

基于全生命周期设备管理的预测性维护技术研究

蔡彤

(中海油能源发展装备技术有限公司临港基地项目组, 天津 300450)

摘要: 信息化浪潮方兴未艾, 数字化技术日趋成熟, 传统制造业面临转型挑战。通过介绍一种基于全生命周期设备管理思路的预测性维护技术, 推荐制造业从被动性维修到主动预测性防治的新质生产力及思路。该技术采用云边端协同的架构设计, 包含智慧生产及智慧运维两大核心主题, 同时需以数据标准化建设为基础。该文论证了设备设施预测性维护的技术可能性, 同时以某海洋装备智能制造基地为例, 展示了该技术在智能制造基地的先进应用效果。

关键词: 智能制造园区; 海洋装备; 数据治理; 预测性维护; 数字化转型

中图分类号: TH17; TP278; U674.9 **文献标志码:** A

Research on Predictive Maintenance Technology Based on Full Lifecycle Equipment Management

CAI Tong

(Lingang Base Project Team, CNOOC Energy Technology & Services Limited, Tianjin 300450, China)

Abstract: Amid the surging wave of informatization and the maturing digital technologies, traditional manufacturing industries face transformational challenges. This paper introduces a predictive maintenance methodology grounded in full lifecycle equipment management, advocating a paradigm shift from passive maintenance to proactive predictive prevention as a new productive paradigm for manufacturing. The proposed technology adopts a cloud-edge-device collaborative architecture, integrating two core themes: smart production and intelligent operations and maintenance, while requiring foundational data standardization infrastructure. This study demonstrates the technical feasibility of predictive maintenance for equipment and facilities. Using an anonymized marine equipment smart manufacturing base as a case study, it showcases the advanced application outcomes of this technology in intelligent manufacturing facilities.

Keywords: smart manufacturing park; marine equipment; data governance; predictive maintenance; digital transformation

1 引言

随着大数据、云计算技术日趋成熟, 设备设施预测性维护成为传统制造业数字化转型的核心切入点。事后维护是在设备发生故障之后再行修理、维护, 存在着可靠性低、维护成本高、生产损失大等缺点, 对企业的稳定生产、成本控制和经济效益造成不利影响。在漫长的技术迭代过程中, 企业意识到维护性工作需要前置, 因此预防性维护(设备年检、季度检修、月度检修等)管理手段十分必要。根据设备使用寿命、运行状态和环境

变化等因素制定维护计划, 提高设备可靠性、减少生产损失、延长设备使用寿命。但由于缺少实时状态数据支撑, 无法做到精准运维。“十四五”规划及新质生产力的提出, 有效助力了“两化融合”工作。企业逐渐意识到需要利用传感器、数据分析、人工智能等技术进行主动性维护工作, 即从设备设计开始到报废整个生命周期内监控故障的诱发因素, 从而避免故障的发生, 降低设备出现故障的概率。此项技术的难点在于需要整合企业系统孤岛, 同时利用新一代信息技术, 物联网、大数据、云计算及人

工智能等手段，对生产线进行数字化、网络化、智能化改造。

2 企业级数据库研究与应用

2.1 数据管理制度与数据标准研究

要做到设备设施预测性维护，首先应从设备生产状态、运输信息、运行追踪和报废管理等全生命周期做到信息统筹追溯，信息通信技术可通过 TCP/IP、ModBus、F5G 和 5G 等技术实现，但重点及难点是做到标准先行和数据规范化统一。对于新建项目，在数据管理制度建设维度，应在目标公司的数据管理办法基础上进行细化，研究一套涵盖不同管理粒度、适用不同对象的设备设施预测性维护的数据管理制度，保障相关数据采集、存储、管理和应用等各项工作能够有据开展；在数据标准规范建设维度，应继承目标公司的数据标准建设成果，研究适合预测性维护功能的数据标准制定方法及模板，统筹各业务链建立设备设施预测性维护的数据标准体系，包括主数据标准体系和业务数据标准体系，为源头数据治理、应用整合奠定基础，提高企业数据质量，实现数据互联互通。

数据标准化的管理可参考 DCMM 数据管理能力成熟度模型开展，需要全域开展的工作包括以下几方面。

1) 数据确权。明确各业务域数据所有者、数据生产者、数据使用者、数据管理者和数据运营者，压实认责部门责任，推动本域数据治理和数据入湖等工作。

2) 数据资产目录的建立。完成数据资产目录 L1 业务域、L2 主题域、L3 业务对象、L4 逻辑数据实体和 L5 属性的梳理工作^[1]，覆盖本业务域业务流程中所产生的、应有的全部数据资源，包括线上及线下的各类表、证、单和书等，并完成对应的技术目录梳理，识别系统中重要数据、无效数据，建立与业务目录 L4、L5 层级的关联和映射关系，实现业务目录和真实数据的打通。

3) 目录挂载发布。生产域以数据资产目录为基础，进一步完善湖内数据模型设计，完成数据入湖和开发。最终通过数据治理工具完成数据资产目录与湖内真实数据的挂载和发布，实现数据可见可用。

4) 制定数据标准。建立数据标准规范，促进数据跨域流通与高效使用，在数据湖内实施并推动源头落地。

需要针对用户数字化场景，个性定制开展的工作包括以下几个方面。

1) 可信数据源确认。依托数字化转型场景建设开展可信数据源认定，压实数据生产者责任，实现“一数一源，权责分明”，做好源头唯一性认证。

2) 数据质量评估。基于场景明确数据范围和数据质量需求，梳理数据质量稽核规则和评估模型，定期开展数据质量评估，通过问题发现、整改机制不断提升数据质量。

3) 数据密级确定。伴随数字化转型场景建设，基于数据资产目录完成数据的安全定级工作，强化数据安全管理能力，保证数据安全、合规。

4) 共享等级确定。依托数字化转型场景建设，完成相关数据资产的共享等级梳理，通过统一的数据共享管理流程，将数据以安全、一致的方式在不同部门间流动和使用，促进数据共享和数据应用。

2.2 数据采集技术研究

企业级数据库数据源头数据存储架构不一，如结构化数据、半结构化数据和非结构化数据，采用单一手段无法将这些数据采集到企业级数据库中。通过研究不同类型的数据源及数据结构相关的数据同步技术，如 ETL 工具、源头数据库日志解析或应用服务埋点等，实现各个应用系统全量数据的自动同步，满足企业数据共享复用、统一规范管理的需要。企业数据库数据流程图如图 1 所示。

设备设施预测性维护需依托大量现场实时数据，如动设备、电气设备、仪控设备、腐蚀监测和环境数据等，其特点是采集的数据点多且频率较高。研究面向现场边缘层设备及外部信息系统的海量实时数据采集策略及汇聚入库技术，明确采集频率、配置数据点表，实现大批量实时数据及录波数据的采集，并利用中间件进行数据缓冲，避免海量数据的瞬时涌入造成数据汇聚服务宕机。

2.3 数据存储技术研究

针对目标公司的数据现状、增长空间及应用场景，借鉴成熟的大数据技术，从数据体量、数据类型、数据维度、数据时效、数据安全和数据挖掘等支撑能力出发，研究适合云环境的企业级数据库存储技术，确保企业级数据库高可用和高性能。常见数据存储体系见表 1。

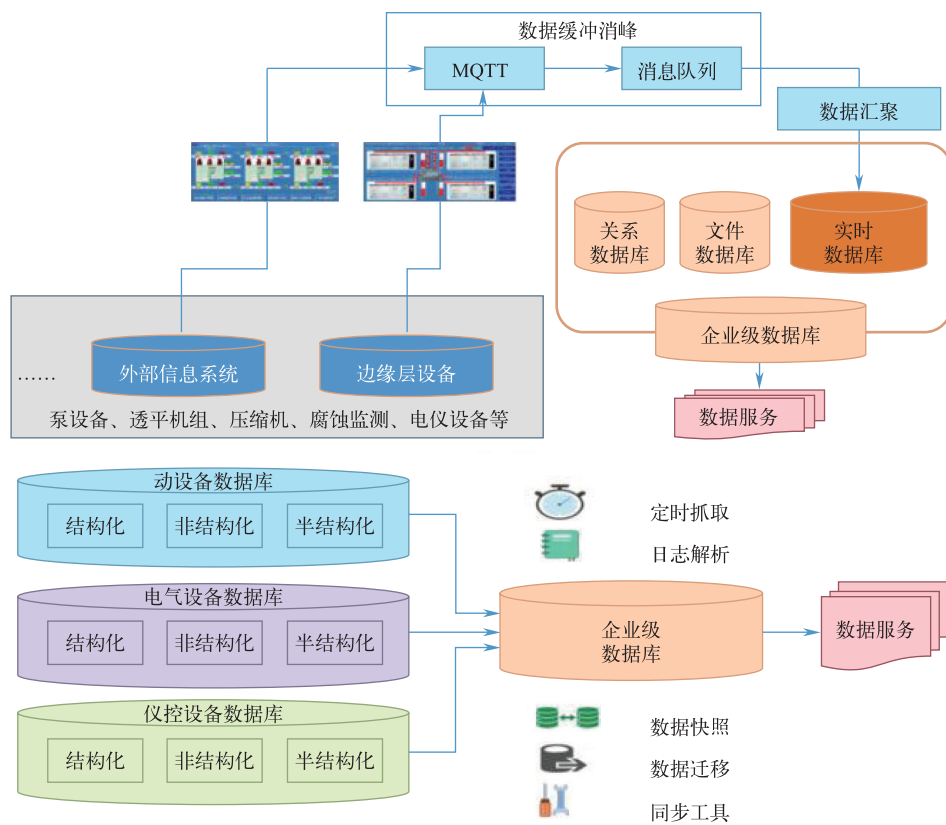


图1 企业数据库数据流图

表1 常见的数据存储体系

项目	分布式存储	大数据并行计算	传统关系型
扩展能力	高	中	低
开发维护成本	高	中	中
SQL 支持	中	高	高
数据规模	PB 级别	准 PB 级别	TB 级别
计算性能	处理非关系型数据效率高	处理关系型数据效率高	处理关系型数据效率高
数据结构	结构化、半结构化、非结构化	结构化数据	结构化数据

2.4 国产信创数据库技术研究

优选适用于设备设施预测性维护应用场景的国产化数据库，研究并制定相应的适配策略，满足企业级数据库高并发、低延迟、大数据量的存储需求。部分国产数据库技术研究见表2。

表2 部分国产数据库技术研究

数据库	分布式存储
人大金仓	价格实惠，适合中小企业的需求和预算；多语言支持，提供了更大的开发灵活性和多样性；高安全性保障机制，包括用户权限控制、密码强度提示、日志记录等
达梦	达梦数据库产品现已通过 100TB 数据库容量测试，是通过了中国人民解放军 B 级认证的数据库产品，在华中、华南地区具有相对比较明显的优势
南大通用	南大通用以数据处理与数据安全技术为核心竞争力，是一款市场急需的具有自主品牌的软件产品，为我国电子政务、电子商务、信息安全等领域提供基础产品支撑和专业服务 ^[2]

3 建设路径研究与规划

3.1 采用“云、边、端”架构的优势和必要性

考虑设备设施预测性维护建设的复用性和兼容性，从技术、业务、场景多角度统筹智能监测及运维业务，边端以物联网平台为核心，构建统一的数据采集、应用管理，云端依托统一的标准与工具，实现统一的数据建模、算法分析、微服务治理、应用集成和研发统一管控。

设备设施预测性维护顶层架构设计如图 2 所示。

“端”建设应依据硬件标准化原则，按照模块化管理方式，统筹设备数据采集需求，部署覆盖电动设备、电气设备、仪控设备、腐蚀监测和环境监测等系统感知设备，实现对设备设施全生命周期智能化数据采集和全面感知，为设备管理创建“智能、安全、高效、感知”的新型运营模式。

“边”建设以边缘一体机为基础，以物联网平台和视联网平台为技术支撑，实现边缘数据的统一采集、数据存储、数据传输、智能分析及边缘业务应用的统一管理。统一现场新增采集端通信接口，收敛通信协议，便于通

过物联网平台统一管理；按需考虑数据采集频率、数据量和计算要求，分组规划制定数据传输策略，实现状态数据准确可靠，报警数据及时高效，趋势数据连续稳定。

“云”建设应以提高安全可靠、降低运维成本为主要目标，以大数据技术和 AI 算法模型为工具，开展关键设备设施状态监测、智能预警、故障诊断、状态评估、故障预测和运维优化等智能化建设。提高设备设施的安全可靠性、减少设备故障导致的非计划关停次数；减少计划性检测维护工作量，降低设备设施检测维护成本。

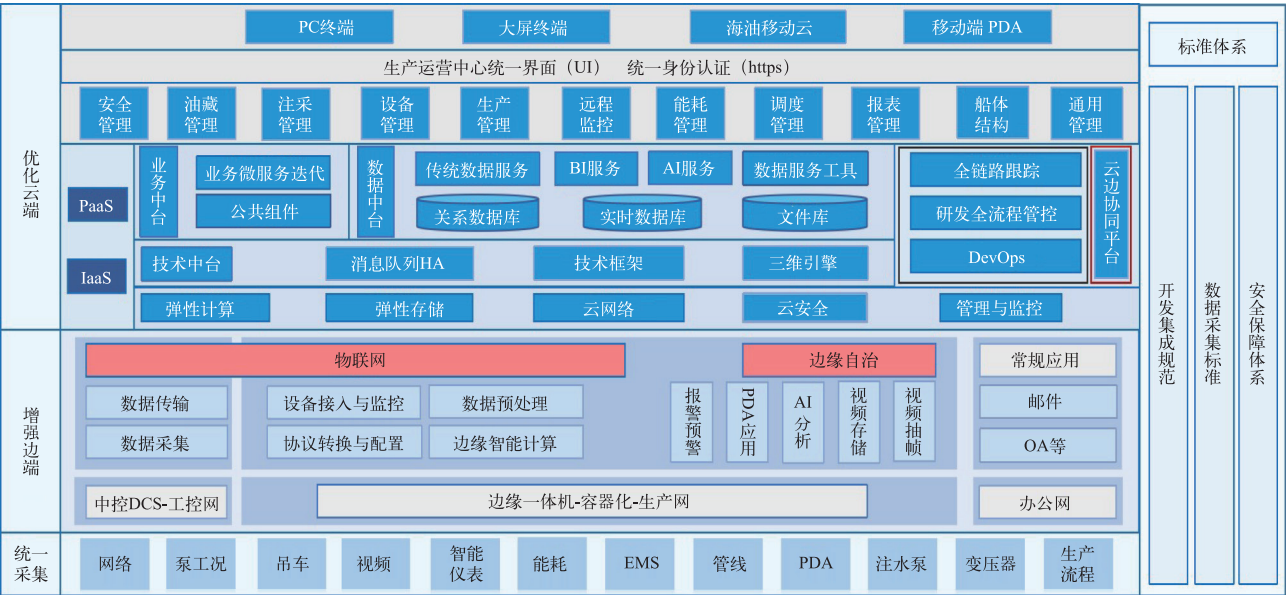


图 2 设备设施预测性维护顶层架构设计

3.2 构建全生命周期智能制造新生态

一方面增加源头感知手段，有能力的企业可自主研发设计、制造智能化产品，内置智能化感知端，实现设备设施源头感知；对于第三方提供的设备或产品，解析设备数据或增加感知手段，通过丰富的数据源，持续优化模型算法和效果，并应用到设备设施智慧运维和管理中。

另一方面建立设备全面感知技术体系、综合诊断技术体系、产品制造和维护治理一体化作业技术体系，融合重构感知、模型和算法核心能力，提供智慧运维一体化服务。最终实现智能产品驱动智慧运维，并以智慧运维反哺智能产品循环促进的高质量发展模式。

构建设备诊断及预测性维护模型，基于实时数据实现电气设备、电力系统、中控健康、电网系统、智能仪表、能源调优和主动设备诊断等设备，进行运行状态在线监测、智能预警、综合诊断评估和主动推荐维修策略，建立全生命周期健康管理，降低设备故障率和维修成本，提高设备可靠性^[3]。

BIM、数字孪生等虚拟仿真技术的成熟，可支撑企业建设相应的三维可视化环境，结合设备监控、生产运行、位置感知等实时数据，可实现设备状态监控、人员定位、风险区域管控、图样资料三维联动和远程巡检等功能，提升现场发现和处置问题的效率，创建“智能、安全、高效”的新型生产运行模式。

3.3 AR 空间指引与数据融合技术应用

2024 年 AR 增强现实趋势正在迅速发展，针对设备设施运维及生产现场安全管理难度大、巡检标准不统一等业务问题和人员定位成本高、信号源不稳定等技术问题，可开展融合 AR 技术的多模态信息交互、智能指引，通过研究 AR 空间指引技术，多模态数据交互技术，探索 AR 和 AI 技术在生产现场的应用前景，实现远程协作、智能巡检、智能识别等功能。

按照设备设施预测性维护的顶层设计思路，开发 AR 空间指引技术组件，并扩展成为 AR 智能应用工具，可包含资源管理（设备 / 人员 / 视频流信息）和远程协作（音视频通话）、低代码配置（工作流编辑）、智能识别（安全风险识别 / 文字识别 / 仪表识别）等基础功能，打造 AR+AI 智能生态底座，支持 Web、AR 头盔、AR 眼镜、电脑、平板和手机等交互设备、支持扩展多领域。接入监控系统、巡检机器人配合智能识别模块可实现视频流的实时调取，非智能摄像头也可以实现智能识别，如劳保穿戴、安全帽工服、仪表识别等功能；配合执法记录仪、热成像仪、内窥镜等外部设备可扩展智慧安全、质量检查等场景发挥重要作用；配合外部专家、智慧助手可实现远程音视频通话，为专家支持、智慧运维提供沟通桥梁；配合进行三维数字孪生模型助力设计师完成协同设计；亦可作为插件接入 MES、PMS 等管理系统，一键配置工单为智慧工厂进行赋能。

通过 AR 技术加持，可有效重塑设备巡检和安全巡检的流程，实现巡检 / 参观路线的指引、虚拟设备看板对动静数据实时展示、风险区域划分与进入提醒，AR 智能应用工具助力智能工厂实现设备巡检流程标准化，有效提升巡检及故障处置效率、提升人员安全管理和应急处置能力。随着工具不断完善与推广，可有效提升设备设施智能化运维服务能力，提升企业服务能力，减少运营和维护支出，从而提高产能和效益，提升客户满意度，增强企业的核心竞争力。

4 实践效果

天津某海洋装备智能制造基地，是上级公司首个从设计、制造、运行到检测、维保全生命周期的数字化、绿色化、人文化标杆基地。项目建成后将解决该公司发展制造产业分散问题，形成集约化、规模化，发挥产业集群效应^[4]，完善“产品 + 技术 + 服务”一体化技术服

务产业链条。秉承“顶层规划、试点先行”战略部署，已在该基地完成设备设施预测性防治一体化系统搭建，初步实现预测性维护能力，提高运维技术水平，初步形成设备设施预测性防治一体化的运维模式。某智能制造基地设备设施预测性防治应用架构如图 3 所示。

设备设施预测性防治一体化平台模型算法总计 128 个，其中新增模型算法总计 92 个，已有模型算法 36 个，预测性维护的功能开发主要针对泵设备、压缩机设备、发电机组设备、压力容器设备、吊机设备、柴油机设备、锅炉设备、重要储罐、工艺管线、电气设备、仪控设备和其他设备共计 12 类设备类型。例如在动设备监控功能模块中，通过采集输油泵等重要动设备的运行状态参数，实现对动设备的远程监控；对采集的设备状态数据进行建模分析，实现对电机过热、泵体过热、流量不足、系统震动预警和故障预测，保证设备安全稳定运行，降低设备故障率 30% 以上。

针对设备设施管理的规划投资、设计建造、营运维护和废弃处置等四大生命周期阶段，把控数据采集与分析、风险评估、检测监测、完整性评价和维修维护五大业务环节，搭建从设计制造、检测评估到维修治理改造的 10 个主要业务功能模块，实现设备设施预测性防治一体化管理系统的建设，为设备设施安全可靠、管理完整性提供技术保障。通过预测性维护平台的搭建，实现了对公司资源集成共享、业务协同及数据智能分析的一站式管控，最终减少人力操作时间约 30%，节省设备维护费用约 20%，目前累计创造超过 10 亿元的商业价值。

在系统实施过程中，该公司首先对存量系统现状、数据分类现状进行详细分析，调研涉及运营维护的信息系统共 33 套，停用 8 套，在用 20 套，在建 5 套。通过调研明确各业务系统的数据采集时间要求、采集频率、采集方式、监管岗位和录入系统情况等现状存在差异，并围绕安全、数据、技术三个方面提炼，总结形成一套设备设施预测性防治一体化平台建设规范。根据模型和评价结果，确定关停、替换策略和步骤，确保在保证业务运营平滑的前提下，进行系统应用科学治理与整合。随后进行了业务架构、应用架构、数据架构、技术架构、集成架构、部署架构和安全架构^[5]的详细设计工作。考虑信创路线和集团统一技术栈要求的情况下，完成了版本开发和软件部署。对内，为该公司的运维服务、智能制造跨业务循环运营生态提供数据服务，构建“基于数



图 3 某智能制造基地设备设施预测性防治应用架构

据决策”的设备设施预测性防治一体化运维服务和创新产业模式；对外，为集团公司数字化转型场景实现和中下游二级单位设备设施全生命周期管理提供数据和服务支撑，为公司拓展集团外部市场提供技术支撑。

下一阶段将进一步完善设备设施预测性防治的核心模型、算法，提升自主化水平至国内领先，打造设备设施预测性防治系统品牌，商务模式向专业 / 系统一体化运维模式转变。

5 结束语

“十四五”规划掀起数字化转型浪潮，以新技术深化数字化应用，以新生态构造智能生产环境，成为传统制造业面临的核心挑战。促进两化深度融合，打造新质生产力，是需要融合科技创新精神、探索实践精神、信仰契约精神的一项系统化工程，展望未来，传感器技术、数据分析和 AI 的进步将进一步推动预测性维护的发展。制造商有望看到更复杂的预测模型、自学习和自适应系统，以及与其他系统的集成能力。这些创新将使即时维护成为可能，从而进一步提升工业运营的效率和安全性。企业开展预测性维护工作，可从“单一”设备着手，并结合先进的算法模型，未来向复杂系统进行跨越。预测

性维护作为数字化时期的设备管理手段，并将会在制造业获得广泛应用，并向跨领域（如能源、交通等）进行深度推广。

参考文献

[1] 丁鑫培，魏涛，隋英杰. 轨道交通装备制造企业数据治理体系研究 [J]. 智慧轨道交通，2024，61 (2) : 92-97.

[2] 高国强，傅青秀，许晓英，等. 渤海某油田开发工程智能化研究与应用 [C]// 第八届数字油田国际学术会议，2023：9-21.

[3] 余丹. 达林数据库的市场策略研究与实施 [D]. 武汉：华中科技大学，2007.

[4] 吴莉. 我国首个海洋油气全生命周期智能装备制造基地奠基 [N]. 中国能源报，2022-01-04 (17) .

[5] 国家质检总局. 智慧城市顶层设计指南：GB/T 36333—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2018.

作者简介：蔡彤（1990—），男，本科，中级工程师，主要研究方向为数字化、智能化、计算机应用。

收稿日期：2024-12-20