引文格式：郁金宝,张浩锋,齐欢,等. 数字孪生技术在电网智能化运检业务中的应用[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 109-113. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.03.025

数字孪生技术在电网智能化运检业务中的应用

郁金宝[1]，张浩锋[1*]，齐　欢[1]，单跃强[1]，严福强[1]，田　甜[2]
（1. 北京国遥新天地信息技术股份有限公司，湖北 武汉 430000；2. 中国舰船研究设计中心，湖北 武汉 430064）

摘　要：结合电网智能化运检平台的运行机制，部署基于数字孪生的电网智能化运检平台，重点设计了电网智能化运检平台的实时量测感知、数字模型、数据驱动和仿真决策。将电网智能化运检平台应用于电力巡检业务中，实现了输变配一体化运行管理。研究表明，数字孪生技术在电网智能化运检业务的应用，推进了运维资源规范化配置，全面提升了电网智能化管控能力。

关键词：数字孪生技术；智能电网；运检业务
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0109-05

Application of Digital Twin Technology in Intelligent Operation and Inspection Business of Power Grid

YU Jinbao[1], ZHANG Haofeng[1], QI Huan[1], SHAN Yueqiang[1], YAN Fuqiang[1], TIAN Tian[2]
(1. EarthView Image Co., Ltd., Wuhan 430000, China;
2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: Combining with the operation mechanism of power grid intelligent operation and inspection platform, we deployed a power grid intelligent operation and inspection platform based on digital twin, and designed the real-time measurement perception, digital model, data drive and simulation decision-making of power grid intelligent operation and inspection platform. The power grid intelligent operation and inspection platform is applied to the power inspection business, realizing the integrated operation and management of transmission, transformation and distribution. The study shows that the application of digital twin technology in power grid intelligent operation and inspection business can promote the standardized allocation of operation and maintenance resources and comprehensively improve the intelligent control capability of power grid.

Key words: digital twin technology, intelligent power grid, operation and inspection business

随着我国各项事业的蓬勃发展，电网建设特别是智能电网建设日益重要，而电网建设规模逐年增大，日常管理工作也日益复杂，导致电网运检工作难度较大[1-3]。数字孪生技术是现代数字化技术的重要组成，具有全景显示、智能诊断、深度分析、高效决策等优势，将有力推动电网智能化、数字化转型升级，成为新时代科技强国的新抓手[4-5]。未来，数字孪生技术还将与5G技术、云计算、人工智能等技术相结合，实现发、输、变、配、用、调各环节的一体化应用，促进智能电网的转型与发展[6-7]。本文将数字孪生技术应用于电网智能化运检业务中，搭建了基于数字孪生技术的电网智能化运检平台，形成了电网智能化运检平台总体框架与技术方案，并梳理了电网智能化运检平台的应用，旨在为数字孪生技术在电网智能化运检业务中的应用提供理论依据与实践指导，满足数字电网精益管理要求。

1　平台总体架构

1.1　运行机制

数字孪生是现实世界在虚拟世界中的映射，虚拟世界是现实世界的反映[8]。智能电网数字孪生主要是充分利用电网实时运行数据、电力系统历史数据、电力系统物理模型等，将电力、气象、通信等学科知识结合起来，对智能电网多物理量、多时空尺度进行运行仿真模拟，从而完成智能电网在虚拟空间的映射，全方位诠释智能电网的全生命周期[9]。电网智能化运检平台从现实世界中获取电网设备的动、静态数据，通过虚拟数字模型搭建数字孪生场景，通过数字投影

第一作者简介：郁金宝（1984—），本科，工程师，从事地理信息智慧遥感大数据、北斗监测技术、数字孪生技术在能源电力领域电网数字化、智能化的应用工作，E-mail：249302780@qq.com。
通信作者：张浩锋（1987—），硕士，工程师，从事智慧遥感大数据、人工智能、数字孪生、地理信息系统技术在智慧能源领域的应用工作，E-mail：304121843@qq.com。

实现电网状态感知，共同支撑电网运检业务的开展，完成电网智能运检、状态分析、风险预警、故障研判，满足电网智能化运检要求。同时，结合运检评估分析结果建设专家知识库进行设备远程诊断，辅助电网应急指挥，提升远程控制、无人值守水平。将数字孪生技术应用于电网智能运检业务，可开展智能设备管理、智能通道监测、智能运维管理和智能生产管理，满足电网场景可视化、实时性、移动性等功能要求，实现对电网智能运检业务的智能化管理，发挥数字孪生虚实融合、以虚控实的优势[10]。

1.2 总体架构

结合平台运行机制，总体架构包括物理实体层、虚拟模型层、数据驱动层、数据服务层和系统应用层。对于物理世界的人员、设备、环境、业务等基本信息，借助传感器、智能终端单元，采集智能电网基本信息，形成智能电网物理空间的相关数据，进而构建智能电网物理模型、几何模型、规则模型和行为模型，作为数据驱动的数据基础。电网智能化运检平台运用设计工具、仿真软件、虚拟现实技术等多种数字化手段，实时连接与映射智能电网的物理世界与虚拟世界，通过标准接口洞察和处理智能电网，同时将承载指令的数据反馈给智能电网，以便进行决策指挥，形成闭环反馈。由于数据属性、数据采集设备均不同，需要在数据驱动层对多种数据进行融合处理[11]，形成数据集合，并利用感知数据进行模拟仿真，实现电网设备状态监测、风险评估、故障识别等功能，为智能化电网运检指挥提供决策依据。通过系统应用层实现输电、变电、配电等业务的可视化处理，更好地满足各业务部门对电网三维数据的深化应用需求。

2 关键技术

基于数字孪生技术的电网智能化运检平台具有实时量测感知、数字模型构建、孪生数据驱动、仿真分析决策4个关键技术环节，各环节互相依存、循环往复，实现了数据流、信息流的双向互动，并贯穿了智能电网的整个生命周期，体现了数字孪生的交互性。

2.1 实时量测感知

实时量测感知是对物理实体进行分析控制的前提。量测对象包括能量系统和辅助调节系统，因此需将传感器安装在平台物理实体层中，还需解决与数据测量、传输、处理、存储、检索等相关的一系列技术问题[12]。鉴于此，本文在电网智能化运检平台物理实体层铺设传感设备，与其他终端产品相结合，实现智能电网数据采集、边缘计算与通信服务功能。平台利用微型电流传感器、光传感在线监测装置等感知设备以及双模通信、数字孪生等信息技术进行智能电网数据的高精度测量和感知，形成全覆盖的数字化感知点，实现智能电网设备运行状态的综合判断[13]。为适应不同场景和需求，需统筹感知体系建设，采用协调分配技术、边缘计算技术等对智能电网感知监测数据进行统计、分析与共享，使电网具备实时量测感知能力。平台采用标准化服务接口和通信统一传输协议，为物理实体层与虚拟模型层数据交互提供接口[14]。

2.2 数字模型构建

平台中物理空间与虚拟模型之间是双向的完整映射。为实时、动态反映智能电网物理实体的行为状态，虚拟模型层需完成物理实体1∶1还原的精细化建模颗粒度，为多尺度多层次的仿真模拟提供支持[15]。数字孪生模型主要实现物理与虚拟空间的数据融合[16]，通过传感器获取信息，采用虚拟标签量化表示电网产品、设备、人员、环境等信息，借助大数据、人工智能等技术不断提高智能电网决策的合理性。平台根据智能电网地理位置、尺寸空间、装配关系、材料特性、电气参数等物理参数，利用3ds Max建模配电网变压器、变电站（换流站）等设备外形结构，利用设备参数、传感器配置、通信接口等参数描述设备特征，结合地理坐标位置、设备编号对单个设备元素进行立体建模。基于此，通过电网各要素间的耦合关联关系、内部运行规律、外部扰动响应行为、能量流动轨迹、信息流传递关系和基本自然规律，构成智能电网动态虚拟模型集[17]。

2.3 孪生数据驱动

孪生数据驱动是平台的核心，采用多源异构的调度数据融合和管理技术，形成唯一的数据源[18]；再对不同数据源和设备进行数据融合，形成物理实体层、虚拟模型层和数据服务层之间的数据交互融合的驱动。自律分散系统（ADS）具有异构集成、泛在链接和系统自治等特点，能实现在线扩展和在线容错，为孪生数据驱动提供了思路[19]。本文借助ADS构建了平台的孪生数据驱动架构，以信息共享协议和数据交互机制为技术支撑，使得电网智能化运检平台具有充分解耦的软件系统架构、友好的接口模块化设计、可扩展的信息共享协议以及高效实时的数据交互机制，实现了物理对象感知数据、信息对象仿真数据与服务系统处理数据的交互，为平台提供了

系统化支持。

2.4　仿真分析决策

仿真分析决策是平台在运行过程中，通过采集和处理物理对象的实时数据和运行状态，在保证其物理原型高度一致的前提下，利用数字仿真对其运行过程进行实时、动态的调节和改进[20]。本文采用电网设备状态评估算法和电网设备故障预测算法，为平台仿真分析决策提供依据。电力设备状态评估算法主要是利用Canopy簇合并算法处理电网设备的多个状态量，分为设备的正常状态和异常状态两个几何体，通过聚类结果判断设备状态。Canopy簇合并算法的实现步骤为：①设置电网运行设备原始状态数据集 $X(n)$ 的阈值 r_1 和 r_2；②随机选择 $X(n)$ 的中心点A，并提取该中心点的非Canopy候选集合；③判断非Canopy候选集合是否包含在已有Canopy中，若是则将其合并到已有Canopy中，否则产生新的Canopy；④从 $X(n)$ 中移除Canopy候选中心点；⑤判断 $X(n)$ 是否为空，若为空则结束，否则返回步骤①进行循环，直到结束。在电网设备状态评估的基础上，进一步预测电网设备故障，本文采用基于深度递归信念网络的电网设备状态预测数字孪生模型预测电网设备故障。具体步骤为：①根据Canopy簇合并算法处理结果，梳理异常状态数据集样本，形成样本集；②利用AHP法计算故障致因因子的权重，并进行重要性排序，再利用熵权法得到组合权重；③将组合权重赋予原始样本，以故障致因因子和预处理后的故障数据为预测输入量，构建深度降噪自编码网络，以网络隐含层输出为下一层输入，直至所有网络训练完成为止；④将电网设备故障分为轻微、注意、异常和严重4类，输出层的神经元为4，通过带标记的训练样本进行有监督的微调，训练整个网络参数，得到具有分类和预测能力的自编码网络，建立故障致因因子与电网设备故障的关联映射关系；⑤完成网络训练后，得到适合的电网设备故障预测模型，可输入测试样本，实现电网设备故障预测。

根据本文采用的仿真决策算法，评估一个月时间内建月一线线路#192–#193档平均风速、日微风振动相对程度的变化趋势（图1），可见平均风速与导线微风振动不存在正相关关系。监测建月一线半个月内逐档异常事件和缺陷隐患严重程度（图2）发现，#265–#266档处缺陷程度较严重，需加强关注。

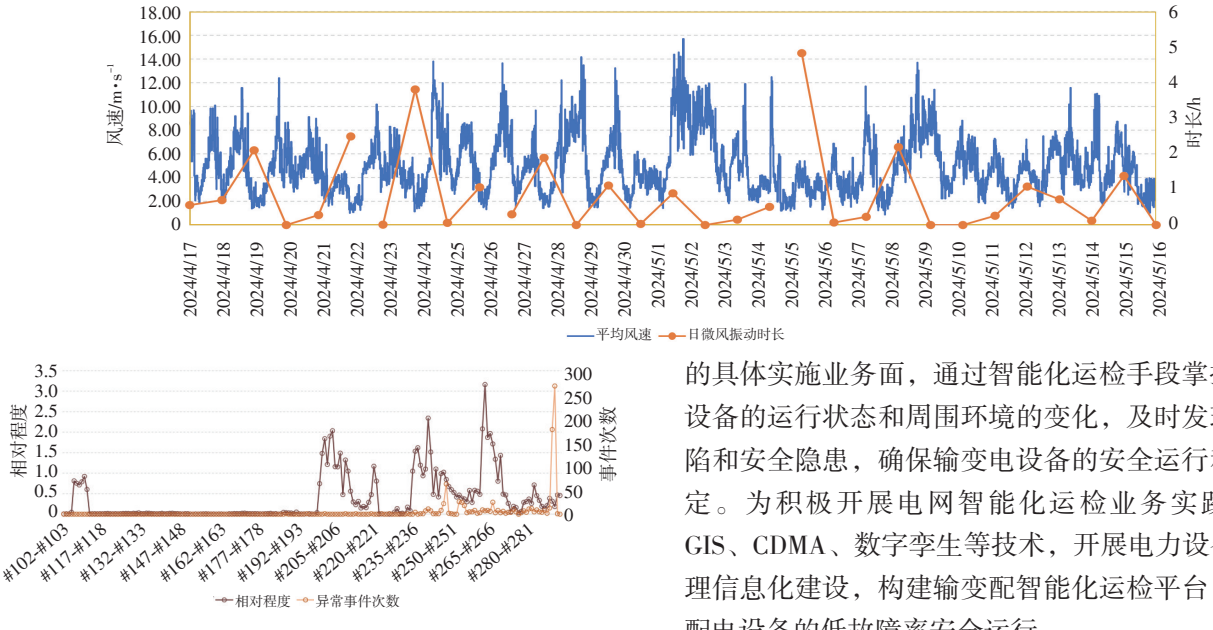


图2　线路各档缺陷隐患严重程度评估分析结果图

3　平台应用

3.1　应用背景

数字化转型升级作为新型能源体系建设的重要内容以及新型电力系统建设的载体和支撑，在电网设备管控、资源配置、智能决策等方面发挥重要作用。基于数字孪生技术的电网智能运检作为电网数字化转型的具体实施业务面，通过智能化运检手段掌握输变电设备的运行状态和周围环境的变化，及时发现设备缺陷和安全隐患，确保输变电设备的安全运行和电网稳定。为积极开展电网智能化运检业务实践，依托GIS、CDMA、数字孪生等技术，开展电力设备巡检管理信息化建设，构建输变配智能化运检平台，保证输配电设备的低故障率安全运行。

3.2　应用实践

输变配智能化运检平台运用大数据、物联网等新技术进行内外数据采集与深度融合，涵盖了输电线路、变电站（换流站）、配电网的全景孪生模型，形成一张数字化“透明大电网”。平台核心功能包括输电数字孪生、变电数字孪生和配电数字孪生。

1）输电数字孪生运检业务。平台可实现输电线

路三维场景可视化、设备状态全息感知、智慧线路、无人机三维巡检等功能；可量化处理外部电网安全运行风险，将智能电网调度由被动故障维护转变为主动预判处理，降低智能电网的潜在风险，提高管控效率；还接入了气象监测、气象预报数据，以分析当前及未来3 d内的极端天气情况，及时识别影响电网安全运行的因素，辅助运维人员提前预测。输电数字孪生应用场景目前已接入监测装置类型、数量以及每天上报数据量（表1）。基于输电监测装置，构建输电通道空间模型，搭建输电数字孪生业务，汇聚设备状态感知、视频监控、风险预警等模块。

2）变电数字孪生运检业务。平台具有感知、巡检、接入、管控、诊断等功能，实现了变电站（换流站）信息总览，通过建立三维模型，深度集成了视频监控和机器人监测，实现了变电设备状态感知，并在三维场景中可视化呈现，仿真站内检修作业流程，规避作业安全风险。借助该平台，可同步显示设备属性和监测数据，全面感知变电站（换流站）状态。采用全景沉浸式巡检，实时查看设备信息和获取运行状态。发生故障时，利用现场视频、设备状态感知等手段进行远程监控，确定故障位置和原因，展开应急处置，辅助运维班组智能决策。变电数字孪生应用场景目前已接入监测装置、设备数量和每天上报数据量。基于监测装置感知数据，依托变电站三维模型，搭建变电数字孪生应用场景，汇聚设备信息、环境感知、安消防监控以及故障告警等业务（图3）。

表1 输电线路监测装置一览表

监测装置	装置数量/台、套	每天上报数据量/条	监测装置	装置数量/台、套	每天上报数据量/条
线路避雷器在线监测	2 748	44 059	导线微风振动监测	41	611
耐张线夹测温	1 197	60 410	杆塔倾斜监测	26	1 372
微气象监测(气象局)	510	9 408	蓄电池电源管理	25	479
导线覆冰监测	499	27 130	分布式地线覆冰监测	15	748
微气象分钟数据	302	112 118	绝缘子污秽度监测	12	171
导线温度监测	231	17 784	导线风偏监测	9	555
杆塔金具测温	205	52 867	导线弧垂监测	9	1 403
导线增容球数据监测	103	65 972	导线综合数据监测	3	17 330
微气象瞬时风和电压数据	102	1 359 954	北斗地灾监测	1	21
导线舞动监测	57	2 300			



图3 变电数字孪生业务场景

3）配电数字孪生运检业务。平台以数字孪生技术为基础，具有配网总览、配网设备感知、设备缺陷分析、电力负荷预测等核心功能，既能在全景电网中展示配电台区内外部信息，又能对配网线路进行风险智能预警，在线预判故障成因，进行历史故障追溯和推演分析，从而实现对配网工程的远程巡检，为配网工程数字孪生业务提供数据智能分析与动态决策支持。此外，平台通过管理数字孪生配电网，能真实反映电网设备在时间维度上的动态变化，实现动态数据的全覆盖，为配网运维提供智能化管理方案。平台提供了指定时间内某配网线路设备预警清单，内容见表2。基于配网感知装置，构建配电网空间三维场景，搭建配网数字孪生业务，汇聚设备缺陷、监测告警、历史故障等模块。

3.3 应用成效

平台以信息系统集成、三维虚拟现实、三维GIS等技术为基础，借助电网设备三维可视化运行管理模块，为研究输变配电网设备在可视化场景下的全息感知、状态监测、状态预测、智能运检等综合控制提供了重要的数字化平台支撑。通过建设输电数字孪生、变电数字孪生和配电数字孪生功能模块，平台实现了事前电网运行全息感知与风险智能预警，事中内外部资源快速协同，事后故障智能分析与辅助决策等流程化功能[21]，实现了输变配一体化运行管理，在输电、变电、配电智能化运检业务中具有重要的应用价值。

4 结 语

目前我国正处于能源与数字革命深度融合的历史

表2　配电设备预警清单

序号	类型	起始时间	结束时间	位置	预警级别	数值/m·s⁻¹	设计值/m·s⁻¹	设计占比/%
1	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#180–#181	黄色（低）	20.24	30	67.47
2	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#287–#288	黄色（低）	17.67	30	58.90
3	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#166–#167	黄色（低）	20.82	30	69.40
4	风速	2024–03–04 19:30	2024–03–04 20:00	#216–#217	黄色（低）	17.41	30	58.03
5	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#278–#279	黄色（低）	17.15	30	57.17
6	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#118–#119	黄色（低）	17.99	30	59.97
7	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#277–#278	黄色（低）	18.50	30	61.67
8	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#112–#113	黄色（低）	19.17	30	63.90
9	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#249–#250	黄色（低）	19.21	30	64.03
10	风速	2024–03–04 19:30	2024–03–04 20:00	#276–#277	黄色（低）	20.47	30	68.23
11	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#246–#247	黄色（低）	17.34	30	57.80
12	风速	2024–03–04 19:30	2024–03–04 20:00	#119–#120	黄色（低）	17.18	30	57.27
13	风速	2024–03–04 19:30	2024–03–04 20:00	#268–#269	黄色（低）	17.11	30	57.03
14	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#245–#246	黄色（低）	20.10	30	67.00
15	风速	2024–03–04 19:30	2024–03–04 20:00	#115–#116	黄色（低）	17.51	30	58.37
16	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#243–#244	黄色（低）	18.13	30	60.43
17	风速	2024–03–04 19:30	2024–03–04 20:00	#172–#173	黄色（低）	18.22	30	60.73
18	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#237–#238	黄色（低）	17.36	30	57.87
19	风速	2024–03–04 20:00	2024–03–04 20:00	#198+1–#199	黄色（低）	18.50	30	61.67
20	风速	2024–03–04 19:30	2024–03–04 20:00	#153–#154	黄色（低）	21.02	30	70.07

交汇点，需要加快电力系统脱碳进程。本文将数字孪生技术应用于电网智能化运检业务中，构建了基于电网智能化运检平台，发挥了数字孪生等技术在电网智能化运检中的应用价值。基于数字孪生技术的电网智能化运检平台由物理实体层、虚拟模型层、数据驱动层、数据服务层和系统应用层构成，物理世界量测感知、数字模型构建、孪生数据驱动、仿真分析决策是核心，四大技术环节相互依存，体现了数字孪生“虚实融合、以虚控实”的优势。平台利用“大云物移智”手段，对发、输、配、变、用整个电网框架进行三维动态展示，推进了运维资源规范化配置，全面提升了电力公司电网智能化的管控能力。

参考文献

[1] 梁卓识. 基于数字孪生的数字电网建设探究[J]. 科技创新与应用,2023,13(30):193-196

[2] 邹鹏,肖泽文,邹佳芳. 数字孪生城市应用场景研究及框架构建[J]. 中国建设信息化,2023(19):118-121

[3] 冯薇玺,李清,黄萍. 基于数字孪生的多信息源输电网数据融合方法[J]. 自动化与仪器仪表,2023(9):96-99

[4] 周育忠,林正平,涂亮,等. 电网运营知识体系中数字孪生技术展望和思考[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2023,42(1):88-94

[5] 王鑫,王霖,余芸,等. 数字孪生电网的特性、架构及应用综述[J]. 电子与信息学报,2022,44(11):3 721-3 733

[6] 彭在兴,王颂,陈佳莉,等. 基于数字孪生的数字电力设备思考与展望[J]. 南方电网技术,2022,16(12):9-15

[7] 何冰,谢天祥. 数字孪生技术在输电线路中的应用研究[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(7):83-89

[8] 周毅,周良才,沈颖平. 基于数字孪生的华东电网安控系统虚拟建模及实现[J]. 电器与能效管理技术,2021(6):47-51

[9] 王志鹏,兰峰,赵勇,等. 数字孪生技术在坚强智能电网中的应用探讨[J]. 电气应用,2021,40(6):111-115

[10] 杨帆,吴涛,廖瑞金,等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术,2021,47(5):1 505-1 521

[11] 唐学用,梁垚,孙斌,等. 数字孪生技术在区域多能源系统中的应用展望[J]. 南方电网技术,2021,15(5):104-114

[12] 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]. 高电压技术,2021,47(5):1 564-1 575

[13] 高扬,贺兴,艾芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术,2021,45(7):2 483-2 491

[14] 黄振. 基于云原生和中台技术的电网调度云智能平台的研究[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(3):98-106

[15] 董梁,宋豪,严薇,等. 智慧变电站孪生系统技术的应用研究[J]. 通信电源技术,2021,38(4):146-148

[16] 蒲天骄,陈盛,赵琦,等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报,2021,41(6):2 012-2 029

[17] 王成山,董博,于浩,等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报,2021,41(5):1 597-1 608

[18] 张炜,梁俊斌,覃剑. 基于多智能体的变电站机器人巡检远程集控系统[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(12):9-16

[19] 郑琨琪,王治华,范帅,等. 电网信息物理系统的数据驱动架构设计及应用[J]. 电网技术,2018,42(10):3 116-3 127

[20] 税碧垣. 智慧管网总体架构与发展策略思考[J]. 油气储运,2020,39(11):1 201-1 218

[21] 白浩,周长城,袁智勇,等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术,2020,14(8):18-24