

机电工程设备运行维护与故障预防

李言亭

天津蓝巢电力检修有限公司 天津 300380

摘要：机电工程设备运行维护与故障预防是保障工业系统高效运转的关键环节。本文从设备全生命周期视角出发，提出通过科学选型与标准化安装筑牢基础，依托物联网、人工智能等技术实现运行阶段的智能监测与预测性维护，同时强化环境适应性改造与人为因素管控，构建系统性防护体系。实践表明，技术与管理协同优化可显著提升设备可靠性，降低非计划停机风险，推动运维模式从经验驱动向数据驱动转型，为工业数字化转型与绿色低碳发展提供坚实保障。

关键词：机电工程设备；运行维护；故障预防

1 机电工程设备运行维护基础理论

1.1 机电工程设备概述

机电工程设备是现代工业与基础设施运行的核心载体，其本质是通过机械、电气、控制等多学科技术的深度融合，实现能量转换、物质传输或信息处理的复杂系统。从微观的精密数控机床到宏观的电力发电站，从自动化生产线到智能物流系统，机电工程设备贯穿了制造业、能源、交通、建筑等关键领域。其核心特征体现在以下方面：（1）技术集成性。设备通常由动力装置（如电动机、内燃机）、传动机构（如齿轮箱、液压系统）、执行单元（如机械臂、泵阀）、传感器及控制系统构成，各子系统需协同工作以实现高效运行。例如，汽车发动机需通过ECU（电子控制单元）实时调节喷油量与点火时机，确保燃烧效率与排放达标；（2）环境适应性。设备需长期承受高温、高压、高湿、强腐蚀或电磁干扰等极端工况。例如，化工行业的反应釜需耐受强酸腐蚀，海上风电设备需抵御盐雾与台风侵袭。智能化趋势：随着物联网、大数据与AI技术的发展，现代设备逐渐具备自感知、自诊断与自适应能力。例如，智能机床可通过振动传感器预测刀具磨损，工业机器人可基于视觉识别动态调整抓取路径^[1]；（3）典型设备包括。动力设备（如燃气轮机、电动机）、传动设备（如减速器、皮带输送机）、自动化装备（如PLC控制的包装线）、特种设备（如电梯、起重机械）等。其运行状态直接决定生产连续性、产品质量及能耗水平，是工业数字化转型的物理基础。

1.2 运行维护原理

运行维护的本质是通过系统性管理手段，保障设备在全生命周期内保持最佳技术状态。其核心原理可概括为以下三个维度：第一，故障机理分析。基于可靠性

工程理论，研究设备失效模式（如疲劳断裂、磨损、腐蚀）与根本原因（如设计缺陷、过载运行、维护不当）。例如，通过疲劳寿命曲线（S-N曲线）预测轴承的剩余使用寿命，或通过故障树分析（FTA）定位液压系统泄漏的潜在诱因。

预防性维护策略：采用时间基准（如定期更换润滑油）或状态基准（如基于振动监测的齿轮箱维护）制定维护计划。现代技术如红外热成像可检测电机绕组过热，超声波探伤可发现管道内部裂纹，从而实现从“故障后维修”到“故障前干预”的转变；第二，动态优化机制。结合设备运行数据（如温度、压力、振动频谱）与维护记录，构建数字孪生模型，实时模拟设备状态并优化维护决策。例如，通过机器学习算法分析风电机组的历史故障数据，动态调整润滑周期以减少停机时间；第三，维护技术体系包括。润滑与密封技术（延长运动部件寿命）、精密检测技术（如激光对中仪校准轴系）、无损检测（NDT）技术（评估材料内部缺陷）、以及基于工业互联网的远程监控平台。其核心目标是以最低成本实现设备可用性最大化。

1.3 运行维护的重要性

运行维护对机电工程设备的价值体现在经济性、安全性与可持续性三个层面。其一，经济层面。降低全生命周期成本：统计表明，有效维护可使设备寿命延长30%-50%，维护成本降低15%-30%。例如，某钢铁企业通过优化轧机轴承维护策略，年节约备件费用超200万元。减少非计划停机损失：关键设备停机每小时可能造成数万元至数百万元损失。例如，半导体生产线停机1小时的直接损失可达50万美元。其二，安全层面。防范重大事故：设备故障是工业事故的主要诱因。例如，压力容器超压运行可能引发爆炸，电梯制动失效可能导致坠

落。保障人员与环境安全：通过定期检测与隐患排查，可避免有毒物质泄漏、电气火灾等次生灾害。其三，可持续发展层面。促进资源高效利用：精准维护可减少过度维修造成的材料浪费，例如通过状态监测避免过早更换未失效的轴承。支撑绿色制造：优化设备运行参数可降低能耗与排放。例如，通过变频技术调节电机转速，可使泵类设备节能20%-40%。在全球化竞争与“双碳”目标背景下，运行维护已从辅助性职能升级为企业的核心竞争力之一。其不仅是技术活动，更是融合工程管理、数据分析与风险决策的系统工程，直接决定企业的生产效率、市场响应能力与ESG（环境、社会、治理）表现^[2]。

2 机电工程设备运行维护的关键技术

2.1 状态监测与故障诊断技术

状态监测与故障诊断技术是设备运行维护的基石，其核心目标是通过实时数据采集与分析，精准识别设备健康状态并预判潜在故障。随着传感器技术、信号处理算法与人工智能的深度融合，该技术已从传统的人工巡检升级为智能化、实时化的监测体系。现代设备通常部署振动传感器（监测轴承、齿轮磨损）、温度传感器（检测过热风险）、声学传感器（捕捉异常噪声）、油液分析传感器（评估润滑油污染程度）等，形成多维度数据网络。例如，在风力发电机组中，通过叶片应变片与塔架加速度计联合监测，可实时捕捉不平衡载荷与结构疲劳。原始监测数据需通过时域分析（如均方根值、峭度指标）、频域分析（如傅里叶变换、包络解调）及小波变换等方法提取故障特征。例如，滚动轴承的故障频率可通过包络谱分析精准定位，齿轮箱的断齿故障则可通过时域冲击信号识别。基于机器学习（如支持向量机、随机森林）与深度学习（如卷积神经网络、循环神经网络）的算法，可构建故障分类与预测模型。例如，某汽车工厂通过LSTM网络分析机床主轴振动数据，将故障预警准确率提升至95%以上。在化工领域，通过红外热成像技术可非接触式检测管道泄漏；在轨道交通中，轮轨力监测系统可实时评估列车运行安全性。该技术不仅降低了人工巡检成本，更将故障发现时间从“事后”提前至“早期萌芽期”。

2.2 预测性维护技术

预测性维护技术以数据驱动为核心，通过构建设备退化模型与剩余寿命预测算法，实现维护决策的精准化与前置化。其核心优势在于平衡维护成本与设备可靠性，避免“过修”或“欠修”问题。基于物理模型（如Paris定律描述裂纹扩展）或数据驱动模型（如威布尔分布拟合设备寿命），量化关键部件的退化规律。例如，

航空发动机叶片的蠕变寿命可通过材料性能参数与服役条件联合建模预测。通过融合多源监测参数（如振动、温度、油液磨粒浓度），构建反映设备健康状态的综合指标。例如，某石化企业基于主成分分析（PCA）方法，将泵群运行状态量化为0-100的健康指数，实现群体设备优先级排序。结合剩余寿命预测与维护成本分析，制定动态维护计划。例如，通过蒙特卡洛仿真模拟不同维护策略下的设备停机概率，选择总成本最优方案。某钢铁企业通过该技术将轧机维护成本降低28%，同时减少非计划停机时间40%。数据质量（如噪声干扰）、模型泛化能力（如工况变化适应性）是当前主要瓶颈。近年来，迁移学习、联邦学习等技术的引入，有效提升了模型在跨设备、跨场景下的预测精度。

2.3 远程运维与智能管控技术

远程运维与智能管控技术依托工业互联网、5G通信与边缘计算，打破物理空间限制，实现设备全生命周期的数字化管理。该技术正在重塑传统运维模式，推动运维服务从“现场响应”向“云端协同”转型。通过部署工业物联网网关，将设备状态数据实时上传至云端，构建可视化监控大屏。例如，某能源企业通过数字孪生技术，在虚拟空间中映射风电场运行状态，运维人员可远程查看风机叶片转速、塔架倾斜度等参数^[3]。基于云平台的大数据分析能力，专家系统可自动生成诊断报告并推送维护建议。例如，西门子MindSphere平台通过集成AI诊断模块，为数控机床提供实时故障定位与备件需求预测。在危险或高精度场景中，机器人可替代人工执行巡检、维修任务。例如，核电站采用轨道式巡检机器人，搭载高清摄像头与辐射传感器，实现反应堆压力容器外观检查与剂量监测。在数据产生端部署边缘节点，实现本地实时分析与决策。例如，某智能工厂通过边缘计算网关对机床振动数据进行预处理，仅将异常片段上传云端，降低带宽占用与响应延迟。通过区块链技术确保数据不可篡改，结合量子加密通信保障传输安全。例如，医疗设备远程运维系统采用国密算法加密患者数据，符合HIPAA等隐私法规要求。

3 机电工程设备故障预防策略

3.1 设备选型与安装阶段的预防措施

设备选型与安装阶段是故障预防的基石，需从技术适配性、安装规范性和质量管控三方面入手，为设备全生命周期可靠性奠定基础。科学选型与适配性评估是首要任务，需根据生产工艺需求（如负载特性、环境工况）选择适配设备，避免“小马拉大车”或“大马拉小车”导致的过载或低效问题。例如，化工企业需根据介

质腐蚀性选择不锈钢或陶瓷材质泵体，数控机床需匹配伺服系统动态响应能力以满足加工精度要求。优先选择通过ISO9001认证、具备FMEA（失效模式与影响分析）报告的供应商，并要求提供MTBF（平均无故障时间）与MTTR（平均修复时间）等关键数据。安装质量控制直接决定设备初始状态。需严格遵循安装手册，确保基础强度（如混凝土标号）、对中精度（如联轴器轴向偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ ）及管道应力消除等关键指标达标。例如，高速离心机需通过激光对中仪校准，避免振动超标；海边电厂的电气设备需加装防盐雾涂层以应对腐蚀环境。此外，安装完成后需进行空载试车、负载试车及性能测试，记录振动、温度等参数基线，为后续维护提供参考。

3.2 运行阶段的预防性维护

运行阶段的预防性维护是保障设备可靠性的核心环节，需通过实时监测、智能诊断与计划性维护相结合，实现故障的早期识别与主动干预。基于状态的维护（CBM）是关键手段，通过部署振动传感器、红外热像仪、油液分析仪等监测设备，实时采集温度、压力、振动频谱等关键参数，构建设备健康档案。例如，利用振动分析技术可提前30天预警风电齿轮箱齿轮裂纹，通过红外热成像非接触式检测电机绕组过热风险。结合阈值管理与趋势分析，动态评估设备劣化趋势，如根据润滑油铁谱分析判断轴承磨损阶段，及时制定维护计划。定期维护与智能技术融合可进一步提升预防效能。一方面，按固定周期更换易损件（如空气滤清器、密封件），并基于可靠性模型（如威布尔分布）优化维护间隔；另一方面，引入AI诊断系统，通过机器学习算法分析历史故障数据，自动识别异常模式。例如，某钢铁厂利用LSTM网络将轧机轴承故障识别准确率提升至92%，实现精准维护。此外，数字孪生技术可模拟设备运行状态，预测潜在失效风险，为维护决策提供科学依据。

3.3 环境与人为因素控制

环境与人为因素是诱发设备故障的两大外部变量，需通过系统性管理降低其影响，为设备稳定运行提供保障。环境控制需从物理条件与污染防控两方面入手。针

对温度、湿度、粉尘、腐蚀等环境因素，采取针对性防护措施。例如，在精密加工车间（如半导体洁净室）维持恒温恒湿（温度 $22\pm 1\text{℃}$ ，湿度 $45\%\pm 5\%$ ），避免电子元件因静电或热胀冷缩失效；对水泥厂等粉尘环境，电机加装防尘罩并定期清理散热通道；在氯碱厂等腐蚀性气体环境中，管道采用PTFE内衬或玻璃钢材质，延长设备寿命^[4]。对强电磁干扰源（如变频器、中频炉），需对控制电缆实施屏蔽接地，防止信号失真引发误动作。人为因素管理需强化标准化操作与技能提升，制定SOP（标准作业程序），明确设备启停顺序、参数调整范围及异常处理流程，例如禁止带载启动离心泵以防止电机过载。定期开展技能培训与考核，重点强化故障诊断能力（如振动频谱解读、热成像分析）与应急响应速度。通过“人防+技防”结合，减少因误操作或经验不足导致的故障。

结束语

机电工程设备的稳定运行是工业生产力的重要支柱。在智能化与可持续发展背景下，运行维护与故障预防需以技术创新为引领，以管理优化为支撑，以人才赋能为保障，形成覆盖全生命周期的防护网络。未来，随着数字孪生、边缘计算等技术的深化应用，设备运维将实现更高水平的智能化与自主化。唯有坚持预防为主、主动运维的理念，才能有效应对复杂工业场景的挑战，为工业高质量发展注入持久动能，助力企业在新时代竞争中赢得先机。

参考文献

- [1]罗方.高速公路机电设备智能故障检测系统[J].中国交通信息化,2023(5):110-113.DOI:10.13439/j.cnki.itsc.2023.05.015.
- [2]褚润涛.煤炭机电设备故障诊断与预测性维护研究与实践[J].中国高新科技,2024,(07):78-79+117.
- [3]白雪岩.煤矿机电设备的安全管理与维护浅谈[J].石化技术,2020,27(07):200-201.
- [4]李华清.煤矿机电设备的安全管理与维护[J].设备管理与维修,2020(06):19-20.