放军 78102 部队,成都 610000)

摘 要:高超声速武器具有机动性强、反应速度快、覆盖范围广、突防能力强等独特优势,其在军事应用领域所展现出的惊人作战效能,使其逐渐成为强国空天竞争新的战略制高点和大国战略博弈的聚焦点。为追求空天安全、保持战略平衡,各国竞相开展高超防御体系建设研究,尤其是装备体系建设研究。本文通过广泛搜集资料,梳理总结了美国和俄罗斯等军事强国在高超声速武器防御装备体系建设方面的情况与发展动向,其中,美高超防御装备体系架构逐渐明朗,正加快推进支撑装备能力的高超防御技术发展;俄持续推进新一代空天防御系统试验与部署,反高超武器系统取得重大进展;在此基础上,通过分析和研判当前形势和威胁,从构建全域立体覆盖的预警探测网、全流程完善多样的拦截打击网和全要素互联高效的指挥通信网等三个方面提出了对高超声速武器防御装备体系建设的建议和顶层思考。

关键词:高超声速武器;防御作战;装备体系;思考建议

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2022.02.002

Development and Top-level Thinking of Hypersonic Weapon Defense Equipment System^{*}

LIU Sitong^{*,1,2} ZHANG Zhanyue³ LIU Da^{1,4} YANG Shuai⁵

(1. Graduate School of Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Xi'an Flight Academy of Air Force, Xi'an 710306, China;3. Space Security

Research Center of Space Engineering University, Beijing 101416, China;

4. Unit 96793 of PLA, Delingha 817000, China;5. Unit 78102 of PLA, Chengdu 610000, China)

Abstract: Hypersonic weapon has the unique advantages of strong mobility, fast response speed, wide coverage and strong penetration ability. Its amazing combat effectiveness in the field of military application makes it gradually become a new strategic commanding point for the air and space competition of powerful countries and the focus of the strategic game of powerful countries. In order to pursue space safety and maintain strategic balance, countries are competing to carry out research on the construction of superb defense system, especially the construction of equipment system. Through extensive data collection, the situation and development trend of hypersonic weapon defense equipment system construction in the

^{*} 国家社会科学基金(2019-SKJJ-C-030),全军军事类研究生资助课题(JY2019B155)

^{**} E-mail: liusitong1114@163.com; Tel: 18510150909

United States, Russia and other military powers are summarized. The hypersonic defense equipment system structure of the US is gradually clear, and it is accelerating the development of hypersonic defense technologies that support equipment capabilities. Russia is promoting the test and deployment of a new generation of aerospace defense systems, and has made significant progress in anti-hypersonic weapon systems. On this basis, through the analysis of the current situation and threats, suggestions and top-level thoughts on the construction of hypersonic weapon defense equipment system are putting forward from three aspects: building an early warning and detection network with three-dimensional coverage in the whole area, a various interception and strike network in the whole process, and a all-factor interconnection and efficient command and communication network.

Keywords: Hypersonic Weapons; Defense Operations; Equipment System; Suggestions

高超声速武器凭借其在军事应用领域所展现出的惊人作战效能,被认为是未来作战领域中的中坚力量,给现有防御装备体系带来很大挑战。相比弹道导弹,高超武器的飞行弹道跨越从低空、高空、临空直至大气层外的巨大空域,且具备机动能力,现有预警系统难以连续探测和稳定跟踪;高超武器飞行速度快,极大压缩了作战时间,对指挥控制系统提出了快速反应和快速决策要求。此外,反导拦截系统的拦截高度在临近空间存在空白,拦截速度也无法满足高超防御要求,拦截能力有待进一步提高。随着高超声速武器的相继服役和迅速崛起,以美俄为代表的军事强国加紧对高超声速武器防御领域的研究,推动和促进了防御装备和技术的不断发展,加速了高超声速武器防御装备体系的论证和建设^[1]。2017 年美国开始着手开发高超声速武器防御体系顶层架构^[2],2019 年发布新版《导弹防御评估》报告^[3]全面开展整体工作部署,积极推进高超声速武器防御系统方案探索、装备和关键技术研发。根据近几年美国公开资料,结合 2020 年美国导弹防御局 (Missile Defense Agency, MDA) 公布的新导弹防御体系架构^[4],其高超防御装备体系架构逐渐明朗。俄罗斯在占据高超声速武器全球领先的强大战略优势的情况下,高超防御领域也齐头并进,持续推进新一代空天防御系统试验与部署,反高超武器系统取得重大进展,加速建设可有效抵御高

超武器打击的防御体系,但目前还没有提出明确的防御装备体系架构。本文从美俄防御装备体系研究与发展动向的梳理分析入手,归纳了美俄高超防御装备发展的共性思路,提出了对我国高超声速武器防御装备体系建设的几点思考,为高超攻防对抗发展提供理论参考。

1 美俄高超声速武器防御装备体系建设及发展趋势分析

1.1 美国

美计划充分依托现有一体化弹道导弹防御体系的装备要素,以改进升级与新研相结合的方式加速构建美高超声速武器装备防御体系^[5],并将其融入到弹道导弹防御体系 (Ballistic Missile Defence System, BMDS) 的发展建设中,形成一体化防御作战能力。目前,美国正从多个维度推动高超声速防御装备发展,构建天基、空基、地基一体化高超声速防御装备体系。

1.1.1 预警探测系统

美国认为,对高超声速武器的探测与跟踪是实现有效防御的前提和基础。因此,将形成针对高超声速武器的预警探测与跟踪识别能力作为防御装备体系构建的第一步,尤其是将提高天基预警探测能力作为优先发展目标。

1) 天基预警探测系统

美国高超声速武器防御天基预警探测系统信

息详见表 1。“高超声速与弹道导弹跟踪传感器”(Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor, HBTSS)卫星可以与搭载大面阵多波段红外阵焦平面探测器^[6]的下一代“持续过顶红外”(Overhead Persistent Infrared, OPIR)系统共同覆盖高超武器的主动段,增强早期预警能力;HBTSS 卫星与太空发展局(Space Development Agency, SDA)开发的国防太空架构(National Defense Space Architecture, NDSA)跟踪层的宽视场(Wide Field of View, WFOV)卫星一起协同工作,WFOV 卫星对目标进行初步探测和追踪,确认威胁后,再把监控权转交给 HBTSS 卫星,由后者为拦截弹提供实时信息和“火控级”数据,实现对高超声速目标的全程探测跟踪和拦截引导。此外,“天基杀伤评估”(Space-based Kill Assessment, SKA)系统^[7]可以用于拦截效果评估,它使用被动辐射传

感器载荷,需要根据其他系统提供的预拦截位置信息进行提前定位,通过观察拦截撞击时“云”扩散的速率、强度以及光谱随时间的变化差异,进而实现杀伤效果评估,辅助二次拦截决策。

2) 空基预警探测系统

美计划将 MQ-9“死神”无人机^[8]进行改造,并为 MQ-9 等平台研发更为先进的导弹探测跟踪传感器,实现对中高空目标的被动探测和主动跟踪。无人机可长时间滞空、反应速度快、机动性能好、可实现应急部署、且人员生存能力较强,是探测和跟踪高超目标的有力补充,可提升美军导弹防御系统的远程发射作战能力。美军最初计划利用 MQ-9 搭载光电/红外传感器,对弹道导弹进行预警探测,发现、识别和跟踪敌方刚刚发射的弹道导弹,随后为前出部署的“宙斯盾”舰提供目标指示和初步要素,实现尽早拦截^[9]。由于装备了雷

表 1 美国高超声速武器防御天基预警探测系统

Tab.1 U. S. Space-based Early Warning and Detection System for Hypersonic Weapon Defense

项目名称	项目介绍	功能职责	牵头机构	经费(合同)支持	备注
OPIR 系统	初期系统包括 5 颗搭载大面阵多波段红外阵焦平面探测器(大面阵红外相机)的卫星,其中 3 颗 GEO,2 颗 HEO	探测导弹和火箭发射并提供早期预警。通过红外手段监控火箭发动机工作时产生的火焰,在导弹发射的主动段进行预警	MDA	洛克希德·马丁公司 2018 年获得了 29 亿美元的 GEO 卫星设计合同,在 2021 年又获得了 49 亿美元的变更合同。2020 年 5 月 18 日,诺斯罗普·格鲁曼公司获得了 29 亿美元的资金,制造 HEO 卫星	首颗 GEO 卫星预计 2025 年交付,计划 2029 年实现系统运行
NDSA 跟踪层卫星星座	由 70 颗广角/宽视场(WFOV)卫星组成的大型低轨导弹预警网络星座	探测、跟踪和识别 ^[12] 高超声速武器和弹道导弹等先进武器威胁,并为拦截打击系统提供探测、跟踪和火控信息	SDA	2020 年 10 月 5 日,SDA 分别授予 SpaceX1.491 亿美元和 L3 哈里斯公司 1.936 亿美元合同用于建造 8 颗低轨卫星以及广角红外导弹跟踪传感器(WFOV)载荷	0 阶段 8 颗跟踪层卫星计划 2022 财年末完成部署,1 和 2 阶段分别预计 2024 财年和 2026 财年部署
HBTSS	由约 200 个搭载中视场(MFOV)、高精度凝视型红外传感器组成,搭载在低地球轨道卫星星座上的预警探测网络	探测与跟踪高超声速威胁和弹道导弹等先进武器,为导弹防御系统提供低延迟高精度的关键数据	MDA	2019 年 10 月 29 日,MDA 授予诺格、Leidos、L3 哈里斯公司和雷声公司 4 家公司为期 12 个月、价值 2000 万美元的科研合同,用于完成 HBTSS 星座的载荷原型机方案设计等研究工作。2021 年初,MDA 分别授予格鲁曼公司 1.55 亿和 L3 哈里斯公司 1.33 亿美元的合同用于研制原型卫星	计划 2022 财年完成首颗传感器发射任务,2025 年后实现部署运行
SKA 系统	由 22 个搭载在商业卫星上的 SKA 传感器载荷组成	对高超声速和弹道导弹进行杀伤评估	MDA	2017 年,搭载 SKA 系统的第二代“铱星”(Iridium-Next)陆续发射。于 2019 年 3 月正式运行	预计 2022 年具备完全作战能力

神公司“多光谱瞄准传感器-B”(Multispectral Targeting Sensor-B, MTS-B),使得 MQ-9 长航时无人机具备高分辨能力、多目标跟踪以及高定位精度能力。2020 年 11 月,美军成功完成了一次 FTX-20 反导试验,试验中携带 MTS-B 型多光谱瞄准系统的一架无人机作为识别传感器,对目标成功进行了跟踪和导引。

3) 地基预警探测系统

(1) 改进 AN/TPY-2 雷达

AN/TPY-2 是 X 波段固态有源相控阵雷达,探测距离远、分辨率高,可用大型运输机空运、具备公路机动能力、战术战略机动性好。AN/TPY-2 雷达探测和跟踪数据可由指挥控制、作战管理与通信(Command, Control, Battle Management and Communications, C2BMC)系统传递给 BMDS。根据任务需要,AN/TPY-2 雷达具有两种部署模式:前沿部署模式(Forward-Based Mode, FBM)和末端部署模式(Terminal Mode, TM)。在 FBM 下,充当导弹早期预警雷达,可以对刚发射的导弹目标进行探测、追踪、威胁分类和导弹的落点估算,是美国陆基中段反导的重要一环。在 TM 下,作为末端高空区域防御(Terminal High Altitude Area Defense, THAAD)系统的火控雷达,可与系统的发射车、拦截弹、火控和通信单元一同部署,与火控中心和拦截器通信,配合武器系统承担火控雷达的任务,实时引导拦截弹飞行及拦截后毁伤效果评估。AN/TPY-2 能够在两种模式之间切换,耗时不超过 8 小时。当前雷声公司共生产了 12 部 AN/TPY-2 雷达:①前沿部署 5 套,分别位于日本北部三泽基地、日本南部经岬分屯基地、以色列内盖夫凯伦山、土耳其迪亚巴克尔、中央司令部卡塔尔驻地。在日本部署的两部 AN/TPY-2 雷达,用于监视朝鲜的弹道导弹发射;其余三部,用

于中东地区(主要是伊朗)的弹道导弹发射预警。②末端部署 7 套,其中关岛和韩国星州郡各 1 套,美国本土 5 套。通过改进,使 AN/TPY-2 具备对高超声速威胁的探测跟踪能力,为拦截系统提供更充裕的反应时间。

(2) 升级远程识别雷达(Long-range Discrimination Radar, LRDR)

LRDR 是一种大规模运用氮化镓(GaN)器件的陆基固态 S 波段预警雷达,部署于美阿拉斯加州克利尔空军基地。它采用可扩展、模块化、氮化镓的雷达结构单元,能够将探测敏感度提高 100 倍以上,有效探测距离可达到 5000 km;LRDR 阵列大,采用一系列独立的发射器和接收器单元,可以实现运行和维护互不干扰^[10];除此之外,LRDR 的扫描频率也有较大提升,还具备更高的效率和可靠性,满足探测高超声速时敏目标要求。LRDR 作为美国 MDA 分层防御战略的关键传感器,具备极强的探测能力和精确跟踪能力,可全年全天时提供采集、跟踪和识别数据,保护美国本土免受导弹攻击。2020 年 3 月 11 日,美国向阿拉斯加州克里尔空间基地交付部分 LRDR 天线面板^[11],已于 2021 年 12 月初完成初始部署,计划 2023 年 12 月完成软件升级并用于远程识别。升级后,LRDR 能够更准确检测和跟踪来袭的敌方导弹。

1.1.2 指挥通信系统

改进现有的 C2BMC 系统,使其具备应对高超声速武器的指控、管理与通信能力;构建天空地一体化的通信传输网络,为高超声速武器预警、探测、跟踪、拦截等防御各阶段的数据传输、信息通信、作战管理和指挥控制提供可靠、无缝、弹性、低延迟的传输连接保障。

1) 计划发展覆盖陆、海、空、天等作战域的全

域指挥控制能力,在现有 C2BMC 系统螺旋 8.2-5 版本基础上进行改进,依托无缝协同的传感器网络,集成所有传感器的监视、预警、探测、跟踪、目指数据,将传感器与武器平台各要素综合集成、实时互联,实现联合全域指挥和控制;提供循环接战过程中的作战管理功能,具备管理多部雷达的能力及直接获取天基信息的能力,进一步强化全球作战管理能力;设计、研发、集成基于人工智能的导弹防御算法、数据跟踪算法等算法和架构,实现防御系统的优化部署和作战方案的智能规划;开发基于联合战术信息分发系统的高超声速威胁航迹数据转发能力,提高数据分发、传输的能力,提升指挥控制效率^[13],满足应对高超声速威胁对指控、管理与通信的要求。

2)作为“骨干”通信网络,由 300 ~ 500 颗卫星组成的传输层星座,旨在将指挥和控制系统与传感器系统、拦截系统等连接起来,为高超声速武器预警、探测、跟踪、拦截等防御各阶段的数据传输、信息通信、作战管理和指挥控制提供可靠、无缝、弹性、低延迟的传输连接保障。SDA 计划分阶段发展传输层卫星星座,根据合同,第 0 批 (Tranche 0) 传输层卫星即初始传输层卫星共建造 20 颗,计划在 2022 财年部署完成。计划 2024 财年部署第 1 批 (Tranche 1) 共 126 颗,2026 财年部署第 2 批 (Tranche 2)^[14]。

1.1.3 拦截打击系统

1)改进升级现有反导防御系统能力

(1) 增程型萨德 (THAAD-Extended Range, THAAD-ER) 系统

现有 THAAD 拦截弹采用单级助推器,最大速度 2.8 km/s,拦截高度 40 ~ 150 km,最大拦截距离 220 km,可实现对中远程弹道导弹的中段拦截和中短程弹道导弹的末段拦截,与标准-3

(Standard Missile-3, SM-3) 导弹、“爱国者”-3 (Patriot Advanced Capability-3, PAC-3) 系统形成分层拦截能力^[15]。THAAD-ER 系统将采用原有的发射装置与杀伤器,并采用两级火箭设计,其中第一级助推器直径 53 cm,用于获得更大的拦截距离;第二级助推器直径 36.8 cm,用于缩短目标距离,提高燃尽速度,提供更大的碰撞动能。THAAD-ER 系统,拦截距离可拓展至 660 km,拦截高度有望增至 450 km。

(2) 高超声速防御武器系统 (Hypersonic Defense Regional Glide Phase Weapon System, HDWS)项目的部分方案

2018 年 9 月,美导弹防御局公布了 HDWS 项目,授予 8 家单位 21 份方案合同进行概念定义研发;2019 年 9 月,从上述方案中选中 5 份继续进行概念改进研发,其中 3 份方案是基于现有反导拦截系统进行升级改进的且都采用动能拦截,如表 2 所示。

表 2 3 份动能拦截方案
Tab. 2 Kinetic Energy Interception Schemes

序号	承包商	方案名称	项目概况	金额/ 万美元
1	洛马公司	“标枪-高超声速防御武器系统”	基于 THAAD 系统改进,主要用于远程拦截,在滑翔中段实施拦截	450
2	洛马公司	“女武神-高超声速防御末段拦截器”	基于增强型 PAC-3 导弹改进,主要用于近程拦截,在滑翔后段及下压末段实施拦截	440
3	雷神公司	“标准-3 霍克”(SM-3-HAWK)	基于 SM-3 导弹改进的变型系统	440

(3)“标准”-6(SM-6)系列导弹

2020 年 9 月,美导弹防御局发布《未来海基末段拦截弹概念定义》跨部门公告,寻求利用多用途末段拦截弹来击败未来高超声速威胁,以维持可靠的分层防御战略。同时,根据 2021 年 6 月 16 日美导弹防御局公布的高超声速防御作战构

想,SM-6 导弹将作为末段拦截武器应对高超助推滑翔飞行器威胁。SM-6 导弹采用 SM-2 Block 4 导弹弹体、MK104 双推力固体火箭发动机和 MK41 助推器,导引头采用 AIM-120 先进中程空空导弹的主动雷达导引头,射程 370 km,射高 34 km。SM-6 导弹列装在宙斯盾舰上,主要担负宙斯盾舰的防空任务,具有对飞机、低空/超低空巡航导弹的强大拦截能力,并具备反舰和有限的末段反弹道导弹能力。在其基础上又衍生出了 SM-6 Block I 型和 Block IA 型,且两者已经服役。2019 年,海军公布了研发 SM-6 Block IB 的计划。相比 SM-6 IA 导弹,SM-6 IB 导弹继续沿用原有导引头和战斗部,但装配 SM-3 II A 导弹上采用的 533 毫米发动机,预计射程将增加到 560 ~ 800 km,射高也将有大幅提高,飞行速度达到高超声速水平,弥补 SM-3 和现有 SM-6 导弹之间的防御空白,拟用于进行高超声速防御。美海军于 2020 财年预算中首次加入 SM-6 IB 导弹项目,经费为 1.167 亿美元;在 2021 财年预算中,美海军大幅增加了 SM-6 IB 导弹研发经费,经费为 2.32 亿美元,未来 5 年经费增加到了约 5.7 亿美元。根据项目计划,2020 财年进行关键设计评审,2021 财年进行低速试生产,预计 2023 财年达到初始作战能力。

2) 持续推进空基激光武器拦截手段

2016 年 4 月,MDA 提出使用机载激光武器防御中俄高超声速武器,计划投入 2300 万美元,开展二极管泵浦碱金属激光系统(Diode Pumped Alkali Laser Systems, DPALS)和光纤合成激光器(Fiber Compositated Laser, FCL)^[16]两项高能激光武器技术研究,并从中选择一种继续进行助推段拦截激光武器系统研制。2016 年 8 月 26 日,MDA 发布低功率激光反导武器演示系统招标书,

开发搭载在高空长航时无人机上的高能激光反导武器,验证助推段拦截作战概念。诺格公司全球鹰无人机、波音公司魅眼无人机、通用原子公司复仇者无人机等均参与了该项目竞争。搭载激光武器的高空无人机平台飞行高度约 2 万米,远大于目前美国空军研究实验室基于 AC-130 运输机的高能液态激光区域防御系统的飞行高度^[17]。按照计划,低功率激光武器将于 2021 年开展飞行演示、远距离激光光束稳定性和目标驻留时间测试,验证助推段拦截的可行性,但目前没有相关进展消息。

3) 加紧研发新的高超声速防御武器

(1) “滑翔破坏者(Glide Breaker)”项目

2018 年 9 月,DARPA 首次公布了 Glide Breaker 概念图。2020 年 2 月,DARPA 与航空喷气-洛克达因公司签订价值 1960 万美元的 Glide Breaker 推进技术开发合同,研究在高层大气拦截高超声速武器的先进技术。2021 年 5 月 8 日,DARPA 在 Glide Breaker 项目下,启动“推进系统用增材制造铍”小企业创新研究项目,制造适于高温高压工况的铍部件。将新型铍部件用于拦截器的推进系统,能够提升性能,且具备规模效应。

(2) “HDWS”项目的部分方案

波音公司提出“针对高超声速武器的超高速拦截弹”方案,建立在波音公司高超声速武器研究基础之上的,计划利用高超武器来拦截高超目标;雷声公司提出“非动力学高超声速防御概念”,基于高功率微波武器的非动力学方案,采用定向能武器拦截高超目标。

(3) “滑翔段拦截弹”(Glide Phase Interceptor,GPI)项目

2021 年 2 月,美导弹防御局提出 GPI 倡议,

决定直接研发可在滑翔段拦截远程高超声武器的新型拦截弹,加速形成滑翔段反高超声速能力。GPI 是美 MDA 为实现在滑翔段拦截区域性高超声速威胁和防御其他先进武器,计划发展的具备高性能、可承受、可靠的能力的创新性武器技术概念。该项目计划采用动能毁伤方式,具备与“宙斯盾”武器系统(MK-41 垂直发射系统)集成的功能,采用螺旋式的发展战略,为海基武器平台增加新型能力。2021 年 4 月 13 日,美导弹防御局发布“增强高超声速防御”跨部门公告,向业界寻求与海军“宙斯盾”系统兼容的高超声速防御武器建议,标志着 GPI 项目的正式启动;2021 年 11 月 19 日启动 GPI 新招标课题,要求雷声公司、洛马公司和格鲁曼公司等三个投标商于 2022 年 9 月前提出成熟的武器构想方案,从中优选并进入下一阶段。

1.2 俄罗斯

俄总体思路是通用集成^[18],即在原有导弹防御系统的基础上,通过升级和新研提高装备通用性,集成对弹道导弹、巡航导弹、空气动力目标以及高超声速武器等多类目标的预警探测、指挥通信和拦截打击能力,使得单个作战系统可完成不同目标类型、不同层次的防御作战任务。俄罗斯的指挥控制系统根据拦截打击系统类别或武器型号的不同,采用不同的指挥系统或指挥所,这里不做详细分析。

1.2.1 预警探测系统

俄罗斯的预警探测系统由天基导弹预警系统和地基导弹预警系统两部分组成。

1) 天基导弹预警系统

主要依靠俄罗斯正在部署的新一代“穹顶”(Kupol)预警卫星系统^[19]——10 颗“苔原”卫星组成的天基导弹预警卫星系统,其中,6 颗位于大

椭圆闪电(“莫尼亚”)轨道,4 颗位于地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit,GEO)。“苔原”卫星搭载热红外传感器,具备全球范围(重点是北美方向)导弹预警发射的能力,能够探测威胁俄罗斯领土的来袭导弹,确定其主弹道参数;同时,搭载安全应急通信载荷,确保在任何需要情况下向战略导弹部队下达核打击指令。截止至 2021 年 12 月,俄罗斯已发射并部署了 5 颗“穹顶”预警卫星,基本完成了“穹顶”系统的最低能力部署和组网运行工作。这 5 颗在轨的“穹顶”卫星均部署在“莫尼亚”轨道上,轨道倾角为 63.4°,轨道周期 12 小时,远地点在北半球,能长时间在北半球上空执行观测任务,可实现对美国境内洲际弹道导弹部署位置、弹道导弹潜艇在大西洋和太平洋主要巡弋区域的 24 小时连续监视,具备探测北美发射的导弹、威胁俄罗斯领土来袭导弹的能力。后续还将发射 1 颗大椭圆轨道卫星和 4 颗 GEO 卫星完成星座组网和备份,实现全球地理范围覆盖、重点关注地区同时覆盖和卫星故障备份等。

2) 地基导弹预警系统

主要依靠“沃罗涅日”系列战略预警雷达、集装箱超视距雷达和“共振-N”雷达等。

(1)“沃罗涅日”系列战略预警雷达

“沃罗涅日”雷达是俄军陆基战略预警系统的核心成员,由相控阵雷达、超级计算机组、信号分析处理中心组成,有“沃罗涅日-M”“沃罗涅日-DM”“沃罗涅日-VP”等 3 种型号,有米波和分米波雷达等 2 种类型。能够同时跟踪 500 个目标,最大探测距离 6000 km,能够实时跟踪和精确定位弹道导弹、巡航导弹以及各种气动目标,对高超声速武器具有发射预警和粗跟踪探测能力。俄罗斯计划在境内及边境部署 10 部“沃罗涅日”雷达,截至 2021 年 12 月,9 部已部署完毕,1 部正

在建设,实现了以莫斯科为中心、以欧洲为重点的环状预警布防、国土周边全境无缝有效覆盖和全方位的导弹袭击预警网。

(2) 集装箱超视距雷达

集装箱雷达站利用电磁波在电离层与地面之间的反射/折射波进行探测,不受地球曲率影响,探测纵深最高可达 2000 km,探测距离为 3000 ~ 7000 km,对于探测隐身目标也十分有效,能对隐身战斗机实施探测跟踪,而且拥有超强的抗干扰能力和对多种目标的探测能力,且天线数量、造型巨大,接收网也很大,可以接收到两三千公里外的敌机或者是敌方导弹的信息,因此可大幅提升俄军早期预警能力。将其部署到边境地区,可实施不间断侦察,帮助俄军实时监测来自欧洲和中东方向的空天威胁,发现并跟踪来袭的飞机、巡航导弹,甚至是高超声速导弹。而且相比部署预警机、普通防空雷达飞机,集装箱雷达站的效费比高,研制和建造费用仅需 1.75 亿美元,其有望成为全球超视距雷达的领头羊。2019 年 12 月 1 日,俄罗斯空天军首座“集装箱”超视距雷达站在俄西部的莫尔多瓦共和国境内正式进入战斗值班。截至 2021 年 12 月,俄军第二座“集装箱”超视距雷达站的基础设施建设工作仍在俄远东地区阿穆尔州进行,将于 2023 年结束,预计 2024 年进入战斗值班,主要负责监测和保护俄东部战略方向的空中安全。

(3) “共振-N”雷达

“共振-N”移动式雷达系统具有反隐身能力,能够轻易探测到隐形巡航导弹、弹道导弹以及飞行速度达 20Ma 的高超声速飞行器、微型无人机、直升机和隐形飞机等。“共振-N”带有人工智能元件,具有自主学习能力。工作在米波段,探测距离 600 ~ 1200 km,探测高度 100 km。截至 2021

年底,俄军已在北极地区部署 5 套“共振-N”远程机动式预警雷达,可有效识别敌方来袭导弹轨迹,增强北极地区防御能力^[14]。此外,俄罗斯还在部署新的地面高超声速机动目标探测和跟踪系统以及研发新型雷达,可同时跟踪包括高超声速导弹在内的多个来袭目标,实现对高超目标的精密跟踪和识别。

1.2.2 拦截打击系统

根据俄公开资料,俄罗斯具备拦截高超能力的武器系统主要有 S-500“普罗米修斯”防空反导系统、S-300V4 型防空导弹系统和 A-235“努多利”战略反导系统,它们有可能成为俄罗斯高超声速武器防御系统的基础。

1) S-500“普罗米修斯”防空反导系统

S-500 是俄罗斯第五代防空反导系统^[20],探测范围 800 公里,最大拦截距离 600 km,拦截高度涵盖整个临近空间到 200 km 的空间,能摧毁 400 km 半径内的所有空中目标,可同时对 10 个目标发起拦截打击,可拦截速度达 7 km/s 的目标,拥有对付高超声速武器的能力。采用公路移动型,具有相当程度的部署性、机动性和生存能力。从设计之初,S-500 就被赋予应对各种空中威胁的使命任务,拥有防空和反导两个独立模块,可以配置发射一系列具有不同功能(包括防空和反导)的多型导弹,如 40N6M 导弹和 77N6-N、77N6-N1 系列导弹等,可先后对同一目标实施中段和末段双层防御,可以有效拦截大气层外和大气高层的弹道导弹、空气动力目标、高超声速以及巡航导弹等多类目标。2021 年 12 月,S-500 已完成服役前试验,并正式列装位于莫斯科周边的俄空天军第 15 特种集团军的一个营,负责拱卫整个莫斯科城区和中央工业区。俄国防部 2021 年 7 月与“金刚石-安泰”公司签署合同,向俄空天

军运送 10 余套 S-500,批量生产已于 2022 年上半年开始,至 2025 年完成。

2) S-300V4 型防空导弹系统

S-300V4 被俄认为是能够有效应对空中所有类型进攻性武器的突破性导弹防御系统,其防空区域面积是 S-300 的 2~3 倍。S-300V4 可以拦截中程导弹的弹头,配备了专用窄束雷达和发射装置,能够摧毁弹道导弹;采用了新型弹药,致力于摧毁高超声速目标。S-300V4 能够拦截以超过 12 马赫的速度飞行、射程达 2500 km 的导弹目标;可以在最远 380~400 km 对付各种类型的气动目标,包括“隐身”目标。在俄媒体和军方透露的多个阶段测试中,S-300V4 均表现出打击未来高超声速武器的能力。

3) A-235“努多利”战略反导系统

第 3 代莫斯科反导系统 A-235 采用常规破片式杀伤方式,可同时拦截单个或多个空中目标,依靠机动发射器,机动性更强;射程、精准度和反应时间都比 A-135 反导系统有大幅改进;配备了远、中、近程拦截弹,其中近程拦截弹的拦截高度为 15~40 km,中层拦截弹拦截高度在 30~70 km 之间的目标,刚好可以覆盖高超目标的主要飞行高度,弥补原有反导系统在临空拦截高度的空白。它将主要用于保护莫斯科免遭来自空中和太空的打击,抵御高超声速导弹的攻击,有效保护指定地区安全。A-235 反导系统与 S-500 防空系统配合使用,可实现对俄罗斯领土的分层防御,形成可靠的空天防御系统。但与美国的拦截系统相比,A-235 系统在撞击精度和抗干扰方面仍然存在一定的差距。

2 对高超声速武器防御装备体系发展建设的思考

高超声速武器飞行速度快、机动能力强且飞

行长时间处于低临近空间,能够在小时内打击全球重要军事目标,给现有导弹防御体系的预警发现、连续跟踪、杀伤拦截等提出了新挑战^[13]。

通过对美、俄高超防御装备体系建设的梳理可以看到,美俄两国发展路线和措施虽不相同,但目的相同,存在一定共性特征。重点归纳为:1)立足于现有装备能力发展,以现有弹道导弹防御和防空能力为基础,针对高超武器特点和防御难点,着力具备或提升高超声速防御能力;2)致力于防御装备和相应技术研发,加快关键技术攻关,探索、研发具备高超防御能力的武器装备,推进装备研究、试验和能力验证进程;3)依托于装备跨域协同配合,协同使用各作战域、不同军种的装备要素,发挥作战“合力”,最终实现有效的一体化高超防御。其建设思路和相应措施对我国高超防御装备体系建设发展有着很好的启示和借鉴作用,为维护空天安全和取得战略平衡,我迫切需要发展空天地一体化的协同防御装备体系,如图 1 所示,以加速我高超防御体系的发展和深入研究。

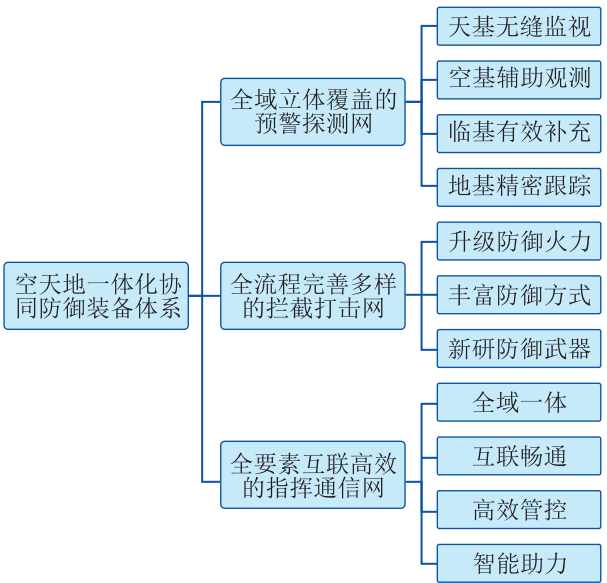


图 1 高超防御装备体系构建框架

Fig. 1 Construction Framework of Hypersonic Defense Equipment System

2.1 构建全域立体覆盖的预警探测网

高超目标的飞行弹道跨越从低空、高空、临空直至大气层外的巨大空域^[21],在飞行过程中雷达散射特性和红外辐射特性等目标特征显著,且不同阶段特征又存在明显差异,使得对其进行预警、探测和跟踪成为可能。通过将天基、空基、临基、地基、海基等多平台,搭载红外、雷达、可见光等多源载荷的传感器设备进行组网,构建全域立体覆盖的高超防御预警探测体系,提升体系作战整体反应能力和响应杀伤能力。

2.1.1 天基无缝监视

天基平台轨道高度在200 km以上,不受地球曲率影响,三颗地球同步轨道卫星即可实现全球大范围区域覆盖,不同轨道高度、携带不同载荷的卫星还可实现重点区域多重覆盖侦察,实现空/临域威胁预警、探测、跟踪和评估等,是高超防御预警探测体系的关键力量。

增加侦察卫星、联合民商卫星对对方关键和重要目标进行全方位全时段的侦察监视,掌握其动向、争取主动权;设计和实现高轨红外预警卫星组网,实现对全球范围内高超武器发射(助推段)的早期预警、探测和初始跟踪;构建中低轨道卫星星座,搭载多视场、多波段的红外载荷和雷达载荷等,实现对高超武器飞行全流程的连续稳定探测和跟踪,为指控平台和拦截武器提供准确可靠的预警信息和“火控级”目指信息,同时实现对防御过程中拦截打击效果的“即时反馈”,为二次(多次)打击决策提供信息。

2.1.2 空基辅助观测

将有人机和无人机作为移动空基传感器节点开展对高超目标的被动探测和主动跟踪。有人机/无人机反应速度快,机动性能好,可在指定和重点空域预先部署或应急部署,尤其是高空无

人机无需参战人员“亲临”空域,人员生存能力强、可以长时间滞空,对高超目标滑翔/巡航段的探测跟踪十分有利,是高超防御预警探测体系的有效辅助力量。

2.1.3 临基有效补充

临空预警平台,主要依靠高空气球和平流层飞艇^[22],因其独特的位置优势,可在其有效工作范围内提供更加准确及时的探测和跟踪信息,并可以长时间滞空起到监视重点区域的作用。通过在重点区域预先组网部署高空气球或平流层飞艇^[23],实现长时间覆盖探测,获取大量及时准确的探测数据,成为高超目标飞行滑翔/巡航段探测和跟踪力量的有力补充。

2.1.4 地基精密跟踪

地/海基预警探测平台位于地球表面,受地球曲率影响大,对临近空间目标的探测距离限制在500 ~ 1000 km^[24]范围内,但其跟踪识别精度高,可提供最终武器拦截的决定性信息保障,是高超目标滑翔/巡航中后段和末段跟踪、识别、打击及评估的主要预警力量。通过组网部署大量多频段、多功能、多体制的预警探测雷达和超视距雷达,融合来自多平台多模式传感器的数据,实现高超目标的尽早预警、稳定跟踪和精确识别,并为后续拦截打击提供精确目指保障和拦截效果评估等。

2.2 构建全流程完善多样的拦截打击网

高超声速武器威胁极大,但现有反导拦截系统无法拦截高度在20 ~ 40 km的高超目标,难以拦截飞行马赫数超过15^[25]的高超目标,拦截能力有待进一步提高。

2.2.1 升级防御火力

在现有武器基础上改进和升级拦截能力,填补现有拦截系统在临近空间的拦截空白,提升其

拦截速度和打击精度,使其具备高超拦截能力。如,美国通过升级 SM-6 导弹应对高超声速武器威胁,预计 2023 财年达到初始作战能力;俄罗斯将对抗高超声速导弹的能力寄望于改进后的 S-500 “普罗米修斯”防空反导系统,已于 2022 年上半年投入批量生产。

2.2.2 丰富防御方式

目前拦截武器以动能拦截为主,利用动能武器高速运动产生的巨大动能,以非爆炸性的方式直接碰撞目标进而达到摧毁效果^[26]。但拦截方式单一,且拦截能力有限,拦截效果未必理想。定向能拦截^[27]是利用激光武器、高功率微波、粒子束武器等定向能武器,沿一定方向发射和传输高能射束攻击和毁伤目标,具有瞬时命中、反应时间短、毁伤效果强等优势,不仅可以硬摧毁,还可以软杀伤,降低高超目标的作战能力和作战效果。网电攻击武器可对保障高超声速导弹攻击的电子设备、信息系统、制导网络以及指控系统等进行攻击和干扰,降低其作战效果^[28]。同时,处于不同“域”的武器平台也能发挥不同的攻击效能。因此,应拓展拦截思路、丰富防御方式,有效利用陆/海基、空/临基、天基等多平台搭载方式,综合使用新型防空/反导导弹、定向能武器、动能武器和网电攻击武器等多种武器系统,同步运用直接杀伤打击和间接网电毁瘫等多种防御方式,多管齐下对高超声速武器实施全面打击,以达到预期拦截效果。

2.2.3 新研防御武器

在升级现有武器的同时,为丰富防御方式,进一步提升防御效果,还应研发新的防御武器,拓宽拦截打击的可能性和可靠性。如 2021 年 4 月 13 日美 MDA 正式启动 GPI 项目,研发可在滑翔段拦截远程高超声速武器的新型拦截弹,加速形

成海基滑翔段反高超目标能力。

2.3 构建全要素互联高效的指挥通信网

高超声速武器的出现,压缩了作战时间、拓宽了作战空间,战场多维、迅速且多变。因此,必须构建全要素互联高效的指挥通信体系,才能在“读秒”的战争时代迅速反应、高效管控,与高超防御进程“同频同步”。

2.3.1 全域一体

发展覆盖陆、海、空、天等作战域的全域一体指挥控制能力,综合集成各平台传感器、武器系统和部分指控系统,进行联合统筹规划和协同行动,实现全域一体指挥和控制。

2.3.2 互联互通

依托无缝连通的数据传输网络,将传感器、指控系统和拦截武器等各平台、各要素互联,保证传感器、指控系统和拦截武器之间数据传输、数字通信、信息发布、指挥控制和管理运行等的连通性、实时性、可靠性。

2.3.3 高效管控

集成各传感器平台的监视、预警、探测、跟踪和目指数据等各种数据信息,经过融合处理和分析,形成统一作战态势信息并分发;集成各传感器和武器系统的状态信息和功能信息,利用扁平化、去中心化、网络化的指控模式实现快速高效指挥、管理和控制。

2.3.4 智能助力

基于颠覆性技术和人工智能技术助力指控系统优化升级,赋予指控系统辅助决策、高效管控和快速反应能力,设计、研发、集成基于人工智能技术的数据跟踪算法、作战规划算法、任务分配算法等算法和架构,实现防御系统的优化部署和作战方案的智能规划,并以最优方式分配和管理传感器资源和拦截武器资源,使其快速投入作

战状态,使体系作战能力和效能得到充分发挥。

3 结束语

当前,高超声速武器的快速崛起引起了以美国为代表的世界各国对高超声速武器防御领域的高度关注,推动和促进了防御装备和技术不断发展,高超防御装备体系已初见端倪。但其仍处于论证和概念发展阶段,有一定不确定性。随着技术的创新发展,未来很有可能形成高超防御新的作战概念和装备发展方向,其将在未来防御对抗中发挥重要作用,值得持续高度关注和进一步研究。

参考文献

- [1]杨明映,朱昱,张笋. 防抗高超声速武器作战体系建设发展[J]. 飞航导弹,2019(7):21-25.
- [2]胡冬冬,张灿. 美军高超声速武器防御体系建设发展态势及研判[J]. 飞航导弹,2019(3):34-40.
- [3]Office of the Secretary of Defense. 2019 Missile Defense Review [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://media.defense.gov/2019/Jan/17/2002080666/-1/-1/1/2019-MISSILE-DEFENSE-REVIEW-little.pdf>
- [4]胡冬冬. 2019 年美国高超声速武器防御体系建设动向及发展研究[J]. 战术导弹技术,2020(1):1-8.
- [5]程建良,葛爱东,吕琳琳. 美国导弹防御系统解析[J]. 飞航导弹,2020(6):55-58.
- [6]GRUSS M. Space Fence Development Closely Tied to Upgrade of U. S. Air Force Control Center[J]. Space News,2014,25(23):4-4.
- [7]WASSERBLY D. Space-based Kill Assessment Programme Launches Ahead [J]. Jane's International Defense Review,2019,52(5):6-6.
- [8]KELLER J. Air Force Orders Four MQ-9 Block 5 Unmanned Attack Drones and Mobile Control Stations [J]. Military & Aerospace Electronics, 2019,30(4):36-37.
- [9]姜林林. 基于先进传感器系统构建的美军空天预警体系浅析 [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://new.qq.com/omn/20210903/20210903A069ZV00.html>.
- [10]熊俊辉,李克勇,刘燚,等. 临近空间防御技术发展态势及突防策略[J]. 空天防御,2021,4(2):82-86.
- [11]Office of the Under Secretary of Defense (Comptroller). National Defense Budget Estimates for FY 2021 [EB/OL]. (2020-03-20). https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2021/FY21_Green_Book.pdf.
- [12]NIU Z Y, SU T, ZHANG J B. Target Detection Algorithm for Hypersonic Vehicle Based on Wideband Radar Echo Model[J]. IEEE Access, 2019(7):7678-7690.
- [13]岳伟,刘仁争,王志军. 美高超声速导弹防御发展及影响分析[J]. 空军工程大学学报,2020,12(4):102-104.
- [14]熊瑛,吕涛,陈祎璠,等. 2021 年国外导弹防御发展综述[J]. 飞航导弹,2021(12):1-6.
- [15]张昊. 高超声速武器作战样式及防御对策分析[J]. 飞航导弹,2019(1):20-26.
- [16]GEORGE N L. Chronology of MDA's Plans for Laser Boost Phase Defense [EB/OL]. (2016-08-26). <https://mostly missile defense.com/2016/08/>.
- [17]KELLER J. Air Force Seeks Best Companies to

Develop Next-generation Airborne Laser Weapons [J]. Military & Aerospace Electronics. 2017, 28 (5):6-7.

[18]陈雅萍,高雁翎. 2020 年世界弹道导弹防御系统发展回顾[J]. 飞航导弹,2021(3):1-6.

[19]SAVVA N E, GA P Y, BYANKIN M A. The Problem of Genesis of Gold and Silver Sulfides and Selenides in the Kupol Deposit (Chukotka, Russia) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2012,53(5):457-466.

[20]潘金宽. 俄军列装 S-500 防空导弹系统[J]. 军事文摘,2020(19):47-49.

[21]王鹏飞,罗畅,徐婧,等. 高超声速导弹发展及防御策略研究[J]. 战术导弹技术,2021(1):60-66.

[22]赵良玉,雍恩米,王波兰. 反临近空间高超声速飞行器若干研究进展[J]. 宇航学报,2020,41(10):1239-1450.

[23]杨虹. 针对高超声速飞行器的飞艇红外探测系统组网方法研究[D]. 北京:装备学院,2017.

[24]金欣,梁维泰,王俊,等. 反临近空间目标作战的若干问题思考[J]. 现代防御技术,2013,41(6):43-49.

[25]李益翔. 美国高超声速飞行器发展历程研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

[26]中国人民解放军总装备部综合计划部. 中国军

事百科全书. 军事装备总论[M]. 北京:中国大百科全书出版社,2008:221-221.

[27]HECHT J. A “Star Wars” Sequel? The Allure of Directed Energy for Space Weapons[J]. Bulletin of the Atomic Scientists,2019,75(4):162-170.

[28]蒋春山,周天卫,周园明. 电子战对宙斯盾舰反导能力的降效作用分析[J]. 中国电子科学研究院学报,2020,15(12):1180-1185.

作者贡献说明

刘思彤:收集、整理资料,设计文章框架,撰写文章初稿,修改定稿;

张占月:把握论文方向,提出指导性意见,论文初稿修改、定稿;

刘 达:收集资料,论文初稿修改、校对、核稿;

杨 帅:收集、整理资料,论文初稿修改。

作者简介



刘思彤:助教;博士研究生;主要研究方向:体系设计和作战概念研究,作战效能评估。