

面向实战化的复杂装备远程支援保障技术

陈 琴

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘 要】：针对信息化、智能化战争中复杂装备保障时效低、覆盖不足、生存能力弱等问题，研究面向实战化的远程支援保障技术体系与运行机制。立足快节奏、广域部署、强对抗环境下的保障需求新特征，构建包含智能感知与故障诊断、远程引导维修、敏捷备件投送与应急制造的核心技术框架，提出“前端嵌入+后方支撑”网络化保障架构与数据驱动、人机协同运行机制。结合实战化应用，依托无人投送、敏捷备件保障与多模人机交互，显著提升复杂装备应急抢修与持续作战能力，通过数字孪生、边缘智能、抗干扰通信与知识推理等技术赋能，最终形成全天候、全疆域、强对抗条件下可靠高效的一体化技术支援新模式，为复杂装备实战化保障能力跃升提供关键支撑。

【关键词】：复杂装备；远程支援保障；实战化；故障诊断；无人化投送

DOI:10.12417/3041-0630.26.11.050

1 引言

现代战争呈现信息化、智能化、体系化特征，装备保障成为影响作战胜负的关键环节。以主战平台、预警雷达、导弹装备为代表的复杂装备技术密集、结构复杂、战损维修难度大，传统现场维修与后送保障模式响应滞后、覆盖有限、抗毁性差，难以适应高强度作战需求。近年来局部战争实践表明，远程化、精确化、智能化已成为装备保障发展主流。我军在演训中运用远程维修、无人投送、增材制造等手段开展保障探索，取得阶段性成效。

国外远程技术保障技术起步早、体系成熟，已形成以网络化、智能化、全域化同为核心的技术体系，广泛应用于军事装备等领域，成为跨地域运维与任务保障的核心支撑。美国依托网络中心战与 PHM（故障预测与健康管理）架构，在 F-35 战机、舰船等平台实现实时状态监测、远程保障诊断与预测性维护，大幅提升装备可用性与任务相应速度。欧洲以德国工业 4.0 为牵引，构建云边协同远程运维体系，结合 AR/VR 与低时延通信，实现紧密设备远程调试与专家协同制导。北约多国联合建立标准化远程保障协议，推动数据互通与数共享，适配跨国联合任务需求。

国内现有远程保障研究多聚焦单项技术应用，面向实战化的体系架构^[1]、运行机制与运筹优化仍有待深化。本文从军事运筹与系统工程视角，剖析实战化保障需求，构建技术体系与组织模式，提出建设路径，为提升复杂装备全域持续保障能力提供参考。

2 实战化装备保障需求特征

2.1 作战快节奏倒逼保障时效提升

高超声速武器、无人蜂群等新型力量显著压缩作战周期，装备故障检测、抢修、补给必须实现瞬时响应、快速闭环。快

节奏作战需求推动保障流程持续精简优化，传统人力前出与现场维修难以满足时效要求，亟需促进故障预测、无人化投送、远程支援等新型保障模式快速应用，有效缩短保障相应周期，增项战场适应与持续作战能力^[2-3]。以时效为导向倒逼装备保障技术革新与流程再造，实现需求感知-资源调度-任务执行的闭环提速，限制突发任务与激动作战中的支撑能力。

2.2 分布式部署拓展保障覆盖范围

未来作战兵力分散、机动频繁，中心化保障基地难以全域覆盖，一线随队保障能力有限，跨地域、跨层级、跨军地的全域可达、精准触达成为基本要求，分布式部署成为拓展保障范围、提升全域支撑能力的必然选择。通过前沿预置、节点下沉、多域布势，可缩短保障链路，实现偏远地域、复杂战场与机动编队的即时触达，有效填补集中保障盲区。分布式架构依托网络协同与冗余备份，提升抗毁韧性，适配全域联合作战对广域覆盖、快速响应的刚性需求。

2.3 复杂战场环境考验保障生存能力

现代战场呈现强电磁压制、精确打击威胁、极端自然环境、体系破击交织的复杂态势，保障力量与设施面临多维度的生存压力，提升保障生存已成为作战体系持续运转的刚性需求。传统集中式保障节点易被精准锁定摧毁，保障链路在强干扰下易中断，人员与装备在恶劣环境中损耗加剧，直接制约持续作战效能。为适应复杂战场对抗需求，构建以无人化、网络化、非接触为核心的远程支援体系，降低人员及设备设施暴露概率与战损风险，确保保障能力不中断。

3 远程支援保障核心技术体系

3.1 智能感知与远程故障诊断

以战场物联网与多源传感为基础，实现装备状态在线监

测、异常预警、趋势预测。通过部署振动、温度、声学及视觉传感器，依托 5G 与工业物联网实时采集运行状态，完成数据降噪、特征提取与异常初判；采用数据与知识混合驱动方法，融合深度学习、知识图谱与数字孪生，开展故障模式识别、根因定位与预测预警；再迭代 AI 诊断模型，打通远程协同决策与维修指引，形成自主预警、智能诊断、远程处置闭环，提升复杂装备诊断准确率与响应速度^[4]。

3.2 远程引导维修与增强交互

针对复杂装备现场维修响应滞后、专家资源不足、操作难度大等现实问题，可通过构建以 AR 增强交互与云边协同为核心的远程技术保障体系，搭建“终端采集-实时传输-专家协同-增强交互”一体化架构。依托 AR 眼镜、移动作业终端等硬件载体，融合空间定位、三维模型低价、实时音视频交互与弱网自适应传输技术，实现现场工况第一时间回传、远程专家虚实标注、维修步骤可视化引导与多端同步会诊。同时，建立“门诊式、会诊式、随诊式”分级支援机制，通过分诊实现常规故障智能派单与自助处理，通过门诊完成常见故障一对一精准指导，通过会诊实现疑难故障多专家联合诊断，形成梯次配置、高效协同的支援模式，优化专家资源调度，提升维修效率与标准化水平。

3.3 敏捷备件保障与无人投送

目前，国外开展以提高装备维修效率为出发点，加快新型保障设备设施的建设力度。依托装备健康状态监测与需求预测模型，建立分级动态库存，实现靠前预测、精准调拨与按需补给，建立智能备件仓储，应用 RFID 与自动化减选，压缩周转时间；运用 3D 打印实现战时损伤备件应急制造，解决紧缺件、非标准件补给难题，减少备件补给周期，降低保障负担；以无人机、无人车为载体，突破地形与风险区域限制，构建智能路径规划与点对点精准投送体系，按任务载荷与环境适配编组，开展抗干扰、高精度投放训练，打通保障“最后一公里”，实现高时效、低风险物资配送；搭建数字孪生管控平台，实现备件存储、调度、投送全流程可视可控可追溯，建立联调机制，打通指挥、保障、投送数据链路。通过技术集成与流程再造，显著提升保障时效与生存能力。

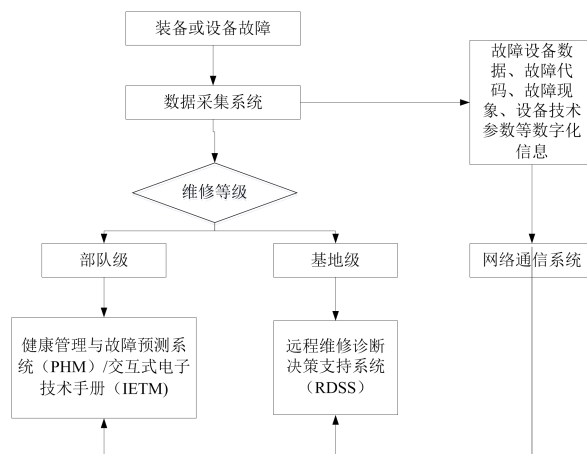


图1 复杂装备远程支援技术保障体系

4 体系架构与运行机制

4.1 网络化保障体系架构

远程技术支援通过信息网络、感知终端与专家资源的跨域整合，实现故障快速定位、技术方案远程推送、维修过程在线指导，已成为现代保障体系的关键组成。当前远程技术支援逐步形成全域感知、云边协同、分级响应、闭环迭代为特征的现代化运行范式，其体系架构围绕装备状态采集、数据传输交互、云端算力支撑、专家资源调度、末端执行反馈展开，通过多技术融合实现保障资源的最优配置与支援流程高效流转。

构建以边缘感知、网络传输、数据中台、业务应用、决策管控五位一体的云边协同架构。依托装备内置传感器、图像采集终端与状态监测模块，实现装备运行数据、环境信息与故障现象的实时采集；整合有线、无线与天地一体通信链路打通数据传输链路，保障数据在强干扰、广域分布条件下稳定传输；基于多源数据融合技术对数据进行整合、分析，结合多领域专家库、典型故障案例库与标准作业流程库，形成数据资源库，集成以深度学习、AI+等方法为基础的远程诊断、仿真验证、维修指导等功能模块，基于态势可视化与流程管控，实现支援任务统筹、资源调度与全过程监督。

4.2 数据驱动智能决策机制

远程技术支援逐步由被动响应向主动预判转型，形成“状态监测-异常识别-需求生成-资源调度-远程处置-效果评估”的流程闭环。常态条件下依托值守机制实现故障预测与技术资源，应急条件下启动跨层级、跨区域专家连诊模式，通过通信加密、权限管控、任务时序规则确保支援过程安全有序。随着数字孪生、物联网与边缘计算的深度应用，体系架构进一步向轻量化、抗毁性、自主化方向发展，运行机制更加强调动态适配与快速重构，有效提升复杂环境下技术支援的稳定性和实效性。

基于数据驱动的智能决策以装备全生命周期数据为基础,构建“数据采集、融合治理、模型计算、决策生成、反复迭代”的智能支援闭环。以多源数据为支撑,整合装备历史故障、维修记录、健康趋势、环境载荷、资源分布等信息^[5-6],通过特征提取形成标准化决策数据集;依托故障预测、模式识别、智能优化等算法模型,实现故障根因推理、支援路径规划、资源需求测算;根据任务优先级、时效要求与资源约束,自动生成最优处置方案,包括专家派遣、备件调运、维修策略推送等,最终根据故障处置情况不断反馈修正模型参数,实现决策能力持续提升,保障模式由经验驱动转换为数据驱动。

4.3 人机协同多模交互模式

复杂场景下远程技术支援存在信息传递失真、指令交互滞后、现场操作协同弱等痛点,人机协同多模式交互以人在回路、多通道融合、虚实协同为核心,重构远程专家、现场操作人员与智能装备间的协同关系,大幅提升指令传递精度与处置效率^[7]。远程专家可通过数字孪生场景与AR虚拟标准直接圈点故障点位、标注拆装路径,现场根据接收可视化指令并回传操作画面,智能系统实时校验操作合规性,形成人机双向可信协同,提升复杂环境下保障作业的可靠性与适应性。

5 实战化应用与技术展望

在高强度对抗、广域分散部署的实战场景中,复杂装备远程技术支援已从辅助保障手段升级为核心战力支撑。当前实战化应用聚焦一线快修、跨域连诊、应急兜底三大核心场景,依托机动便携终端、抗干扰自组网与AR实景标注,实现故障信息实时回传,专家异地同步研判、维修步骤可视化引导,在野

外机动、远海航行、高原驻地等任务中大幅缩短处置周期,降低一线人员作业强度与暴露风险。体系运行紧贴实战流程,构建常态值守、快速接报、分级处置、闭环复盘机制,强化通信降级、节点受损等极限下的保底交互能力,形成适配实战节奏的响应规范与处置范式,有效破解复杂装备“修不了、等不及、送不来”的保障瓶颈。

面向未来,新一代信息技术将持续为实战化远程支援深度赋能。数字孪生全要素映射可实现装备虚实同步与故障预演,在任务前完成隐患排查;多模人机协同交互融合语音、手势、力触觉反馈与AR空间标注,推动远程指导向“告知式”向“沉浸式示教”转型;边缘智能与抗干扰传输在弱网、强电磁环境下保障数据稳定交互,支撑端侧自主诊断与本地决策;知识图谱与大模型推理可快速匹配历史案例,生成最优维修策略,实现从被动响应向预测性支援跨越。后续发展将围绕体系抗毁、自主协同、极致轻量化方向突破,打通感知、决策、投送、维修全链条,构建全天候、全疆域、强对抗条件下可靠高效的远程技术支援新形态。

6 结论

面向实战化的复杂装备远程支援保障,是适应现代战争形态的必然选择。本文基于军事运筹与系统工程方法,构建了以智能感知、远程交互、无人投送为核心的技术体系,提出网络化架构与数据驱动运行机制,明确了实战化建设路径。研究表明,远程支援可有效突破传统保障瓶颈,提升响应速度、覆盖范围与生存能力。加快技术融合、体系构建与战法创新,将有力支撑形成快速抢修、精准支援、持续稳定的现代化装备保障能力,为打赢高端战争提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 刘宸宁,孔鑫,马之馨,等.数据知识混合驱动的装备保障智能网构建方法[J].兵工自动化,2024,43(7):1-6.
- [2] 郭一鸣,曹军海,陈春良,等.战时装备维修保障力量抢修行动模型构建与求解[J].国防科技大学学报,2023,45(4):170-181.
- [3] 金星.PHM技术的应用对新型装备保障模式的影响[J].科技传播,2011.
- [4] 李科,张军冬,胡金华.海军装备维修远程技术支持系统体系架构探讨[J].舰船电子工程,2011.08.
- [5] 魏曦初,李文立,邱立鹏.基于影响因素分析和数据重构的备件需求预测[J].计算机应用研究,2017,34(5):4.
- [6] 邸彦强,李婷,冯少冲,等.云边端架构的装备精确维修平行仿真系统[J].系统仿真学报,2022,34(9):11.
- [7] 郝东升王超勇李林.增强现实在航空装备舰基修理中的应用[J].科技创新与应用,2025(5).