

临近空间高速飞行器防御制导律发展与分析

刘双喜¹, 赵伟¹, 黄伟^{1*}, 马文卉²

(1. 国防科技大学先进推进技术实验室, 湖南长沙 410073; 2. 西安工业大学基础学院, 陕西西安 710021)

摘要:当前世界各国普遍缺乏有效防御高速飞行器的能力,相关基础研究仍处于起步阶段,加快发展高速目标防御技术对维护空天安全具有重要意义。针对此背景下临近空间防御对抗中存在的防御态势狭窄、速度劣势明显、单弹防御力弱等问题,对当前临近空间高速飞行器防御制导律的发展现状进行综述,分别从复杂攻防场景、协同制导机理、真实环境约束等方面剖析现有制导律研究的不足,并展望了未来高速飞行器防御制导律的重点发展方向,旨在为未来高速飞行器防御体系建设和精确制导领域的前沿基础研究提供参考。

关键词:高速飞行器;临近空间;协同对抗;制导律;防御体系

中图分类号:V11;V19;TJ760 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2026)02-131-13

Development and analysis of defense guidance laws for high-speed vehicles in near space

LIU Shuangxi¹, ZHAO Wei¹, HUANG Wei^{1*}, MA Wenhui²

(1. Advanced Propulsion Technology Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Sciences, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Currently, countries around the world are generally unable to defend effectively against high-speed vehicles, and related basic research is still in its infancy. Accelerating the development of high-speed target defense technology is crucial for maintaining aerospace security. Given the problems present in the near-space defense confrontation under this background, such as a narrow defensive posture, significant speed disadvantages, and limited single-missile defense capability, this paper reviews the current development status of the defense guidance law for high-speed near-space vehicles. It analyzes the deficiencies of the existing guidance law research from perspectives such as complex offensive and defensive scenarios, cooperative guidance mechanisms, and real environment constraints. It also foresees the key development directions of future defense guidance laws for high-speed vehicles, aiming to offer references for the construction of future defense systems for high-speed vehicles and the frontier basic research in the field of precision guidance.

Keywords: high-speed vehicles; near space; cooperative engagement; guidance law; defense system

随着空天攻防局势的不断升级,越来越多的新型高技术武器被投入实际运用。2022年3月18日和20日,俄罗斯先后两次发射“匕首”滑翔式高速飞行器,摧毁乌克兰伊万诺-弗兰科夫斯克地区的地下导弹与航空弹药仓库^[1],这是人类历史上首次实际运用高速飞行器。此后在2024年3月24日,俄军又向乌克兰首都基辅发射了

“锆石”吸气式高速飞行器,摧毁乌克兰国家安全局的一座办公楼和基辅朱利安机场^[2],体现出优异的对抗能力。由此可见,滑翔式和吸气式高速飞行器均已被实际运用并产生重大效果,在军事领域受到了广泛关注。

作为一类穿透型“速度隐身”飞行器,高速飞行器兼具了传统飞行器的各项性能优势,具有飞

收稿日期:2025-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12502052);国家资助博士后研究人员计划资助项目(GZB20240989);中国博士后科学基金资助项目(2024M754304);智能博弈重点实验室创新工作站开放课题资助项目(ZBKF-24-01);湖南省自然科学基金资助项目(2025JJ60072)

第一作者:刘双喜(1995—),男,陕西汉中,助理研究员,博士,E-mail:lsxdouble@163.com

*通信作者:黄伟(1982—),男,湖北天门人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:gladrain2001@163.com

引用格式:刘双喜,赵伟,黄伟,等.临近空间高速飞行器防御制导律发展与分析[J].国防科技大学学报,2026,48(2):131-143.

Citation:LIU S X, ZHAO W, HUANG W, et al. Development and analysis of defense guidance laws for high-speed vehicles in near space[J].

Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(2): 131-143.

行速度快、对抗能力强、打击半径大等突出优势，可以完成普通飞行器所难以完成的情报收集、快速打击等任务^[3-6]。高速飞行器的出现彻底打破了传统空天防御之间的界限，推动战争进入高速度、强对抗时代。因此，高超声速技术的成熟发展必将引发临近空间对抗样式、战术战法的演变革新，对战场环境带来深远影响^[7-8]。

现阶段，各国在防御高速飞行器方面尚缺乏有效手段，相关防御技术研究亟待加速推进。从我国空天安全防御体系看，高速飞行器的快速发展已经对各层级防御力量形成新的压力，严重威胁我国空天防御网络的有效性^[9-10]。因此，如何有效提升针对高速飞行器的防御能力，已成为临近空间防御对抗领域亟须解决的关键问题。

综上所述，积极开展高速飞行器防御制导技术研究，推动临近空间防御对抗领域新兴技术和前沿基础理论的发展，对于构建自主可控的国防装备体系、增强国家空天安全具有重要意义。因

此，本文围绕高速飞行器防御制导律的发展现状与不足展开综述分析，并展望了未来的发展方向。

1 临近空间防御对抗局限性分析

根据中国工程院全球工程前沿项目组 2023 *Global Engineering Fronts* 一文报道，高速飞行器技术是 2023 年全球机械与运载工程研究领域最受关注的技术^[11]（见表 1）。高速飞行器具备打击速度快、攻击范围广、对抗能力强以及毁伤效果高的特点，被军事专家称为继螺旋桨、喷气推进器之后航空史上的第三次革命性成果，是各大军事强国竞相发展的武器之一^[12]。作为一种新质装备，高速飞行器是引领新一代攻防对抗体系变革的跨越式武器。自古以来，“矛与盾”之争始终贯穿了武器装备的发展历程^[13]。近年来，世界各国高速飞行器的开发和部署工作持续推进，如何防御该类目标成为当前各国试图探索的重要问题^[14-15]。

表 1 机械与运载工程领域 2023 年排名前 10 工程研究前沿

Tab. 1 Ranked top 10 engineering research frontiers in the field of mechanical and transportation engineering in 2023

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引次数	篇均被引频次	平均出版年
1	高速飞行器技术	50	4 930	98.60	2 018.7
2	低碳及零碳燃料发动机技术	47	4 429	94.23	2 018.8
3	动态可重构移动微型机器人集群	11	870	79.09	2 019.1
4	柔性自供电可穿戴传感器	30	2 218	73.93	2 019.8
5	对抗性环境自动驾驶智能性能测试	11	337	30.64	2 019.7
6	多材料 4D 打印	32	736	23.00	2 020.4
7	水下自主航行器无线充电系统	13	337	25.92	2 020.2
8	血管介入手术机器人系统	18	377	20.94	2 020.3
9	基于迁移学习的机械故障诊断	12	328	27.33	2 021.0
10	机器人铣削和磨抛	41	1 717	41.88	2 019.9

作为防御体系中不可或缺的一部分，防御弹是对抗策略的最终执行者。从防御制导律角度来看，目前针对高速飞行器的对抗存在以下三方面的局限：

1) 防御态势狭窄。高速飞行器推动战争进入“秒杀”级别时代，导致防御方响应时间短、防御窗口小。在不理想的态势下，防御弹的响应窗口稍纵即逝，一旦防御失败，高速飞行器将会对对抗目标造成毁灭性打击^[3]。只有占据理想的态势，制导律才能发挥出最佳的防御性能^[16]。

2) 速度劣势明显。以吸气式高速飞行器为例，该类目标的飞行高度一般在 20 ~ 30 km，在该

飞行高度，大气密度稀薄，气动效应不明显，所有飞行器的可用过载均受限。在过载能力相当的情况下，现阶段防御弹的飞行速度一般不超过 $4Ma$ ^[17]，与高速飞行器相比，具有明显的速度劣势。该劣势能够大幅度压缩防御弹的可响应区，降低防御概率。此外，高速飞行器一旦机动变轨，将更容易加快防御弹视线角速率的发散，进一步压缩其响应区，极易导致防御任务失败。

3) 单弹防御力弱。单枚导弹受自身性能限制，难以高效防御高速机动目标。一方面，单枚导弹的可响应区域有限，难以对高速飞行器的大飞行包线实现有效覆盖；另一方面，单枚导弹的探测

能力有限,难以精准获取态势信息,容易丢失目标。

综上所述,围绕高速飞行器防御需求开展制导律设计研究,有助于提升防御系统在高动态环境下的响应能力与鲁棒性,并为相关防御体系的性能提升提供重要支撑。

2 临近空间防御制导律研究现状

制导律是导弹制导系统的核心。导弹根据实时获得的信息生成制导指令,并以适当的方式导引其到达目标,甚至满足特定约束条件^[18]。因此,制导律的性能在一定程度上决定了导弹防御的性能。在临近空间防御对抗中,弹目相对运动速度快,防御窗口小,极大地压缩了防御方的响应时间^[19]。导弹要想在如此短的时间内实现对目标的有效杀伤,对制导律提出了较高的要求。在此背景下,导弹制导律呈现从基于单弹制导律到基于多弹协同制导律的演变、基于经典制导律与基于现代控制理论制导律相结合的特点。

2.1 基于单弹的制导律

2.1.1 经典制导律

追踪法、前置角法、平行接近法、三点法和比例导引(proportional navigation guidance, PNG)法等^[20]是经典制导律的主要方法,其中比例导引法因其具有结构简单、鲁棒性强、易于实施等优点而在工程实践中得以广泛应用。文献[21]基于高抛弹道防御思路,将导弹抛射到较高的空域,设计了一种修正比例导引(amendatory proportional navigation guidance, APNG)律实现对高速飞行器的精准防御。文献[22]提出了空基防御高速飞行器的复合制导律,基于传统比例导引律,考虑导弹末端的落角约束,并充分利用导弹中制导段过载承受能力,有效加快了导弹达到期望末视线角的速度,能够对典型机动目标实施有效防御。文献[23]基于扩展比例导引(extended proportional navigation guidance, EPNG)律,采用模糊逻辑理论,在防御过程中使导弹能够有效跟踪弹目视线角速率变化及高速飞行器的机动加速度,从而实现高效防御。文献[24]提出了一种基于真比例导引(true proportional navigation guidance, TPNG)律和微分几何的组合制导律,可以加速视线角速率的收敛速度,在较短时间内精准防御高速飞行器,降低其逃逸的可能性。

然而,基于比例导引的制导律虽可以有效对抗静止或匀速运动目标,但对于高速飞行器,其在防御过程中很可能会出现导弹过载饱和现象,使

得视线角速率发散,从而导致防御任务失败。

2.1.2 基于滑模控制方法的制导律

对于满足匹配条件的有界模型不确定性和外界干扰,滑模控制具有结构简单、易于实施、响应快速等优点^[25-27],具备较好的鲁棒性,因而被广泛用于导弹制导律设计。文献[28]提出了一种具有终端攻击角约束的滑模制导律,该制导律改进了一种快速收敛非奇异终端滑模控制算法,具有非奇异、有限时间收敛的特点。针对高速飞行器防御问题,通过设计有限时间干扰观测器,文献[29]提出了一种顺轨防御滑模制导律,充分考虑了导弹导引头的动态特性与目标机动特性。在此基础上,文献[30]将分数阶算子引入滑模面,设计了小弹目速度比防御高速飞行器分数阶滑模制导律。与整数阶滑模制导律相比,该制导律既可以保证防御精度,还可以节省导弹的能量消耗。

然而,基于滑模控制方法的制导律的参数选取比较困难,并且在制导过程中,制导指令的抖振现象是很难避免的。此外,基于滑模控制方法的制导律大多需要较为精确的目标机动信息,亦没有考虑性能指标的最优特性来保证导弹能够在中远程距离对目标实行防御任务^[31]。

2.1.3 基于最优控制方法的制导律

相比于经典制导律,基于最优控制理论设计制导律可以在保证制导精度的基础上,进一步优化导弹的各项性能指标,例如防御时间最短、能量消耗最低等,同时,可以考虑多种终端约束条件,以满足不同的防御场景需求,例如攻击角和过载约束等^[32-34]。文献[35]利用小角度假设,提出了一种同时兼顾攻击时间和攻击角约束的最优制导律。通过在得到的最优制导律中引入反馈控制器,实现了攻击时间和攻击角约束要求,解决了制导律奇点问题。针对机动目标防御问题,文献[36]在PNG的基础上引入了偏置项,设计了一种考虑避障的线性二次最优控制制导律。

然而,基于最优控制方法的制导律一般是建立在目标运动已知的情况,而实际上目标会通过机动来实现一定程度的自我保护,避开导弹的攻击。此外,基于最优控制方法的制导律大多建立在线性化模型的基础上,这种线性化模型与实际制导模型存在较大的差异,在实际应用中容易造成制导精度显著下降的现象。

2.1.4 基于微分对策方法的制导律

微分对策理论的出发点是解决动态博弈问题,追逃问题作为一种典型的动态博弈问题,目标尝试以最佳策略逃离导弹的攻击,而导弹则总是

尝试以最佳策略攻击目标^[37-39]。文献[40]应用目标方位信息来减小目标加速度的可达集,提出了面向水平面内的短程空-空防御场景的微分对策制导律,优化了零控脱靶量矫正估计的计算。文献[41-42]通过对速度可控导弹的制导模型进行线性化,设计了微分对策制导律,并设计了带有攻击角约束的微分对策性能指标。文献[43]针对小弹目速度比防御高速飞行器问题,利用非线性微分对策理论将高速飞行器防御问题转化为代数黎卡提方程和状态依赖参数(state-dependent coefficient, SDC)的求解,给出了基于状态依赖黎卡提方程方法微分对策制导律的解析形式。该制导律在计算过程中综合考虑了导弹和目标之间的运动,且不需要计算导弹剩余飞行时间。

然而,在实际防御过程中,上述方案多依赖简化动力学模型与完全信息假设,难以充分刻画高机动、不确定扰动及多约束条件下的复杂对抗关系;同时实时求解计算量较大,对参数敏感,导致在强机动与高动态变化场景中的鲁棒性与工程适用性仍存在不足。因此,基于微分对策方法的制导律在制导精度方面可能无法得到保证。

2.1.5 基于模糊逻辑方法的制导律

模糊控制作为智能控制方法的典型代表,通过模糊语言进行模糊化推理,可近似表示出难以建立精确数学模型的非线性系统,实现对非线性系统的精确控制,具备较强的鲁棒性^[44-46]。文献[47]利用模糊控制理论对普通滑模面参数进行自适应更新,设计了一种复合制导律,该制导律可以自适应补偿制导系统未建模动力学部分的影响并缓解制导指令的抖动现象。文献[48]提出了一种基于模糊控制理论的防御高速飞行器制导律,该制导律能够在导弹进入末制导段之前提供近迎头的防御条件,比 PNG 具有更小的脱靶量和更广的防御范围。在此基础上,文献[49]通过设计模糊开关点,提出了一种两阶段制导律。该制导律对目标机动的敏感性较低,可以同时平滑制导指令分布和提升制导精度。文献[50]以模糊和博弈理论为基础,通过导弹-高速飞行器策略集及多属性评估模型获得满足约束的均衡策略模型,设计了一种高速目标分阶段模糊博弈防御策略。文献[51]针对机动目标,采用自适应神经网络对目标机动引起的外界干扰信息进行补偿,提出了一种考虑导弹可用过载和自动驾驶动力学特性的模糊滑模控制制导律。

然而,模糊控制方法尚缺乏系统性,导弹在实

际运动过程中,其自身的运动状态受环境、气候、目标、执行机构等因素的共同影响,简单的模糊处理将导致制导精度降低和系统动态品质变差;此外,模糊控制规则大多基于专家的经验 and 知识,建立了一个描述人类的行为及决策分析的自然架构,它的正确与否直接影响到制导系统的应用效果。

2.1.6 基于神经网络控制方法的制导律

神经网络控制一般是指在控制系统中以神经网络为工具,以神经元为基本节点,对难以精确描述的复杂的非线性对象进行建模,实现非线性控制的方法^[52-54]。文献[55]通过假设目标加速度信息为有界干扰,研究了基于模型预测的神经网络末制导律设计问题。该制导律设计过程可以被转化为一个受限的二次规划问题,利用线性变分不等式和对偶神经网络对制导律的解析解进行求解。针对防御具有固定机动能力的目标,文献[56]利用神经网络控制方法进行末制导律设计,仿真结果表明当导弹沿防御轨迹的转移增量速度变化最小时,该制导律可以优化对抗过程中导弹的尺寸和重量。文献[57]针对高速机动目标,设计了考虑自动驾驶仪动态特性和攻击角度约束的有限时间制导律。该制导律利用反步法,设计了虚拟控制指令,通过设计非线性一阶滤波器,克服了传统反步法的“差分扩张”问题。在此基础上,文献[58]将该制导律扩展到三维空间,设计了一种快速非奇异终端滑模面和自适应律来补偿径向基函数神经网络对目标机动信息的估计误差,提高了制导系统的收敛速度。

虽然神经网络控制方法可以在一定程度上提升导弹制导性能,但是离线训练方式设计的制导律对新的目标信息、环境信息等较为敏感,容易导致制导性能下降甚至无法完成对抗任务;而对于在线实时训练方式设计的制导律,神经网络在训练时处于大规模的状态空间中,对弹载计算资源的配置要求较高,容易导致神经网络收敛效率低下。

2.2 基于多弹协同的制导律

近年来,随着网络中心战、马赛克战、联合全域作战等对抗体系概念的丰富和发展,智能化战争初现端倪,未来对抗模式必将是体系之间的对抗^[59-62]。因此,“以量取胜”和“以劣胜优”的多弹协同对抗方式受到了广泛关注(见图 1),如何利用协同对抗样式来铸炼新质战斗力已成为各军事大国导弹武器系统发展的新方向和新竞争点^[63-66]。

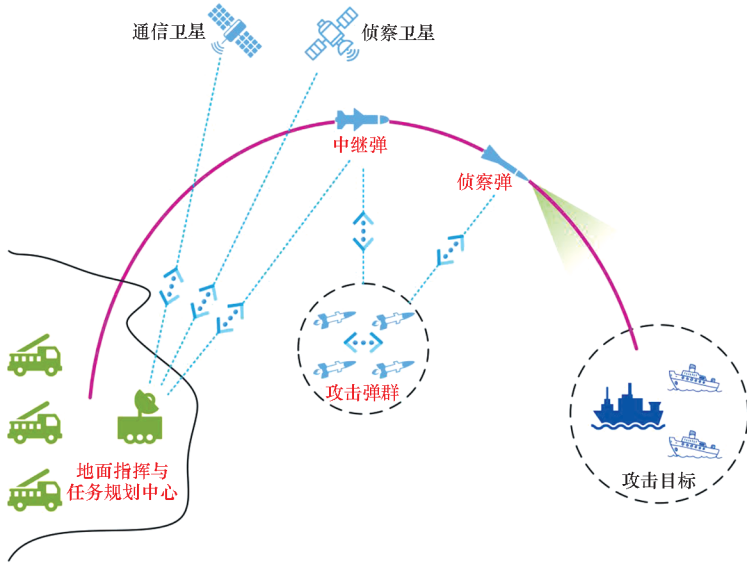


图 1 多弹协同运用场景

Fig. 1 Conceptual diagram of multi-missile cooperative operations

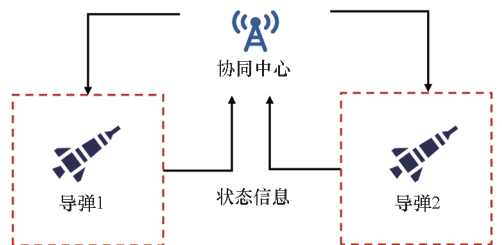
协同对抗中通过将多枚导弹构成一个信息共享、功能互补、战术协同的对抗编队,利用群体优势,对敌防御体系和目标实施全方位、多层次打击,从而提升整体的打击能力^[67-70],这也是制导领域近年来的重要发展方向。根据弹间信息交互方式的不同,协同制导可以分为开环协同与闭环协同两种方式。

在开环协同方式下,导弹间无信息交互,导弹无法感知和利用他弹的状态信息,仅依靠发射前预先设定的期望值来进行多弹协同,又称作攻击时间控制制导 (impact time control guidance, ITCG),该概念最早由 Jeon 等提出^[71-72]。文献[71]在比例导引律的基础上,对弹目相对运动方程进行了线性化处理,增加了与攻击时间误差相关的附加项,确保导弹可以按照期望攻击时间攻击舰船目标。在此基础上,文献[72]在制导指令中增加了和攻击角度相关的附加项,使得导弹编队同时能够以期望的攻击时间和攻击角度攻击舰船目标。基于最优控制方法,文献[73]提出了一种二次运动学近似的攻击时间制导律,该制导律的二次运动学近似解和非线性运动学的解析解高度吻合,并且具有能量最优的特点。文献[74]基于反步控制和虚拟目标点方法,设计了一种攻击时间可调的制导律,并考虑了导引头视场角的约束,拓展了制导律的工程应用价值。文献[75]基于不完备函数理论,对传统导弹剩余攻击时间的计算方法进行改进,提出了一种满足 Lyapunov 稳定性的攻击时间制导律。

然而,由于导弹编队中各成员缺乏信息交互,

本质上开环协同中导弹在飞行过程中是各自独立完成制导任务,无法结合外界环境和其他导弹的运动状态及时地调整自身飞行状态,仅可实现终端状态协同。此外,对于高速飞行器,防御时间本身就在“秒”级单位,很难精准地为每一枚导弹设定期望的攻击时间。

与开环协同相比,在闭环协同制导过程中,弹间能进行实时的信息交互和信息共享,较大提升了协同的准确度和完成度^[76]。根据导弹编队中各成员通信连接方式的不同,闭环协同可以分为集中式和分布式两大类(见图 2)。Jeon 等^[77]在比例导引律的基础上,将导弹编队中各成员的剩余飞行时间和制导参数结合,从而实时调整每枚导弹的飞行状态,确保所有导弹在同一时间攻击目标。在此基础上,Chen 等^[78]对原始协同制导律进行改进,克服了导弹前置角在 0 附近时,制导指令出现奇点的现象。在保证导弹编队内局部通信和传统比例导引律的基础上,邹丽等^[79]设计了一种自适应可变系数的异构协同制导律,该制导律具有通信信息量少、制导精度高等优点。



(a) 集中式协同架构

(a) Centralized cooperative architecture

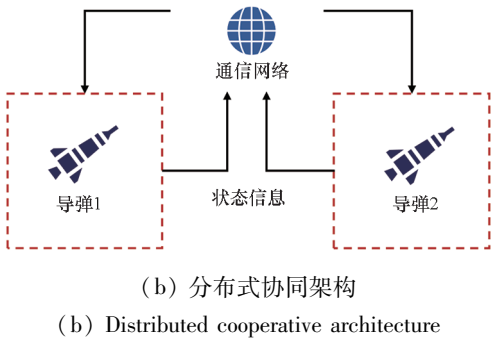


图 2 闭环协同制导主要模式

Fig. 2 Main modes of closed-loop cooperative guidance

尤浩等^[80]基于固定时间一致性和滑模控制理论,设计领弹-从弹结构制导律。该制导律在同时满足时间和角度约束条件下,能够削弱制导指令的抖振现象,实现快速收敛,且收敛时间的上界与系统初始状态无关。文献[81-82]基于“两方向”协同制导思想(见图3),将制导模型分解为视线方向和视线法向两个子系统,设计视线方向制导指令以确保导弹编队同时攻击目标,设计视线法向制导指令满足攻击角约束。文献[83]采用领弹-从弹协同架构,由领弹携带导引头探测目标并协同无导引头的从弹,融合预定时间收敛理论、运动伪装技术与快速非奇异终端滑模控制,实现了系统在预定时间内稳定收敛,且领弹具备运动伪装能力以隐蔽探测信息,有效捕获目标。

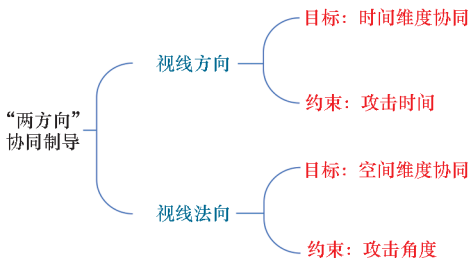


图 3 “两方向”协同制导结构

Fig. 3 “Two-directional” cooperative guidance structure

上述协同制导律主要集中于实现时间维度和空间维度(例如攻击角度)的协同一致,主要面向防御静止、匀速/低速运动目标,并不适用于高速飞行器和导弹之间的攻防对抗过程,因此,在对该类机动目标的防御中,采用合适的协同制导策略就成为协同制导的关键。目前,在对机动目标协同制导方面主要有如下一些研究:①基于预测制导思想^[84],把对机动目标的协同制导问题转化为对静止、匀速/低速目标的协同制导问题;②基于生物群体协作机理^[85-86],在目标逃逸方向将多枚导弹构建形成合适的围捕构型,从而实现机动目标的围捕防御(见图4);③基于滑模控制或自抗

扰方法^[87-90],实时估计和补偿目标加速度信息,从而把目标加速度对防御任务的影响降低;④基于微分对策或协同博弈方法^[91-93],结合机动目标防御的博弈对抗特点,从而对协同制导律进行求解。

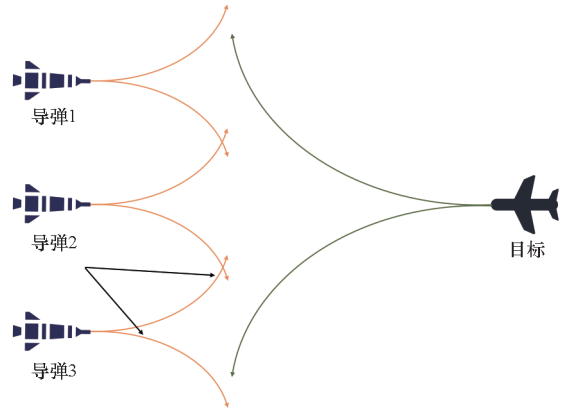


图 4 围捕防御示意图

Fig. 4 Schematic diagram of encirclement and defense

然而,上述方法中均未考虑导弹在防御高速飞行器时自身面临的真实环境的效能约束,这些约束条件将直接影响防御精度和制导性能。现有研究表明,在防御机动目标时,导弹自身必须具有数倍于目标的可用过载优势,才能保证防御任务成功^[94-96]。随着军事科学技术的不断发展,高速飞行器性能不断提升,机动策略逐渐丰富,这必然对导弹性能和制导律提出了很高要求,导致研制难度大、成本高。

总的来看,协同制导是目前的研究热点,针对静止目标、匀速直线或者低速弱机动目标的协同制导律研究较多,虽然部分国家在工程实践上也进行了相关探索,但针对高超声速目标协同制导的理论研究仍较少。随着计算机技术、探测技术、无线通信技术的发展,目前多导弹协同制导的硬件条件取得了一定建设基础,亟须发展协同制导新技术、新理论。

2.3 临近空间防御制导律现状分析

高速飞行器的出现彻底打破了传统空天防御之间的界限,推动战争进入高速、高对抗时代,现有高速飞行器防御制导律梳理分析如图5所示,单枚导弹对此类目标的防御难度大。尽管多导弹协同制导已经取得了较为丰富的设计方法和应用成果,但是考虑到导弹制导问题本身所具有的一些特点和难点,现有协同制导方案在防御该类目标中仍然存在着一些不足之处,主要体现在以下几个方面:

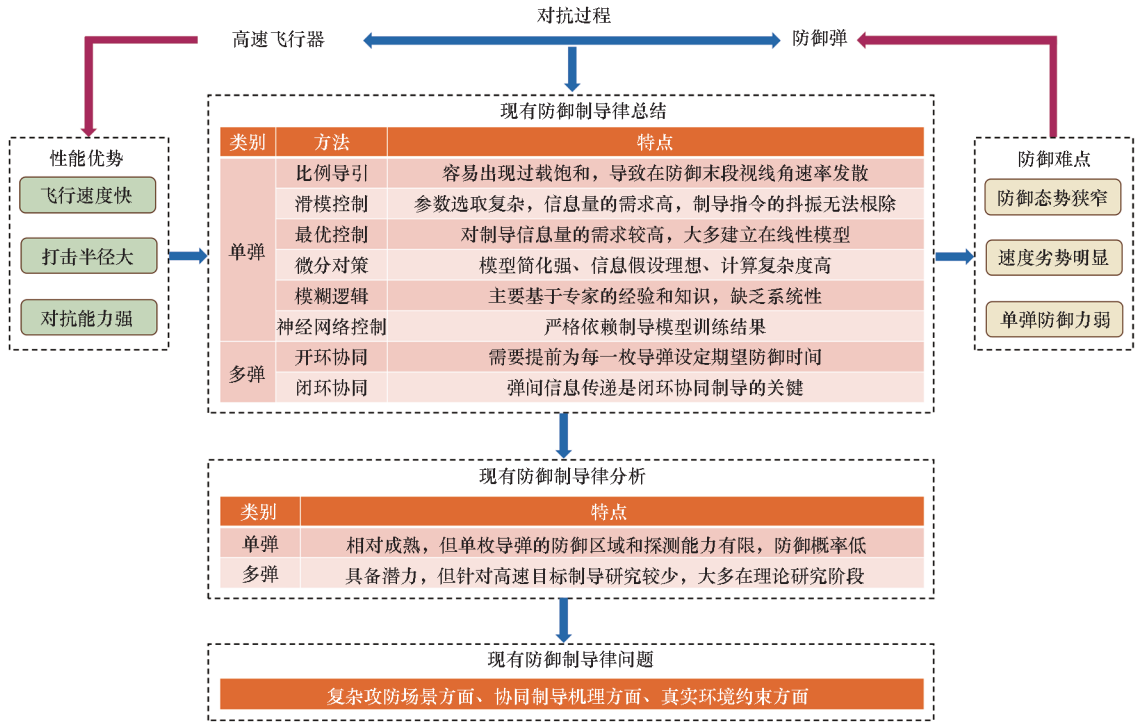


图5 现有防御制导律特点分析

Fig. 5 Analysis of the characteristics of existing defense guidance laws

1) 复杂攻防场景方面: 难以适应高强度动态对抗。高速飞行器具备飞行速度快、打击半径大、对抗能力强等突出优势, 使得发展有效的防御策略一直都是导弹精确制导领域的难题。现有协同制导方案对静止或低速弱机动目标具有较好的防御性能, 但由于高速飞行器和导弹之间的攻防对抗过程处于强时变、强耦合、多约束、高动态状态, 现有方案对其仍不具备实用性。此外, 随着军事科学技术的不断发展, 高速飞行器的飞行速度更快、机动能力更强、对抗策略更丰富, 亟须赋予导弹编队“因敌生变”的智能化对抗能力。

2) 协同制导机理方面: 过度强调多弹的同时到达。当前, 多数协同制导律通过选取协调变量, 利用弹间通信网络, 在多智能体一致性协议的作用下, 使得多枚导弹可以在同一时间攻击目标。然而, 由动量定理可知, 一旦有一枚导弹成功防御高超声速目标, 就足以对其造成有效毁伤。此外, 在实际飞行过程中多枚导弹之间要保持稳定可靠的通信是十分困难的, 必然存在通信延迟、丢包、跳变、通信中断以及通信网络动态切换等复杂情况, 弹间实际能共享的数据量是十分有限的。实际上, 精准防御才是真正的目标, 过度强调同时到达不仅对导弹性能提出了更高的要求, 还给防御任务带来不必要的通信负担。未来体系化智能攻防对抗的迅速发展, 更是对临近空间网络通信限

制条件下的协同制导机理提出了新要求, 亟须探索面向高速飞行器的协同防御机制。

3) 真实环境约束方面: 未考虑复杂环境效能限制。高速飞行器速度优势明显, 使防御过程中的感知、决策与执行链路面临更高时效性要求, 防御响应时间和窗口明显受限。在不理想的防御态势下, 导弹编队的防御窗口稍纵即逝。从个体层面来看, 高速飞行器在临近空间环境中飞行时, 受稀薄大气条件影响, 其气动效能与可用过载均受到一定限制; 在过载能力相当的情况下, 现阶段防御弹的飞行速度一般不超过 $4Ma^{[17]}$, 具有明显的速度劣势, 这大幅度压缩了导弹的可防御区, 降低了成功防御的概率; 在末制导阶段, 导弹的推力控制能力有限, 受空域环境和目标特性影响, 其面临着防御态势狭窄、速度劣势明显、防御能力不足等难点。从群体层面来看, 导弹的数量并不是越多越好, 一味地增加导弹数量将会增加对抗成本, 不能充分发挥导弹编队的数量优势。此外, 现阶段多数协同制导律要求导弹具备推力控制能力。因此, 从制导律设计角度来看, 亟须发展面向真实临近空间对抗环境效能约束的协同制导理论。

3 未来展望

为进一步提高应对高速飞行器威胁的防御制导能力, 未来需在以下几个方向开展深入研究和

重点突破。

3.1 智能化筑基:制导智能化与自适应

将人工智能技术深度融入导弹制导系统,是提高复杂对抗环境下防御效能的必然趋势。一方面,可利用深度学习、强化学习等方法实现制导律参数的在线调节与优化,使导弹能够针对不同目标特性自适应地调整防御策略;另一方面,发展基于大数据和机器学习的目标意图识别与轨迹预测技术,可赋予制导系统“预测性”能力,从而提前规划最优防御路线。例如,当高速飞行器进行突发机动时,制导系统能自动更新防御轨迹,动态优化攻防态势。智能化与自适应制导技术的融合,将有助于克服传统固定制导律的局限,使导弹在动态战场环境中始终保持高效的防御性能。

3.2 协同化赋能:多源信息与协同制导

面向未来体系化防空作战,防御制导律的发展需更加注重传感器信息融合与多平台协同。通过融合来自卫星、预警机、雷达等多源探测器的信息,可大幅提升对高速目标的早期预警和精确跟踪能力,为制导决策提供更可靠的态势感知支持。多平台的信息共享还能增强导弹编队的协同感知,有效解决单平台视野受限的问题。同时,需要研究分布式导弹协同制导策略,包括异构导弹的任务分配、协同防御的队形控制以及通信受限条件下的协同方法。通过多源信息融合与导弹协同作用的紧密结合,构建“探测—决策—制导”一体化的防御体系,将极大提升对高速机动目标的综合防御能力。

3.3 鲁棒化护航:复杂环境与鲁棒制导

真实对抗环境中的不确定因素和干扰条件要求未来的防御制导律具备更强的鲁棒性和容错性。一方面,应充分考虑大气稀薄、可用过载低、目标高速机动等临近空间特有的物理约束,在制导律设计中引入相应的安全裕度和约束处理机制;另一方面,针对通信延迟、测量噪声、敌方电子干扰等因素,发展具有容错能力的制导律,如事件触发控制、自适应补偿等,以保证导弹在信息不完美条件下仍能稳定跟踪目标。通过在制导律中显式建模各类环境扰动并优化鲁棒性能,可确保防御导弹在“恶劣”战场环境中保持较高的防御成功率。未来的鲁棒制导理论应与先进的仿真技术结合,针对各种极端工况进行仿真验证,不断提高制导律对不确定环境的适应能力。

3.4 体系化集成:防御体系与多体联动

应对高速飞行器威胁离不开完备的防御体系

支撑,制导律的发展也需要放在体系对抗的高度统筹考虑。如图 6 所示,在总体架构上,应通过多源信息融合构建覆盖临近空间的广域态势感知能力,形成多层级、多视角的信息网络;在能力构建上,应设计跨平台的协同规划机制,使火控指挥与制导单元协同配置、制导决策与不同载体(空基平台、临近空间平台、浮空器^[97-98]等)实现能力互补与策略协同;在效能验证上,依托数字化仿真平台,通过高逼真环境还原、场景推演与体系级数字孪生,实现对防御制导策略、平台配置方案及整体体系效能的动态迭代优化。此外,为支撑多平台协同体系的可扩展性与演进性,体系构建应坚持开放式与标准化原则,确保未来新型平台和算法模块能够以模块化方式无缝融入体系框架,从而逐步形成由多类型平台组成的临近空间综合防御体系^[99-101]。

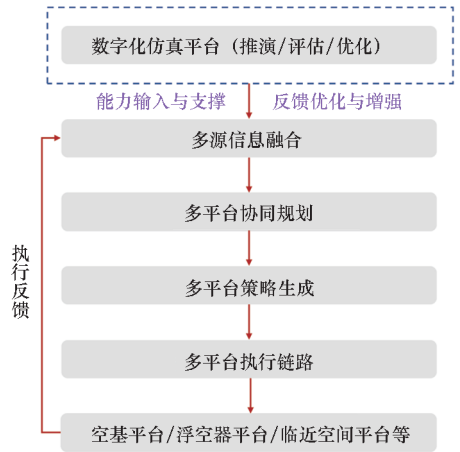


图 6 现面向体系防御的多平台协同框架
Fig. 6 Multi-platform cooperation framework for system defense

4 总结

高速飞行器的快速发展及实际运用,对现有防空反导体系构成了巨大挑战,高速目标的有效防御已刻不容缓。本文围绕高速飞行器防御制导律的研究现状和存在问题进行了系统综述,并探讨了开展相关研究的局限性,分析了复杂攻防场景、协同制导机理、真实环境约束等方面的不足。

总体而言,大力推进科技创新发展面向高速飞行器的先进防御制导技术,对于丰富精确制导理论和提升防御体系能力具有重要意义。通过充分利用新兴技术加速构建针对高速目标的可靠防御能力,不仅为精确制导领域的基础理论与应用研究提供了新思路、新途径,也将为高速飞行器防御体系建设提供重要支撑。

参考文献 (References)

- [1] 刘双喜, 赵伟, 黄伟, 等. “匕首”高速飞行器在俄乌冲突运用中的分析与启示[J]. 航空兵器, 2026, 33(1): 25-32.
LIU S X, ZHAO W, HUANG W, et al. Analysis and insights on the application of the “Dagger” high-speed vehicle in the Russia-Ukraine conflict[J]. Aero Weaponry, 2026, 33(1): 25-32. (in Chinese)
- [2] 读览. 俄军用“锆石”导弹, 大规模袭击基辅, 乌军爱国防空毫无反应[EB/OL]. (2024-03-29) [2024-04-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1794821519160323493>. Dulan. Russian military launches large-scale strikes on Kyiv using “Zircon” missiles, Ukrainian “Patriot” air defense remains unresponsive. [EB/OL]. (2024-03-29) [2024-04-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1794821519160323493>. (in Chinese)
- [3] LIU S X, YAN B B, HUANG W, et al. Current status and prospects of terminal guidance laws for intercepting hypersonic vehicles in near space: a review [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2023, 24(5): 387-403.
- [4] CHEN J Q, SUN R S, LU Y, et al. Adaptive cooperative game penetration guidance for multiple hypersonic vehicles with performance constraints [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(4): 5538-5555.
- [5] YAN T, JIANG Z J, LI T, et al. Intelligent maneuver strategy for hypersonic vehicles in three-player pursuit-evasion games via deep reinforcement learning [J]. Frontiers in Neuroscience, 2024, 18: 1362303.
- [6] 臧红岩, 王凯, 高长生, 等. 基于滚动时域估计的高超声速飞行器轨迹跟踪[J]. 现代防御技术, 2024, 52(2): 132-144.
ZANG H Y, WANG K, GAO C S, et al. Trajectory tracking of hypersonic vehicles based on moving horizon estimation[J]. Modern Defence Technology, 2024, 52(2): 132-144. (in Chinese)
- [7] 杨光, 万华翔. 高超声速飞行器对战场环境的影响[J]. 飞航导弹, 2020(3): 28-32.
YANG G, WAN H X. Influence of hypersonic vehicle on battlefield environment [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(3): 28-32. (in Chinese)
- [8] 文苏丽, 张宁, 李文杰, 等. 国外飞航导弹及高超声速飞行器未来发展分析[J]. 飞航导弹, 2015(11): 3-12.
WEN S L, ZHANG N, LI W J, et al. Analysis of the future development of international winged missile and hypersonic aircraft[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015(11): 3-12. (in Chinese)
- [9] 刘双喜, 刘世俊, 李勇, 等. 国外高超声速飞行器及防御体系发展现状[J]. 空天防御, 2023, 6(3): 39-51.
LIU S X, LIU S J, LI Y, et al. Current developments in foreign hypersonic vehicles and defense systems[J]. Air & Space Defense, 2023, 6(3): 39-51. (in Chinese)
- [10] 赵鸿燕, 谢邦荣. 国外高超声速防御武器发展研究[J]. 航空兵器, 2023, 30(5): 11-16.
ZHAO H Y, XIE B R. Research on development of hypersonic defense weapons abroad [J]. Aero Weaponry, 2023, 30(5): 11-16. (in Chinese)
- [11] YAN J L, MU Z R, ZHENG W J. 2023 global engineering fronts[J]. Engineering, 2023, 31(12): 4-7.
- [12] 李建平, 宋文艳. 超燃冲压发动机隔离段流动特性研究[J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(2): 75-78.
LI J P, SONG W Y. Research on flow characteristic of isolator in scramjet [J]. World Sci-Tech R & D, 2006, 28(2): 75-78. (in Chinese)
- [13] 王鹏飞, 罗畅, 白炎. 临近空间高超声速飞行器进展及防御策略分析[J]. 现代防御技术, 2021, 49(6): 16-21, 28.
WANG P F, LUO C, BAI Y. Development of near space hypersonic vehicles and defense strategies analysis [J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(6): 16-21, 28. (in Chinese)
- [14] 尹中杰, 刘凯, 朱柏羊, 等. 面向临近空间目标拦截的预测命中点设计方法[J]. 宇航学报, 2020, 41(9): 1184-1194.
YIN Z J, LIU K, ZHU B Y, et al. Method of predicted impact point planning for near-space target interception[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(9): 1184-1194. (in Chinese)
- [15] 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.
ZHANG D Y, LEI H M, SHAO L, et al. Interceptor trajectory programming for near space hypersonic target [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(3): 91-96. (in Chinese)
- [16] 谭一廷, 荆武兴, 高长生, 等. 高超声速机动目标拦截多约束解析捕获区[J]. 航空学报, 2023, 44(22): 328436.
TAN Y T, JING W X, GAO C S, et al. Multiple constrained analytical capture region for hypersonic maneuvering target interception [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(22): 328436. (in Chinese)
- [17] 王铮, 邢晓露, 闫天, 等. 高超声速飞行器突防制导的发展现状与未来发展方向[J]. 飞航导弹, 2021(7): 18-24, 67.
WANG Z, XING X L, YAN T, et al. The current development status and future development direction of hypersonic vehicle penetration guidance [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(7): 18-24, 67. (in Chinese)
- [18] LU P. What is guidance [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2021, 44(7): 1237-1238.
- [19] 梁子璇, 郭栋, 朱圣英, 等. 高超声速目标拦截末段交战窗口快速生成方法[J]. 宇航学报, 2021, 42(3): 333-343.
LIANG Z X, GUO D, ZHU S Y, et al. Rapid generation of terminal engagement window for interception of hypersonic targets [J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(3): 333-343. (in Chinese)
- [20] 方群, 朱战霞, 孙冲. 飞行器飞行动力学与制导[M]. 2版. 西安: 西北工业大学出版社, 2021.
FANG Q, ZHU Z X, SUN C. Aircraft flight dynamics and guidance [M]. 2nd ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2021. (in Chinese)
- [21] 杨佳, 尉建利, 闫杰. 采用高抛弹道的反临拦截器制导律设计[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(8): 114-118.
YANG J, WEI J L, YAN J. Guidance law for near space target interceptor using parabolic trajectory [J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(8): 114-118. (in Chinese)
- [22] 于志鹏, 陈刚, 李跃明. 反吸气式临近空间飞行器空基拦

- 截弹制导律设计[J]. 飞行力学, 2017, 35(1): 66 - 69, 74.
- YU Z P, CHEN G, LI Y M. Design of air-based interceptor's guidance law for airbreathing hypersonic vehicle in near space[J]. *Flight Dynamics*, 2017, 35(1): 66 - 69, 74. (in Chinese)
- [23] 邵杰, 刘佳琪, 张超, 等. 基于模糊逻辑的导弹扩展比例导引律[J]. *导弹与航天运载技术*, 2016(2): 66 - 71. SHAO J, LIU J Q, ZHANG C, et al. Extended proportional guidance law of missile based on fuzzy logic[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2016(2): 66 - 71. (in Chinese)
- [24] ZHAO B Q, DONG X W, LI Q D, et al. A combined guidance law for intercepting hypersonic large maneuvering targets [C]//*Proceedings of 2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2020: 1425 - 1430.
- [25] 焦思洋, 潘涛, 孔哲, 等. 基于滑模变结构的高速动能弹制导控制算法[J]. *现代防御技术*, 2022, 50(2): 53 - 60. JIAO S Y, PAN T, KONG Z, et al. Arithmetic on guidance and control for hyper velocity kinetic energy missile based on sliding-mode variable structure control[J]. *Modern Defence Technology*, 2022, 50(2): 53 - 60. (in Chinese)
- [26] LIU S X, LIN Z H, HUANG W, et al. Adaptive sliding mode attitude control of two-wheeled robots for planetary auxiliary: from theory to applications [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 151: 109332.
- [27] YONEZAWA H, YONEZAWA A, KAJIWARA I. Experimental verification of model-free active damping system based on virtual controlled object and fuzzy sliding mode control[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 224: 111961.
- [28] ZHANG K Q, YANG S C. Fast convergent nonsingular terminal sliding mode guidance law with impact angle constraint [C]//*Proceedings of 2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, 2018: 2963 - 2968.
- [29] ZHU C Q. Design of finite-time guidance law based on observer and head-pursuit theory [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 235(13): 1791 - 1802.
- [30] LIU S X, YAN B B, ZHANG X, et al. Fractional-order sliding mode guidance law for intercepting hypersonic vehicles[J]. *Aerospace*, 2022, 9(2): 53.
- [31] 孙景亮, 刘春生. 基于自适应动态规划的导弹制导律研究综述[J]. *自动化学报*, 2017, 43(7): 1101 - 1113. SUN J L, LIU C S. An overview on the adaptive dynamic programming based missile guidance law [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(7): 1101 - 1113. (in Chinese)
- [32] AI X L, WANG L L, YU J Q, et al. Field-of-view constrained two-stage guidance law design for three-dimensional salvo attack of multiple missiles via an optimal control approach [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 85: 334 - 346.
- [33] BAI Y, ZHOU D, HE Z. Optimal pursuit strategies in missile interception: mean field game approach [J]. *Aerospace*, 2025, 12(4): 302.
- [34] 李宁波, 雷虎民, 周颀, 等. 基于邻域最优控制的跟踪制导律设计[J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(1): 46 - 51. LI N B, LEI H M, ZHOU J, et al. Design of tracking guidance law based on neighboring optimal control [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(1): 46 - 51. (in Chinese)
- [35] CHEN X T, WANG J Z. Optimal control based guidance law to control both impact time and impact angle [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 454 - 463.
- [36] WEISS M, SHIMA T. Linear quadratic optimal control-based missile guidance law with obstacle avoidance [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(1): 205 - 214.
- [37] XIE J L, MA K M. Cooperative differential game guidance laws for target with multiple defenders against missile [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(5): 11657 - 11668.
- [38] BASHIRI M, BINAZADEH T, AZHDARI M. A Nash differential game approach in observer-based LQR controller design [J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2025, 46(4): 1388 - 1401.
- [39] 毛柏源, 李君龙, 张锐, 等. 拦截高速机动目标的捕获区及微分对策导引律 [J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(3): 165 - 174. MAO B Y, LI J L, ZHANG R, et al. Capture zones and differential game guidance law for high-speed maneuvering target interception [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(3): 165 - 174. (in Chinese)
- [40] OSHMAN Y, RAD D A. Differential-game-based guidance law using target orientation observations [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 316 - 326.
- [41] 花文华, 陈兴林. 变速导弹有界控制非线性微分对策制导律[J]. *控制与决策*, 2011, 26(12): 1886 - 1890. HUA W H, CHEN X L. Nonlinear bounded-control differential game guidance law for variable-speed missiles[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(12): 1886 - 1890. (in Chinese)
- [42] 花文华, 刘杨, 陈兴林, 等. 具有终端约束的线性二次型微分对策制导律[J]. *兵工学报*, 2011, 32(12): 1448 - 1455. HUA W H, LIU Y, CHEN X L, et al. Linear quadratic differential game guidance law with terminal constraints[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(12): 1448 - 1455. (in Chinese)
- [43] 刘双喜, 王一冲, 朱梦杰, 等. 小弹目速度比下拦截高超声速飞行器微分对策制导律研究[J]. *空天防御*, 2022, 5(2): 49 - 57. LIU S X, WANG Y C, ZHU M J, et al. Research on differential game guidance law for intercepting hypersonic vehicles with small missile-to-target speed ratio [J]. *Air & Space Defense*, 2022, 5(2): 49 - 57. (in Chinese)
- [44] VLADOV S. Cognitive method for synthesising a fuzzy controller mathematical model using a genetic algorithm for tuning [J]. *Big Data and Cognitive Computing*, 2025, 9(1): 17.
- [45] 周锐, 张宇航, 熊伟, 等. 一种基于模糊控制的平稳滑翔再入制导律[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(2): 197 - 206. ZHOU R, ZHANG Y H, XIONG W, et al. A reentry steady glide guidance algorithm based on fuzzy control [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(2): 197 - 206. (in Chinese)

- [46] BOUNEMEUR A, CHEMACHEMA M. Finite-time output-feedback fault tolerant adaptive fuzzy control framework for a class of MIMO saturated nonlinear systems[J]. *International Journal of Systems Science*, 2025, 56(4): 733–752.
- [47] ELHALWAGY Y Z, TARBOUCHI M. Fuzzy logic sliding mode control for command guidance law design[J]. *ISA Transactions*, 2004, 43(2): 231–242.
- [48] LIN C L, CHEN Y Y. Design of fuzzy logic guidance law against high-speed target[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, 23(1): 17–25.
- [49] HASSAN L, SADATI S H, KARIMI J. Integrated fuzzy guidance law for high maneuvering targets based on proportional navigation guidance[J]. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 2013, 9(4): 204–214.
- [50] 王鑫, 闫杰, 孟廷伟. 高速目标分阶段博弈拦截制导策略[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 325598.
WANG X, YAN J, MENG T W. High-speed target multi-stage interception scheme based on game theory[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 325598. (in Chinese)
- [51] WANG Y L, TANG S J, SHANG W, et al. Adaptive fuzzy sliding mode guidance law considering available acceleration and autopilot dynamics[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 2018(1): 6081801.
- [52] HNG LIM W, SFARRA S, HSIAO T Y, et al. Physics-informed neural networks for defect detection and thermal diffusivity evaluation in carbon fiber-reinforced polymer using pulsed thermography[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1–10.
- [53] TAO H, JIA Z X, ZHU B, et al. REMOVED: curriculum learning-based missile guidance law for intercepting maneuvering targets with high-speed[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025, 155: 110948.
- [54] FEDERICI L, BENEDIKTER B, ZAVOLI A. Deep learning techniques for autonomous spacecraft guidance during proximity operations[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2021, 58(6): 1774–1785.
- [55] LI Z J, XIA Y Q, SU C Y, et al. Missile guidance law based on robust model predictive control using neural-network optimization[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2015, 26(8): 1803–1809.
- [56] COTTRELL R G, VINCENT T L, SADATI S H. Minimizing interceptor size using neural networks for terminal guidance law synthesis[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1996, 19(3): 557–562.
- [57] WU G, ZHANG K. A novel guidance law for intercepting a highly maneuvering target[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 2021(1): 2326323.
- [58] WU G, ZHANG K, HAN Z G. Three-dimensional finite-time guidance law based on sliding mode adaptive RBF neural network against a highly manoeuvring target[J]. *The Aeronautical Journal*, 2022, 126(1301): 1124–1143.
- [59] 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.
LIU S X, XU X P, HUANG W, et al. Development and key technologies outlook of foreign multi-missile collaborative projects[J]. *Aero Weaponry*, 2024, 31(6): 1–13. (in Chinese)
- [60] 李风雷, 卢昊, 宋闯, 等. 智能化战争与无人系统技术的发展[J]. *无人系统技术*, 2018, 1(2): 14–23.
LI F L, LU H, SONG C, et al. Development of intelligent warfare and unmanned system technology[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2018, 1(2): 14–23. (in Chinese)
- [61] 孙盛智, 刘玉, 盛碧琦, 等. “马赛克”战运行机制及制胜机理研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2023, 45(2): 150–154.
SUN S Z, LIU Y, SHENG B Q, et al. Research on the operation mechanism and winning mechanism of Mosaic warfare[J]. *Command Control & Simulation*, 2023, 45(2): 150–154. (in Chinese)
- [62] LIU S X, LIN Z H, HUANG W, et al. Current development and future prospects of multi-target assignment problem: a bibliometric analysis review[J]. *Defence Technology*, 2025, 43: 44–59.
- [63] 郑卓, 路坤锋, 王昭磊, 等. 飞行器集群协同控制技术分析与展望[J]. *宇航学报*, 2023, 44(4): 538–545.
ZHENG Z, LU K F, WANG Z L, et al. Analysis and prospect of vehicle swarm cooperative control technology[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(4): 538–545. (in Chinese)
- [64] 孟二龙, 高桂清, 吴鹏程, 等. 智能导弹战发展趋势研究[J]. *飞航导弹*, 2021(9): 26–31.
MENG E L, GAO G Q, WU P C, et al. Research on the development trends of intelligent missile warfare[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(9): 26–31. (in Chinese)
- [65] 岳丽军, 王凡, 赵朝先. 海战场无人作战体系协同运用与指挥控制设想[J]. *指挥控制与仿真*, 2022, 44(4): 1–7.
YUE L J, WANG F, ZHAO C X. Cooperative application and command and control assumption of unmanned combat system in sea battlefield[J]. *Command Control & Simulation*, 2022, 44(4): 1–7. (in Chinese)
- [66] 温广辉, 周佳玲, 吕跃祖, 等. 多导弹协同作战中的分布式协调控制问题[J]. *指挥与控制学报*, 2021, 7(2): 137–145.
WEN G H, ZHOU J L, LYU Y Z, et al. Distributed coordination control in multi-missile cooperative tasks[J]. *Journal of Command and Control*, 2021, 7(2): 137–145. (in Chinese)
- [67] LIU S X, LIN Z H, HUANG W, et al. Technical development and future prospects of cooperative terminal guidance based on knowledge graph analysis: a review[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2025, 26(7): 605–634.
- [68] 张婉滢, 司马珂, 张育禾, 等. 基于近端策略优化的多弹协同围捕机动目标制导控制方法[J]. *空天防御*, 2025, 8(4): 94–103.
ZHANG W Y, SI MA K, ZHANG Y H, et al. The guidance and control method of multi-missile cooperative encirclement of maneuvering targets based on proximal policy optimization[J]. *Air & Space Defense*, 2025, 8(4): 94–103. (in Chinese)
- [69] 马文卉, 刘双喜, 黄伟, 等. 基于收敛性能的多导弹网络化协同制导律综述[J]. *中国科学: 技术科学*, 2025, 55(4): 681–697.
MA W H, LIU S X, HUANG W, et al. Research progress of convergence performance-based networked cooperative guidance laws: a review[J]. *Scientia Sinica: Technologica*,

- 2025, 55(4): 681–697. (in Chinese)
- [70] ZHANG R T, FANG Y W, CHEN Z, et al. Group cooperative midcourse guidance law design considering time-to-go[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2025, 36(3): 835–853.
- [71] JEON I S, LEE J I, TAHK M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(2): 260–266.
- [72] LEE J I, JEON I S, TAHK M J. Guidance law to control impact time and angle[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 301–310.
- [73] MERKULOV G, WEISS M, SHIMA T. Minimum-effort impact-time control guidance using quadratic kinematics approximation [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2022, 45(2): 348–361.
- [74] LEE J Y, KIM H G, KIM H J. Adjustable impact-time-control guidance law against non-maneuvering target under limited field of view [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 236(2): 368–378.
- [75] SALEEM A, RATNOO A. Lyapunov-based guidance law for impact time control and simultaneous arrival[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2016, 39(1): 164–173.
- [76] 姚禹正, 余文斌, 杨立军, 等. 多导弹协同制导技术综述[J]. *飞航导弹*, 2021(6): 112–121.
- YAO Y Z, YU W B, YANG L J, et al. Overview of multi missile cooperative guidance technology [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(6): 112–121. (in Chinese)
- [77] JEON I S, LEE J I, TAHK M J. Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2010, 33(1): 275–280.
- [78] CHEN Y D, WANG J A, WANG C Y, et al. A modified cooperative proportional navigation guidance law[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(11): 5692–5705.
- [79] 邹丽, 孔繁峨, 周锐, 等. 多导弹分布式自适应协同制导方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(1): 128–132.
- ZOU L, KONG F E, ZHOU R, et al. Distributed adaptive cooperative guidance for multi-missile salvo attack [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(1): 128–132. (in Chinese)
- [80] 尤浩, 常新龙, 赵久奋, 等. 带落角约束的新型领弹—从弹固定时间协同制导律[J]. *国防科技大学学报*, 2024, 46(6): 64–76.
- YOU H, CHANG X L, ZHAO J F, et al. Novel leader-following missiles fixed-time cooperative guidance law with impact angle constraints[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, 46(6): 64–76. (in Chinese)
- [81] LIU S X, YAN B B, LIU R F, et al. Cooperative guidance law for intercepting a hypersonic target with impact angle constraint[J]. *The Aeronautical Journal*, 2022, 126(1300): 1026–1044.
- [82] 谭诗利, 雷虎民, 王斌. 高超声速目标拦截含攻击角约束的协同制导律[J]. *北京理工大学学报*, 2019, 39(6): 597–602.
- TAN S L, LEI H M, WANG B. Cooperative guidance law for hypersonic targets with constrained impact angle [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2019, 39(6): 597–602. (in Chinese)
- [83] CHEN W X, GAO C S, JING W X. Three-dimensional distributed cooperative guidance via motion camouflage theory against hypersonic vehicles with speed advantages [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(5): 6869–6882.
- [84] 李继广, 陈欣, 董彦非, 等. 基于协同滤波轨迹预测的机动目标 RTPN 拦截制导律[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(1): 86–96.
- LI J G, CHEN X, DONG Y F, et al. RTPN interception guidance law for maneuvering target based on collaborative filtering trajectory prediction [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(1): 86–96. (in Chinese)
- [85] 于江龙, 董希旺, 李清东, 等. 拦截机动目标的分布式协同围捕制导方法[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 325817.
- YU J L, DONG X W, LI Q D, et al. Distributed cooperative encirclement hunting guidance method for intercepting maneuvering target [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 325817. (in Chinese)
- [86] ZHOU S T, ZHOU D, LI S Y, et al. Three-dimensional cooperative guidance law based on dynamic coverage strategy[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38(10): 103490.
- [87] 汤清璞, 华岳阳, 李国飞, 等. 错误信息注入攻击下对高速目标的多飞行器协同制导方法[J]. *航天控制*, 2025, 43(2): 10–17.
- TANG Q P, HUA Y Y, LI G F, et al. Cooperative guidance method of multiple flight vehicles against high-speed target under false data injection attacks [J]. *Aerospace Control*, 2025, 43(2): 10–17. (in Chinese)
- [88] 张豪, 朱建文, 李小平, 等. 针对高机动目标的深度强化学习智能拦截制导[J]. *北京航空航天大学学报*, 2025, 51(6): 2060–2069.
- ZHANG H, ZHU J W, LI X P, et al. Deep reinforcement learning intelligent guidance for intercepting high maneuvering targets[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 51(6): 2060–2069. (in Chinese)
- [89] 郭正玉, 王超磊, 钱航, 等. 带有攻击角约束的大机动目标协同攻击制导律[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(6): 1257–1265.
- GUO Z Y, WANG C L, QIAN H, et al. Cooperative intercepting guidance law for large maneuvering target with impact angle constraint [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(6): 1257–1265. (in Chinese)
- [90] WANG Z K, FU W X, FANG Y W, et al. Cooperative guidance law against highly maneuvering target with dynamic surrounding attack [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 2021(1): 6623561.
- [91] 胡艳艳, 张莉, 夏辉, 等. 不完全信息下基于微分对策的机动目标协同捕获[J]. *航空学报*, 2022, 43(增刊1): 726905.
- HU Y Y, ZHANG L, XIA H, et al. Cooperative capture of maneuvering targets with incomplete information based on differential game [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(Suppl 1): 726905. (in Chinese)
- [92] 席阿行, 蔡远利. 事件触发机制的多弹分布式微分对策制导律[J]. *控制与决策*, 2024, 39(11): 3745–3754.
- XI A X, CAI Y L. Event-triggered-based distributed differential game guidance laws [J]. *Control and Decision*, 2024, 39(11): 3745–3754. (in Chinese)

- [93] 杜雪松, 张东俊, 诸葛浩. 拦截高超声速飞行器的微分对策制导律[J]. 航天控制, 2024, 42(3): 29-34.
DU X S, ZHANG D J, ZHU GE H. Differential game guidance law for intercepting hypersonic vehicle [J]. Aerospace Control, 2024, 42(3): 29-34. (in Chinese)
- [94] LI J, FENG X H, HE Y C, et al. A coverage-based cooperative detection method for CDUAV: insights from prediction error pipeline modeling[J]. Drones, 2025, 9(6): 397.
- [95] ZHAN Y, WANG L W, ZHOU D. Three-dimensional finite-time optimal cooperative guidance with integrated information fusion observer[J]. Defence Technology, 2025, 46: 12-28.
- [96] RUSNAK I. Acceleration requirements in defense against missile attack [C]//Proceedings of the 47th Israel Annual Conference on Aerospace Science, 2007: 1-16.
- [97] 杨虹, 张雅声, 丁文哲. 飞艇红外探测系统探测高超声速目标性能研究[J]. 中国光学, 2016, 9(5): 596-605.
YANG H, ZHANG Y S, DING W Z. Detectability of airship infrared detection system to hypersonic vehicle[J]. Chinese Optics, 2016, 9(5): 596-605. (in Chinese)
- [98] 谭贤四. 临近空间高超声速目标预警探测若干研究进展[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(6): 625-639, 650.
TAN X S. Research progress on early warning of near space hypersonic targets[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(6): 625-639, 650. (in Chinese)
- [99] 余水明, 晁涛, 梅铮, 等. 高超声速飞行器防御系统的拦截能力评估研究[J]. 空天防御, 2025, 8(5): 25-30.
YU S M, CHAO T, MEI Z, et al. Research on interception capability assessment of hypersonic vehicle defense systems[J]. Air & Space Defense, 2025, 8(5): 25-30. (in Chinese)
- [100] 倪明, 杨阳, 梁壮. 美陆军一体化防空反导系统发展研究与启示[J]. 空天防御, 2025, 8(2): 27-33.
NI M, YANG Y, LIANG Z. Research and implications on the development of the US Army's integrated air and missile defense system[J]. Air & Space Defense, 2025, 8(2): 27-33. (in Chinese)
- [101] WANG F, QU Q K, YANG H, et al. Current status and prospects of guidance techniques for intercepting hypersonic glide vehicles: a review [J/OL]. Defence Technology. (2025-10-15) [2025-12-08]. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.10.009>.