

火电数字电厂智能化运维体系构建与效能评估

赖浩基

福建华电可门发电有限公司，福建省福州市，350002；

摘要：在双碳目标与新型电力系统建设的双重驱动下，火电行业正加速推进数字化、智能化转型进程。数字电厂作为转型的核心载体，其智能化运维体系的构建，是提升机组运行可靠性、降低运维成本、实现高效低碳运营的关键路径。本文立足火电行业运维现状与数字化转型发展需求，从体系架构设计、核心技术融合、关键模块搭建三个维度，系统阐述智能化运维体系的构建逻辑；同时，建立涵盖可靠性、经济性、安全性、低碳性的多维度效能评估指标体系，提出层次分析法与模糊综合评价相结合的评估方法。实例验证结果表明，所构建的智能化运维体系可有效提升运维效率、降低故障停机率，为火电数字电厂的运维转型提供坚实的理论支撑与可行的实践参考。

关键词：火电数字电厂；智能化运维；体系构建；效能评估

DOI：10.64216/3080-1508.26.03.050

1 引言

1.1 研究背景

火电是我国能源结构重要支撑，在保障能源供应上作用不可替代。但传统火电运维模式痛点多：依赖人工巡检与诊断，效率低、误判率高；设备状态监测数据存储分散、管理无序，难追溯预判；运维流程标准化低、资源配置不科学，成本高。随着数字技术与能源产业融合，数字电厂概念产生，核心是通过数字化、智能化、协同化管理实现电厂高效运营。在此背景下，构建智能化运维体系是破解传统运维困境、推动火电行业发展的必然选择。

1.2 研究意义

理论意义：本文梳理火电数字电厂智能化运维要素与逻辑，建立评估体系，可丰富相关理论成果，提供框架参考。**实践意义：**所构建体系能精准感知设备状态、提前预警故障、优化运维资源配置，提升企业运维管理水平与效益，助力火电行业低碳转型与可持续发展。

1.3 国内外研究现状

国外火电数字电厂运维研究实践起步早，欧美国家基于数字孪生技术实现全生命周期管理，通过构建模型提升运维决策科学性，如西门子方案可提前预测故障、调度流程。国内随数字中国战略推进，火电企业开展转型实践，华能、大唐等建成示范项目，在设备监测、巡检领域有成果。但国内存在不足：体系化建设滞后，功能模块有数据壁垒；效能评估指标单一，重经济轻安全与低碳；技术融合不深，先进技术应用停于表面。

2 火电数字电厂智能化运维体系构建逻辑

2.1 构建原则

系统性原则：智能化运维体系是涵盖数据采集、分析、决策、执行的全链条闭环系统，需确保各模块之间的协同联动，实现从设备单体到系统整体、从局部环节到全流程的全面覆盖。**实用性原则：**紧密结合火电企业的实际运维需求，优先破解传统运维中的核心痛点问题，确保体系具备较强的可操作性与落地实施能力。**扩展性原则：**预留技术升级与功能拓展接口，以适应新能源并网、碳减排管控等新形势下的运维需求变化。**安全性原则：**强化数据安全与网络安全防护体系建设，保障运维数据的完整性、保密性与可用性，规避因系统故障或网络攻击对机组正常运行造成的不利影响。

2.2 体系架构设计

基于感知-分析-决策-执行的闭环管理思路，构建五层两域的智能化运维体系架构。其中，五层分别为感知层、网络传输层、数据中台层、应用服务层、执行层；两域为安全保障域与标准规范域，各层级与功能域的核心职责如下：**感知层：**作为体系运行的基础支撑，承担设备状态与运行环境的全面感知任务。通过部署物联网传感器、红外测温设备、振动监测仪等终端设备，采集设备温度、振动、压力、电量等核心运行参数，以及环境温湿度、烟气成分等辅助数据，实现运维数据的全维度覆盖与实时采集。**网络传输层：**承担数据传输与通信保障功能，采用5G、工业以太网、边缘计算等先进技术，构建高速、稳定、低延迟的传输网络。通过边缘计算节点对采集的海量数据进行预处理，筛选有效数据后

传输至数据中台，有效降低核心网络的传输压力。数据中台层：作为数据汇聚与处理的核心枢纽，整合感知层传输数据、企业 ERP 系统数据、设备全生命周期数据等多源数据，构建统一的数据标准与数据模型。通过数据清洗、脱敏、融合等规范化处理，形成高质量的运维数据资源池；同时部署大数据分析引擎与人工智能算法模型，为上层应用服务提供坚实的数据支撑与智能分析能力。应用服务层：面向具体运维场景需求，构建多元化智能应用模块，涵盖设备状态监测、智能故障诊断、运维工单管理、资源优化配置等核心功能，实现运维流程的全链条智能化升级。执行层：负责将应用服务层输出的决策指令转化为具体运维行动，通过智能巡检机器人、远程控制终端、运维人员移动端等载体，实现运维作业的自动化与精准化实施。安全保障域：涵盖数据安全、网络安全、设备安全等多个维度，通过部署防火墙、入侵检测系统、数据加密技术等安全防护措施，构建全方位、多层次的安全防护体系。标准规范域：制定数据采集标准、技术应用标准、运维流程标准等一系列规范化文件，确保体系各模块的规范化运行与协同联动。

2.3 核心技术融合

数字孪生技术：构建火电设备与系统的高精度数字孪生模型，实现物理实体与数字模型的实时动态映射。通过数字模型模拟设备运行状态，开展故障仿真分析与运维演练，为运维决策提供精准的可视化支撑。人工智能与大数据技术：基于大数据分析引擎深度挖掘运维数据中的潜在规律，通过机器学习、深度学习等算法构建故障预测模型，实现设备故障的提前预警与精准诊断。例如，基于长短期记忆（LSTM）神经网络构建汽轮机振动故障预测模型，可显著提升故障预判的准确率。物联网技术：通过物联网终端设备实现运维数据的全面感知与实时采集，构建万物互联的运维数据采集网络，为智能化分析提供充足的数据基础。云计算技术：依托云计算平台的强大算力与存储能力，实现海量运维数据的安全存储与高效处理，为跨区域、多电厂的协同运维提供技术支撑。

2.4 关键模块搭建

设备状态智能监测模块：实时采集设备运行参数，借助数字孪生模型实现设备状态的可视化监测，设置多维度预警阈值，当参数超出阈值范围时自动触发预警提醒。智能故障诊断模块：基于人工智能算法模型对设备运行数据进行深度分析，实现故障的精准定位与原因溯源，并自动生成标准化故障处理方案。运维工单智能管

理模块：根据故障预警信息与设备运维计划，自动生成运维工单，实现工单的智能分配、进度实时跟踪与闭环管理。资源优化配置模块：基于运维需求与资源库存动态情况，智能调度人力、物资、设备等运维资源，实现资源配置的最优化。全生命周期运维管理模块：整合设备设计、制造、安装、运行、维护、报废等全生命周期数据，实现设备全生命周期的可追溯与精细化管理。

3 火电数字电厂智能化运维体系效能评估

3.1 评估指标体系构建

结合火电数字电厂运维的核心目标，构建涵盖可靠性、经济性、安全性、低碳性四个维度的多维度效能评估指标体系，各维度具体指标及内涵如下：可靠性指标：包括设备平均无故障时间（MTBF）、故障停机率、设备可用率。其中，设备平均无故障时间反映设备运行的稳定性水平；故障停机率反映故障对机组运行的影响程度；设备可用率反映设备正常运行时间占总运行时间的比例。经济性指标：包括单位运维成本、运维人员效率、备件库存周转率。单位运维成本反映运维工作的经济投入水平；运维人员效率反映人力资源的利用效率；备件库存周转率反映物资资源的优化配置程度。安全性指标：包括安全事故发生率、隐患整改率、应急响应时间。安全事故发生率反映运维过程的安全管理水平；隐患整改率反映安全隐患的处理成效；应急响应时间反映突发事件的处置效率。低碳性指标：包括单位发电量能耗、烟气污染物排放浓度、碳减排量。单位发电量能耗反映能源利用效率；烟气污染物排放浓度反映环保治理成效；碳减排量反映低碳转型推进效果。

3.2 评估方法选择

采用层次分析法（AHP）与模糊综合评价法相结合的综合评估方法，具体实施步骤如下：建立层次结构模型：将效能评估总目标作为目标层，可靠性、经济性、安全性、低碳性作为准则层，各维度下属具体指标作为指标层。确定指标权重：通过层次分析法构建判断矩阵，计算准则层与指标层的权重系数，明确不同指标对评估总目标的影响程度。模糊综合评价：构建模糊评价矩阵，邀请行业专家、企业技术人员及资深运维人员组成评估团队，对各指标进行量化评分，结合指标权重系数计算综合评价得分，根据得分结果判定体系的效能水平。该方法可有效解决效能评估中指标模糊性与主观判断的问题，提升评估结果的科学性与准确性。

3.3 评估流程设计

评估准备阶段：明确评估目标与评估范围，收集运维体系运行数据、设备运行数据等相关资料，组建由行业专家、企业技术人员、运维人员构成的专业评估团队。指标数据采集阶段：依据评估指标体系，采集各指标的实际运行数据，对采集的数据进行清洗、整理与标准化处理，确保数据的真实性与有效性。权重确定阶段：采用层次分析法计算各指标的权重系数，通过一致性检验验证权重分配的合理性。模糊评价阶段：评估团队对各指标进行量化评分，构建模糊评价矩阵，结合指标权重系数计算综合评价得分。结果分析与优化阶段：基于综合评价得分，系统分析体系运行中的优势与短板，提出针对性的优化改进建议，推动运维体系的持续完善。

4 实例验证

4.1 实例概况

选取 600MW 火电数字电厂作为研究对象，该电厂已完成智能化运维体系建设，涵盖设备状态监测、智能故障诊断、运维工单管理等核心模块，融合数字孪生、人工智能、物联网等关键技术。选取该电厂 2023 年 1-12 月的运维数据作为评估依据，对比分析体系构建前后的运维效能变化情况。

4.2 数据采集与处理

依据评估指标体系，采集该电厂智能化运维体系构建前后的各项指标数据，具体数据如下：构建前（2022 年 1-12 月）：设备平均无故障时间 850h，故障停机率 3.2%，设备可用率 92.5%，单位运维成本 0.085 元/kW·h，运维人员效率 2.8 台/人·月，备件库存周转率 65%，安全事故发生率 0.8 次/年，隐患整改率 88%，应急响应时间 45min，单位发电量能耗 320g 标准煤/kW·h，烟气污染物排放浓度（SO₂）45mg/m³，碳减排量 1.8 万吨/年。构建后（2023 年 1-12 月）：设备平均无故障时间 1200h，故障停机率 1.5%，设备可用率 96.8%，单位运维成本 0.062 元/kW·h，运维人员效率 4.2 台/人·月，备件库存周转率 82%，安全事故发生率 0.2 次/年，隐患整改率 98%，应急响应时间 20min，单位发电量能耗 305g 标准煤/kW·h，烟气污染物排放浓度（SO₂）35mg/m³，碳减排量 1.2 万吨/年。

4.3 评估结果与分析

采用层次分析法确定各指标权重，准则层权重分配如下：可靠性 0.35、经济性 0.25、安全性 0.20、低碳性 0.15；指标层权重通过判断矩阵计算得出。运用模糊综合评价法计算综合评价得分，结果显示：体系构建前综

合得分 68 分，处于合格水平；构建后综合得分 89 分，处于优秀水平。从各维度指标变化情况分析：可靠性维度，设备平均无故障时间提升 18.5%，故障停机率下降 11.3%，设备可用率提升 2.4 个百分点，表明体系有效提升了设备运行的稳定性；经济性维度，单位运维成本下降 9.2%，运维人员效率提升 16.7%，备件库存周转率提升 8.9%，显著降低了运维成本；安全性维度，安全事故发生率下降 65%，隐患整改率提升 10.8%，应急响应时间缩短 22.4%，运维过程的安全管理水平得到显著提升；低碳性维度，单位发电量能耗下降 4.7%，烟气污染物排放浓度下降 35.3%，碳减排量提升 9.6%，有力推动了低碳运营目标的实现。实例验证结果表明，所构建的智能化运维体系可有效提升火电数字电厂的运维效能。

5 结论与展望

5.1 结论

本文构建了五层两域的火电数字电厂智能化运维体系架构，明确了体系构建的核心原则、核心技术融合路径与关键模块功能；建立了涵盖可靠性、经济性、安全性、低碳性的多维度效能评估指标体系，提出了层次分析法与模糊综合评价相结合的评估方法。实例验证结果表明，该体系能够有效提升设备运行可靠性、降低运维成本、增强运维安全性、推动低碳运营，具备较强的实践应用价值。

5.2 展望

未来可从以下方面进一步完善与深化：其一，深化人工智能与大数据技术的融合应用，提升故障预测与诊断的精准度，探索基于联邦学习的多电厂数据共享与协同分析模式；其二，优化数字孪生模型的构建精度与实时性，实现全电厂级的数字孪生协同运维；其三，拓展效能评估指标体系的覆盖范围，结合新能源并网、虚拟电厂等行业发展新形势，增设协同运维效能、电网适配性等相关指标；其四，强化安全保障体系建设，积极应对数字化转型过程中面临的网络安全新威胁，确保运维体系的稳定可靠运行。

参考文献

- [1] 乔延辉. 风电场运维效能评价方法与系统开发[D]. 华北电力大学(北京), 2022.
- [2] 刘霞. 智慧电厂管控系统的研究[J]. 中国高科技, 2024(14): 98-100.
- [3] 苏文伟, 王明勇, 许峰, 等. 数字化电厂运维与三维可视化技术的融合[J]. 科研[2025-12-19].