

基于跨域融合网络通信体系的杀伤链/网分析与展望

田 浩^{1,2,3}, 陈大薇^{2,3}, 陈建清^{2,3}, 羊 彦¹, 郭 庆⁴

(1.西北工业大学, 陕西 西安 710072;

2.中国航空研究院, 北京 100029;

3.中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471099;

4.哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:近年来, 5G/6G、物联网、云计算、网络切片、智能决策等新质信息技术的飞速发展, 催生以“跨域组网、融合生智、体系协同”为特点的新一代杀伤链/网。基于传统观察、判断、决策、行动 (observe-orient-decide-act, OODA) 理论形成的杀伤链在时域、空域、精度域的闭合分析, 正朝着发现、锁定、跟踪、瞄准、交战、评估 (find-fix-track-target-engage-assess, F2T2EA) 构建的杀伤网跨越式发展, 实现在时域、空域、精度域、电磁域、能量域等多维多域的综合分析及优选。从网络通信体系化发展的角度分析杀伤链/网的特征, 提出面向杀伤网的跨域融合网络通信关键支撑技术, 基于“能力-技术”匹配关系, 研究“跨域融合网络体系化”建设的解决方案, 为新质信息技术支撑下的新一代杀伤链/网构建提供了技术可行性建议。

关键词: 跨域协同; 融合网络; 杀伤链/网; 体系架构

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2025096

Analysis and prospects of kill chain/web based on cross-domain converged network communication architecture

Tian Hao^{1,2,3}, Chen Dawei^{2,3}, Chen Jianqing^{2,3}, Yang Yan¹, Guo Qing⁴

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China

3. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471099, China

4. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: In recent years, the rapid development of new-quality information technologies such as 5G/6G, the Internet of things (IoT), cloud computing, network slicing, and intelligent decision-making has given rise to a new generation of kill chains/webs characterized by “cross-domain networking, fusion-enabled intelligence generation, and systemic synergy”. The kill chain, traditionally formed under the OODA theory and focused on the temporal, spatial, and precision domains, is now undergoing a leapfrog development towards the comprehensive multi-domain analysis and optimization of kill webs constructed under the F2T2EA framework. This new paradigm encompasses the temporal, spatial, precision, electromagnetic, and energy domains, among other multi-dimensional fields. The characteristics of kill chains/webs were analyzed from the perspective of systematic network communication development and key enabling technologies were proposed for a cross-domain converged network communication architecture. Based on a “capability-technology” mapping relationship, the solution for building a “systematic cross-domain converged network architecture” was explored. Furthermore, technically feasible recommendations were provided for constructing a new generation of kill chains/webs underpinned by these new-quality information technologies.

Key words: cross-domain collaboration, converged network, kill chain/web, system architecture

收稿日期: 2025-12-30; 修回日期: 2026-05-07

通信作者: 陈大薇, 409890402@qq.com

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No.20230001004002)

Foundation Item: Aeronautical Science Foundation of China (No.20230001004002)

0 引言

由美国前空军参谋长罗纳德·福格尔曼于1996年提出的“杀伤链”概念,经20余年的持续论证及发展,现已由美国国防部高级研究计划局进一步拓展并形成“杀伤网”概念^[1-2]。从作战流程的角度来看,杀伤链的行动过程具有闭环的链式结构特点,是典型的传统线性模型,各个功能节点串联形成;链式结构的脆弱性注定其仅适用于对抗强度低的场景。杀伤网的设计则是基于信息融合、动态重构、智能优选的分布式网状结构,各个功能节点之间呈分布式结构,可并行同步开展,且动态自适应特点使其具有较高的鲁棒性。由此可见,杀伤网并不能简单理解为多条杀伤链的集合。杀伤网的覆盖范围之广、决策层级之多、指标要素之宽、动态重组之强,均是杀伤链不可及的,特别是在美国联合全域作战(JADC2)的发展模式下,其以“马赛克战”为基础,以遂行任务为目标,已形成具有“智能化、体系化、协同化”典型特点的新一代杀伤网^[3-6]。从技术驱动的角度来看,杀伤链向杀伤网快速发展,是新质网络通信技术体系发展的必然趋势。5G的“万物互联,智能感知”特性^[7]助力物联网的快速构建,形成以车联网、智能家居为代表的一系列信息时代的标志性成果。6G旨在实现“全域覆盖,泛在智联”,其将网络架构进一步推向空地海全域一体化。具有智能感知融合能力的6G技术,可覆盖传统观察、判断、决策、行动(observe-orient-decide-act, OODA)中从“感知”到“射手”的各个环节,为装备无人化、指控信息化、攻击自主化的能力生成提供有力支撑^[8-10]。因此,具备跨域融合网络体系特点的杀伤网构建,是“装备牵引,技术驱动”发展过程中与新质信息技术相结合的必然趋势。

本文基于跨域融合网络通信体系技术的发展,针对性地开展基于新质技术的杀伤链/网构建,分析杀伤链/网的通信体系化发展脉络,提出融合网络发展的新型架构,进而研究该架构支撑新一代杀伤链/网的关键技术及方法,给出跨域智能融合网络下杀伤网的发展可行性建议。

1 基于网络通信体系的杀伤链/网的发展及分析

杀伤网的概念从提出以来就受到了人们的广泛关注,尤其是在大国竞争背景下,杀伤网的全域覆盖、动态重组、体系支撑等特性,在颠覆传统作战样式的同时,催生出跨域联合、融合智能、动态适应的新型作战

样式,虽然其相关理论研究和实践应用尚处于发展阶段,但凭借其优于杀伤链的“柔性重组能力、弹性抗毁能力、动态适应能力、智能适配能力”,不难构建出其在当前全域作战场景中可生成多种远优于以往模式的新型作战样式。

1.1 杀伤链向杀伤网跨越式发展

传统杀伤链作为对时延敏感目标进行打击的所有活动的统称,包括具备传感、决策、打击等能力的各平台节点,具有闭环的链式结构特征,从最初的概念提出到后期的多型链并行发展,杀伤链的发展一方面源于多个实战的现实需求,另一方面则受益于信息时代的高速率、大容量、低时延信息传输技术的迅猛发展。最初,杀伤链旨在用短于对手的时间先一步实现“发现即打击”,这个阶段的杀伤链作战效能取决于链路的闭合时间;随后,在“反介入/区域拒止”的作战样式下,杀伤链侧重在强对抗环境下的稳健性,这个阶段的杀伤链效能以场景适应性、跨域协同性为核心;现如今,在人工智能、5G/6G等技术的支撑下,杀伤链构建向多样化、整合化、多域化方向持续发展,以期实现体系作战效能最大化。根据杀伤链各个阶段的发展方向,开展如下分析。

(1) 从“发现”向“智能感知功能”发展

杀伤链始于“发现”环节,作为“眼睛”功能的杀伤链第一阶段,其任务是通过自身的探测能力,发现作战目标。现阶段,随着电子对抗、隐身穿透等多学科新型技术的发展,在充满迷雾的电磁空间内第一时间发现真实的作战目标,是具有重大挑战的。以马赛克战为例,其将具有探测感知能力的“发现”节点进行分布式广泛布撒,以数量取胜,获取目标节点的关键信息,该方法的直接后果是带来了海量数据的处理难题。随着智能技术的进一步完善,该问题可从两个方面形成有效的解决方案:一方面,从信息层提取关键特征形成特征信息,以便进一步特征融合;另一方面,从云计算能力方面形成“边缘云”,解决海量数据与实时处理之间的矛盾。

(2) 从“判断”向“特征融合功能”发展

杀伤链的“判断”环节,是“承上启下”的重要阶段,既是基于“发现”环节的智能感知、目标探测阶段的结果,又是下一个“决策”环节的前提基础。例如,“智能感知”阶段形成作战态势图,“判断”环节就是根据不同作战任务的要求,实时确定态势图上的多层级打击目标,以便下一阶段的“决策”快速生成。当前以及未来一段时间内,对作战目标的“判断”不再是简单的“是”与“否”判别,而是基于具有特征信息的多源信

息,构建时变的作战态势目标库,从顶层对所有作战节点进行标注,根据不同阶段战略战术对目标的不同需求,形成多层次、多种类的目标分类集合,以便一旦作战任务生成后,可即时生成该任务下以目标威胁程度为第一要素的排序列表,助力“决策”快速生成。

(3) 从“决策”向“战术目标筛选及优选”发展

杀伤链的“决策”阶段,在现阶段的作战体系下处于最高层次,“决策”并不仅仅代表对某一个目标打击与否的确定,在体系作战中,上层决策往往包含军事以外的诸多要素,如政治、经济、文化等。仅以实施战术作战为目标的“决策”,以“决策中心站”为例,结合“平台中心站”的发展趋势,不难预料,未来具有“决策”功能节点的比重将会持续递增,这种由上而下逐级放权的趋势,是“平台无人化、体系智能化”带来的显著特点。战争“窗口”稍纵即逝,基于杀伤网的体系作战中的“决策”具有不同于以往的内涵:一方面,作战空域的全覆盖带来往返传输时间的叠加,亟须提升边缘作战武器装备的自主决策能力;另一方面,由智能技术训练形成的“需求-任务-目标”的多重映射,有效减少原本“决策”的时间代价。综上,杀伤链的“决策”正向着更高层次发展,基于体系效能的评估,在确定的作战需求、作战任务下形成的作战目标列表中,进一步对战术目标进行筛选及优选。

(4) 从“打击”向“各平台装备资源整合、效能评估最大化”发展

杀伤链的“打击”阶段,针对某一类武器装备而言,是链路闭合的最后一环。当今武器种类繁多、功能各异,以相应的武器打击作战目标,实现最优效费比的模式已逐渐成熟并获得广泛认可。随着精细化作战模式的推进,“打击”阶段具备的功能逐步增多,以往以“命中率”为主要指标的武器平台评价模式,现已发展成多层次指标要素综合评估的关键模块。典型代表是远程反舰导弹(LRASM),其旨在实现强对抗环境下对目标关键部位的高效毁伤,结合多弹协同实现对航母舰队的体系毁伤能力。可以预见,面对体系作战中的多个不同种类的平台目标,多元化异构弹群是武器发展的典型模式,其汇聚对空、对天、对海、对地的全域作战武器系统,可在同一时间对某一特定区域实现全面的火力覆盖,构建区域性相对控制权^[11]。

综上,杀伤链的功能纵然覆盖从“发现”到“打击”的全链条,但其未来必将向更复杂的分布式杀伤网的网状结构发展,最终形成由若干关键节点构成,集“智能感知”“特征融合”“目标优选”“资源最优”功能于一

体的杀伤网。以美军马赛克战为基准,马赛克场景下的能力提升分析见表1。这种由“链”至“网”,再至“功能节点”的发展趋势,是智能化作战、体系化协同、信息化支撑的综合发展趋势,具有一定的牵引性意义。

表1 马赛克场景下的能力提升分析

杀伤链关键环节	杀伤网关键环节	技术指标能力发展
“发现”	“智能感知”	探测能力↑ 对关键目标的感知能力↑ 对特定目标关键部位的感知能力, 海量数据融合汇聚提取关键信息, 平衡海量数据与实时处理
“判断”	“特征融合”	目标确定能力↑ 多层次、多种类的作战目标分类集合 根据不同要素生成目标排序列表
“决策”	“战术目标筛选及优选”	“决策”效能↑ 具备决策能力的平台种类及数量激增 引入智能技术加快“决策”过程
“打击”	“各平台装备资源整合、效能评估最大化”	命中概率↑ 资源最优能力,体系效能最大化

注:■为新增能力。

1.2 融合式杀伤网未来趋势分析

目前,不少研究者围绕杀伤网的概念、发展、应用等问题展开了深入研究。在杀伤网的构建方面,相关研究以跨域自适应杀伤网为代表^[12-13],跨域作战的高强度、高时延敏感性、高不确定性与杀伤链的脆弱性、僵化性之间的突出矛盾,推进了杀伤网模型架构的全面研究,这些研究重点对智能算法及强化学习算法在杀伤网设计中的应用进行分析,并展望来自适应杀伤网在效能评估方面应考虑指标;在杀伤网的分析方面,研究者从作战视角对杀伤网的设计进行研究^[14-16],在模型元素、框架规范、分析优化方面进行方法设计及验证,结合复杂网络、OODA环、体系架构设计方法,以评价指标为切入点实现对杀伤网的定量定性分析;在杀伤网的建模仿真方面^[17-18],基于模拟仿真构建典型任务场景下的杀伤网作战效能评估方法,探索不同杀伤网性能边界的指标敏感度分析及贡献率量化,从动态重构及多目标冲突消解策略入手,开展杀伤网建模机理的解析。与此同时,结合云协同体系、云计算及云存储技术,研究者提出云边协同杀伤网、分布式云体系架构^[19-20],结合网络切片技术^[21],形成跨域网络体系架构,进一步支撑杀伤网在跨域、网络、融合中的可行性。

本文针对5G技术体系中发展较成熟的多级平台架构,对基于6G技术的跨域融合网络体系下的杀伤网展开

分析,将杀伤网的应用与多级平台的层级匹配关系进行梳理,逐层分析“杀伤链-杀伤网”的发展模式,以杀伤网构建为牵引,对跨域融合网络通信体系架构关键技术进行深入分析,初步形成可参考的技术方案及探索途径。

杀伤链-杀伤网体系核心技术及架构模型未来发展趋势如图1所示。F2T2EA表示发现、锁定、跟踪、瞄准、交战、评估, C4KISR表示指挥、控制、通信、计算机、杀伤、情报、监视与侦察。当前具有脆弱链式结构的杀伤链,按不同分类方式可划分为武器数据链、卫星数据链、空基数据链等,其依托的通信技术是较成熟的信息处理、信息传输与组网技术;随着新质通信技术的发展,助力数据链的类型有别于以往特定场景应用的数据链,转而向支撑“跨域协同、体系对抗”应用而形成的具有特定功能的数据链推进,进而有效支撑以马赛克战、先进作战管理系统为代表的杀伤网作战样式。

融合式杀伤网作为典型的网状结构,节点数量多、交互关系复杂,且功能关系各有不同,从功能实现层面看,杀伤网的闭环全流程是基于网络信息体系而形成的,其各个阶段对网络体系的指标要求均有所不同。杀伤网

体系架构横向拓展,纵向贯通:同一层级的平台之间进行通信组网,侧重覆盖广度、融合共享;对于特定平台,其上下级之间的通信互联,侧重速率调整、资源分配。结合特定的场景任务,对杀伤网实现的时延、传输速率、丢包率、吞吐量等指标均有不同的需求。

从技术需求和应用范围来看,跨域多层级杀伤网体系架构设计可划分为“中心网”“区域网”“边缘网”3类。以各层指挥中心为节点组成的“中心网”,主要负责海量信息的汇总、多源数据的融合处理及指挥决策,以便实现资源综合调配与全局分析,侧重实时共享,对传输速率、丢包率等要求较高,即传输有效性、可靠性的综合平衡;以空天地海各典型区域平台为节点构建的“区域网”,主要承载多元具体任务的实施,负责数据的收集和管理,并从中心网获取战术指令数据,侧重信息处理及任务分配调度,对传输速率、吞吐量要求较高;以执行多种任务的不同武器平台为节点的“边缘网”,主要对任务进行实时响应,面对瞬时作战窗口,其对时延、信息精度、传输速率、数据更新频率等指标要求很高。以马赛克战为例,其旨在实现跨域、分布式、多平

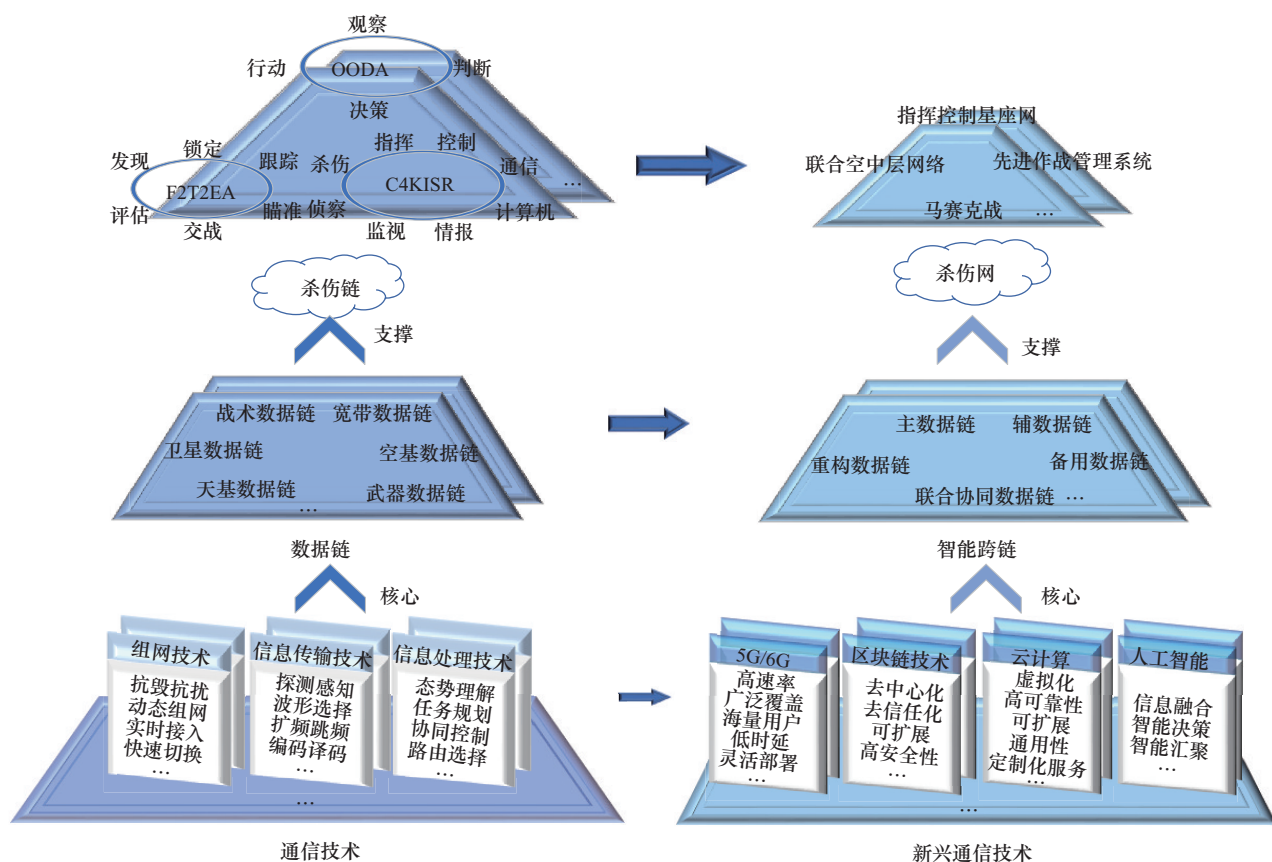


图1 杀伤链-杀伤网体系核心技术及架构模型未来发展趋势

台间高效自主协同,既包括可对各作战要素进行组合搭配、形成复杂效应的杀伤网作战架构,也包括分布式作战管理、低截获可靠通信能力、低成本/自主化/小型化武器平台,以及可在雷达、通信、电子战模式之间自适应、灵活切换的综合射频系统。

虽然支撑杀伤网高效运行的技术很多,但其根本目的主要有以下两个。

(1) 信息融合实时汇聚,在线决策任务响应

高效可靠的杀伤网体系构建,依赖各个节点平台信息互联互通的广度和深度,信息融合网络支撑决策能力的进一步生成,提高作战任务的响应能力,从根本上实现高动态环境下的可靠杀伤网能力建设。

(2) 网络通信协议优化,体系信息寻优保障

对杀伤网的弹性抗毁能力、柔性重组能力的实现,可从网络通信协议角度切入,如体系作战信息保障需求、武器装备实时性需求、指挥中心态势共享需求等角度,综合构建可支撑强鲁棒性的高效杀伤网架构。

2 面向杀伤网的跨域融合网络通信关键技术

以5G/6G为典型代表的跨域融合网络通信体系架构,涵盖广域覆盖能力与灵活调度机制,结合智能技术,可有效支撑未来体系作战需求下的杀伤网建设。本节从新一代通信技术发展的角度梳理杀伤网体系作战所需的网络通信关键技术,为构建柔性、弹性、动态、智能的杀伤网提供参考。

2.1 柔性重组能力——拓扑重构技术

杀伤网的柔性重组能力决定了其在强对抗环境下有效发挥作用的程度;杀伤链因其链式结构具有一定的僵化性,链路易遭破坏而无法闭环。马赛克战针对性设计了具有高柔性重组能力的传感器网络,以多数量、分散化且具备不同功能的传感器按需组网,实现功能级的战场信息链闭环。从网络设计的角度来看,主要从以下两个方面进一步完善。

(1) 体系元素功能设定支撑基本构型

杀伤网涉及的作战节点种类繁多,包括指挥节点、探测节点、中继节点、决策节点、武器节点、保障节点等,各类节点功能不同,所需网络资源也大相径庭。从杀伤网的功能级构建角度入手,可将节点划分为感知功能节点、指控功能节点、决策功能节点、打击功能节点,这4类节点通过层级设定,可组建基本骨干网络。对于具有多个功能的节点,可进一步形成次骨干网络,以此类推,形成普通节点网络、边缘节点网络等。

体系内各个节点要素的设定,是多层级、多类别大型网络构建的基础,节点元素的划分并不是一成不变的:随着节点功能的拓展,当其功能簇的发展具备多重功能时,节点类型也将随之更改,以保障体系作战效能的充分发挥。

(2) 拓扑重构技术赋能网络体系

杀伤网的拓扑重构侧重某一个或多个节点在失能或弱能的情况下,具备相当能力的平台节点可以迅速“补位”,以保障信息链路的持续、高效运行。从某个功能节点的角度看,其应具备多个备份功能节点,在资源可承受、能量可覆盖的前提下,实现快速链路切换,这部分在民用通信技术中较常见且较成熟;从体系功能实现的角度看,实现某项作战任务涉及的若干个节点,实质上是若干个功能划分的集合节点,需要从数量、功能两个方面进行网络体系的保障。

具有快速重构能力的拓扑体系设计,是动态对抗作战场景下的重中之重,在设计初期,需要尽量避免某一功能节点的单一性及不可替代性,以便后续体系网络的灵活性拓展。

2.2 弹性抗毁能力——抗干扰通信技术

相比于柔性重组能力,杀伤网的弹性抗毁能力是从网络体系鲁棒性角度描述的网络韧性性能,其主要指标可以理解为“在环境信噪比降低或对方释放各类干扰的前提下,自身仍可保障接收端正确接收信息的能力”,可以通过丢包率、差错率进行定量分析。未来作战体系必然充斥各类信号,如红外、激光、微波、电磁等,无论是对方还是己方,从信号的层面来看,“非我所需即噪声”,在网络通信领域,抗干扰通信并不是新学科。作为杀伤网弹性抗毁能力的关键,其涉及的抗干扰通信技术可侧重从以下两个方面研究。

(1) 以物理层编解码、调制解调技术创新为主

网络参考模型对比及发展历程如图2所示,虽然传统网络通信的7层模型架构在数据链中演化为3层模型架构,但物理层作为唯一不变的模型层,其包含的关键技术重要性显而易见。物理层中的诸多技术是网络通信领域中的研究热点。其中,波形设计及选择技术是调制解调技术的核心,在杀伤网的感知探测功能中具有天然的抗干扰能力;编解码技术的原理恰好对应有效信息“隐藏”传输,在一定意义上保证信息安全性的同时,兼顾纠错能力;相比于编解码技术从时域进行的抗干扰能力构建,目前常用的扩频技术则是在频域上构建的抗干扰技术,同时,空域角度上的抗干扰则以智能天线技术为主。

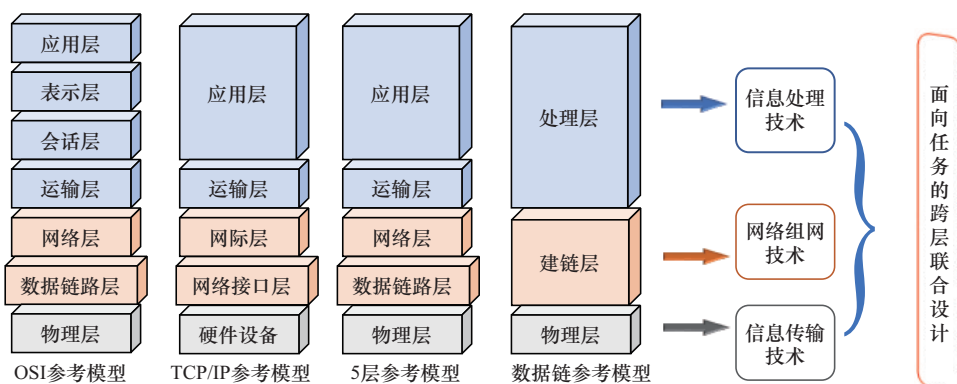


图2 网络参考模型对比及发展历程

体系对抗环境具有多元复杂性，抗干扰通信技术的研究是长期且持续发展的，基于感知信道及环境信息，结合自适应适配、智能选择、跨层设计等思路，可有效实现系统参数动态调整、传输性能优化。同时，波形选择、编解码设计、扩频、分集等多类技术的融合设计，可综合提升网络的抗干扰通信能力。

（2）以信息融合、网络构建技术突破为辅

在民用通信中，主要面对海量用户、复杂城市环境等挑战，对抗干扰技术的探索处于较低对抗性阶段，大多是速率和时延的分配。因此，传统抗干扰通信技术通过时域编码、频域扩频、空域天线技术的设计，即可解决绝大多数的通信问题。但杀伤网的体系作战环境是典型的强对抗场景，其面对的干扰样式、干扰能力均具有很强的挑战性，该环境下的抗干扰通信技术不仅需要本身就具有强鲁棒性的波形设计，还需要多重抗干扰能力的技术加持，这样才能在强对抗的体系作战下仍具有持续稳定通信传输的能力，助力真正实现跨域融合网络的杀伤网。

信息融合技术从信息传输层面进行抗干扰能力的保障，通过特征提取、筛选、识别等步骤，可应对多种典型干扰；网络构建技术则是从上层架构方面对干扰进行调整，基于先验信息，可通过网络多条链路的保障、路由协议的设计等，从最前端抑制可能的干扰入侵，大幅降低对方在信号层对己方信息的干扰及破坏。

2.3 动态适应能力——组网协议设计

与弹性抗毁能力中的网络构建辅助支撑相呼应，组网协议设计还具有更重要的任务，即保证具有高速动态性的节点之间实现可靠组网，这也是跨域融合网络具有的明显特征之一。以往相同区域或领域的平台组网，其节点相对动态性并不足以影响整个网络的能力实现，多

领域平台节点之间的稳定、可靠连接，则需要网络体系的保障，不再是少量节点能力可覆盖的。特别是随着以低轨卫星群、高超声速飞行器为代表的高马赫数飞行的平台节点工程实现，高动态场景下网络体系的通信链路稳定是体系杀伤网效能实现的根基，具有重要意义。因此可重点考虑以下两个方面的能力实现。

（1）适配跨层级跨平台体系架构的协议设计

通信网络中的协议设计，最初是为了形成符合客观需求、满足功能实现、便于高效传输的交互规则。因此，协议设计会随着客观需求的变化、功能目标的变动而多方向发展。例如典型的TCP/IP的协议设计，通过3次握手的核心保障、灵活适应的IP协同、简单开放且满足多样化的分层结构，实现通信模型各层之间的协调有序，共同实现性能指标；适用于深空环境通信的利克莱德传输协议（licklider transmission protocol, LTP）设计，是针对容迟网络（delay tolerant network, DTN）架构的特点形成的，其针对性设计重传机制、间歇性连接等机制，对标于“最终可达性”而不是“实时性”，这是在特定通信场景下实现有效性与可靠性之间的一个平衡。

杀伤网的多层级架构并不完全适用于某一类协议，很大概率上需要多种协议的联合开发，以满足跨域融合网络下的体系杀伤网中各平台之间跨层级的高效通信传输要求。以“中心网”“区域网”“边缘网”为例，单一网络内部的各个节点平台之间可采用同一传输速率、时延的组网协议，而网络与网络之间受限于空间、时间的约束，需设计更具适配性的协议，以得到更优的传输能力。

（2）支撑海量差异化平台智能算法的扩展设计

为提升网络动态适应能力而设计的组网协议，着眼于当前各高速运行平台之间的跨域协同，对标于未来全

域体系作战的智能化、协同化需求。面对海量差异化作战节点平台特点,逐层设计、逐类完善,从体系架构、杀伤链闭环结构、节点功能模块等多方面统筹考虑,生成可扩展智能算法、可支撑数据算力的新型组网通信协议。体系架构上,设计之初就将网络协议纳入重点考虑范围,通信网络作为体系的“神经系统”,其设计的合理性、可行性直接影响体系架构的运行速度;杀伤链闭环结构设计,可为杀伤网的设计提供借鉴,如最少节点的网络化设计、最少备用节点平台的协议优化、最短交互链路的选择、多任务并行场景下兼顾效能与稳健性的网络拓扑等。

智能算法助力杀伤网跨域融合的落地,海量数据、算法、模型、平台等错综复杂的交互管理,构建成基本的杀伤网模式。当前,适用于动态性网络的协议设计在实时性及稳健性上稍显逊色,引入智能算法,有望实现动态性、实时性、稳健性网络设计在一定意义上的融合生成与灵活切换,综合保障杀伤网体系作战能力。

2.4 智能适配能力——在线决策算法

承接动态组网协议中对智能算法的可扩展性,跨域融合网络架构中的各层级、各平台、各协议均需有效兼顾算法的能力实现,这也是主动应对“算法战”的必然途径。随着跨域融合网络中各平台无人化、体系化、智

能化水平迅速发展,智能飞行控制、在线航迹规划、集群任务分配、实时智能决策等方面的设计,逐步形成以算法为核心的智能适配能力。

(1) 平台自主决策能力辅助有人-无人协同

平台智能化牵引作战无人化生成,作战无人化映射平台智能化发展,两者相互促进。以美国为代表的无人作战体系发展处于全球领先,当前正朝着“网络中心、智能主导”的方向持续推进,旨在通过有人-无人协同与跨域自主集群,形成穿透性强、成本可控、适应性高的新型作战体系。其中,自主决策能力在经历“人机协同决策”阶段后,正面临着复杂对抗环境与强对抗电磁干扰的现实挑战,须探索与“前哨节点”、低成本集群联合的作战策略设计,突破平台自主决策能力受限的瓶颈。

当前杀伤网的构建是基于现有杀伤链脆弱性的缺点而发展的,类似地,平台自主决策能力的发展助力有人-无人协同向无人化作战体系的稳步推进,这也是源于当前作战对决策速度、决策准确度的紧迫性而形成的。自主决策能力既适用于任务装备平台的选择,也适用于武器发射时机的确定,不同场景下的自主决策,其最终决策权下放尺度还需进一步斟酌。但自主决策能力作为无人化作战体系的关键,其能力形成已初见规模。

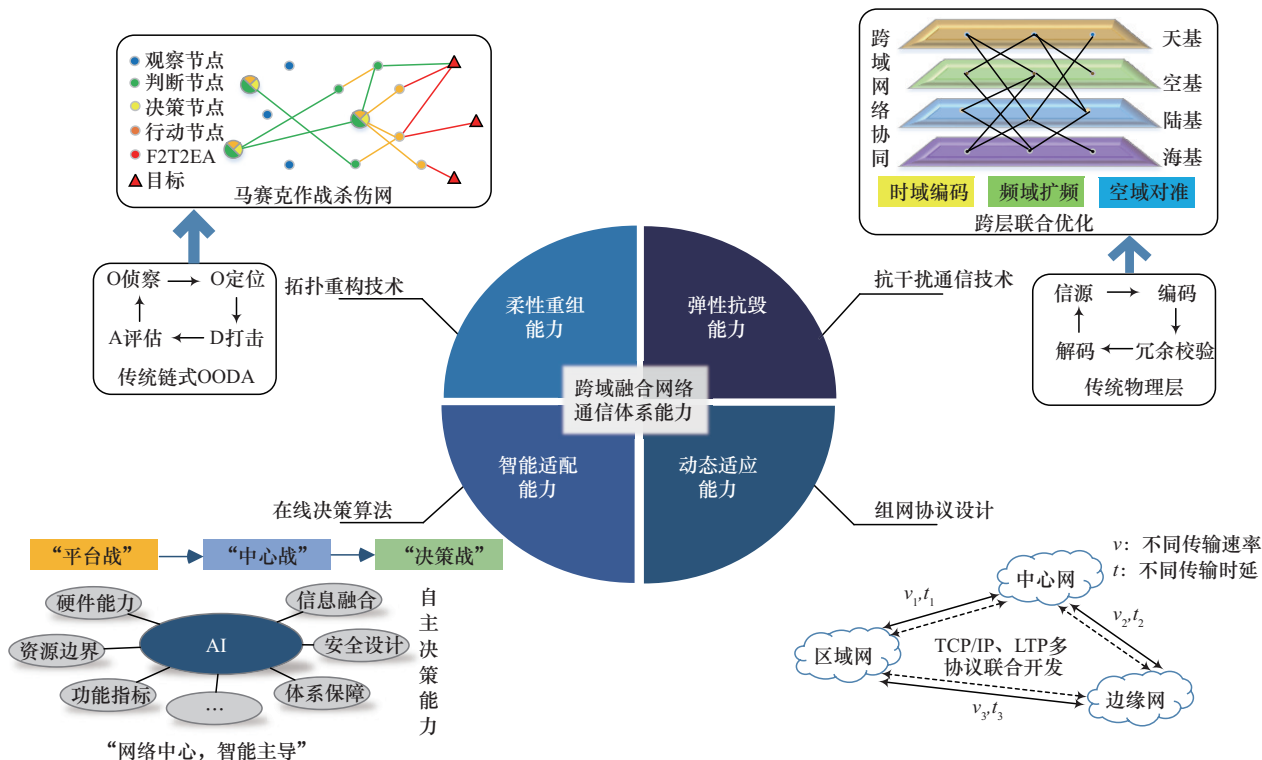


图3 跨域融合网络通信体系架构“能力-技术”映射关系

(2) 以无人化作战为载体的“智能决策战”

从机械时代的“平台战”到信息时代的“中心战”，其发展脉络具有明显的时代新型技术烙印，目前依托智能技术、机器学习算法、AI推理的“决策战”，更是结合了装备平台、网络信息、智能决策等诸多能力的集大成者。可以预见，以跨域融合网络体系为主要特点的杀伤网动态重组，结合AI推理的算网资源适配将汇聚多种新型战术战法，形成出其不意的作战效能及综合能力。在作战决策中，AI推理可以基于融合多源信息进行决策辅助甚至主导关键事项的自主决策；在网络构建的流程中，AI技术可以综合评估平台能力、网络资源能力及作战效能，辅助进行全域组网的杀伤网建设；在体系保障阶段，AI推理可以根据实时数据预测各级平台的当前情况，以便优化资源配置，实现跨域网络体系支撑下的杀伤网最优效能。未来，基于AI推理的杀伤网实时构建，将成为支撑全域联动能力体系构建的重要突破点，其算网资源适配、模型封装及AI适配、分布式协同推理等技术，将综合构建支撑AI杀伤网的内生驱动。

智能技术的成熟、稳定，是无人化体系作战的有力支撑。通过优化智能安全设计、裕度设计以及多层网络体系保障，可以在一定程度上降低智能算法陷入“宕机”的可能性，如具有监督节点的网络安全路由设计，通过智能算法实现路由选择与优化，但同时设置若干监督节点，以保障网络体系在智能技术的加持下更高效、更安全、更顺畅。

综上所述，在跨域融合网络通信新质体系架构中，形成了杀伤网在柔性、弹性、动态、智能4个典型方面的“能力-技术”映射模式，明确了新质通信技术赋能体系作战的可实施路径，跨域融合网络通信体系架构“能力-技术”映射关系如图3所示。

3 结束语

本文针对跨域融合网络体系架构下的杀伤链/网进行深入研究，分析网络通信体系下杀伤链/网的发展模式、技术特点与未来趋势，结合以5G、6G为代表的新型通信技术对杀伤链向杀伤网跨越式发展的技术推动，形成跨域融合网络通信体系架构的关键技术，并开展“能力-技术”模式研究，以网络拓扑、物理层抗干扰、动态适配协议、智能决策算法为代表，对网络柔性重组能力、弹性抗毁能力、动态适应能力、智能适配能力进行映射，自底向顶形成技术驱动下杀伤网融合体系化发展的可行性路径。

参考文献

- [1] 张传良, 丁浩森. 从杀伤链到杀伤网: 全域作战视角下的杀伤链战略[J]. 军事文摘, 2021(2): 6-12.
Zhang C L, Ding H M. From kill chain to kill net-kill chain strategy from the perspective of global operations[J]. Military Digest, 2021(2): 6-12.
- [2] 赵仁星, 赵国林, 冯明月, 等. 美军“马赛克战”概念下杀伤网探析[J]. 航天电子对抗, 2021, 37(5): 61-64.
Zhao R X, Zhao G L, Feng M Y, et al. Analysis of kill net under the concept of Mosaic warfare by the US Army[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(5): 61-64.
- [3] The Joint Staff. Joint operations concepts development process (CJCSI 3010.02B) [EB]. 2006.
- [4] Chairman of the Joint Chiefs of Staff. Guidance for development and implementation of joint concepts (CJCSI 3010.02E) [EB]. 2013.
- [5] PHISTER P W, PIONISH I G. Information and knowledge centric warfare: the next steps in the evolution of warfare [EB]. 2011.
- [6] 赵国宏. 体系中心战: 未来战争的顶层作战概念[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7(3): 225-240.
Zhao G H. SoS-centric warfare: capstone operational concept for future war[J]. Journal of Command and Control, 2021, 7(3): 225-240.
- [7] Zhang H J, Liu N, Chu X L, et al. Network slicing based 5G and future mobile networks: mobility, resource management, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8): 138-145.
- [8] 中国信通院 IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group, CAICT. White paper on 6G overall vision and potential key technologies[R]. 2021.
- [9] 中信科移动, 无线移动通信国家重点实验室. 全域覆盖场景智联—6G 场景、能力与技术引擎白皮书 [EB]. 2021.
CICT Mobile, State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications. All-domain coverage&scenario intelligent connectivity: white paper on 6G scenarios, capabilities and technology engine[EB]. 2021.
- [10] You X H, Wang C X, Huang J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China Information Sciences, 2020, 64(1): 110301.
- [11] 陈大薇, 张永亮, 段鹏飞, 等. 高超声速飞行器数据链关键技术分析及展望[J]. 航空兵器, 2023, 30(4): 26-32.
Chen D W, Zhang Y L, Duan P F, et al. Analysis and prospect of key technologies for hypersonic vehicle data link[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(4): 26-32.
- [12] 刘好, 刘亚群, 谢钧, 等. 跨域自适应杀伤网研究综述[J]. 计算机技术与发展, 2025, 35(10): 1-9.

- Liu H, Liu Y Q, Xie J, et al. Comprehensive survey on adapting cross-domain kill-webs[J]. Computer Technology and Development, 2025, 35(10): 1-9.
- [13] 张子龙, 黄海宇, 樊县林. 基于可扩展模式的自适应跨域杀伤网构建方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2023, 14(6): 48-53, 95.
- Zhang Z L, Huang H Y, Fan X L. Construction method for adapting cross-domain kill-webs (ACK) based on extendable mode[J]. Command Information System and Technology, 2023, 14(6): 48-53, 95.
- [14] 林涛. 杀伤网作战视角设计与分析技术研究[D]. 北京: 中国电科信息科学研究院, 2025.
- Lin T. Research on design and analysis technology of kill web from combat perspective[D]. Beijing: China Electronics Technology Group Corporation Information Science Research Institute, 2025.
- [15] 熊蓉玲, 杨庆, 张晏玮, 等. 基于仿真推演的杀伤网作战效能敏感度分析[J]. 现代防御技术, 2025.
- Xiong R L, Yang Q, Zhang Y W, et al. Sensitivity analysis of kill web operation effectiveness based on simulation deduction[J]. Modern Defence Technology, 2025.
- [16] 王川川, 陆科宇, 王满喜, 等. 基于杀伤链和网络层次分析法的体系效能评估方法[J]. 舰船电子工程, 2025, 45(4): 146-153.
- Wang C C, Lu K Y, Wang M X, et al. System effectiveness evaluation method based on kill chain and analytic network process[J]. Ship Electronic Engineering, 2025, 45(4): 146-153.
- [17] 王超尘, 姜鸿儒, 王步历, 等. 杀伤链到杀伤网的演进: 建模、评估与优化研究综述[J]. 空天防御, 2025, 8(4): 1-8.
- Wang C C, Jiang H R, Wang B L, et al. From kill chain to kill web: a survey on modeling, evaluation, and optimization[J]. Air & Space Defense, 2025, 8(4): 1-8.
- [18] 吴亮, 祝江汉, 朱承, 等. 基于“功能-信息-协同”多维关系的杀伤网建模方法[J]. 指挥与控制学报, 2025, 11(4): 405-413.
- Wu L, Zhu J H, Zhu C, et al. A modeling approach for kill webs based on functional-information-coordination multidimensional relationships[J]. Journal of Command and Control, 2025, 11(4): 405-413.
- [19] 关星凯, 张安, 毕文豪, 等. 云边协同杀伤网的作战链路服务化构建流程设计[J]. 指挥与控制学报, 2025, 11(4): 504-516.
- Guan X K, Zhang A, Bi W H, et al. Service-oriented combat chain construction process design for the cloud-edge collaborative kill web[J]. Journal of Command and Control, 2025, 11(4): 504-516.
- [20] Liu J, Du Y, Yang K, et al. Edge-cloud collaborative computing on distributed intelligence and model optimization: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 5049-5080.

- [21] Ghafouri N, Vardakas J S, Ksentini A, et al. High-level service type analysis and MORL-based network slice configuration for cell-free-based 6G networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(6): 8508-8519.

[作者简介]



田浩 (1982-), 男, 西北工业大学博士生, 中国航空研究院&中国空空导弹研究院协同创新中心正高级工程师, 主要研究方向为体系组网协同、量子信息技术、武器总体技术等。



陈大薇 (1989-), 女, 中国航空研究院&中国空空导弹研究院协同创新中心高级工程师, 主要研究方向为体系总体、体系对抗仿真、组网协同、数据链等。



陈建清 (1983-), 男, 博士, 中国航空研究院&中国空空导弹研究院协同创新中心高级工程师, 主要研究方向为体系总体、武器系统总体、体系对抗仿真等。



羊彦 (1970-), 女, 西北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂干扰环境下的目标跟踪识别、多传感器信息融合技术等。



郭庆 (1964-), 男, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带卫星通信、深空通信、无线通信网络与传输技术等。