

智能化装备体系的“学习性”：从鲁棒自主到认知演化的跃迁逻辑

张龙¹, 黄文博¹, 雷震^{1,2}, 冯轩铭^{1,3}, 王莹¹

(1. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100101;

2. 海军航空大学, 山东 烟台 264000;

3. 陆军研究院, 北京 100012)

摘要: 智能化装备体系是作战形态向认知主导、自主适应转型的实体承载。为在高度不确定性与强对抗性战场环境中维持功能连续性, 体系必须具备内生性的“学习性”。将学习性界定为智能化装备体系应对不确定性、维持功能连续性的存在论能力, 并构建了一个贯通本体论、作用机理与实现路径的三层理论框架。首先, 从历史必然性、技术重塑与复杂性临界3个维度, 论证了学习性成为体系存续刚性需求的内在逻辑。其次, 逐层剖析了学习性的三重层级内涵: 智能节点层以“鲁棒自主”为存在基线, 智能系统层以“涌现协同”为结构增益, 智能体系层以“认知演化”实现规则主导。进而, 提出了与之对应的三层结构化实现路径, 详细阐述了从个体表征推演、系统结构自组织到体系规则演化的耦合机理与闭环反馈机制。所提框架旨在为智能化装备体系的顶层设计、效能评估与能力生成提供一套系统性的理论框架, 为理解并构建未来战场的“认知生命体”提供理论探索。

关键词: 智能化装备体系; 学习性; 鲁棒自主; 涌现协同; 认知演化; 实现机理

中图分类号: E919, TP18

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202607

“Learnability” of intelligent weapon systems: a transition logic from robust autonomy to cognitive evolution

Zhang Long¹, Huang Wenbo¹, Lei Zhen^{1,2}, Feng Xuanming^{1,3}, Wang Ying¹

1. System Engineering Research Institute, Academy of Military Science, Beijing 100101, China

2. Naval Aviation University, Yantai 264000, China

3. Army Research Institute, Beijing 100012, China

Abstract: The intelligent equipment system serves as the physical carrier for the transformation of operational forms toward cognitive adaptation. To maintain functional continuity within highly uncertain and strongly adversarial battlefield environments, the system must possess an endogenous “learnability”. Learnability as the ontological capability of an intelligent equipment system was defined to cope with uncertainty and sustain functional continuity, constructing a three-layer theoretical framework that integrates ontology, operational mechanisms, and implementation paths. Firstly, the intrinsic logic of learnability becoming a rigid requirement for system survival was demonstrated in three dimensions, such as historical inevitability, technological reshaping, and complexity criticality. Secondly, the connotations of learnability at three hierarchical levels were analyzed, such as the intelligent node level established “robust autonomy” as the existence baseline, the intelligent system level achieved “emergent collaboration” as structural gain, and the intelligent system-of-systems level realized “cognitive evolution” for rule dominance. Furthermore, corresponding three-layer structured implementation paths were proposed, elaborating on the coupling mechanisms and closed-loop feedback mechanisms ranging from individual representation deduction and system structure self-organization to system-of-systems rule evolution. This

framework aims to provide a systematic theoretical framework for the top-level design, effectiveness evaluation, and capability generation of intelligent equipment systems, offering theoretical exploration for understanding and constructing the “cognitive life forms” of the future battlefield.

Key words: intelligent equipment system, learning capability, robust autonomy, emergent coordination, cognitive evolution, implementation mechanism

0 引言

现代作战体系正经历由平台中心向体系中心、由信息赋能向认知主导的根本性转型，智能化装备体系正是这一转型在实体层面的具体承载形态。智能化装备体系是指由具备自主感知、决策与执行能力的异构智能节点，通过网络化交互构成的、能够在不确定性战场环境中持续适应并演化其行为逻辑的复杂人机协同系统^[1]。其本质特征不在于单装性能的叠加，而在于体系层级上涌现出的功能连续性维持能力，即在态势剧变、信息残缺与对抗演化等多重扰动下，仍能保障作战链路不中断、任务逻辑可重构、能力再生可持续。这一能力的核心支撑，正是本文聚焦的“学习性”。

该转型的深层动因源于现代战场环境中日益凸显的三重结构性挑战：第一，对手的战术行为呈现出明显的动态演化特征，使战场态势持续处于非稳态变化之中，传统依赖固定响应模式的体系难以及时适配新出现的对抗场景^[2-3]；第二，受电磁压制、地形遮蔽等物理条件限制，感知系统获取的信息普遍存在缺失与失真现象，导致对战场环境的认知表征与实际状态之间出现显著偏差^[4-6]；第三，随着装备单元数量大幅增长及功能差异化程度不断加深，集中式控制在计算资源与通信带宽的双重约束下逐渐丧失工程实现的可行性，体系控制逻辑客观上趋于分布式的自主运行模式^[7]。在此背景下，以静态规则库和预设流程为核心的传统体系架构的内在局限性逐渐显现：当实际对抗情境偏离既有训练经验覆盖的范围时，体系在行为响应上易表现出滞后性增强、判断偏差累积以及多节点协同关系紊乱等现象，进而影响整体任务执行的稳定性与连贯性。已有作战实践表明，缺乏适应能力的规则体系，在持续对抗中往往难以维持其预期功能输出；具备内生学习机制的体系则更有可能在动态变化中保持行为逻辑的连贯性与任务目标的可达性，从而为维持战略层面的主动性提供基础支撑。由此可认为，学习性已不再仅是一种附加的技术能力，而是

智能化装备体系在高度不确定与强对抗环境下维持其功能存在与任务有效性的基本前提。换言之，学习性构成了此类体系得以持续运行并发挥战斗力的结构性必要条件——它并非对既有性能的增量优化，而是体系在复杂性升维背景下实现自我维系与能力再生的内在机制保障。

现有研究虽在单装自主决策、多智能体协同与对抗演化建模等领域取得进展，但整体仍囿于三重割裂：第一，层级建模彼此孤立，单装层侧重局部策略收敛，系统层假设通信完备与任务静态，体系层停留于宏观描述，缺乏对“学习如何从个体行为升华为体系能力”的结构化阐释；第二，评价指标脱离实战语境，算法层面的累积回报或收敛速度难以映射至“观察-判断-决策-执行”（observe-orient-decide-act, OODA）压缩率、杀伤网韧性、战损交换比等作战实效维度；第三，模型构建普遍忽视任务突变、装备损耗与强扰动等典型作战场景，致使理论结果难以解释体系在持续对抗中的能力保持机制^[8-10]。

本文立足军事智能演进规律与实战需求，提出一个贯通本体论基础、作用机理与实现路径的统一分层理论框架，将学习性严格界定为智能化装备体系在不确定性中维持功能连续性的存在论能力，并依循“智能节点-智能系统-智能体系”三层结构，系统演绎其从鲁棒自主、涌现协同到认知演化的跃迁逻辑；进而阐明三层间通过数据上行、规则下行与效能反馈形成的闭环耦合机制，揭示作战效能非线性放大的深层原理，旨在为智能化装备体系的顶层设计、效能评估与能力生成提供理论探索 and 支撑。

1 学习性的历史逻辑：智能化战争语境下的必然选择

1.1 战争范式跃迁：从力量主导型向认知适应型的深刻转型

装备体系若丧失自主更新行为策略的能力，其结构性脆弱将不可避免地在高强度对抗中暴露，进

而导致作战效能系统性坍塌——这一判断并非经验推论，而源于现代战争复杂性已越过临界阈值，使静态架构失去维持功能连续性的基本条件^[11]。尤其关键的是，自主决策能力已不再仅是单装层面的技术指标，而是直接决定体系整体战斗力生成效率的核心变量：当个体节点无法在通信中断或感知失真时独立校准行为边界，其误判将通过耦合网络放大为协同失效；当系统层无法依据交互反馈动态优化协作规则，局部弹性将转化为全局混乱；当体系层缺失对战法规则的迭代能力时，技术优势便迅速折价为认知劣势。因此，学习性实为战斗力可持续生成的前提要素，其必要性根植于战争形态演进的不可逆逻辑。

人类战争史的本质，是作战系统应对环境不确定性能力的持续跃迁过程。机械化战争阶段确立“力量投送主导型”范式，其效能基础在于平台物理性能的线性叠加，即火力密度、机动速度与防护强度构成的三维优势域。该范式隐含两大前提：环境状态可预知和任务目标具有静态性，故决策逻辑以预定程序与人工指挥为核心，追求在确定性条件下实现最优解。信息化战争阶段转向“信息流主导型”，依托数据链构建感知-决策-打击闭环，显著提升态势理解精度与响应速度。然而其底层假设仍未动摇：对方行为模式相对稳定，可被建模为有限状态马尔可夫过程；指挥控制仍以集中式为主导，体系行为具有高度可复现性与可预测性。在此框架下，自主决策仅作为辅助环节存在，其作用限于提升执行效率，而非重构作战逻辑^[12]。

进入智能化战争阶段，上述前提发生结构性瓦解。第一，对方战术策略呈现强非平稳性与非遍历性特征，其决策机制深度融合强化学习与生成式模型，具备在线调整行动偏好、动态重构响应规则的能力，使任何固定行为模板均在数轮对抗后落入可建模区间；第二，战场环境受气象扰动、电磁压制与地形遮蔽等多重因素耦合影响，呈现强非线性与时变特性，导致态势表征持续漂移，传统基于稳态假设的建模方法失效；第三，作战单元数量激增且功能异构性深化，使集中式调度在计算复杂度与通信带宽双重约束下失去工程可行性，分布式自主成为唯一现实路径^[13]。

三重变革的叠加使传统体系架构依赖的若干基本前提受到持续冲击，并由此暴露出明显的适应性局限。首先，静态规则集由于缺乏根据对抗反馈进

行调整和更新的机制，其适用范围往往受限于既有经验条件；一旦对手策略发生变化，原有行为模式便可能被识别、预测并加以针对性抑制，从而使体系逐渐转入被动应对状态。其次，依赖全局态势图的集中决策模式，通常以信息相对完整和传输相对稳定为前提，在信息缺失、感知失真和链路受扰的条件下，这种模式容易出现态势判断偏差、决策链条拉长以及响应效率下降等问题。再次，分布式结构虽然在一定程度上缓解了集中式架构面临的通信与计算压力，但如果缺乏跨层级的协同学习与规则校准机制，也可能出现局部决策之间难以有效耦合的情形，进而影响系统层面的整体协同效果，甚至诱发策略上的不一致。从已有作战实践和相关对抗现象来看，体系能否保持对环境变化和对手策略调整的持续适应，已成为影响其功能稳定性的重要因素之一。若体系的规则更新与认知调整长期滞后于对手的策略变化，其既有部署和预设方案的有效性通常会受到削弱，并可能在持续对抗中表现出更高的失配风险。近年若干局部冲突中，部分预设电子对抗方案在对手快速调整战术后难以维持原有效果，这在一定程度上说明，单纯依赖静态规则和预设防御的体系架构在高度动态的对抗环境中面临较明显的适应性压力。也正因如此，如何将学习、调整与协同更新机制嵌入体系运行过程，已成为智能化装备体系架构演进中一个值得重点讨论的理论课题。

由此，作战范式必然向“认知适应主导型”跃迁。其本质特征在于：体系不再满足于对当前态势的最优响应，而必须具备对未来态势的建模与推演能力；决策重心从“执行既定流程”转向“生成适应性策略”；效能衡量标准也从任务完成率延伸至策略演化速率、环境适应广度与认知窗口持续时间。在此范式下，学习性超越技术附加属性，升格为体系维持功能性的存在论规定，它使装备系统在对方策略演化、环境扰动叠加与任务目标变更的三重压力下，仍能通过内部模型持续重构，保障行为输出的连贯性与有效性。换言之，学习性即智能化时代作战体系的负熵源：通过持续吸收对抗经验、修正认知偏差、生成新策略，抵消战场混沌带来的系统熵增，维系功能有序。这一能力并非由算法堆砌而成，而源于对战争本质的深刻把握——未来制胜的关键，已从物质能量的规模优势，转向认知迭代的速度优势与深度优势。唯有将学习性内嵌于体

系架构本体，方能实现从“适应战场”到“塑造战场规则”的战略跃升。

1.2 技术边界重塑：从感知增强到认知内生的代际演进

先进技术的军事化应用从来不是能力的线性叠加，而是一场由认知范式重构引发的质变跃迁。智能化技术的深度发展构成了智能化装备体系必须具备学习能力的根本动因之一——当系统获得构建内部表征、推演未来状态与生成适应性策略的能力时，其角色已从执行终端升格为认知参与者，学习性随之成为维系体系功能存续的内在规定。

该跃迁过程可划分为3个清晰的技术代际。第一阶段为感知增强型辅助系统，以卷积神经网络与多源融合滤波为代表，系统仅能在人类指令框架内执行预设任务，如目标初筛、威胁排序与路径建议，其行为逻辑完全受控于外部程序，不具备建模与策略生成能力，属于典型的工具理性延伸。第二阶段为决策支持型自适应系统，伴随深度强化学习与部分可观测马尔可夫决策过程（partially observable markov decision process, POMDP）建模的成熟，系统可在有限扰动下进行策略微调，例如动态火力分配或应急通信切换，但其适应边界仍受限于训练分布，面对分布外任务常陷入探索失效或过度保守的困境，核心瓶颈在于缺乏对战场动态的因果理解。第三阶段为认知内生型自主系统，其突破源于世界模型与元学习的协同演进：世界模型使单装能在内部构建环境的动力学表征并推演行动后果，元学习则赋予其仅凭少量样本即可快速适配新任务的能力，二者共同支撑“感知-建模-推演-适应”闭环，使单装从被动响应单元蜕变为具备初步认知自主性的决策节点。

此类能力集成引发深刻的主体性重构。装备体系虽仍处于人类战略意图与伦理边界的约束之下，但在战术执行层已能独立界定问题域、生成候选策略并评估其可行性与风险。这一能力并非拟人化修辞，而是技术演化的客观结果。当系统可基于对抗经验修正自身策略库，并将修正结果反馈至群体交互协议时，其已实质参与作战逻辑的建构。在强对抗环境下，人类难以对瞬时突发状况作出即时指令，体系必须依靠内生学习维持功能连续性。此时，学习性成为人机协同的结构性耦合枢纽：人类负责战略意图设定与价值边界校准，机器承担战术层面的快速迭代与环境适应，二者通过持续学习实

现动态平衡。

由此可明确认识：智能化技术的发展，从根本上重塑了装备体系的存在方式——从“被编程”走向“自组织”，从“执行流程”转向“生成策略”。当技术赋予系统构建世界模型、进行分布外泛化与策略自我演化的可能时，若体系仍固守静态规则库与预设流程，其认知维度将迅速落后于对手，效能衰减不可避免。因此，学习性并非可选附加功能，而是技术演进倒逼下的必然选择；智能化装备体系必须学会学习，这既是应对动态对抗的生存要求，更是技术红利转化为实战优势的唯一路径。唯有将学习能力内嵌于体系本体，方能在对方策略演化、环境扰动叠加与任务目标突变的三重压力下，持续注入负熵以维系功能有序，实现从“适应战场”到“塑造战场规则”的能力跃升。

1.3 复杂性临界：异构、自主与对抗三重张力下的功能存续需求

未来智能化装备体系已演变为由数百类异构智能节点、动态耦合交互协议与实时演化对抗环境共同构成的开放复杂系统。其规模、异构性与自主程度同步攀升，使系统整体逼近功能解耦的临界阈值。当各单元在自主运行中遭遇动态对抗压力时，学习性成为维系体系功能整合的关键结构性保障。此临界状态并非偶然现象，而是由异构性、自主性与对抗性三重张力共同驱动的：三者相互强化，导致传统基于统一建模与集中控制的治理范式彻底失效，唯有学习性可提供动态适配路径，使体系在结构解耦风险中维持功能整合。

第一重张力源于装备异构性，直接导致规则普适性丧失。现代体系集成预警探测、精确打击、电子对抗、无人集群等多类功能单元，其动力学尺度、任务优先级与资源约束差异悬殊。若强求统一决策框架，无异于以单一控制律统摄不同物理层级的子系统，必然引发行为冲突与协同失配。学习性在此提供去中心化解法：各单元在本地维护个性化策略空间，并通过轻量级交互协议（如共享隐状态表征或分布式信用分配）实现行为协调。该机制不追求全局一致性，而是依靠局部适应性达成整体功能涌现，有效化解异构带来的系统耦合难题。

第二重张力源于单装自主性的制度性增强，进而放大行为不确定性。为提升战场生存能力，单装被赋予在通信中断、传感器失能等异常工况下独立决策的权限。若其策略库僵化不变，微小扰动即可

触发连锁误判，例如目标识别偏差诱发友邻误伤或任务优先级误判导致火力资源错配。此种级联效应源于个体决策与群体目标之间的反馈失配。具备在线学习能力的单装则可在保障基本行为鲁棒性的前提下，动态校准其决策边界：通过小样本经验更新策略参数，在个体弹性与群体一致性之间建立动态平衡。换言之，学习性使单装从“固定响应器”转变为“可塑性执行体”，其微观适应能力构成了体系宏观稳定的底层支撑。

第三重张力来自对方对抗性的持续升级，构成最严苛的选择压力。在高强度对抗中，对方策略库不断迭代演化，任何静态部署均将在数轮交锋后暴露适应盲区。当体系学习速率持续低于对方策略演化速率时，即形成“适应性赤字”，其作战效能将呈指数衰减趋势。此时，学习性不再仅服务于效率优化，而是成为抵抗系统熵增、维系功能有序的负熵源：它通过持续吸收对抗经验、修正内部模型、生成新策略，抵消环境扰动引发的秩序退化。其核心价值在于，为体系在强扰动环境中保留功能存续的可能性空间，使其不致崩溃，从而为后续能力跃迁提供基础条件。

综上，智能化装备体系的复杂性已达到结构性临界点：异构性瓦解统一规则基础，自主性放大局部不可预测性，对抗性施加持续演化压力。三者叠加，使静态架构失去工程可行性。在此背景下，学习性从技术选项升格为功能维持的刚性需求：它并非附加功能，而是体系在高维、非平稳、强对抗环境中维系功能连续性的内在规定性。因此，体系复杂性的临界跃升，正是智能化装备体系必须学会学习的根本动因之一。唯有通过内生学习机制实现动态调适，方能在结构解耦风险中保持功能整合，最终完成从“机械集合体”向“认知生命体”的质变跃迁。

2 学习性的层级内涵：智能节点、系统与体系

2.1 节点层的存在基线：作为“鲁棒自主”的学习性

智能节点的学习本质，是其在信息不完备与环境强扰动条件下构建并维持行为输出稳定边界的认知自律能力。此处的“稳定边界”并非追求全局最优解，而是确立一个物理可执行、逻辑自洽且风险可控的最低行为阈值。它确保单装在传感器失效、

通信中断或规则缺位等极端情境下，仍能拒绝随机响应，转而采取有界限的理性试探。该边界构成体系功能存续的微观基座：当上层协同崩溃、指令流中断时，单装依靠此基线维持基本作战能力，避免功能解耦引发的级联失效。换言之，鲁棒自主不是性能冗余，而是存在底线，学习性在此层面上是个体在不确定性中持续存在的根本保障。

学习类型可归纳为3类，三者彼此互补、分层演进。

第一，风险敏感策略生成。该类型以极小化最坏情形损失为优化目标，摒弃传统强化学习中期望回报最大化的范式，契合军事行动中生存优先的根本原则。其底层逻辑在于：战场扰动具有非高斯、非平稳特性，期望值易被极端事件扭曲，而风险敏感准则通过约束扰动集内所有可能轨迹下的最低收益，确保策略在最不利场景下仍满足预设安全阈值。运行机理上，系统在感知建模阶段将异构传感数据压缩为低维状态变量，提取任务强相关不变量；进入策略试错阶段后，在世界模型支持下生成多个候选策略，并评估其在分布外扰动集下的最坏表现，仅保留满足安全阈值的可行策略子集；最终在行为固化阶段嵌入执行模块，形成具备参数弹性的决策基线，支持后续微调。该机制使单装在突防、侦察等高风险任务中，优先规避已知致命威胁区，即使路径稍长也可接受，从而将生存概率内化为策略生成的先验约束。

第二，世界模型驱动的虚拟推演。世界模型并非环境的像素级复现，而是面向决策效用的因果表征结构，其核心功能在于将高维非结构化观测编码为可推理的状态空间，并支持对行动后果的前向模拟。该模型由感知编码器、动态预测器与行动评估器3个部分协同构成，感知编码器负责从多源输入中提取时空不变特征；动态预测器建模状态转移规律，内嵌物理定律、战术常识与对抗逻辑；行动评估器则将物理结果映射至作战价值尺度，完成策略可行性与风险水平的综合校准。其本质是构建一个可证伪的战术信念系统——每一次预测误差的修正，都是对“个体能在特定战场环境中存续并履行职能”这一根本信念的迭代确认。运行中，系统在策略试错期将当前态势输入世界模型，生成若干行动序列并在模拟中注入多重扰动，评估各序列的后果边界，筛选出在扰动集中始终满足安全阈值的稳健策略。此过程实质是将外部不确定性内化为可控

的推演变量,使单装得以在真实执行前完成虚拟试错,极大降低实战探索成本。其军事价值在于,赋予单装在规则缺失情境下的自主建模能力,当既定交战规则失效时,其仍能基于因果推演生成临时行为准则。

第三,人在回路的认知校准。此类型并非简单的人工干预,而是通过可解释接口将人类的价值先验与经验约束结构化注入策略空间,实现规范性引导。其底层逻辑在于:机器学习的策略空间可能存在伦理偏离或战略脱节风险,必须由操作员对关键决策维度施加边界约束。其运行机理体现为双向反馈闭环:系统向操作员呈现决策依据的逻辑链条,包括所依赖的感知证据、推演前提及风险权衡框架,操作员据此提供定性修正意见,如强调某类地形的历史战术风险或调整任务优先级权重等;该反馈经知识蒸馏转化为策略参数的偏移量,用于校正世界模型的先验分布或风险阈值设定。此过程既保障单装的战术自主性,又维系其与高层意图的一致性,避免因局部优化导致整体目标偏移。

综上,智能节点的学习性绝非算法技巧的堆砌,而是一种以生存为前提、以因果可证伪为路径、以行为边界维稳为结果的认知自律能力。它通过风险敏感约束锚定底线、世界模型推演拓展空间、人在回路校准确保合意,共同支撑一个动态演化的“存在信念”结构。该信念并非静态知识储备,而是持续被对抗经验修正的活性认知框架。这一框架使单装在强扰动、高对抗、低可观测的现代战场中仍能保持功能连续性,成为整个智能化装备体系韧性的第一道防线。

2.2 系统层的结构增益:作为“涌现协同”的学习性

智能系统的学习本质并非个体能力的叠加或交互协议的调试,而是一种以协同结构为学习客体、以功能耦合关系为演化目标、以分布式约束为先验条件的结构性自组织能力。其核心在于系统不学习“如何协作”,而是学习“何种结构能产生有效协作”。协作效能的非加性增益源于该学习过程将拓扑构型从静态配置升华为可建模、可抽象、可泛化的认知对象。

第一,协同结构具备本体可学习性。传统系统观将网络拓扑视为固定物理连接或预设通信协议,智能化系统则将其视作动态可塑的认知实体。结构本身成为被表征、被评估、被修正的对象:系统通

过对交互历史的因果分析,识别高价值功能耦合对(如电子压制与突防单元间的时序互补性),继而将此耦合映射为可量化结构参数(如间距梯度、信息延迟窗口、冗余覆盖密度),并构建关于“结构-效能”映射关系的隐式模型。此过程使拓扑脱离物理载体束缚,转化为可在虚拟空间推演与优化的抽象变量。正如单装层将状态压缩为低维表征,系统层将协作关系压缩为结构特征向量,从而为后续演化提供操作基础。结构的可学习性是涌现协同得以发生的前提。

第二,功能耦合关系具有内生演化性。系统并非被动响应外部指令以调整协作方式,而是依据任务流动态与效能反馈,自发生成新的功能耦合模式。其演化动力来自两类内生机制:一是基于局部交互效用的信任权重再分配,使节点间的依赖关系随环境变化而弹性重构;二是通过轻量级知识聚合,将分散经验升华为群体共识模型,使隐性战术知识跨单元流通并沉淀为新型耦合规则。此类演化不依赖全局优化目标函数,而由局部适应行为累积形成。当某类编队构型在多次任务中持续提升杀伤网韧性与任务弹性时,系统即倾向于强化该模式的结构参数配置,使其从偶然成功转化为稳定功能模块。此即“正反馈学习”在系统层的体现:优势结构被选择、放大与固化,推动整体能力超越个体简单加和。

第三,分布式约束构成学习的先验建构场。局部观测受限与通信带宽约束并非学习的障碍,而是塑造学习形态的根本条件。在无全局可观测性前提下,系统无法依赖中心化调度达成最优协同;相反,其必须发展出一种“去中心化但结构有序”的学习范式:各节点在有限信息窗内构建局部世界模型,并通过注意力机制动态识别最具决策影响力的邻域关系。在此基础上,知识共享机制以加密、轻量形式实现跨节点经验整合,既保障数据主权,又避免信息孤岛。此类约束迫使系统放弃对“精确最优解”的追求,转向对“结构鲁棒性”与“任务适应性”的平衡探索。其学习产出不再是单一策略,而是一组可在扰动下维持效能边界的协同构型集合。分布式约束由此从限制条件升华为学习的生成性语境。

综上,智能系统的学习性是体系在结构性约束条件下,将协同拓扑作为认知对象并通过内生演化生成适配性功能耦合关系的能力。它体现为一种结

构自觉：系统不仅执行任务，更持续反思“自身如何被组织才能更好地完成任务”。此能力使体系摆脱对集中控制的路径依赖，在开放架构中自主孕育更具适应性的作战形态。其终极价值不在于单次任务的效率提升，而在于构建一种可持续的、抗毁性强的、能随对抗演化而进化的作战结构秩序。

2.3 体系层的规则主导：作为“认知演化”的学习性

智能装备体系的学习性，本质是其作为复杂适应系统在对抗扰动下持续生成有效作战规则的能力。它并非对既有策略的优化补充，而是规则本身成为可建模、可演化、可重定义的认识对象。体系通过元层级操作将战法从执行结果升格为生产过程，从而确立自身在对抗中的认知主导地位。这一能力的实现根植于三层结构性规定：规则的可计算表征、空间的动态塑形与认知-工程的闭环传导。

首先，作战规则必须被解构为高维参数化的结构实体。传统条令或经验总结因缺乏形式化接口而无法进入学习域，唯有将其映射为具有几何意义的策略流形，维度对应时机阈值、协同触发条件与资源分配比例等关键变量，拓扑结构反映规则间的兼容性与转换路径，体系才能对其实施梯度引导与演化搜索。在此表征下，一次战术失败不再仅是任务偏差，而是流形上某区域的局部凹陷；一次成功突防则成为新吸引子的形成信号。规则由此脱离静态文本，成为可被观测、扰动、选择的动态客体。

其次，体系的一项关键能力体现在其对作战规则构成的认知空间进行持续调整与优化的机制上。该空间并非静态不变的规则集合，而是在历史对抗经验积累的基础上，由策略生成与评估机制协同作用形成的动态结构。在实际运作中，体系常借助高频次的虚拟对抗推演，开展多轮次的规则探索：首先生成若干候选战法方案，随后将其置于高保真仿真环境中进行多维度检验，检验标准通常涵盖任务达成效果、系统级韧性表现及资源消耗效率等作战相关指标；经综合评估后，表现相对稳定的方案可被进一步加工，例如通过规则要素的组合调整或局部参数微调，形成新的规则变体；这些更新后的规则再以结构化方式反馈至单装行为边界设定与系统层级协同协议中，从而实现从认知层到执行层的渐进式渗透。在此过程中，规则空间的构成与分布可能随对抗经验的积累而发生缓变，其演化节奏与对环境变化的响应能力之间存在一定的关联性。从某

些对抗实践中观察到：当体系能够以较快节奏完成规则的验证与更新时，其在面对对手策略变化时表现出的行为适应能力往往更显著；反之，若规则调整明显滞后于外部变化，则易出现行为逻辑与实际态势脱节的现象。需要指出的是，此类现象的显现，高度依赖于仿真环境的保真度、评估指标选择的合理性以及规则注入机制的工程可行性，并不构成普适性结论，更多的是反映一种在特定技术路径下可观察的操作逻辑。

最后，上述认知演化必须通过稳定接口传导至工程执行层。体系层不直接命令节点行为，而是将演化出的元规则解构为结构性约束参数。例如，将“突防-掩护”协同逻辑转化为电子战平台对突击单元的注意力权重函数或把“抗毁优先”原则编码为分布式信用分配机制的衰减系数。这些参数嵌入系统层交互协议后，驱动单装在局部自主中自然呈现全局一致性。更关键的是，执行层反馈的效能偏差（如OODA环超时、杀伤链中断）被逆向解析为规则失配信号，触发新一轮元反馈调节，由此形成的“认知生成→结构注入→行为涌现→偏差回传”闭环，使学习不再是离散事件，而成为体系存续的持续代谢过程。

因此，学习性在此已超越方法论范畴，升华为一种存在论属性，它确保装备体系在对方策略演化、环境非平稳扰动与任务突发变更的三重压力下，仍能维持功能输出的连贯性与有效性。其终极体现并非某次作战的胜利，而是体系在长期对抗中始终保持“可被理解、可被预测、可被改进”的认知可及性，这正是智能化战争时代装备体系得以存续并胜出的根本前提。

3 学习性的实现路径：三层结构的耦合机理与工程逻辑

3.1 智能节点层的实现：鲁棒自主的构造逻辑

智能节点的学习实现并非若干算法的拼接，而是一个以表征层、推演层与决策层为骨架的协同认知架构，其本质是将2.1节界定的“风险敏感策略生成”“世界模型驱动推演”与“人在回路认知校准”3类学习本质结构化嵌入三层流程，形成跨层耦合的鲁棒自主生成机制。此架构不追求全局最优解，而致力于在信息不完备与环境强扰动下，构建并维持行为输出的可靠边界——即“不失控”的微观基座。

表征层承担现象提纯与因果奠基功能，其核心任务是从高维异构感知流中生成具备任务强相关性与物理可解释性的低维状态变量集。该层技术路径以变分自编码器与对比学习为基础，但关键创新在于引入物理规律与战术常识作为结构化先验约束。例如，通过联合建模雷达回波时序特性与运动学参数，使特征空间天然区分局部杂波与真实目标，避免黑箱表征导致的误判风险。此过程实质是为后续学习提供可信的状态输入域，它既服务于风险敏感机制对“最坏情形”的定义精度（因状态失真将导致风险误估），也为世界模型提供可验证的初始化先验（如将地形坡度、电磁反射率等嵌入状态向量），同时为人机校准提供可解释界面，操作员可追溯某决策如何源于特定感知特征组合，从而增强反馈有效性。

推演层构成认知闭环的核心引擎，其功能是构建一个内嵌作战物理约束与战术逻辑的动态世界模型，支持对行动后果的前向模拟与反事实推演。该层采用动态贝叶斯网络或神经微分方程等工具，不仅建模状态转移规律，更将弹道学、电磁传播模型及典型交战模式编码为推演规则，确保在有限样本下仍可合理外推未知战况。其深层价值在于：一方面，它为风险敏感策略提供扰动场景下的性能包络评估能力，使系统能在执行前识别并规避已知高风险策略路径；另一方面，它将人在回路的规范约束转化为推演前提，例如，当操作员设定“禁止进入某类地雷区”时，该约束被注入模型的状态转移禁令集，直接限制推演空间，而非事后过滤结果。由此，推演层成为3类学习本质的交叉操作平台：风险敏感性决定推演的评估准则，世界模型提供推演载体，人在回路则定义推演的边界条件。

决策层是学习成果的最终落地点，其技术实现以风险敏感策略梯度算法为核心，但绝非孤立运行。它接收来自推演层的多条行动序列及其在扰动集下的最劣表现评估，并将人类操作员设定的安全阈值作为硬性约束，强制筛选出满足生存底线的可行策略子集。更重要的是，该层通过可解释性接口将决策逻辑反向映射至表征层与推演层。例如，某策略被采纳，因其在推演中始终处于预设安全边界内，而且所依赖的状态特征具有明确的物理依据；若操作员提出修正，系统可定位至具体表征模块或推演假设予以调整。此机制使决策层成为多源约束的融合枢纽：风险敏感机制保障下限，世界模型拓

展可行性，人在回路确保意图对齐，三者共同生成具备参数弹性、可追溯、可校准的行为基线。

综上，该三层架构的协同机理在于：通过内部模型的持续校准，将外部不确定性转化为内部可控变量；当环境突变时，闭环可快速收缩策略空间，规避已识别风险域，从而在保证生存的前提下维持任务连续性。其终极价值不体现为单项指标提升，而在于为上层系统提供稳定可靠的行为输入源。唯有单装层面实现“不失控”的鲁棒自主，体系级的涌现协同与认知演化才具备坚实微观基础。此即智能节点学习的构造逻辑：非追求完美，而确保存在；非被动响应，而主动稳态。

3.2 智能系统层的实现：涌现协同的组织逻辑

系统层的学习实现并非对单装行为的简单聚合，而是在分布式约束下，通过结构感知层-耦合演化层-约束内化层三层递进式技术架构，将“协同结构作为可学习对象”“功能耦合作为内生演化目标”“分布式约束作为先验建构场”三大本体规定，转化为可工程部署的认知操作流程。该实现路径的核心逻辑在于使系统具备从局部交互中抽象结构规律，在扰动环境中动态优化耦合关系，并将任务约束内化为行为规范的能力，从而生成非加性的协同增益。

结构感知层承担对协同拓扑的实时建模与动态表征功能，其本质是将物理连接与逻辑关联共同编码为可计算的结构变量。该层以图神经网络与因果发现算法为基础，从异构节点的通信日志、行动时序与效能反馈中挖掘高价值功能耦合对（如电子压制单元与时敏目标突防单元之间的时序互补性），并将其映射为结构参数（间距梯度、信息延迟窗口、冗余覆盖密度）。此过程并非静态图构建，而是持续更新的结构势场估计：系统依据局部观测偏差与全局效能偏移，修正各边权重与节点属性，使结构表征始终逼近当前环境下的最优拓扑形态。该层直接支撑“协同结构可学习性”，它将拓扑从被动配置升级为主动认知对象；同时为“分布式约束先验建构性”提供输入：通信带宽限制被建模为容量约束，局部观测盲区被编码为节点可观测性衰减函数，使结构推理天然兼容现实作战条件。

耦合演化层构成系统能力跃升的核心引擎，其功能是在结构感知基础上，驱动功能耦合关系的自适应优化与正反馈放大。其实现依赖两类协同机制：一是基于注意力机制的动态信任赋权，使各节

点能依据实时交互效用，自主调整对邻域节点的依赖强度，从而在局部扰动下快速重构最优合作链；二是轻量级知识聚合框架（如联邦知识蒸馏），在保障数据主权的前提下，将分散经验升华为群体共识模型，支持隐性战术知识的跨单元流通与复用。关键在于，此类演化不依赖中心化目标函数，而是由局部适应行为累积形成：当某类编队构型持续提升杀伤网韧性与任务弹性时，系统即强化其结构参数配置，使其从偶然成功固化为稳定功能模块。此过程体现“功能耦合内生演化性”，耦合关系非预设规则，而是系统在任务流中自发生成的适应性产物；同时反向增强“协同结构可学习性”——演化结果不断反馈至结构感知层，用于修正结构势场模型，形成“感知→演化→再感知”的闭环迭代。

约束内化层是系统学习成果落地的最终接口，其作用是将任务意图、作战规则与生存底线转化为可执行的行为规范与结构约束。该层通过可解释性接口接收高层指令（如“禁止进入雷区”“优先保障突防通道连续性”），并将其解构为3类可操作约束：结构约束（如强制规定某类任务中无人机与电子战平台的最大通信时延阈值）、耦合约束（如限定掩护单元对突防单元的最小响应时间窗口）、行为约束（如设定单装在通信中断时的默认规避策略集）。这些约束并非静态插入，而是由元学习机制动态适配：系统在历史对抗中识别出哪些约束组合在特定任务类型下最有效，并将其编码为轻量级协议模板，注入节点行为函数。此过程实现分布式约束先验建构的深层转化，外部约束被内化为系统自身的结构性先验；同时保障“功能耦合内生演化性”不偏离战略边界，无论耦合如何演化，其产出始终落在预设的价值可行域内。

综上，该三层架构的协同机理在于：结构感知层提供可学习的拓扑表征，耦合演化层驱动功能关系的自主优化，约束内化层确保演化结果符合战略意图。三者交织运作，使系统不仅能在扰动中维持协作连续性，更能从中提炼结构规律、生成新型耦合模式，并将其制度化为可持续能力。此即系统层学习的实现逻辑，非模仿人类指挥，而是构建一种具备结构自觉、耦合弹性与规则内生能力的分布式认知主体，为体系级认知演化提供坚实中观基础。

3.3 智能体系层的实现：认知演化的调控逻辑

体系层的学习实现并非算法组合或仿真规模扩展，而是对“规则自创生”本体规定的结构性执

行，其技术通路由规则的形式化建模、策略流形的在线演化与元规则的工程注入构成，三者形成从认知生成到物理落地的闭环传导链。

规则的形式化建模能力是学习得以启动的前提，它要求将作战逻辑解构为可参与演化计算的结构实体。传统战法因依赖自然语言描述而无法进入学习域，体系层通过构建策略参数化流形实现突破，该流形以时机阈值、协同触发条件与资源分配比例为坐标轴，使战术自由度获得几何表达，规则间的兼容性与转换成本则由流形的局部曲率与拓扑连通性表征。这一建模过程本身就是一次认知抽象，它剥离经验性叙述，保留可变性内核，使规则具备被扰动、被比较与被组合的数学资格。技术上，该建模依托因果图谱与符号-神经混合架构共同完成，前者明确界定战术要素间的必然关系与或然依赖，如电子压制持续时间超过临界值时突防窗口开启的确定性条件；后者则拟合高维非线性边界，如多源干扰叠加下协同失效概率随信噪比变化的连续函数。唯有完成此步骤，后续演化才拥有可操作的对象基础。

策略流形的在线演化机制构成学习的核心驱动力，其本质是以作战效能为选择压力驱动规则空间的定向迁移。策略生成器基于历史对抗数据与环境先验持续产出候选战法变体，这些变体被注入高保真数字孪生战场接受多维扰动下的抗压测试，评估函数综合任务成功率、战损交换比与OODA环压缩率等军事效标生成适应度排序，优胜者经交叉重组与微变异产生新一代种群并循环迭代直至收敛至局部最优策略簇。关键在于，演化目标被明确限定为规则分布的长期稳健性而非单次任务胜利，系统优先保存那些在多种扰动下均表现稳定的规则，使其在面对未知威胁时仍具有可启动性。由此，策略流形的吸引子区域自发向高韧性与高泛化方向偏移，实现空间的动态塑形。

元规则的工程注入接口解决认知成果如何稳定渗透至执行层的问题，体系层不直接命令节点行为，而是将演化出的优胜战法解构为两类可部署参数：一类是系统层协同协议的约束参数，规定信息共享频次下限或决策权限下放阈值以调节多平台间的信息耦合强度；另一类是单装层策略偏好调制参数，设定生存奖励与任务奖励的动态权重比或风险规避系数以塑造个体在自主决策中的价值倾向，这些参数通过标准化接口注入下层策略库，形成认知

输出经结构约束转化为行为涌现的三级传导路径。更深层的设计在于双向反馈通道的存在，当执行层因规则失配出现效能衰减，例如杀伤链响应时延持续超阈值时，该偏差被逆向解析为元规则置信度下降信号，触发新一轮演化重置，从而确保学习不是一次性固化过程，而是永续的代谢循环。

综上，体系层的“如何学习”实为一场在形式化空间中以作战效能为选择压力的认知达尔文主义实践：规则建模提供演化基底，流形演化实现范式跃迁，工程接口保障落地闭环。三者协同使装备体系获得在强对抗环境中自我定义作战逻辑的能力，这不仅是技术实现，更是智能主权的根本确立。

4 结束语

本文立足于智能化战争形态演化的深层逻辑，系统提出并阐释了“智能化装备体系的学习性”这一核心命题。研究认为，学习性并非算法层面的技术附加，而是装备体系在高度不确定、强对抗环境中维持功能连续性的存在论能力。通过构建“智能节点-智能系统-智能体系”三层分析框架，本文分别界定了“鲁棒自主”“涌现协同”与“认知演化”作为各层级学习性的本质规定，并进一步揭示了从表征推演、结构感知到规则建模的层级实现路径及其耦合机理。这一理论框架的意义在于：它将学习性从技术指标升格为体系设计的前提性变量，为理解智能化装备体系如何从“被动响应”走向“主动演化”提供了系统的认知工具；同时，也为未来装备体系在认知对抗中实现战略主动，奠定了可工程化的理论基础。面向未来，如何将学习性嵌入装备体系的全生命周期设计，如何在实战化环境中验证其演化效能，仍是亟待深入探索的关键课题。唯有持续推动学习性从理论走向实践，才能真正构建起适应未来战争需求的“认知型装备体系”。

参考文献：

- [1] Li X D, Dunkin F, Dezert J. Multi-source information fusion: Progress and future[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(7): 24-58.
- [2] Zhou Z H, Wei P J, Wang Z Y, et al. Towards human-centered interaction with UAV swarms: Framework, system design, and user study[J]. Design and Artificial Intelligence, 2025, 1(3): 100029.
- [3] Zabala-López A, Linares-Vásquez M, Haiduc S, et al. A survey of data-centric technologies supporting decision-making before deploying military assets[J]. Defence Technology, 2024, 42: 226-246.
- [4] Chen X, Li L X, Zhang W, et al. Command and control system in intelligentized warfare[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Conference on

Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 951-954.

- [5] Liu C, Li J, Wang Y, et al. A time-driven dynamic weapon target assignment method[J]. IEEE Access, 2023, 11: 129623-129639.
- [6] León-Pamplona J C, Guerrero-Sierra H F, Wilches-Tinjacá J A. Lethal autonomous weapons systems (LAWS)[J]. Revista Científica General José María Córdova, 2025, 23(52): 761-784.
- [7] Grosvenor A, Zemlyansky A, Wahab A, et al. Hybrid intelligence systems for reliable automation: advancing knowledge work and autonomous operations with scalable AI architectures[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2025, 12: 1566623.
- [8] 王飞跃. 未来的智能生态 \cong AIR²IST+LaSEE²CiSEE+SEE²H₃O[J]. 智能科学与技术学报, 2025, 7(2): 139-142.
Wang F Y. The future ecology of intelligence: AIR²IST+LaSEE²CiSEE+SEE²H₃O[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2025, 7(2): 139-142.
- [9] Gibney E, Witze A, Ahart J. Trump's AI 'genesis mission': what are the risks and opportunities?[J]. Nature, 2025, 648(8093): 253-255.
- [10] Kaber D. From automation to autonomy through AI: enabling and retaining human controllability[M]//Xu W. Handbook of human-centered artificial intelligence. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025: 1-45.
- [11] 马琼敏, 唐小静, 肖刚, 等. 装备学习能力评估方法研究[J]. 军事运筹与评估, 2024, 39(2): 9-14.
Ma Q M, Tang X J, Xiao G, et al. A study on assessment methods of equipments learning capability[J]. Military Operations Research and Assessments, 2024, 39(2): 9-14.
- [12] 王建红, 严俊琦. 世界模型赋能未来产业发展: 演化图景与推进策略[J]. 改革与战略, 2025, 41(3): 169-176.
Wang J H, Yan J Q. World model empowers future industrial development: evolution prospect and promotion strategy[J]. Reformation & Strategy, 2025, 41(3): 169-176.
- [13] 张龙, 王数, 雷震, 等. AIGC 军事大模型评估体系框架研究[J]. 战术导弹技术, 2025(1): 42-52.
Zhang L, Wang S, Lei Z, et al. Research on the framework of AIGC military large model evaluation system[J]. Tactical Missile Technology, 2025(1): 42-52.

[作者简介]



张龙（1990-），男，军事科学院系统工程研究院博士生，主要研究方向为智能化装备体系设计与评估。



黄文博（1983-），男，博士，军事科学院系统工程研究院助理研究员，主要研究方向为装备论证与智能评估。



雷震（1985-），男，军事科学院系统工程研究院博士生，主要研究方向为装备论证。



王莹（1988-），女，军事科学院系统工程研究院助理研究员，主要研究方向为装备论证与智能评估。



冯轩铭（1986-），男，军事科学院系统工程研究院硕士生，主要研究方向为装备论证与系统工程。