

直升机飞行保障领域的数字化建设思考

刘恋 任金亮

71901 部队

DOI:10.12238/pe.v3i5.16589

[摘要] 直升机凭借垂直起降、灵活机动的优势,广泛应用于军事作战、应急救援、医疗转运等领域,但传统飞行保障模式高度依赖技术人员个人经验,存在故障排查效率低、周期性检查易漏检或过度维护等问题。本文指出,数字化建设是该领域转型升级的核心路径,重点阐述了数字化技术在健康监测与故障分析中的四大关键应用:通过高精度传感器构建直升机实时健康监测网络(如空客H160的物联网系统)、依托大数据与AI实现预测性维护(如美军“阿帕奇”直升机的LSTM神经网络故障预测)、基于数字孪生技术开展可视化运维(如贝尔FCX-001的1:1虚拟建模)、借助AR/VR实现人机协同检修与培训(如莱昂纳多直升机的AR智能引导系统)。文章强调,数字化建设能显著提升保障效率、降低维护成本、保障飞行安全,推动直升机飞行保障从“经验依赖的传统模式”向“数据驱动的智能模式”转型。

[关键词] 数字化; Ai; 数字孪生; AR/VR; 高精度传感器

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A

Thoughts on Digital Construction in the Field of Helicopter Flight Support

Lian Liu Jinliang Ren

Unit 71901

[Abstract] Helicopters are widely used in military operations, emergency rescue, medical transportation and other fields due to their advantages of vertical take-off and landing and flexible maneuverability. However, the traditional flight support mode relies heavily on the personal experience of technicians, which has problems such as low efficiency in fault diagnosis and high risks of missed inspection or over-maintenance in periodic checks. This paper points out that digital construction is the core path for the transformation and upgrading of this field, and focuses on four key applications of digital technology in health monitoring and fault analysis: constructing a real-time health monitoring network for helicopters through high-precision sensors (e.g., the IoT system of Airbus H160), realizing predictive maintenance based on big data and AI (e.g., the LSTM neural network fault prediction for the U.S. Army Apache helicopter), conducting visual operation and maintenance using digital twin technology (e.g., the 1:1 virtual modeling of Bell FCX-001), and achieving human-machine collaborative inspection and training with AR/VR (e.g., the AR intelligent guidance system of Leonardo helicopters). The paper emphasizes that digital construction can significantly improve support efficiency, reduce maintenance costs, ensure flight safety, and promote the transformation of helicopter flight support from the "traditional experience-dependent mode" to the "data-driven intelligent mode".

[Key words] Digitization; AI; Digital twin; AR/VR; High-precision sensor

引言

在现代航空体系中,直升机以其“垂直起降、全域可达”的独特优势,成为军事作战、应急救援、医疗转运、offshore作业等关键场景的核心装备——从战场前沿的战术投送,到地震灾区的生命搜救,再到城市上空的紧急医疗转运,其响应速度与任务适应性直接决定了场景作业的效率与成败。然而,随着直升机任务复杂度提升、装备技术迭代加速,传统飞行保障模式的局限

性日益凸显:以“定期检修+经验判断”为核心的运维体系,难以捕捉核心部件的细微故障隐患(如传动系统的早期磨损、电子设备的间歇性异常),又易因过度维护造成资源浪费,甚至可能因技术人员经验差异导致故障排查延误,直接影响飞行安全与任务达成率。

当前,全球航空领域正加速迈入“数字化转型”新阶段,高精度传感器、大数据分析、人工智能、数字孪生等技术的成熟,

为直升机飞行保障突破“经验依赖”瓶颈提供了全新路径。本文聚焦直升机健康监测与故障分析这一核心环节,通过对比传统保障模式的局限,系统阐述数字化技术如何重构运维逻辑,旨在为推动直升机飞行保障从“被动应对”向“主动预判”、从“经验驱动”向“数据驱动”转型提供思路与参考。

1 传统保障模式:以人工经验为核心的技术体系

在数字化技术尚未广泛应用的阶段,直升机健康监测与故障分析高度依赖维修人员的个人经验积累,形成了“经验主导、人工判断”的技术特征。这种模式虽能精准应对部分复杂隐患,但存在经验壁垒高、效率受人员能力制约的显著局限,其应用场景集中体现在两类典型故障排查中:

1.1 机械部件细微异常的经验性判断

直升机旋翼系统作为核心动力传输部件,其桨叶摆动角度的细微偏差常处于常规仪器检测的“标准阈值边缘”,易被自动化设备判定为“正常状态”。但拥有长期维护经验的工程师,可凭借对旋翼动力学特性的深度理解,快速建立“角度偏差—连接部件间隙变化—液压系统压力失衡”的关联逻辑,进而通过拆解检查,最终确认桨毂连接螺栓隐性松动等核心故障点。这种对“非显性异常”的敏感度,需通过累计数千小时的实操经验培养,新入职技术人员即便掌握理论知识,也难以在短时间内复刻此类判断能力。

1.2 电子系统间歇性故障的靶向排查

飞行过程中电子仪表的间歇性黑屏,属于典型的“偶发故障”,常规地面检测时全系统参数往往显示正常。此时,资深电子工程师会基于对该型号直升机电子架构的熟悉度,优先采用“分段测试法”,重点检查电源模块输出稳定性与线路接口状态,通常能快速定位故障;而经验不足的维修人员若采用“全系统扫描法”,可能需耗费数倍时间,甚至因忽视隐性影响因素(如振动导致的接触不良),无法找到故障根源。

2 数字化转型:以技术融合为核心的革新方向

随着传感器技术、大数据分析、人工智能(AI)及数字孪生等前沿技术的深度渗透,直升机健康监测与故障分析已完成从“经验驱动”到“数据驱动”的转型,构建起实时感知、智能预判、虚实融合、人机协同四大核心能力体系,有效突破传统模式的局限,具体应用如下:

2.1 实时感知:高密度传感器构建的健康监测网络

针对发动机、旋翼系统、传动装置等核心部件在飞行中承受交变应力的特点,传统“定期检修”模式难以捕捉突发隐患。数字化方案通过在关键部位部署多类型高精度传感器(振动、温度、压力等),以毫秒级速度将运行数据(如旋翼转速波动、轴承温度变化、液压系统压力异常)传输至地面监测中心,形成“数据采集—实时分析—即时预警—精准诊断”的闭环管理。

应用案例:空客H160直升机物联网监测系统

该系统依托高密度传感器阵列,实时采集超2000个运行参数。当发动机振动频率超出正常阈值时,系统会立即触发三级预警机制:一级预警推送至机组仪表盘,提示飞行员关注状态;二

级预警启动地面中心的数据分析模块,通过交叉比对历史运行数据与实时数据,排除“瞬时干扰”误判;三级预警则调用故障树分析模型,精准定位故障部件,并在飞机着陆前生成包含故障诊断报告、维修操作步骤及备件需求清单的完整解决方案。

2.2 智能预判:大数据与AI融合的预测性维护

传统“定时检修”模式存在过度维护(过早更换可用部件)与漏检(隐性故障未发现)的双重痛点,且维护成本高昂。而大数据与AI技术的结合,通过构建“历史数据+实时数据+环境数据”的多维度分析模型,可实现对部件寿命的精准预测与故障征兆的提前识别。

-核心技术:基于长短期记忆网络(LSTM)的预测算法,通过学习直升机多次飞行的历史数据(如发动机油耗变化、排气温度趋势、部件振动特征),结合维护记录与环境数据,构建部件磨损趋势预测模型,可提前数月发出更换提醒,避免过度维护与漏检风险。

-应用案例:美军“阿帕奇”武装直升机AI运维体系

该体系整合了分布式传感器网络与边缘计算节点,持续采集发动机转速、传动齿轮啮合温度、液压系统压力等核心数据。通过累计海量实战飞行数据(含复杂环境下的运行参数),构建融合物理模型与神经网络的故障预测算法:利用LSTM递归神经网络对振动波形进行时序分析,识别“正常振动—初期磨损—严重磨损”的渐变过程,并以三维可视化模型呈现故障发展趋势;同时,结合战场维修资源调度系统,自动生成维修优先级、备件部署路线及野战抢修流程,显著缩短故障修复时间。此前该系统曾成功监测到一架“阿帕奇”直升机发动机齿轮箱运行异常,提前规避了齿轮箱失效风险。

2.3 虚实融合:数字孪生驱动的可视化运维

数字孪生技术以“高保真建模+实时数据映射”为核心,构建与实体直升机1:1匹配的三维虚拟模型——不仅精准复刻直升机的几何结构、材质特性,更通过实时数据接口,将实体直升机的运行状态同步至虚拟模型,实现“虚拟预演—动态复现—故障仿真”的全流程可视化运维,具体能力包括:

-极端工况模拟:输入高温高湿、极寒强风等环境变量,模拟直升机性能表现,提前识别极端条件下的潜在风险(如低温下液压油黏度增加导致的传动效率下降)。

-应力分布复现:直升机完成跨区域复杂气象飞行后,数字孪生模型可调取飞行记录仪中的海量运行数据(振动频率、气动载荷等),结合有限元分析算法,在虚拟环境中动态复现旋翼叶片、传动主轴的应力分布云图,通过热力图定位应力集中区域,预判裂纹风险与部件疲劳寿命。

-故障仿真推演:在虚拟模型中设置齿轮箱异常磨损等故障场景,快速模拟故障传播路径及对整机性能的连锁影响,辅助制定最优维护策略。

应用案例:贝尔FCX-001概念飞机数字孪生设计

贝尔公司与技术合作方联合,将CAD设计模型导入虚拟开发平台,结合虚拟现实技术,实现设计方案的实时测试与修改。同

时,模型整合了直升机结构设计、飞行数据与维护记录至同一平台,维修人员通过交互式界面可直观查看部件三维结构、历史维护记录及当前健康状态,甚至通过虚拟操作模拟维修流程,验证方案的可行性,大幅缩短故障排查与修复时间。

2.4 人机协同: AR/VR技术赋能的智能检修与培训

针对直升机机舱空间狭窄、结构复杂(管线密集交错)的特点,传统检修依赖维修人员的“空间记忆”与“经验操作”,易出现误操作。增强现实(AR)技术通过“虚拟信息叠加—沉浸式交互”,实现“人机协同”,降低检修门槛、提升操作精度,典型应用以莱昂纳多直升机AR检修系统为例,其核心流程与能力如下:

-环境感知与定位:维修人员佩戴的AR智能眼镜内置高清摄像头与同步定位地图构建(SLAM)算法,启动后快速扫描直升机部件,构建检修场景的“数字地图”,确保虚拟信息与真实部件精准对齐,避免因定位不准导致的操作失误。

-虚拟信息生成与渲染:系统根据故障类型,自动调取相关虚拟内容(部件三维拆解模型、维修步骤动画、关键参数标注等),并通过AR眼镜叠加到真实视野中,实现“所见即所得”的可视化指导,维修人员无需频繁查阅纸质手册。

-交互式故障排查:扫描故障指示灯或维修手册二维码后,系统自动解析故障代码,以虚拟切面图形式展示部件内部结构,帮助快速定位故障点;对于复杂操作(如发动机部件更换),系统会将流程分解为分步引导,通过高亮框标注操作区域,同时提示注意事项,确保操作精准性。

-沉浸式培训:新手维修人员可在虚拟环境中模拟各类故障检修场景,反复练习操作流程,无需依赖实体直升机即可积累经验,显著缩短培训周期。

3 结论

从“定期拆检”到“实时监测”,从“经验判断”到“AI预判”,数字化技术正彻底重构直升机飞行保障的底层逻辑——它不仅解决了传统模式中“故障难捕捉、维护效率低、资源浪费大”的核心痛点,更通过实时感知、智能预判、可视化运维、

人机协同的全链路升级,为直升机飞行安全筑起“数据防线”。空客H160的物联网系统、美军“阿帕奇”的AI预测模型、贝尔FCX-001的数字孪生实践,已充分验证了数字化转型的可行性与价值,其本质是让“数据”取代“经验”成为保障决策的核心依据。

然而,直升机飞行保障的数字化建设并非单一技术的应用,而是涉及“数据采集—算法建模—场景落地—人员适配”的系统工程:未来还需突破多源数据融合(如飞行数据与气象、地理数据的联动)、边缘计算在复杂环境下的稳定性(如高原、海上的信号传输)、数字孪生模型的实时性优化等关键问题。但可以确定的是,随着技术迭代与实践深化,直升机飞行保障将逐步实现“全生命周期智能化管理”,最终为军事任务、应急救援等关键场景提供更高效、更可靠的支撑,这既是航空装备发展的必然趋势,也是提升国家应急响应与国防保障能力的重要路径。

[参考文献]

[1]Airbus Helicopters.H160 Helicopter Technical Specification: IoT-Enabled Health Monitoring System[S].Marignane, France:Airbus Helicopters S.A.S.,2023.

[2]Bell Flight,a Textron Company.FCX-001 Concept Aircraft Design Case Study:VR-Driven Digital Twin Innovation:Bell-2023-045[R].Fort Worth, TX, USA:Bell Flight,LLC,2023.

[3]Leonardo Helicopters.AWARE: Advanced Watchful and Autonomous Robot for External Inspection:LEO-HELI-2023-06 [R].Rome, Italy:Leonardo S.p.A.,2023.

[4]U.S. Army Aviation and Missile Command (AMCOM).Future Vertical Lift Maintenance Strategy: Apache AH-64E Dynamic Sustainment:AMCOM-TR-2022-03[R].Redstone Arsenal, AL, USA: U.S. Army Aviation and Missile Command,2022.

作者简介:

刘恋(1982—),男,汉族,辽宁葫芦岛市人,大学本科,于2006年毕业于陆军航空兵学院,工程学士学位,从事飞行保障事业20余年,职称:工程师,研究方向:飞行器系统与动力工程。