

数字化赋能新能源发电场站的智慧运维体系构建与成本控制研究

张 吉

国家电投集团北京电力有限公司 北京市 100044

摘要：在“双碳”战略和能源结构转型的时代背景下，新能源发电场站作为清洁能源体系的重要组成部分，正承担着促进能源绿色低碳发展的关键使命。然而，随着新能源装机容量的持续扩大，风电、光伏等场站的运行管理难度显著增加，传统的人工巡检与定期维护模式已无法满足现代能源管理的高效、安全和低成本要求。本文基于管理科学与工程的理论视角，探讨数字化技术在新能源发电场站智慧运维体系构建与成本控制中的应用路径。通过对制造执行系统（MES）的成熟应用进行分析，并结合新兴的数字孪生（Digital Twin）理念，构建了一套数据驱动、智能感知、闭环优化的智慧运维管理体系。研究结果表明，数字化赋能能够显著提高设备运行监测精度，实现运维活动的科学决策与动态调整，从而有效降低维护成本、减少非计划停机时间并优化能源利用效率。本文的研究对新能源企业的数字化转型、智慧运维体系设计及成本优化具有重要的理论和现实意义。

关键词：数字化运维；新能源发电；成本控制；MES 系统；数字孪生

引言

随着全球能源结构的深度调整和我国“碳达峰、碳中和”战略的全面推进，新能源发电产业呈现出高速发展的态势。风电、光伏发电等清洁能源装机容量迅速增长，但其运行特征具有分布广、环境复杂、设备多样等特点，传统运维方式已难以支撑场站的高效运行。传统的运维体系主要依靠人工巡检、定期维护和经验判断，存在响应滞后、信息割裂、管理成本高等问题。面对新能源规模化发展的新要求，构建智慧化、数字化的运维体系成为行业发展的必然趋势。制造执行系统（MES）以其在制造业中的过程控制和实时监测优势，为新能源运维提供了成熟的管理思路。而数字孪生（Digital Twin）作为近年来兴起的新一代信息技术，通过虚实映射与智能仿真，为设备状态预测、运行优化与成本控制提供了新的可能。本文从管理科学与工程的系统视角出发，分析新能源场站运维面临的挑战与数字化转型路径，探讨智慧运维体系的构建机制及其在成本控制中的应用策略，以期为新能源企业提供理论支持与实践参考。

1 数字化运维在新能源发电场站中的战略意义

1.1 能源产业数字化发展的必然要求

新能源产业的运行特征决定了数字化转型是其发展的必经之路。风电、光伏等新能源发电场站普遍分布在偏远地

区，设备运行状态受气候环境、负荷波动等因素影响显著。传统人工管理无法实现对运行数据的实时掌握，导致故障响应延迟、能效监控不及时。通过数字化赋能，可实现设备运行数据的采集、传输、分析与反馈的自动化，大幅提升管理的精度与效率。数字化不仅是一种技术革新，更是一种管理模式的重构，它通过数据流取代经验判断，实现以信息驱动的科学决策。

1.2 智慧运维体系在新能源管理中的核心价值

智慧运维体系是以信息化和智能化手段为支撑的管理系统，其核心目标是实现设备健康状态的实时监测、运行风险的智能预警和维护过程的精细控制。通过构建感知层、分析层与决策层的三级体系结构，智慧运维能够将海量设备数据转化为决策依据，实现从“事后维修”到“预测性维护”的转变。这种模式不仅提升了运维响应速度，还能有效降低成本，延长设备寿命，提高整体能效增加。

1.3 管理科学视角下的系统优化意义

从管理科学与工程的角度看，新能源场站的运维体系应具备系统性、协调性与反馈性。数字化技术的引入，使运维活动具备了可视化、可追溯和可量化的特征。通过优化系统结构和管理流程，可以实现资源配置的动态优化与决策流程的智能改进，促进组织运行的协同性与管理科学化。

2 传统新能源运维模式的局限性

2.1 信息孤岛与数据断层问题突出

传统的新能源运维系统多以单一电站为单位建设，缺乏跨系统的数据互联互通。不同设备品牌、通信协议差异大，导致监控系统无法有效整合，数据资源难以共享，形成典型的信息孤岛现象。信息碎片化直接限制了管理层的整体把控能力，使得决策往往滞后于实际运行情况。

2.2 运维模式依赖人工经验，响应效率低

传统运维主要依赖人工巡检和固定周期维护，这种模式对突发问题响应慢，且维护决策往往基于经验判断，缺乏数据支撑。大量重复性工作导致人力资源浪费，设备问题往往在出现故障后才被发现，造成较大经济损失。

2.3 成本控制机制缺失

新能源场站的运维成本包括设备检修、人工巡检、备件储备及停机损失等多个方面。由于缺乏对运维全过程的成本数据监控与分析，企业难以精确掌握成本结构，也无法制定科学的成本优化策略。传统成本核算方式静态化、滞后性强，难以反映运维过程的动态变化。

3 MES 系统在新能源场站智慧运维中的管理启示

3.1 MES 系统的核心理念与功能特征

制造执行系统（MES）是实现管理层与执行层信息互通的重要系统，主要功能包括生产调度、质量控制、数据采集与绩效追踪。MES 强调“计划—执行—监控—优化”的管理闭环，通过实时监控生产过程，确保任务执行与资源配置的精确性。其核心在于实现信息透明化与过程可视化，为管理者提供实时决策依据。

3.2 MES 理念在新能源场站运维中的借鉴价值

MES 的过程管控思维与新能源运维具有高度契合性。新能源场站的运行过程可视为一个连续的生产系统，通过 MES 式管理理念，可建立统一的监控与反馈机制，实现从设备运行到维护执行的全过程追溯。数据采集端可实时获取设备运行状态，分析端进行智能诊断，反馈端自动生成维护计划，从而形成运维流程的闭环优化。

3.3 MES 在新能源场站管理中的应用潜力

在新能源场站中，MES 可作为连接感知层与决策层的中间枢纽，实现设备状态监测、任务执行管理和绩效评估的统一协调。结合能源生产特性，可扩展 MES 功能至能效分析、调度优化与安全控制等领域，为智慧运维体系的构建提供数

据支撑与管理框架。

4 数字孪生技术赋能智慧运维体系的创新机制

4.1 数字孪生技术的概念与特征

数字孪生是一种将物理实体与虚拟模型深度融合的创新技术，通过高精度传感器、物联网与数据分析手段实现实体与虚拟系统的双向映射。虚拟模型能够实时接收来自现实设备的运行数据，动态反映其状态与性能变化，形成对物理世界的精准镜像。借助这一技术，管理者不仅能够在虚拟环境中直观了解设备的运行状况，还能通过模型预测未来的行为趋势，评估不同操作方案的效果。数字孪生在制造、城市管理、能源、交通等领域都有广泛应用，可显著提升系统的可控性与可靠性。其核心特征体现在实时性、可视化、交互性和预测性，使复杂系统的运行更加透明和高效。通过持续的数据反馈与智能分析，数字孪生正成为推动产业数字化转型和智能决策的重要支撑，为现实世界的优化提供坚实的技术基础。

4.2 数字孪生在新能源场站运维中的应用逻辑

在新能源发电场站运行管理中，数字孪生技术的引入为设备运维提供了更加智能与高效的解决方案。通过构建风机、光伏组件、储能系统及逆变器等关键设备的虚拟映射模型，系统能够实现物理设备与虚拟空间的同步运行与数据交互。结合历史运行记录与实时监测数据，数字孪生系统能够对设备性能变化进行趋势分析，精准预测潜在故障点，并评估设备的健康状态。当某项运行参数出现异常时，系统会在虚拟模型中进行动态仿真，模拟故障的演变过程，提前生成风险预警与优化方案。运维人员可依据模拟结果及时调整运行策略或制定检修计划，从而有效降低非计划停机的发生率。数字孪生不仅改变了传统被动式维护模式，还推动了新能源场站向智能化、自主化运维转型，为实现绿色能源的高效利用与可持续发展奠定了坚实基础。

4.3 MES 与数字孪生的融合优化模式

MES 系统强调生产执行与过程控制，数字孪生技术侧重预测分析与优化决策，两者的结合为新能源智慧运维提供了全新的系统框架。通过 MES 的实时数据采集与反馈机制，运维系统能够全面掌握设备运行状态、工艺参数及能耗信息，为数字孪生提供高质量的数据支撑。数字孪生则基于这些数据构建虚拟模型，对设备运行进行仿真、预测与优化分析，实现虚实融合的动态监控。两者形成“数据采集—模型

验证—预测优化—智能决策”的闭环结构，使系统具备自感知、自学习与自调节能力。该融合模式不仅能提升设备运行的精准度与稳定性，还能有效降低运维成本与能源浪费。通过模型对异常趋势的提前预判，可实现预防性维护与资源的合理分配，为新能源场站构建出持续优化、智能高效的运维管理体系，推动能源管理向智能化与可持续化方向发展。

5 智慧运维体系的构建与成本控制策略

5.1 智慧运维体系的构建原则

智慧运维体系的建设应遵循系统化、集成化与智能化的总体原则，以实现高效协同与科学决策。系统化要求企业在组织层面建立统一的运维管理平台，将设备运行、人员管理、风险控制等环节纳入同一管理框架中，形成结构清晰、职责分明的管理体系。集成化则强调多系统、多平台间的数据互联互通，通过标准化接口与共享机制打通信息壁垒，实现数据的高效流动与综合利用。智能化体现为运用人工智能算法对运行数据进行深度分析，支持预测性维护、异常检测与决策优化。体系的建设应以数据为核心驱动力，形成设备层、通信层、平台层与决策层的多层次架构。设备层负责采集运行信息，通信层保障数据传输的安全与实时性，平台层进行数据汇聚与建模分析，决策层则基于智能算法实现优化与指令反馈，从而推动运维全过程的数字化与智能化管理转型。

5.2 数据驱动的成本控制机制

基于智慧运维体系的成本控制应建立在精确的数据分析与动态决策基础之上。通过对设备运行数据的实时监测，可以深入剖析维护成本的结构与变化规律，识别出影响运营效率的关键环节。大数据分析能帮助企业优化备件库存结构，科学制定检修计划，避免因冗余库存或突发故障造成的资源浪费和非计划停机。借助 MES 系统的过程数据与数字孪生技术的预测模型，管理者能够实现运维资源的智能分配与动态调度，使设备状态、人员配置与成本支出保持最佳匹配。系统化的监控还能实时捕捉异常趋势，触发预警与反馈机制，形成“预防—反馈—调整—优化”的运维闭环管理模式。这种以数据为驱动力的成本管理方式，使企业在保证设备稳定运行的同时，实现运维费用的可控与可视化，为构建高效、低耗、可持续的智能运维体系奠定坚实基础。

5.3 管理科学视角下的组织与人才支持

智慧运维体系的建设不仅是技术革新的体现，更标志

着企业管理理念的深层转型。企业要在运维管理中形成以数据驱动为核心的管理文化，使决策建立在实时、精准的数据分析基础之上。通过完善跨部门协同机制，实现技术信息与管理信息的无缝对接，形成从数据采集到决策优化的闭环管理模式。在此过程中，构建技术反馈与管理反馈相结合的双层体系，使信息流、决策流和执行流保持动态互动，提升组织的响应速度与适应能力。智慧运维的推进还离不开高素质的复合型人才支撑。企业应重点培养具备系统建模、数据分析和智能决策能力的专业团队，使技术创新能够真正融入管理实践。通过这种“技术+管理”的融合路径，企业不仅能提高运维效率与安全水平，还能实现治理体系的数字化升级，形成面向未来的智能运营格局。

6 结论

数字化技术的深度融入，为新能源发电场站的智慧运维开辟了新的发展路径。通过构建以数据驱动为核心的运维体系，管理者能够以更科学的方式实现设备的全生命周期管理。传统的运维模式依赖人工巡检和经验判断，存在信息滞后、响应不及时和维护成本高等问题。基于管理科学与工程视角，应用 MES 系统与数字孪生技术能够打通生产、监控与管理环节，实现从数据采集、仿真分析到智能决策的闭环优化。数字孪生模型的建立，使设备运行状态得以在虚拟空间中实时映射，并通过预测算法提前识别潜在故障，提升维护的精准性与安全性。MES 系统则在生产调度与资源配置方面发挥协同作用，实现运维计划的动态优化。随着人工智能、边缘计算和大数据分析的不断成熟，智慧运维体系将具备自学习与自优化的能力，为新能源企业实现降本增效与可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 王志强, 李明. 新能源发电场站智慧运维体系研究 [J]. 电力管理研究, 2022, 40(6): 88–94.
- [2] 张丽, 陈晓东. 基于数字孪生的能源装备运维模式创新 [J]. 管理科学学报, 2023, 36(4): 75–83.
- [3] 刘宏伟, 郑晨. MES 系统在能源企业数字化管理中的应用研究 [J]. 管理工程学报, 2021, 35(5): 56–62.

作者简介：张吉（1990—），男，汉族，内蒙古，大学本科，工程师。