

防空系统总体设计前沿技术研究

陶德智

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：本文系统研究了2021~2026年防空系统总体设计的前沿技术发展。研究表明，近五年，防空系统总体设计聚焦体系化、智能化、高速化、敏捷化四大方向，核心由平台中心向认知中心转变，开放式杀伤网架构、人工智能全链路赋能、高超声速攻防、定向能集成与数字工程成为关键技术。总体设计竞争焦点从单一平台性能转向系统弹性、智能决策速度与跨域协同效率，数字孪生与基于模型的系统工程（MBSE）构成全生命周期数字化设计核心使能器。

【关键词】：防空系统；总体设计；人工智能；MBSE

DOI:10.12417/3041-0630.26.06.054

1 引言

21世纪20年代，空中威胁的质变对传统防空理念形成颠覆性挑战。高超声速滑翔/巡航导弹、低可观测隐身战机、智能化无人机蜂群等“新三样”威胁，与认知电子战、网络空间攻击结合，构成多域融合、饱和协同的复合攻击模式。威胁具备速度边界拓展、电磁频谱隐匿、物理空间分布、决策循环敏捷的核心特征，传统基于“探测-跟踪-射击”线性杀伤链的防空系统在预警时间、火力通道、抗干扰能力和效费比等方面面临严峻挑战。防空系统总体设计逻辑从追求单一系统极限性能，转向构建弹性、智能、高效、可承受的“系统之系统”。

2 体系架构演进：从固定编组到动态弹性杀伤网

2.1 开放式系统架构与模块化设计

开放式架构是实现硬件即插即用、软件快速升级、系统弹性重构的基础。美军C5ISR/EW模块化开放式套件（CMOSS）标准与传感器开放系统架构，为构建开放式系统提供通用技术框架。基于CMOSS的一体化防空反导战斗指挥系统成功将爱国者、萨德、哨兵等独立单元连接成网，实现传感器-射手最优配对。2023年实弹测试表明，系统重组时间较传统模式缩短60%以上^[1]。

因此，防空系统总体设计应遵循“硬件模块化、软件服务化”原则，各作战装备需演变为搭载标准计算、通信、电源模块的通用底盘，导弹需强化多源信息融合能力和标准化接口，以适应动态变化的网络制导信息源。

2.2 联合全域指挥控制下的认知杀伤网

认知杀伤网是JADC2理念在防空反导领域的落地体现，通过人工智能将分布于陆、海、空、天、网、电各域的传感器和效应器动态编织成针对特定威胁的最优杀伤路径，核心是从预编程协同进化为基于实时态势的自主协同。美军“先进作战管理系统”在2024年演习中演示了天基发现、秒级传输、跨

军种打击的完整链路，决策周期压缩至分钟级^[2]。

因此，防空系统总体设计应考虑“无边界协同”，系统需具备与天基、空基等非传统节点通信能力，火控系统从“控制本系统火力”升级为“调度全域适宜火力”，系统生存性设计重点从平台加固转向网络弹性与功能分布式部署。

3 智能技术赋能：AI重塑系统内核

3.1 智能感知与目标识别

利用Transformer等模型深度融合雷达、红外、电子侦察等多模态数据，欧洲“空中主宰者”项目基于Transformer的跨模态注意力融合模型对低可观测目标连续跟踪概率提升超过40%，并能有效识别伴飞诱饵，针对新型目标样本稀缺问题，采用生成对抗网络生成高保真合成数据，可将高超声速滑翔器识别率从不足30%提升至75%以上^[3]。认知电子战将AI嵌入射频前端，实现“感知-干扰-评估”闭环，行为学习自适应电子战项目已发展至实战化阶段，系统实现毫秒级未知雷达波形识别与最优干扰策略生成，极大提升复杂电磁环境下防空系统生存与作战能力。

3.2 自主决策与协同交战

多智能体深度强化学习将雷达、干扰机、发射单元、导弹等建模为智能体。MIT林肯实验室模拟了由24个智能体构成的防空集群经训练后可自主演化出动态区域防空、接力拦截等策略，抗饱和和无人机蜂群防御效能提升130%^[4]。

分布式火力控制算法采用拍卖算法等实现杀伤网内火力资源实时最优分配，以色列铁穹系统引入在线学习分配算法后，拦截效率提升约25%。

4 高超声速攻防：拓展速度边界的设计挑战

预警探测与持续跟踪。将天基、地基、电子侦察等多源数据进行高精度融合，形成统一、高数据率复合数据，为拦截提供高精度火控数据。

拦截弹总体设计创新。高超声速滑翔器拦截弹需具备超高速、敏捷性和发射后快速修正重瞄能力。美国滑翔段拦截弹项目采用轻质复合材料弹体、多脉冲固体轨控发动机，终端横向机动能力达 60~100g，导引头采用红外成像与主动毫米波雷达双模复合设计以克服“黑障”影响^[5]。旋转爆震发动机作为新概念推进技术，燃烧效率更高、结构更简单，正由 DARPA “莫哈韦”项目推动成熟化。同时，发展“多对一”协同拦截策略，通过发射多枚拦截弹构成拦截云增大命中概率。

5 新概念武器与混合式防御体系

激光武器以光速交战、低成本单次发射、无限弹药特点成为应对无人机蜂群和低成本弹药首选。美军定向能机动短程防空系统已部署 50 千瓦激光器，300 千瓦级激光器于 2024 年成功进行反巡航导弹拦截试验。“激光软化+动能击杀”概念通过激光使来袭目标结构软化或导引头失效，再由低成本动能拦截弹完成摧毁，优化效费比。

高功率微波武器具备面杀伤能力，可对低空无人机群实施区域性电子压制。美军“雷神之锤”系统已实现更远作用距离与更精确波束指向控制，CHIMERA 项目利用高超声速目标等离子体鞘套作为能量耦合通道，实现非物理摧毁“软杀伤”，为分层拦截提供新手段。

6 设计范式转型：数字工程与先进制造

6.1 基于模型的系统工程与全数字线程

MBSE 与数字孪生构建贯穿全生命周期数字连续体。美国

诺格公司在“下一代拦截弹”竞标中宣称，数字孪生模型置信度足以支撑超 80%设计决策，实物原型迭代次数减少 70%。方案阶段在数字空间进行虚拟集成与试验，评估导弹杀伤效能，部署后实装数据与数字孪生体实时比对，实现故障预测与健康管理（PHM），并基于 AR/VR 技术实现智能维修指导，大幅提升装备可用性。

6.2 先进材料与智能制造

增材制造用于优化轻质承力结构，形状记忆聚合物、压电陶瓷等智能材料用于自适应弹翼或主动振动控制，量子精密测量、量子通信与计算为未来自主导航、反隐身探测与安全通信提供变革性手段。

7 结论

2021~2026 年，防空系统总体设计正经历从单一平台性能向系统弹性、智能决策与跨域协同的根本转型，总体设计成功标准重新定义为体系融合深度、协同广度、应对不确定性的弹性与全生命周期成本可承受性。设计师角色从“导弹专家”转向精通体系架构、信息融合、人工智能、网络通信的复杂系统工程。未来防空系统将演变为具备自主感知、智能决策、分布式协同与持续进化能力的作战智能体集群，深刻影响空天安全与大国战略平衡。

参考文献：

- [1] U.S.Army Program Executive Office Missiles and Space.IBCS Operational Test and Evaluation Report(FY2023).2024.
- [2] U.S.Department of the Air Force.Advanced Battle Management System(ABMS)Capability Release 4 Demonstration Report.2024.
- [3] Lockheed Martin Skunk Works.Generative AI for Training Next-Generation Seekers.Journal of Defense Innovation,2023,8(2):22-31.
- [4] Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory.Multi-Agent Reinforcement Learning for Distributed Air Defense:Simulation and Results.Technical Report LL-TR-2024-01,2024.
- [5] Missile Defense Agency(MDA).Glide Phase Interceptor(GPI)Critical Technologies Review.MDA Public Release,2025.