

复杂电磁环境下雷达装备维修保障策略优化

赵施斌 张栋栋

上海航天电子技术研究所 上海 201109

摘要: 本文围绕复杂电磁环境下雷达装备维修保障展开研究。分析复杂电磁环境构成特点与雷达装备特性,指出当前维修保障存在故障诊断难、资源调配难等问题,提出可靠性、及时性等优化原则,以及基于状态监测、集成化、智能化的优化思路,进而给出故障诊断、资源管理等具体优化措施。为提升雷达装备在复杂电磁环境下的维修保障效率与可靠性提供可行路径,助力雷达装备稳定运行。

关键词: 复杂电磁环境; 雷达装备; 维修保障策略; 优化措施

引言: 复杂电磁环境广泛存在,对雷达装备正常运行影响重大。当前雷达装备维修保障面临故障诊断难、资源调配难、技术要求高、效率低下等问题。深入研究复杂电磁环境下雷达装备特性,剖析现有维修保障模式不足,提出针对性优化策略,对保障雷达装备可靠运行、提升作战效能与民用服务水平具有重要意义。

1 复杂电磁环境与雷达装备特性分析

1.1 复杂电磁环境的构成与特点

自然电磁环境要素包含雷电、太阳黑子活动等自然现象产生的电磁辐射。雷电放电过程会释放强电磁能量,形成宽频率范围的电磁脉冲,可能短暂干扰雷达装备信号接收;太阳黑子活动引发的太阳风暴会喷射高能带电粒子,影响雷达装备电子系统稳定性,这类干扰具有突发性与能量波动性特点^[1]。人为电磁环境要素涵盖民用领域产生的各类电磁干扰,例如通信基站持续释放高频信号,高压输电线路因电流变化产生电磁辐射,此外工业生产中的电气设备运行也会产生电磁信号,这些人为干扰频率范围覆盖广、强度可调节,部分干扰源还会随使用需求或生产节奏动态变化。复杂电磁环境的综合特性体现为复杂性、动态性、随机性与耦合性,多种干扰源信号叠加导致环境电磁态势复杂,干扰强度与频率随时间动态变化,部分干扰的出现具有随机性,且不同类型干扰可能相互耦合增强影响,这些特点使雷达装备故障诱因更难识别,维修保障需应对更复杂的环境变量。

1.2 雷达装备的结构与工作原理

雷达装备的基本组成包括发射机、接收机、天线、信号处理系统等核心部分。发射机负责产生并放大高频电磁波信号,接收机用于接收目标反射的回波信号并进行初步处理,天线承担电磁波发射与回波接收的双向功能,信号处理系统则对回波信号进行分析计算,提取目标位置、速度等信息。雷达装备的工作原理是通过发射

机产生电磁波,经天线辐射至空间,电磁波遇到目标后反射形成回波,回波被天线接收并传输至接收机,经信号处理系统处理后输出目标相关数据。在复杂电磁环境下,发射机的信号频率易受外部干扰偏移,接收机可能误接收干扰信号当作回波,天线接收方向图可能因电磁干扰发生畸变,信号处理系统也可能因干扰数据出现计算偏差,这些环节均成为易受干扰的关键部位。

1.3 复杂电磁环境对雷达装备的影响

对雷达装备硬件的影响表现为复杂电磁干扰可能损坏电子元器件,强电磁脉冲可能击穿电容、电阻等元件,导致电路断路或短路;长期电磁辐射会加速电路板老化,降低绝缘性能;干扰信号还可能改变天线辐射特性,使天线增益下降、波束偏移,影响电磁波发射与接收效果。对雷达装备软件的影响体现在电磁干扰可能破坏软件运行环境,导致程序跑飞,无法正常执行数据处理任务;干扰信号混入数据传输过程会引发数据错误,影响目标信息计算精度;严重时甚至导致系统死机,需重启才能恢复运行,凸显软件抗干扰设计对维持装备功能的重要性。对雷达装备整体性能的影响表现为干扰信号会缩短雷达探测距离,使远距离目标无法被识别;干扰导致的信号失真会降低探测精度与分辨率,无法准确判断目标位置与大小;同时削弱装备自身抗干扰能力,使其在多种干扰源环境下更易出现性能失效,保障雷达装备在复杂电磁环境下正常工作成为亟待解决的问题。

2 复杂电磁环境下雷达装备维修保障现状与问题分析

2.1 现有维修保障模式概述

当前雷达装备采用的维修保障模式主要包括定期维修、事后维修与视情维修。定期维修按照固定周期对装备进行全面检查与维护,无需等待故障出现即可提前排查潜在问题,适用于结构稳定、故障规律明确的雷达部件,如天线机械传动系统等,但该模式易出现过度维修,

增加保障成本。事后维修在装备发生故障后才开展维修工作,无需提前投入资源进行定期检查,适用于故障影响范围小、维修成本低的核心部件,如部分辅助电路模块,不过故障突发可能导致装备长时间停机,影响任务执行。视情维修依托状态监测数据判断装备健康状况,仅在监测指标异常时启动维修,兼顾保障效率与成本控制,适用于可实时监测状态的核心部件,如发射机功率模块,但对监测设备的可靠性与数据准确性要求较高。

2.2 复杂电磁环境下维修保障面临的困难

故障诊断难度大,复杂电磁干扰会使雷达装备故障现象呈现显著多样性,同一类型干扰可能引发不同故障表现,不同干扰也可能导致相似故障症状,难以通过传统故障现象与原因的对应关系定位问题。传统故障诊断方法多基于正常电磁环境下的故障规律设计,缺乏对电磁干扰因素的考量,无法区分故障是装备自身损耗还是电磁干扰引发,易出现误判,延长诊断时间。维修资源调配困难源于复杂电磁环境下雷达装备故障具有突发性,故障发生时间、地点与损坏程度难以提前预判,导致维修人员、备件与检测设备资源难以提前规划布局。当多台装备同时受干扰出现故障时,资源供需矛盾加剧,可能出现部分装备因等待资源延误维修。维修技术要求高体现在维修人员需掌握电磁兼容技术以分析干扰影响,了解电子对抗技术以识别干扰类型,还需具备强干扰环境下操作检测设备的能力^[2]。当前部分维修人员缺乏系统电磁相关培训,对干扰故障处理经验不足,难以快速制定有效维修方案。维修保障效率低下是前几类问题的综合结果,故障诊断耗时、资源调配延误、维修技术不足共同导致维修周期延长,使雷达装备无法及时恢复工作,降低可用性,任务执行期间可能因故障导致探测能力下降,影响整体作战效能。

3 复杂电磁环境下雷达装备维修保障策略优化原则与思路

3.1 优化原则

可靠性原则要求维修保障全过程始终以雷达装备在复杂电磁环境下的可靠性为核心导向。维修方案设计需充分考量电磁干扰对装备各部件的影响,选用抗干扰性能适配的维修部件与技术手段,维修操作完成后还需通过专项抗干扰检测验证装备性能,以此降低故障发生率,提升装备在复杂电磁环境中的持续工作能力,确保装备能稳定发挥探测功能。及时性原则需构建快速响应机制,一旦雷达装备出现故障信号,立即启动专属诊断流程,采用适配复杂电磁环境的诊断工具缩短故障定位时间,同时优化维修资源调度机制,让维修人员、所需备件快

速抵达故障现场,最大程度缩短维修周期,减少装备停机对作战任务或民用服务的不利影响。经济性原则强调在满足维修保障基本要求的前提下合理控制成本,选择维修方式时需综合评估不同方案的投入与实际效益,科学规划维修资源的储备数量与布局位置,优化维修流程以减少人力与时间消耗,实现维修费用最小化,避免资源浪费。前瞻性原则要求密切跟踪电磁环境的发展趋势,如新型干扰源出现、干扰强度变化等,同时关注雷达装备技术的更新换代,提前研究适配新技术装备的维修方法与流程,制定具备预见性的维修保障方案,确保策略能随环境与装备变化动态调整,避免因技术迭代或环境改变导致策略失效。

3.2 优化思路

基于状态监测的维修保障思路需在雷达装备关键部位部署抗干扰性能强的监测传感器,同步采集装备运行参数与周边电磁环境参数,通过专业数据分析技术识别参数异常波动,预判故障发展趋势,从传统的“故障后维修”“定期维修”转向更精准的视情维修与预测性维修,提前介入处置潜在隐患,减少突发故障。集成化维修保障思路需打破故障诊断、维修决策、资源调配等环节的孤立状态,将各环节流程与功能深度整合,搭建一体化维修保障平台,实现诊断数据自动传输至决策模块、决策结果直接触发资源调配指令、资源调度信息实时反馈至维修终端,形成闭环体系,提升维修保障效率与各环节协同性。智能化维修保障思路需借助人工智能技术构建适配复杂电磁环境的故障诊断模型,通过学习大量干扰故障数据提升诊断精准度;利用大数据技术分析历史维修数据与电磁环境参数,优化维修决策方案;依托物联网技术实现维修资源实时定位与状态监控,最终实现故障诊断、决策、资源管理的智能化升级,全面提升维修保障的精准度与效率。

4 复杂电磁环境下雷达装备维修保障策略优化具体措施

4.1 故障诊断策略优化

多传感器信息融合故障诊断通过部署不同类型传感器,分别采集雷达装备的信号强度、部件温度、电压电流等运行状态信息,以及环境中的电磁干扰强度、频段分布等参数,再借助信息融合技术对多源数据进行筛选、整合与分析,消除单一传感器受电磁干扰产生的误差,提升故障特征识别的准确性,增强诊断结果的可靠性^[3]。基于人工智能的故障诊断方法中,神经网络可通过学习大量历史故障数据与电磁环境参数,自动挖掘故障与干扰之间的关联规律;专家系统能整合领域专家经验,形

成故障诊断规则库；模糊逻辑可处理电磁环境中模糊不清的故障信号，通过这些技术构建的诊断模型，能快速识别复杂电磁干扰下的装备故障类型与位置。在线故障诊断依托实时监测模块，持续跟踪装备运行状态，一旦发现参数异常立即发出预警；离线故障诊断则对在线监测中难以确诊的复杂故障，调取详细运行数据与环境记录进行深度分析，两者结合可覆盖不同复杂度的故障场景，提高诊断的全面性与有效性。

4.2 维修资源管理策略优化

维修人员管理需制定系统的培训计划，课程内容涵盖电磁兼容技术原理、电子对抗方法、复杂环境下的维修操作规范等，通过理论教学与模拟实操提升维修人员专业素养；同时建立绩效评估机制，从故障诊断准确率、维修完成时效、资源使用效率等维度考核工作表现，依据评估结果实施奖惩，激励维修人员提升工作效率与质量。备件管理采用ABC分类法，根据备件重要程度与使用频率划分类别，优先保障关键备件储备；经济订货批量模型可计算最优订货量，平衡库存成本与供应需求，合理确定备件储备种类与数量；建立备件共享机制，打破区域或单位限制，实现备件跨场景调配，减少冗余库存，提高备件利用率。维修设备管理需定期对检测仪器、校准工具等进行维护与校准，检查设备抗电磁干扰性能，确保处于良好工作状态；根据维修任务的类型与规模，动态调配维修设备，避免设备闲置或资源不足，提升维修设备的使用效率。

4.3 维修决策策略优化

基于风险评估的维修决策先构建故障风险评估模型，收集装备故障发生的历史概率数据与电磁环境干扰记录，分析故障可能导致的装备停机时间、作战能力损失等后果严重程度，综合评估不同故障的风险等级，再依据风险等级制定对应的维修优先级与方案。多目标维修决策方法中，层次分析法可将维修时间、成本、装备可靠性等目标转化为可量化的指标，确定各指标权重；数据包络分析能对比不同维修方案的效率与效果，通过这些方法

从多个维度筛选最优维修方案，平衡各项需求。动态维修决策调整通过实时监测装备运行状态变化与电磁环境波动，当环境干扰强度骤增或装备出现新的异常信号时，及时更新故障风险评估结果，调整维修计划与方案，确保维修保障策略能适配动态变化的环境与装备状态。

4.4 维修保障信息化建设策略优化

建立维修保障信息管理系统，整合雷达装备的型号参数、出厂信息等基本数据，维修次数、故障原因等历史记录，故障诊断报告，以及维修人员、备件、设备等资源信息，通过系统实现信息实时共享与动态更新，方便管理人员快速查询与调度。利用物联网技术在雷达装备关键部位安装抗干扰传感器与通信模块，传感器采集的运行数据通过无线传输实时上传至远程平台，管理人员可远程监测装备状态，系统一旦检测到故障，立即向维修人员发送报警信息与故障位置，缩短响应时间。构建维修保障仿真平台借助计算机仿真技术，模拟不同电磁干扰强度、故障类型下的维修场景，对制定的维修策略进行模拟推演，分析策略的可行性与有效性，根据仿真结果优化维修流程与资源配置，提高维修保障决策的科学性。

结束语

复杂电磁环境给雷达装备维修保障带来诸多挑战，通过对其特性与现状的深入分析，提出的优化原则、思路及具体措施具有重要实践价值。这些策略从故障诊断到信息化建设多方面发力，有助于提升维修保障的精准度、及时性与经济性。未来需持续关注电磁环境与装备技术变化，不断完善优化策略，确保雷达装备稳定运行。

参考文献

- [1]许庆.基于系统动力学的航天测量雷达维修保障系统效能评估[J].兵工自动化,2023,42(9):79-82.
- [2]郭跃辉.S波段天气雷达故障诊断与维修维护措施研究[J].仪器仪表用户,2025,32(8):32-34.
- [3]宋锴,刘迪.L波段探空雷达维护及常见故障分析和维修保障措施[J].中国高新科技,2023(20):133-134,157.