

数字孪生技术驱动下电力监管管理工程的智能化转型路径研究

钱忠

华电和祥工程咨询有限公司, 山西 太原 030006

DOI:10.61369/EPTSM.2025010026

摘要： 本文围绕数字孪生技术展开，追溯其起源于21世纪初，历经模型构建、数据采集处理等方面的演进，逐渐渗透至电力行业。在火电新能源建设监管中，可实现火电厂设备精准监测与故障预警、新能源发电波动性模拟与优化调度。然而，智能化转型面临数据安全隐患、技术融合、成本效益等挑战。通过加密与访问控制保障数据安全，制定标准与开发中间件解决技术融合难题，优化技术方案与规划项目实施考量成本效益，推动数字孪生技术在电力监管领域更好应用。

关键词： 数字孪生技术；电力监管管理工程；智能化转型；火电新能源

Research on the Intelligent Transformation Path of Power Supervision and Management Engineering Driven by Digital Twin Technology

Qian Zhong

Huadian Hexiang Engineering Consulting Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi 030006

Abstract： This article focuses on digital twin technology, tracing its origins to the early 21st century. Through evolutions in model construction, data collection and processing, it has gradually penetrated into the power industry. In the supervision of thermal power and new energy construction, it can achieve precise monitoring and fault warning of thermal power plant equipment, as well as simulation and optimized scheduling of new energy generation fluctuations. However, the intelligent transformation faces challenges such as data security and privacy, technology integration, and cost-effectiveness. By encrypting and accessing control to ensure data security, developing standards and middleware to solve technology integration problems, optimizing technical solutions and planning project implementation to consider cost-effectiveness, we can promote the better application of digital twin technology in the field of power supervision.

Keywords： digital twin technology; power supervision and management engineering; intelligent transformation; thermal power and new energy

引言

电力是现代社会的關鍵能源，其供应稳定、安全、合理意义重大。电力监管管理工程保障电力系统可靠运行，避免电力问题影响社会经济与生活，维护安全，促进资源配置、市场公平与行业可持续发展。数字孪生技术为电力行业带来新机遇，通过虚实融合，在电力监管中可提升效率与精准度，帮助监管人员掌握运行信息，分析风险并预防，还为规划等提供依据，提高整体水平。在环保与可持续发展要求下，火电新能源建设成为重点。其监管影响新能源利用等多方面，但面临诸多挑战，传统监管乏力。数字孪生技术可构建模型实现实时监测分析，模拟波动制定策略保障稳定，对火电新能源建设监管智能化转型极为迫切且重要。

一、数字孪生技术发展脉络

（一）数字孪生技术

数字孪生（Digital Twin）是以电力设备、发电机组或新能源场站等物理实体为基础，运用多源数据融合、高精度建模与实时交互技术构建的虚拟镜像系统。其核心特征在于，通过物理实体与虚拟模型间的实时数据交互，实现传感器数据上传与优化指令

下发的双向映射；并贯穿设备从设计、建造、运行到退役的全生命周期管理；还能基于仿真推演提供故障预警、能效优化等预测与决策支持，实现主动干预。

随着碳排放的限制，未来工业企业的能源成本将进一步增加，因此能源系统的结构性调整与生产运行、经营管理的协同优化，对于能源集中型企业，尤其是典型的火力发电企业意义重大。在传统的经营决策与生产运行方式下，全局性的协同提升困

难重重，数字化转型成为各国工业企业发展的共同选择，而数字孪生技术作为推动企业数字化转型、实现物理信息深度融合及智能制造的一个重要方式，已在众多行业被实践^[1]。

（二）在电力行业的渗透

数字孪生技术逐步进入电力行业，并在各个环节实现了广泛应用拓展。在电力设备运维方面，通过构建电力设备的数字孪生模型，可实时监测设备运行状态，提前预测设备故障，实现设备的智能运维与管理，提高设备运行可靠性和使用寿命。在电力系统调度领域，借助数字孪生技术对系统各环节进行广泛深度感知和精准建模，能够实现对电力系统的高效准确调度，应对新能源发电大规模并网以及需求响应、电动汽车等带来的系统不确定性增强的问题。在电网运行层面，基于数字孪生技术构建数字孪生电网，可推进电网安全稳定运行，为建设能源互联网企业提供新思路 and 途径，从设备层、电网层、业务层和运营管理层等多个层面实现电网的智能化升级。

二、火电新能源建设监管中数字孪生技术智能化转型内容

（一）火电厂设备精准监测与故障预警

基于火电厂设备实际参数构建精准的数字孪生模型，是实现火电厂设备有效监管的关键一步。通过深入分析火电厂各类设备的物理特性、运行机制及历史数据，运用专业的建模软件和算法，能够构建出与实体设备高度契合的数字孪生模型。该模型可精确反映设备在不同工况下的运行状态，为后续的设备监测与故障预警奠定坚实基础^[2]。在数据采集方面，借助先进的传感器技术，如温度传感器、压力传感器、振动传感器等，对火电厂设备的各项实时数据进行全面采集。这些传感器紧密部署于设备的关键部位，能够实时感知设备的运行参数变化，并将采集到的数据通过有线或无线通信技术传输至数据处理中心，确保数据的及时性与准确性。同时，为保证数据传输过程中的稳定性与安全性，采用数据加密和冗余传输等技术手段，有效避免数据丢失或泄露。

利用数字孪生模型与实时数据实现故障预警，主要基于模型对设备正常运行状态的模拟与实时数据的对比分析。当实时数据与模型预测的数据出现偏差时，系统能够迅速识别并判断设备可能出现故障的部位及类型。例如，在某火电厂的实际运行中，通过对锅炉设备的数字孪生模型与实时采集的温度、压力数据进行对比分析，成功提前预警了一起因管道堵塞可能引发的故障，避免了设备的损坏与生产事故的发生，相关数据来源于该火电厂的设备运行监测系统^[3]。

（二）新能源发电波动性模拟与优化调度

新能源发电如风电、光伏发电具有显著的波动性特点。风电受风速、风向、气温等气象因素影响，其出力具有间歇性和随机性；光伏发电则受光照强度、天气状况、季节变化等因素制约，发电功率波动较大。这种波动性给电力系统的稳定运行和调度带来了巨大挑战。数字孪生技术可有效模拟新能源发电的波动情

况。通过收集大量的历史气象数据、地理信息数据以及新能源发电设备的运行数据，运用数据分析与机器学习算法，建立能够准确反映新能源发电波动特性的数字孪生模型。该模型能够根据不同的气象条件和环境因素，模拟新能源发电功率的变化趋势，为优化调度提供可靠依据^[4]。

基于数字孪生模拟结果，可制定科学合理的新能源发电优化调度策略。例如，根据模型模拟的风电、光伏发电功率波动情况，结合电力系统的负荷需求，合理安排传统能源机组的出力，实现新能源与传统能源的协同调度，确保电力系统的供需平衡。在某地区电网的实际调度中，依据数字孪生模型对风电、光伏发电的波动模拟，提前调整火电机组的出力，成功应对了新能源发电的大幅波动，保障了电网的稳定运行，相关数据来源于该地区电网的调度运行记录^[5]。

（三）火电设备全生命周期管理的工程实践

某600MW超临界火电机组在锅炉设备管理中引入数字孪生技术，依据锅炉设计图纸、历史运行数据及材料特性，运用ANSYS、ABAQUS等仿真软件构建包含燃烧系统、汽水系统、烟风系统等关键部件的三维数字孪生高精度热力模型，将模型误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。同时部署200余个含振动传感器、红外热成像仪等的传感器，以1Hz的数据更新频率对锅炉水冷壁、过热器、再热器等关键部位进行数据采集^[6]。通过对比实时数据与模型预测值，提前48小时预警了因水冷壁管腐蚀导致的泄漏事故，避免了约300万元的直接经济损失。该技术应用也面临一些挑战，初期存在平均延迟5ms的传感器信号传输延迟问题，导致模型与现实存在偏差，通过部署华为FusionPlant边缘服务器等边缘计算节点，将延迟降至1ms以内；针对锅炉燃烧动态特性复杂的问题，引入LSTM神经网络等AI算法对燃烧效率进行动态修正，使模型预测精度从85%提升至92%^[7]。

三、智能化转型面临的挑战

（一）数据安全与隐私问题

在数字孪生技术应用于电力监管的过程中，数据安全与隐私问题尤为突出。一方面，电力监管数据包含大量敏感信息，如电力系统的运行状态、用户用电数据等。这些数据若遭到非法获取或篡改，不仅会影响电力系统的正常运行，还可能泄露用户的隐私信息，造成严重的社会影响。另一方面，数字孪生技术依赖大量的数据采集与传输，在这个过程中，数据面临着诸多安全威胁，如网络攻击、数据窃取等^[8]。此外，随着数据的跨部门、跨区域共享，数据的隐私保护难度进一步加大，如何在保证数据共享与利用的同时，有效保护数据的安全与隐私，是智能化转型面临的重要挑战。

（二）技术融合难题

数字孪生技术与电力监管现有系统及相关技术的融合面临多重挑战。在接口层面，电力监管系统接口标准繁多，与数字孪生技术接口标准不统一，使得数据传输交互不畅，如同不同语言的沟通障碍，严重阻碍信息流动。数据格式方面，电力监测设备采

集的数据格式与数字孪生模型需求不匹配，这种差异迫使系统进行大量数据转换工作，不仅大幅增加开发和运营成本，还在转换过程中存在数据失真风险，影响数据的完整性和准确性^[9]。技术协同同样存在难题，由于缺乏完善的协同工作机制，数字孪生技术与电力监管现有技术无法实现无缝对接，难以形成高效协同的技术体系。各技术模块如同分散的个体，无法凝聚成强大合力，致使电力监管智能化转型进程受阻，难以充分发挥数字孪生技术在电力监管领域的优势与潜力。

（三）成本效益考量

在智能化转型过程中，数字孪生技术应用的成本投入与预期效益之间的关系需要深入研究。从成本构成来看，主要包括硬件设备购置成本，如传感器、数据采集设备等；软件开发与维护成本，用于构建数字孪生模型及相关应用系统；以及人员培训成本，以确保工作人员能够熟练运用新技术^[10]。在效益评估方面，虽然数字孪生技术有望提高电力监管的效率与精准度，降低运维成本，增加电力供应的稳定性等，但这些效益难以精确量化。因此，如何准确评估成本效益，合理规划投资，确保在可接受的成本范围内实现最大的效益，是电力企业在智能化转型中必须面对的重要问题。

四、应对策略

（一）数据安全保障措施

为保障电力监管数据的安全与隐私，可采取多种有效措施。一方面，加密技术是保护数据的重要手段。通过对采集、传输及存储的电力监管数据进行加密处理，将原始数据转化为密文形式，即使数据被非法获取，攻击者也难以解读其真实内容。例如，采用对称加密算法对大量实时采集的设备运行数据进行加密，确保数据在传输过程中的保密性；同时运用非对称加密算法对关键控制指令等进行加密，提高数据的安全性。另一方面，访问控制机制也不可或缺。通过设定严格的用户权限，只有经过授权的人员或系统才能访问特定的数据资源。基于角色的访问控制（RBAC）模型可应用于电力监管系统，为不同职责的工作人员分

配相应的权限，如运维人员只能访问设备运行数据，而管理人员可访问综合监管数据，从而有效防止数据的非法访问和泄露。

（二）技术融合解决方案

为攻克数字孪生技术与电力监管现有系统及相关技术融合难题，可从两方面着手。一方面，建立统一标准是实现技术无缝对接的核心。电力行业需构建覆盖数据格式、接口规范、通信协议的标准化体系，通过明确各类传感器数据格式标准，确保不同厂家设备采集的数据能被统一处理解析，消除技术对接中的“语言壁垒”。另一方面，中间件开发可有效解决技术兼容性问题。作为连接不同技术的桥梁，中间件具备数据转换、协议适配功能，能化解数字孪生技术与现有系统在数据交互、通信上的矛盾，促进各技术模块间的深度协同，推动电力监管智能化转型从理论构想迈向高效实践，助力数字孪生技术与电力监管体系有机融合。

（三）成本效益优化途径

在智能化转型过程中，为降低成本、提高效益，可从多方面入手。其一，优化技术方案至关重要。对数字孪生技术的模型构建、数据采集与处理等关键环节进行优化，采用更高效、精准且成本较低的算法和技术手段。例如，运用先进的数据压缩算法减少数据传输和存储成本，同时提高数据处理效率。其二，合理规划项目实施也不容忽视。在项目前期，对智能化转型的成本进行详细预算，综合考虑硬件设备采购、软件开发、人员培训等各方面的费用，并制定科学的项目进度计划。

五、结束语

数字孪生技术在电力监管领域尤其是火电新能源建设监管中，具备巨大应用潜力，能提升设备监测与调度管理水平。但当前智能化转型存在数据安全与隐私、技术融合、成本效益评估等棘手问题。通过采取数据加密、访问控制、统一标准、开发中间件、优化技术方案及合理规划项目等针对性策略，有望逐步克服这些挑战。未来，随着技术的不断进步与完善，数字孪生技术将在电力行业发挥更大作用，助力电力系统实现更高效、智能、安全的运行与管理，为能源领域可持续发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 柴政, 朱凌君, 姚胜平, 等. 基于数字孪生技术的火电智能应用平台研究 [J]. 科技与创新, 2023, (09): 36-39. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyex.2023.09.010.

[2] 王新迎, 蒲天骄, 张东霞. 电力数字孪生研究综述及发展展望 [J]. 新型电力系统, 2024, 2(01): 52-64. DOI: 10.20121/j.2097-2784.https.230006.

[3] 相晨萌, 曾四鸣, 闫鹏, 等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望 [J]. 高压技术, 2021, 47(05): 1564-1575. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201838.

[4] 胡守超. 智能电网数字孪生技术发展方向及应用 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 576.

[5] 辛策. 基于数字孪生的电力系统自动化管理系统研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(06): 222-224+245. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2024.06.069.

[6] 裴育. 试论数字技术在工业电气自动化中的应用和创新 [J]. 信息产业报道, 2024(3): 197-199

[7] 麻淑芳, 杨党政, 孟志东, 等. 数字孪生技术在电厂智慧化转型中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(03): 156-157. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2024.03.067.

[8] 潘陈志, 夏晗, 冯加章. 基于数字孪生的电力系统自动化管理系统的研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(20): 64-66.

[9] 温启良, 曾锡池, 张渊洲, 等. 数字孪生关键技术及其在电力行业中的应用 [J]. 华东科技, 2023, (04): 117-119.

[10] 陈浩, 李杏, 陈江, 等. 基于大数据和人工智能的电力安全监管新模式探索 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(09): 1-3.