

文章编号: 1671-0576(2026)02-0001-05

# 超高速炮弹防空反导作战应用研究

党乐乐, 夏高峰, 贾继鹏, 费聚锋, 林振钰

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 结合防空反导体系的现状及发展趋势,围绕末端防御领域出现的新兴作战力量,即电磁发射超高速炮弹,系统研究了其在防空反导作战中的应用。首先,基于超高速炮弹的特点,阐明了其对现有防空反导体系的效能倍增作用;其次,面向未来协同作战场景,构想了其典型的作战应用样式;最后,对提升超高速炮弹作战效能涉及的关键技术进行了梳理,以为我国新一代防空反导体系建设提供支撑。

**关键词:** 超高速炮弹; 防空反导; 作战应用

**中图分类号:** TJ866

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2026.02.001

## Research on Combat Applications of Hypervelocity Projectiles in Air Defense and Anti-Missile

DANG Lele, XIA Gaofeng, JIA Jipeng, FEI Jufeng, LIN Zhenyu

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Drawing upon the current status and development trends of air defense and anti-missile systems, the applications of a new type of combat capability emerging in the field of terminal defense-electromagnetically launched hypervelocity projectiles (HVPs)-in air defense and anti-missile operations were systematically examined. Firstly, based on the characteristics of HVPs, their role in enhancing the effectiveness of the existing air defense and anti-missile systems was clarified. Secondly, oriented toward future collaborative combat scenarios, the typical combat application modes were proposed. Finally, the key technologies involved in improving the combat effectiveness of HVPs were analyzed, providing support for the construction of China's new generation air defense and anti-missile system.

**Key words:** hypervelocity projectile (HVP); air defense and anti-missile; combat application

## 0 引言

在大国战略竞争和新技术革命的双重驱动下,新型作战力量不断涌现,传统防空反导体系面临的压力越来越大。升级本国防空反导力量或研发新型武器,已经成为各国现阶段的重要任务。基于电磁发射的超高速炮弹(hypervelocity projectile, HVP)作为电磁轨道炮发射的新型动能杀伤武器,不仅具备导弹的精度和速度,更保留了火炮的射速和成本优势,已成为各国精确制导弹药发展的重点方向<sup>[1-4]</sup>。在以防空反导拦截导弹为“盾”的防御体系对抗以精确制导导弹等为“矛”的攻击体系时,HVP能够以其超高速、高密度、低成本火力优势,有效毁伤低成本无人机集群、对抗饱和火力攻击、拦截高速高机动目标,在一定程度上增强防空反导体系的生存能力。未来,HVP将与防空导弹、激光武器、微波武器等共同构建一个分层、高效、经济的立体攻防体系。为此,亟需开展HVP防空反导作战应用研究,为提高其在防空反导领域的体系贡献率提供理论和技术支撑。

## 1 防空反导体系发展现状

随着作战方式的革新与科技创新的突破,高超声速武器、无人机集群等新兴威胁不断涌现。以精确打击和多系统协同为核心的防空反导体系化作战,已成为应对复杂电磁环境下多目标对抗、破解低成本集群饱和攻击的主要特征<sup>[5-8]</sup>。防空反导作为确保国防安全和行动自由的重要基石,在作战需求和体系化建设的驱动下,正面临应对目标多、系统协同难、对抗突防难等严峻挑战。为此,世界主要军事强国重点围绕防空反导体系演进、新型防空反导体系构建、新质防空反导武器研制等方面开展研究,持续推动作战模式从“以武器为中心”的独立作战向“以体系为中心”的协同作战转变<sup>[9-12]</sup>。西方国家发布了新版《导弹防御评估》报告,提出构建全面、分层、机动的一体化防空反导体系,推动指控系统的互操作性,研制标准化、模块化新型防空系统,并加快固体激光武器、电磁轨道炮、HVP等新概念武器的研发和测试

验证<sup>[13]</sup>。面对复杂的区域安全形势,其他军事强国也通过构建由A-100“首相”机载预警探测系统和S-500“普罗米修斯”防空导弹武器系统组成的新一代防空反导体系,实现了“道尔”防空导弹的模块化改进,并加速了激光武器、电磁轨道炮、微波武器等新概念武器的研究进程<sup>[14]</sup>。我国积极吸收国外先进理念,面向未来作战需求,在不断完善远中近衔接、高低空结合的防空反导体系的同时,加快推进现有体系的升级改造,并重点开展电磁轨道炮、定向能武器等新型作战力量的研制工作。

防空反导面临的威胁日趋复杂多样,预警探测在时间、空间、精度等方面的要求不断提升;具备远程精确打击能力的战机、高超声速武器、高动能武器等装备相继问世;低成本无人装备集群饱和攻击、分布式协同作战、有人/无人协同等新型战法不断涌现。传统防空导弹从发射到命中需要一定时间,在拦截超高速且突然出现的临近目标时,拦截时间窗口极短,导弹系统可能来不及反应。HVP的初速度可达马赫数3以上,能以极短的时间抵达目标区域,为杀伤链的有效闭环赢得反应时间。另外,在面向低成本无人机、巡航导弹等拦截作战时,HVP的单发成本相比现有中远程防空导弹能够降低一到两个数量级,极大缓解了防空反导体系的经济压力。

## 2 超高速炮弹的作用与体系架构

### 2.1 主要作用

与传统高爆炸弹药不同,超高速炮弹依靠电磁能转换动能实现高能量毁伤,能以极低的成本实现媲美导弹的远程精确打击能力,能在一定程度上弥补传统防空反导体系的缺陷。综合现有研究,HVP具有以下四个优势<sup>[15-19]</sup>。

首先,具备超高速和远射程特性。HVP是基于电磁力加速的制导炮弹,其理论初速可以达到6 000~8 000 m/s(马赫数为17.6~23.5)。在当前研究水平下,其初速可达马赫数7,最大射程超过200 km,能够在较短的时间窗口内对敌方目标进行打击,提升了拦截毁伤效能。

其次,实现大威力和高生存能力的统一。HVP飞行速度快,拥有巨大动能,可通过直接碰撞高效毁伤目标。由于不使用燃料推进,HVP在

发射时不会产生浓烟和火光,降低了被敌方发现的概率。另外,其飞行弹道可通过空气动力控制系统实现灵活调整,能够有效规避目标的防御系统。

再者,拥有多平台兼容性和强通用性。HVP可采用适配器由现役火炮、舰炮等平台发射,无需研制专用发射系统,提升了现役装备的作战效能。

最后,低成本和高作战效费比的优势突出。HVP不带昂贵的火箭发动机,单发成本约5万~10万美元。相较于传统燃料推进式地空导弹和舰空导弹,其拦截打击成本显著降低。当面向大量目标从不同方向来袭时,HVP能够在短时间内形成高密度火力拦截通道,使得有效应对低成本饱和攻击成为可能。

现有防空反导体系对超高速、高机动目标的探测、跟踪和拦截的时间窗口极短,易被敌方武器突破防线,HVP的超高速特性缩短了拦截来袭目标所需的反应时间,弥补了传统打击手段的速度短板。随着敌方进攻武器系统在探测、制导、毁伤等方面性能的不不断提升,防空反导体系面临更高、更严峻的防御要求。HVP作为末端防御领域出现的新型武器装备,在应对新型、低成本、饱和攻击方面,能够为防空反导提供更多战术选项。面对无人机集群作战、火箭弹密集火力打击等低成本饱和攻击,传统防空反导体系往往存在拦截成本高、经济性差的问题。HVP的低成本、多平台部署特性能够提高密集防御的经济性和可持续性,有效应对多方向、多目标的饱和攻击。综上所述,HVP凭借其独特的技术特性和作战优势,对现有防空反导体系形成了有力补充,为防空反导体系提供了更高效的打击手段。

## 2.2 体系架构

超高速炮弹防空反导体系是以空天地一体化信息网络为基础,将广域分散的侦察、通信、指挥、打击等各类作战要素有机融合,构建的信息流实时联通、资源按需聚集、毁伤精准释放的一体化防空反导作战架构。该体系可以实现HVP武器打击系统的内循环杀伤链和基于跨域、跨平台、跨军种多源信息保障与多域火力打击的外循环杀伤链的快速闭环,从而有效应对未来“快速猛禽”、“敏捷作战”等新型作战样式。HVP防空反导体系架

构如图1所示。

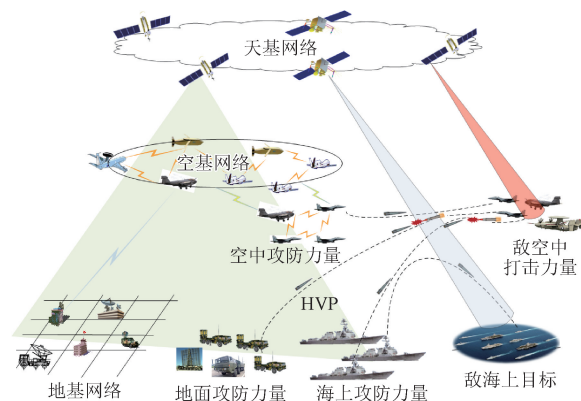


图1 HVP防空反导体系架构

空天地一体化信息网络由高中低轨不同任务载荷的卫星构成的天基网络、临近空间飞艇及无人机、预警机等平台构成的空基网络,以及指挥专网、战术互联网、野战机动网等构成的地基网络等组成,具备广域覆盖、动态组网、随遇接入的能力,能够支撑在广域作战空间对敌威胁目标进行有效探测、拦截和评估。

HVP在空天地一体化信息网络支撑下,能够在近程防空炮弹和远程防空导弹之间构建一道低成本、高密度的拦截屏障,与现有防空反导体系形成高低搭配、成本互补的防御层,实现应对低成本饱和攻击时,从不对称消耗到可持续对抗的转变,为末端防御提供更多的战术选项。

## 3 超高速炮弹的典型作战应用样式

### 3.1 多源信息保障下的区域反介入、拒止作战

“多源信息保障下的区域反介入、拒止作战”是指:为应对敌方的航母战斗群、远程空中轰炸群等高价作战平台,对我方海域、空域构成的军事压制和威胁,我方综合应用天基和空基等多源侦察情报,充分扩展炮弹精确打击的远界,降低视距传输对发射平台的限制,提高其超视距打击能力、打击精度和机动性能,实现对特定区域的可靠投送与有效毁伤,形成区域反介入、拒止的非对称作战能力。多源信息保障下的区域反介入、拒止作战示意图如图2所示。

### 3.2 低成本反无人集群作战

“低成本反无人集群作战”是指:依托空天地

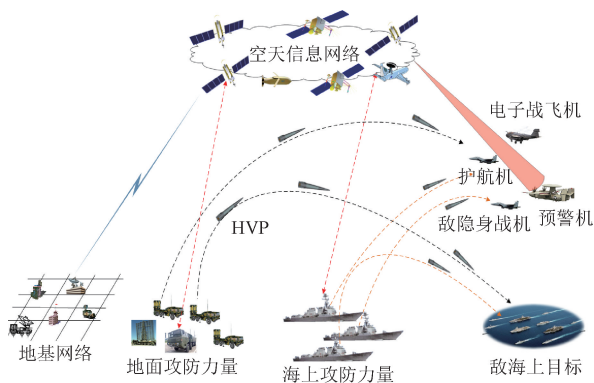


图 2 多源信息保障下的区域反介入、拒止作战示意图

一体化的情报保障,陆海作战平台根据指挥控制指令,发射低成本超高速炮弹,对来袭的敌方空中及海上无人集群目标进行打击。低成本反无人集群作战示意图如图 3 所示。HVP 具有初速高、射程远、火力强的特点,结合空天地信息网的广域分布式侦察监视能力,作战系统能够对目标指示信息作出快速反应,大大缩短打击链路时间。因此,面对敌方无人机集群或舰艇编队目标,该作战系统可实现多波次打击,提升了抗饱和和攻击能力。

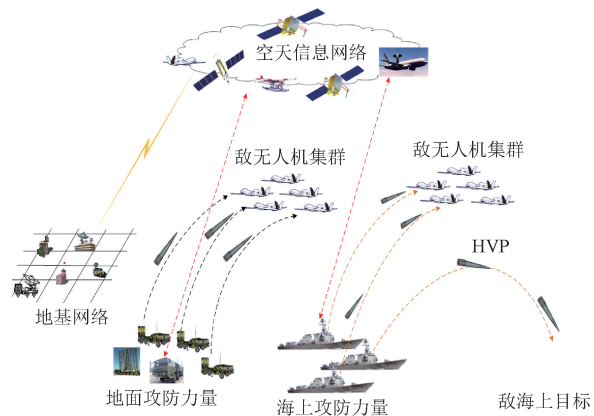


图 3 低成本反无人集群作战示意图

### 3.3 高速高机动拦截作战

“高速高机动拦截作战”是指:为应对敌方发射超高速导弹、新一代战略弹道导弹等高速高机动武器,对我方高价值目标实施打击,我方综合利用地、海基防御系统对敌方高速高机动目标进行拦截。高速高机动拦截作战示意图如图 4 所示。HVP 的速度可达数千米每秒,凭借其超高速优势,极大缩短炮弹飞行时间,从而压缩杀伤链的闭环周期,为实现“发现即摧毁”的打击能力提供支撑。



图 4 高速高机动拦截作战示意图

## 4 超高速炮弹作战应用关键技术

面向多域联合一体化作战需求,构建能够支撑多源信息融合、多节点动态组网的一体化作战网络体系,已成为国内外装备发展的重要方向。为适应天、空、地、海等多维信息支持下的体系作战,充分发挥 HVP 的精确毁伤威力,应加快突破网络化协同应用的关键技术,以支撑多弹敏捷组网和集群攻击,为提升对高速目标的精确打击能力及作战效费比提供技术保障。

### 4.1 跨平台多源信息保障技术

防空反导是超高速炮弹的重要作战使命之一。但受限于现阶段的战场信息保障能力,其有效杀伤区仍被约束在视距范围内,导致其在远程防空反导领域的潜力尚未得到充分发挥。在信息化和网络化的战争形态下,HVP 应该具备从卫星、飞机、舰船等异构作战平台获得协同交战信息的能力。为此,应重点围绕跨域互联、随遇接入、天基目指信息直接铰链等关键技术开展研究,以提升基于网络信息体系的联合作战能力,为联合海上打击、联合边境防卫、联合防空反导等作战任务提供支撑。

### 4.2 多节点协同组网数据链技术

未来战争将是体系与体系的对抗,尤其是以精确制导武器为主的攻击体系与多维一体化防御体系间的博弈,而信息战和电子战将贯穿始终。在这种情况下,单枚导弹能够发挥的作用十分有限,多弹协同作战将变得至关重要。协同作战的

效能很大程度上受限于武器系统间的信息交互。特别是对于电磁发射的超高速炮弹这类新型武器,因其具有发射初速高、节点高机动和姿态变化剧烈等特点,需重点围绕超高动态多普勒频率补偿、网络拓扑的快速重构与控制、低时延高可靠敏捷组网等关键技术开展研究。这旨在全面提升系统在强干扰条件下的多节点快速、可靠组网通信能力,为实现协同任务规划、协同对抗、协同攻击等先进作战模式提供可靠信息传输保障<sup>[20]</sup>。协同组网数据链信息支撑保障示意图如图 5 所示。

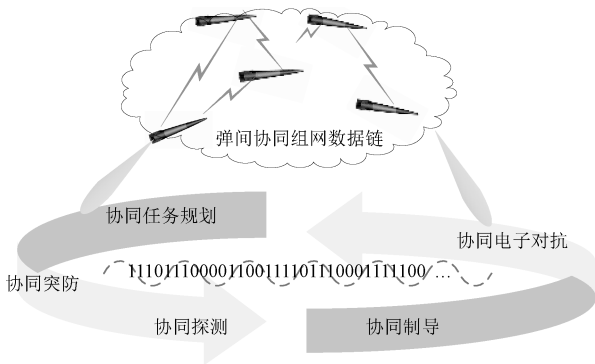


图 5 协同组网数据链信息支撑保障示意图

### 4.3 小型化高过载制导平台设计技术

超高速炮弹利用电磁力加速至超高速,具有初速高、威力大、持续打击能力强等优势,但发射瞬间带来的高过载,给天线罩、无线应答机、遥测设备等弹上设备抗过载能力带来诸多挑战。为了满足严苛的环境适用性要求,需从元器件、电路、结构到装配工艺的全链条进行高可靠设计,同时通过高过载仿真与试验,对设计方案进行迭代和优化,从而系统性提升 HVP 高过载适应能力<sup>[21]</sup>。

另一方面,为适应武器系统微小型化、多功能化和通用化的发展趋势,还需围绕宽带综合射频、软件无线电平台以及高性能可编程嵌入式微系统等关键技术开展研究。以此为基础,构建一个开放、通用、小型化的先进电子设备架构,并为其复合多模应用、低成本研制提供支撑。

## 5 结论

在未来体系化对抗作战中,进攻作战会呈现出立体多样的全方位打击态势,防空反导体系必

须担负起在空、天、网等多域空间的多重使命任务。电磁发射超高速炮弹具有速度快、射程远、隐蔽性好等优点,可用于摧毁空中飞机、低轨道卫星和来袭导弹等目标。为了将该装备的优点有效转化为支撑防空反导作战的实战能力,丰富防空反导体系装备,需要进一步加强相关技术研究,探索其防空反导总体方案及作战流程设计,重点突破作战应用关键技术,包括多源信息保障技术、协同组网数据链技术、抗高过载平台设计技术等,为实现超高速武器融入防空反导体系以及体系赋能打下基础。

### 参考文献

- [1] 于蓝. 美海军探索用常规舰炮发射超高速制导炮弹[J]. 太空探索, 2015(7): 55.
- [2] 鲁军勇, 冯军红, 李开, 等. 超高速制导弹丸研究综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(10): 1418-1427.
- [3] 马晓平, 廖欣, 陈兵. 电磁发射超高速制导炮弹国内外研究现状综述[J]. 空天防御, 2021, 4(2): 87-92.
- [4] FAIR H D. Progress in electromagnetic launch science and technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 93-98.
- [5] 刘双喜, 徐小平, 黄伟, 等. 国外多弹协同项目发展及关键技术展望[J]. 航空兵器, 2024, 31(6): 1-13.
- [6] 孟光, 孔晓俊. 基于天地一体信息网络的防空反导反临装备发展思考[J]. 空天防御, 2018, 1(1): 1-7.
- [7] 李帆, 张云飞, 李航宇, 等. 2021 年世界防空反导综述及对我国发展的启示[J]. 战术导弹技术, 2022(3): 34-39, 90.
- [8] 张宏俊. 空天一体联合体系作战及其技术展望[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 1-7.
- [9] 张景伟, 祁世民, 冯蕴天, 等. 世界防空反导发展现状与前沿趋势研究[J]. 航天电子对抗, 2025, 41(3): 51-58.
- [10] 陈利玲, 蔡亚梅. 国外防空防天装备发展现状与趋势[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(3): 5-8.
- [11] 张文涛, 苏琪雅, 于沐尧. 国外防空反导发展情况及启示[J]. 科技世界, 2024, 14(3): 5-7.
- [12] 陈雅萍, 宋晓阳, 刘杰. 2024 年国外防空反导领域发展综述[J]. 战术导弹技术, 2025(3): 64-71.

- [10] 陈振宇,吕召会. SJ 20382《楔形锁紧装置规范》行业标准修订介绍[J]. 中国标准化, 2023(6): 150-154.
- [11] 李风新. LRM热传导结构在加固计算机中的研究与应用[J]. 电子机械工程, 2020, 36(4): 17-21, 25.
- [12] 龙湛. 某航天单机锁紧装置质量问题分析[J]. 中国设备工程, 2021(23): 134-138.
- [13] 胡玉琴,陶帆帆,邓宗白. 楔形锁紧装置的力学性能分析[J]. 水利电力机械, 2007, 29(12): 203-206, 210.
- [14] 李文刚,王立志,刘谦文,等. 楔形锁紧装置螺纹锁死故障分析及改进[J]. 科学技术创新, 2019(23): 146-147.
- [15] 荣飞. 螺栓紧固的扭矩系数与标准偏差[J]. 中国设备工程, 2016(2): 42-44.
- [16] 李珣. 有限元网格划分对模态计算精度的影响研究[J]. 铁道车辆, 2024, 62(4): 101-105, 130.

(上接第5页)

- [13] 王旭祥,宗彬锋,周池军,等. 美俄防空反导武器系统发展探析及启示[J]. 战术导弹技术, 2024(2): 76-82.
- [14] 全建禄,武剑,刘良. 俄罗斯空天防御装备体系发展现状及启示[J]. 军民两用技术与产品, 2022(4): 10-15.
- [15] 伍尚慧. 国外电磁轨道炮的发展现状与作战效能分析[J]. 军事文摘, 2018(21): 34-38.
- [16] 贾强. 电磁轨道炮技术及应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [17] 陈帅,马偃毫,赵婉瑜,等. 电磁轨道炮最新研究进展及应用展望[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(17): 11-14.
- [18] WEEKS J S, GORHAM D A. Development of a guided hypervelocity projectile for naval applications[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2018, 33(9): 34-41.
- [19] WAKELAND R S. Review of hypervelocity projectile technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(3): 502-509.
- [20] 程冬. 超高速导弹制导技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [21] 李阳,秦涛,朱捷,等. 电磁轨道炮发展趋势及其关键控制技术[J]. 现代防御技术, 2019, 47(4): 19-23.

(上接第13页)

- [9] YONEL B, MASON E, YAZICI B. Deep learning for passive synthetic aperture radar [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2018, 12(1): 90-103.
- [10] GAO J K, DENG B, QIN Y L, et al. Enhanced radar imaging using a complex-valued convolutional neural network[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 16(1): 35-39.
- [11] PAN Y X, WU D, HAN G D, ZHU D Y. Forward-looking imaging method of airborne radar based on alternating direction multiplier network [J]. Modern Radar, 2022, 44(12): 74-80.
- [12] KOTTE V V, GISHKORI S, MASOOD M, AL-NAFFOURI T Y. Unsupervised deep basis pursuit based resolution enhancement for forward looking MIMO SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(6): 9080-9093.
- [13] LATIFI M A, AMINDAVAR H R. Forward-looking ground penetrating radar image reconstruction using fully connected neural network[J]. Signal Processing, 2023, 203: 108788.