

工程机械远程监控平台下的故障预警与备件协同管理

王俊杰

中铁三局集团有限公司运输工程分公司 山西省晋中市 030600

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21122

[摘要] 随着建设工程规模持续扩大与施工场景日趋复杂,工程机械的运维效率直接决定项目进度与运营成本。传统事后维修与定期保养模式存在故障发现滞后、备件储备盲目、响应周期过长等突出问题,难以适应现代工程管理的精细化要求。远程监控平台通过物联网传感技术实现设备运行数据的实时采集与云端汇聚,为故障前置预警与备件资源协同配置提供了数据基础。本文从远程监控平台的技术架构切入,分析多源数据融合下的故障特征提取方法与分级预警机制,重点阐述故障预警信号如何驱动备件需求动态预测与多级库存协同调度,结合工程实践验证该模式在缩短停机时长、降低库存资金占用方面的实际成效。研究表明,将故障预警与备件管理进行流程联动与数据打通,能够构建“感知-预判-调度-修复”的闭环运维体系,对提升工程机械全生命周期管理水平具有现实参考价值。

[关键词] 工程机械; 远程监控; 故障预警; 备件协同; 运维管理

引言:

工程机械作为基础设施建设的核心生产要素,其运行可靠性与施工连续性高度相关。行业统计数据显示,因设备突发故障造成的非计划停机,可使单项目月产值损失达到5%至8%,而维修过程中备件短缺又会使停机时间延长三分之一以上^[1]。传统运维体系中,设备状态判断依赖现场人员经验,故障发生后才逐级上报并申请备件,信息传递链条长且准确性不足;备件管理则多采用定期采购与经验备货方式,一方面造成通用件积压占用资金,另一方面关键易损件缺货现象频发,两者之间缺乏数据层面的联动机制。近年来,工业互联网技术向工程建设领域渗透,主流主机厂商与大型施工企业相继搭建远程监控平台,通过车载终端与各类传感器实现设备位置、工况、能耗、核心部件参数的全天候采集。徐工、三一重工等企业的平台已接入数十万台设备,积累了海量运行数据与故障样本。但从实际应用深度看,多数平台仍停留在状态展示与事后报警阶段,数据价值未充分释放,尤其在故障预判的准确性、备件调度的敏捷性方面仍有较大提升空间。如何将远程监控产生的实时数据转化为可落地的运维决策,实现故障预警与备件管理的深度协同,成为当前工程机械数字化运维亟待解决的现实问题。

1. 工程机械远程监控平台的技术架构与数据基础

1.1 远程监控平台的层级化架构

工程机械远程监控平台采用“边缘采集-网络传输-云端

处理-应用展示”的四层架构设计,各层分工明确且数据流向清晰。感知层作为数据源头,在发动机、液压系统、传动机构、电气系统等关键部位部署温度、压力、振动、转速等多类型传感器,通过车载智能网关完成本地数据汇总与初步清洗。考虑到施工现场常处于偏远区域,网络传输层采用4G/5G为主、北斗短报文为辅的多网融合方案,在信号盲区启用本地缓存机制,待信号恢复后自动补传数据,有效解决移动作业场景下的数据丢包问题。

平台层承担数据存储与计算功能,部署时序数据库专门处理高频工况数据,同时搭建统一的数据中台对设备档案、维修记录、备件信息等异构数据进行标准化治理。应用层面向不同角色开放功能端口,设备管理员可查看实时运行参数与健康评分,维修人员接收故障工单与处置指引,物资管理人员则获取备件消耗预测与补货建议。这种分层架构既保证了数据采集的稳定性,又为上层业务功能的灵活扩展预留了空间,是故障预警与备件协同得以实现的物理基础^[2]。

1.2 多源数据采集与标准化处理

远程监控平台采集的数据涵盖工况运行数据、设备基础数据与环境场景数据三大类。工况数据包括发动机转速、机油压力、液压系统油温、燃油消耗率、作业小时数等实时参数,采样频率根据参数重要性从秒级到分钟级不等,是判断设备健康状态的核心依据。设备基础数据包含出厂参数、历次维修记录、保养周期、已更换备件明细等静态信息,用于

建立单台设备的健康基线与磨损参考标准。环境数据则通过接入工地气象站与位置信息获取,涵盖环境温度、粉尘浓度、海拔高度、作业地形等,用于修正不同工况下的故障阈值。

原始数据上传后需经过标准化处理才能用于分析建模。首先进行异常值剔除,对传感器漂移、信号干扰产生的跳变数据采用滑动窗口算法进行识别修正;其次按照统一的设备编码与数据字典进行格式转换,解决不同厂商、不同机型的数据口径不一致问题;最后将处理后的数据按设备维度聚合,形成每台设备的连续健康时间序列。数据质量直接决定后续预警的准确性,实践中通常设定数据完整率不低于90%的准入标准,对采集异常的设备及时排查终端故障,从源头保障分析结果的可靠性。

2. 基于远程监控数据的故障预警体系构建

2.1 故障特征提取与动态阈值设定

故障预警的核心在于从正常运行数据中识别早期异常信号,这依赖于有效的特征提取方法与合理的判定标准。对于发动机、液压泵等核心部件,采用时域与频域结合的分析思路:时域上提取温度上升速率、压力波动幅度、振动有效值等统计特征,反映部件整体劣化趋势;频域上对振动信号做快速傅里叶变换,识别特定频率分量的幅值变化,定位具体故障类型,比如轴承磨损会在特征频率处出现明显峰值^[3]。

阈值设定摒弃传统的固定数值模式,转而采用基于工况的动态阈值方法。平台根据载荷大小、作业动作、环境温度等参数自动识别当前作业场景,比如挖掘机构成“挖掘-回转-卸料”的循环工况,压路机则分为静压与振动两种模式。不同场景下设备正常运行的参数区间存在差异,系统通过历史正常数据自学习生成对应场景的基准区间,当实时参数连续超出基准范围且持续时长达到设定条件时,判定为异常状态。这种场景化阈值机制有效降低了因作业强度变化导致的误报,某矿山应用案例显示,采用动态阈值后故障预警误报率从55%降至12%以内。

2.2 分级预警机制与响应流程设计

根据故障严重程度与发展速率,将预警划分为提示、关注、紧急三个等级,匹配不同的响应策略。提示级预警对应参数轻微偏离正常范围,部件仍可正常运行,系统将信息推送至设备管理员,建议在例行保养时重点检查,此类预警多用于滤清器堵塞、油液轻微变质等缓慢劣化问题。关注级预

警表示异常特征明显,故障风险在一周内显著上升,系统自动生成预防性维护工单,推荐最近的停机窗口期安排检修,并同步推送所需备件清单至物资部门。

紧急级预警针对可能引发设备停机或安全事故的严重异常,如主泵压力骤降、发动机水温急剧升高等,系统立即通过短信、APP推送等多渠道通知现场操作人员与维修负责人,同时自动锁定设备位置并调取周边服务资源。响应流程上,预警触发后系统自动关联设备档案与历史故障库,给出可能的故障原因与排查步骤,减少人工诊断时间。每一条预警从产生到处置完毕形成完整闭环,处置结果反向输入模型库,持续优化预警准确率。分级机制既避免了预警泛滥导致的人员麻痹,又确保了高危故障得到优先处理,使运维资源投向最需要的环节。

3. 故障预警驱动的备件协同管理模式

3.1 基于剩余寿命预测的备件需求动态估算

备件管理的首要难题是需求不确定,而故障预警体系恰好为需求预测提供了前置信号。平台针对发动机三滤、液压元件、易损密封件等不同品类,结合预警等级与部件剩余寿命预测结果,生成差异化的备件需求计划。剩余寿命预测采用威布尔比例风险模型,融合设备累计运行时长、载荷累积值、当前劣化速率三个维度参数,输出核心部件的预计更换时间窗口,预测误差可控制在8%左右。当某部件进入预警状态时,系统自动匹配对应的备件物料编码,根据维修工时与物流周期倒推备件到货时间节点。

需求估算并非单台设备的简单叠加,而是按区域、按项目进行汇总分析。系统综合同一工地全部设备的预警信息,结合历史消耗规律与季节性波动因素,生成分级需求清单:短期需求对应未来7天内确定需要更换的备件,直接触发出库或调拨流程;中期需求覆盖15至30天的预判消耗,用于指导区域仓库补货;长期需求则按季度滚动更新,为采购计划提供数据支撑。徐工的智能备货系统接入二十余万台设备的远程数据,能够提前识别高负荷作业下的备件消耗高峰,使常用件库存满足率稳定在98%以上。这种由设备健康状态驱动的需求测算,比传统基于历史均值的预测方法更贴合实际,从根源上减少了盲目备货。

3.2 多级库存网络的协同调度机制

工程机械备件通常采用“中心库-区域库-工地现场库”

三级库存布局，协同调度的目标是在保障供应的前提下降低整体库存水平。远程监控平台打通各级库存的数据接口，实现全网库存可视化，管理人员可实时查看任意备件在各仓库的存放数量、在途数量与预留状态，彻底改变以往信息分散、重复备货的局面。当预警产生备件需求时，系统按照“就近满足、逐级调拨”原则自动寻源，优先从距离设备最近的现场库或区域库调取，库存不足时向上一级申请，同时计算不同调拨路径的物流时效与成本，给出最优供应方案。

对于通用性强、价值较高的备件，引入联合库存管理思路。同一区域内的多个项目共享区域中心库储备，各工地仅存放少量高频消耗件，中心库根据各项目的预警动态统一调配。紧急情况下还可启动跨项目调拨机制，系统自动匹配周边同型号设备的冗余备件，经审批后直接调运。部分企业进一步推行供应商管理库存模式，将远程监控的消耗预测数据共享给核心供应商，供应商根据预测结果主动补货，领用后再结算，有效转移了库存资金压力。多级协同使库存从分散的“点”连接成联动的“网”，整体库存周转效率提升 30%以上，呆滞物料占比明显下降。

4. 实践应用与成效分析

4.1 应用场景与实施路径

某大型建筑施工企业在其土石方工程项目中部署远程监控与备件协同管理系统，覆盖挖掘机、装载机、压路机等共 42 台主力设备。实施过程分三个阶段推进：第一阶段完成车载终端安装与平台部署，梳理全部设备的备件清单与对应关系，统一物料编码体系，历时约一个月；第二阶段搭建故障预警模型，导入该企业近三年的故障维修数据进行训练，结合设备出厂参数设定初始阈值，并行运行三个月持续优化；第三阶段打通监控平台与备件管理系统的数据接口，实现预警信号自动生成备件需求、库存状态实时反馈至运维调度端的双向联动。

配套管理机制同步调整，建立运维与物资部门的每日会商机制，针对关注级以上预警共同确认备件需求与到货时间；修订备件考核指标，将库存周转率与故障停机时长纳入联合考核，避免部门间各自为政。现场操作层面，为维修人员配备移动终端，可随时查看设备预警详情与备件库存位置，领用备件扫码登记，数据自动回传平台。技术落地与管理配套双管齐下，保障了协同模式真正发挥效用而

非停留在系统层面。

4.2 运行效果与价值评估

系统运行满一年后，各项运维指标呈现显著改善。故障预警方面，核心部件故障提前发现率达到 82%，非计划停机次数同比下降 57%，单次故障平均修复时长从 7.2 小时缩短至 2.8 小时，主要得益于故障预判后备件提前到位、维修方案预先准备。备件管理方面，项目级备件库存资金占用从 480 万元降至 310 万元，降幅达 35%，同时备件满足率反而从 85% 提升至 96%，实现了降库存与保供应的双重目标。

从综合效益看，减少停机带来的产值增加与库存资金节约，扣除系统建设与运维成本后，项目年净收益约 260 万元，投资回报周期不足十个月。更长远价值在于积累了设备全生命周期的健康数据与维修记录，为后续设备选型、保养策略优化以及二手设备残值评估提供了数据支撑。实践证明，基于远程监控的故障预警与备件协同并非单纯的技术升级，而是对传统运维流程的重构，能够在不增加人员编制的情况下显著提升管理颗粒度与响应速度。

结语：

远程监控技术为工程机械运维管理带来了数据驱动变革可能，而将故障预警与备件管理进行深度协同，是释放数据价值、构建闭环运维体系的关键路径。通过层级化的监控平台获取高质量运行数据，建立场景适配的动态故障预警机制，并以此驱动备件需求的精准预测与多级库存的联动调度，能够有效解决传统模式下故障发现晚、备件匹配差、响应速度慢等痛点。工程实践表明，该模式在减少非计划停机、降低库存成本方面成效明确，具备较高的推广应用价值。随着物联网技术持续成熟与行业数据标准逐步完善，故障预警与备件协同的深度融合将向更智能、更精细的方向发展，成为工程机械全生命周期管理的核心支撑能力。

【参考文献】

- [1] 张少华, 张涛, 李晓侠. 工程机械故障诊断及报警系统设计[J]. 设备管理与维修, 2024, (15): 63-67.
- [2] 朱海明. 浅谈工程机械设备智能化管理工作策略[J]. 内燃机与配件, 2021, (24): 194-196.
- [3] 赵环宇. 工程机械设备维护与故障预防策略研究[J]. 中国设备工程, 2025, (20): 12-14.