

电气工程自动化设备维护与管理的现代化方法

杨 博

葫芦岛市中心医院 辽宁葫芦岛 125000

摘要:本文旨在系统探讨电气工程自动化设备维护与管理从传统模式向现代化、智能化范式转型的综合路径。研究通过剖析预防性、预测性维护及可靠性工程等理论基础，并结合传感器、物联网、大数据分析等关键技术，构建了一个“理论—技术—管理”三位一体的现代化维护体系框架。进一步，论文深入阐述了该框架下的管理流程优化、成本控制策略以及人员能力转型等核心实践方案。研究表明，通过上述理论与技术的深度融合与系统性实施，能够有效推动维护活动从事后被动响应向事前精准预测的根本性转变，为提升设备全生命周期可靠性、运行安全性与综合经济效益提供了系统的解决方案。

关键词:预测性维护；物联网技术；维护管理；智能化转型

引言

随着电气自动化设备日益复杂与高集成化，传统维护模式难以满足现代工业对可靠性、效率及成本控制的要求，其维护管理向智能化、数字化转型势在必行。

本文旨在系统探讨电气自动化设备现代化维护管理的理论、技术与策略。研究核心在于构建一个融合智能感知、数据分析与决策优化的综合框架，重点涵盖从预测性维护理论到物联网、大数据等关键技术应用，以及管理流程的优化实践，以期为提升设备可靠性与运行经济性提供系统性解决方案。

1 电气工程自动化设备概述

1.1 自动化设备的定义与分类

电气工程自动化设备指在电力生产、输配及工业控制中，能按预设程序或指令自动完成测量、控制、保护及执行等任务的装置与系统。其核心在于实现“无人干预或少人干预”的自主运行。从功能与层级划分，可分为三类：一是控制核心设备，如 PLC、DCS，负责逻辑运算与指令发出；二是现场执行与测量设备，包括智能断路器、变频器、传感器与执行机构，直接作用于生产过程；三是智能互联设备，如集成通信模块的智能终端与边缘网关，是实现状态感知与远程运维的物理基础。此分类为理解其多样化维护需求提供了清晰框架。

1.2 自动化设备在电气工程中的应用^[1]

自动化设备已深度融入电气工程发、输、配、用各环节。在智能电网与工业领域，它们不仅执行基础的监测、保护与

控制，更通过智能机器人实现了高危、高频作业的革新。例如，辅助组塔机器人可进行铁塔自动化组装，而具备强地形适应能力的四足机器人与双手机器人则能自主完成变电站设备巡检、配电线路带电接火等复杂任务，显著提升作业安全与效率。这些应用是后续探讨其现代化维护管理方法的现实基础。

1.3 自动化设备的关键技术^[2]

自动化设备的关键技术体系构成了其智能维护与管理的基石。该体系可分为三个层面：首先是智能感知与控制层，依赖高精度传感器与先进控制算法（如预测性控制）实现设备的精确操控与实时状态感知。其次是数据智能层，通过边缘计算就地处理数据，并运用人工智能（如机器学习模型）进行故障预测、异常检测与工艺参数优化，将事后控制转向事中与事前干预。最后是通信与集成层，由工业以太网、5G 及物联网技术确保数据可靠传输，并结合数字孪生与开放自动化架构，实现虚实映射与系统间的协同互操作。这些技术的深度融合，为第四章讨论的具体维护方法提供了核心技术支撑。

2 现代化维护与管理理论基础

2.1 预防性维护理论

预防性维护理论，作为现代维护管理体系的基石，其核心在于通过计划性的定期检查、保养与部件更换，在设备发生故障之前主动采取干预措施，从而避免非计划停机、降低严重故障风险并延长设备整体使用寿命。它基于一个核心理念：设备磨损与性能衰退具有一定的时间或使用周期规律，

通过对这些规律的把握，可以制定标准化的维护计划。

该理论的主要特征包括计划性、周期性和资源预置。其优势在于能将复杂的维护工作纳入可管理的计划，提高生产安排的确定性，并有效防止灾难性故障。然而，其局限性亦十分明显，主要体现在两个方面：一是依赖于平均故障间隔时间等统计规律，可能导致维护不足或“过度维护”；二是缺乏对设备实时运行状态的响应，无法精准应对个体差异和突发性异常。因此，预防性维护常被视为一种基础而必要的策略，它为更高级的预测性维护和智能维护提供了管理框架和数据积累的起点。

2.2 预测性维护理论

预测性维护理论代表了从“基于时间”到“基于状态”的根本性范式转变。其核心在于通过部署传感器对设备的振动、温度等关键参数进行实时或定期状态监测，并运用大数据分析和人工智能算法（如 LSTM、随机森林等）处理这些数据，构建故障预测模型。该理论旨在精准预测设备性能衰退趋势与剩余使用寿命，从而在故障发生前主动生成维护决策，实现从被动响应到主动预见、从经验驱动到数据驱动的变革。相较于周期性、计划性的预防性维护，预测性维护能够显著降低非计划停机风险与过度维护成本，是构建智能化维护体系的基石。

2.3 可靠性工程理论

可靠性工程理论，是现代设备维护与管理体系的顶层设计与量化评估基础。其根本目标是，通过系统的设计、分析与改进，确保设备或系统在规定的使用条件与规定的时间内，持续、稳定地完成规定功能。它超越了单一故障的修复，着眼于从全生命周期视角（设计、制造、运行、维护）系统性提升设备的固有可靠性与使用可靠性。

该理论的核心方法包括：运用故障模式与影响分析识别潜在薄弱环节；通过可靠性建模与分配（如可靠性框图）进行定量设计与预测；利用可靠性试验收集数据，并采用威布尔分布等统计模型评估关键指标，如平均故障间隔时间与平均修复时间。在维护实践中，它为制定科学的预防性维护周期、评估预测性维护模型的有效性，以及优化备件库存策略，提供了不可或缺的数学与工程学依据，是实现设备高可用性与运行经济性的理论基石。

2.4 智能维护理论

智能维护理论是维护管理范式演进的高级阶段，其核

心在于构建一个能够自主感知、分析、决策与执行的闭环系统。它深度融合了工业物联网、人工智能、数字孪生等前沿技术，旨在实现从“基于状态的预测”到“基于认知的自主优化”的跨越。其运作流程表现为：通过泛在感知网络实时采集全维度运行数据，利用人工智能模型进行深度分析、故障根因诊断与寿命预测，并最终由系统自主或辅助生成最优维护决策与调度方案，甚至驱动执行机构完成自适应调整。

该理论超越了预测性维护的数据分析层面，强调系统的自主性、协同性与进化性。它不仅响应设备状态，更能通过对历史与实时数据的学习，持续优化自身诊断模型与决策逻辑，实现维护策略的自我完善。这正是第四章探讨的物联网、大数据等技术应用的最终目标，也是实现第五章所述全流程优化与智能化管理的关键理论支撑。

3 现代化维护技术与方法

3.1 传感器技术在自动化设备维护中的应用^[3]

传感器技术是构建自动化设备智能维护体系的感知基石。通过在设备关键部位部署振动、温度等传感器，可实时采集表征设备健康状态的多维物理信号，为后续的大数据分析与故障诊断提供唯一数据源。当前，技术正朝着无线化、集成化与智能化演进，例如集成边缘 AI 处理能力的智能传感器，能直接在数据源头进行特征提取与异常初判，大幅提升状态感知的实时性与决策自主性。这为从被动维修转向预测性维护提供了最前端的技术支撑。

3.2 物联网技术在自动化设备管理中的应用

物联网技术是实现自动化设备现代化管理的核心架构与连接纽带，它通过构建“感知 - 传输 - 分析 - 决策”的闭环系统，将孤立的物理设备转化为互联互通的智能节点。在架构层面，物联网系统依托部署于设备的传感器（端）实时采集多维运行数据，通过边缘计算节点（边）进行毫秒级的本地处理与协议转换，再经由高速网络将数据汇聚至云端或管理平台（云），最终与上层的生产管理系统（商）深度融合，实现数据到决策的转化。这使得管理者能够突破空间限制，对设备群进行远程实时监控、批量参数调整与协同调度，推动设备管理从传统的被动响应、定期巡检，向基于数据的预测性维护、能效优化和全生命周期智能化管控的根本性转变。

3.3 大数据分析在设备故障诊断中的应用

大数据分析技术是驱动设备故障诊断从经验推断迈向

精准智能的核心引擎，它通过对物联网所汇集的设备海量异构运行数据进行深度挖掘与智能分析，将原始数据转化为可执行的维护洞察。其具体流程包括利用数据预处理技术清洗、对齐多源时序数据，进而借助机器学习算法（如孤立森林、深度学习）构建故障特征模型与预测模型，不仅能实现设备早期异常与复合故障的精准识别与根因分析，还能预测性能衰退趋势与剩余使用寿命。这使得维护决策从基于规则的阈值报警，升级为基于概率与趋势的动态优化，最终形成“数据采集 – 模型分析 – 决策反馈”的闭环，为第五章实施优化的维护策略与成本控制提供了直接的数据驱动决策支持。

4 现代化管理策略与实践

4.1 维护管理流程优化^[4]

维护管理流程优化的本质是从传统“按时检修”和“故障后响应”的范式，向数据与知识双驱动的预测性、自主化范式演进。其核心在于构建一个闭环系统：通过部署传感器与物联网实现设备状态的实时感知与数据汇聚；利用大数据与人工智能技术分析数据，预测故障并评估健康状态；最终基于此生成优化的维护决策，驱动工单自动派发、资源精准调度，并借助自愈控制等策略实现部分问题的自主处理。这一流程重塑了运维角色，使人员聚焦于决策监督与策略优化，从而系统性提升设备可靠性、运行安全性与管理经济性。

4.2 维护成本控制策略

维护成本控制策略的核心目标是从单纯的“费用削减”转向追求全生命周期综合成本最优的“价值创造”。其实施路径包括：首先，通过引入基于风险的维护理念，综合评估设备故障概率与后果，科学区分并差异化配置预防性、预测性维护资源，避免“一刀切”造成的过度维护或维护不足。其次，借助物联网与大数据分析，实现对设备健康状态的精准把握与剩余寿命预测，从而动态优化维护周期与备件库存，减少非计划停机损失与冗余库存占用。最终，这些策略需整合到一个统一的数字化管理平台中，实现从预算、采购、执行到分析的成本闭环透明化管理，推动维护活动从成本中心向保障可靠运行、提升资产价值的核心职能转变。

4.3 维护人员培训与管理

在智能化维护体系下，维护人员正从传统的“操作执行者”向“数据分析师”与“决策管理者”复合型角色转型。因此，人员培训与管理的核心是构建系统化的能力重塑体

系：在培训内容上，需超越传统设备维修技能，重点加强物联网数据解读、预测性维护平台操作、以及基于人工智能诊断结果的决策能力；在培训方式上，应推广虚实结合的数字化培训平台与增强现实指导工具，实现技能的高效传递与安全实训。同时，管理机制需同步革新，建立与新技术应用挂钩的技能认证、绩效激励与知识共享平台，从而激发团队持续学习的内在动力，形成“技能提升 – 实践应用 – 价值创造”的良性循环，为现代化维护策略的有效落地提供最关键的人力资源保障。

4.4 维护服务外包与合作模式

维护服务外包与合作模式的现代化演进，其核心在于从传统的、以成本削减为主的简单合同外包，转向构建以价值共创与风险共担为特征的战略合作伙伴关系。企业通过将非核心的、专业要求高或资源消耗大的维护业务（如定期巡检、预测性分析、备件集中管理）委托给外部专业服务商，不仅能借助其规模效应与技术专长降低综合成本，更能快速导入先进的维护技术与管理体系。成功的合作依赖于建立清晰的数字化服务水准协议、共享的设备数据平台以及融合双方优势的协同工作流程，这使企业内部团队得以聚焦于核心资产的战略性管理与运维决策，最终形成一种弹性、高效且持续优化的维护生态系统。

5 结论与展望

本研究系统构建了电气工程自动化设备从传统维护向智能维护转型的理论、技术与管理的综合框架。研究成果表明，通过深度融合物联网、大数据与人工智能等现代化技术，并实施与之匹配的流程优化、成本控制及人员转型策略，能够有效构建预测性维护体系，显著提升设备可靠性、运行安全性与管理经济性。然而，研究亦存在局限性，主要体现在所提框架对实际企业数据基础、技术整合能力与初始投资要求较高，且跨平台数据互操作性与安全风险等实施难题有待深入探索。展望未来，研究将进一步向生成式 AI 辅助决策、基于数字孪生的全生命周期闭环优化以及绿色低碳维护等方向发展，以推动维护体系向更自主、更协同、更可持续的下一代演进。

参考文献：

- [1] 张辉, 杜瑞, 钟杭, 等. 电力设施多模态精细化机器人巡检关键技术及应用 [J]. 自动化学报, 2025, 51(1):20–42.
- [2] 施耐德电气.“智”控全局 施耐德电气重磅发布

EcoStruxure 边缘智能盒 [J/OL]. 电力网 ,2025.

[3] Li Bozhou,Ju Dajiang,Li Xingwang,et al.Synergistic effect of artificial intelligence and new real-time disassembly sensors: Overcoming limitations and expanding application scope[J].Journal of Intelligent Systems,2025,(1).

[4] 谢庆 , 王春鑫 , 李帆 , 等 . 知识及数据驱动的电力一次设备健康管理方法综述 [J]. 高电压技术 ,2024,50(2):605–620.

作者简介: 杨博 (1992.04—), 女, 汉族, 辽宁省葫芦岛市, 本科, 中级工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。