

# 数字孪生技术在电网工程中的应用研究

郭俊韬<sup>1,✉</sup>, 张珏<sup>1</sup>, 郑宁敏<sup>2</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 简思亮<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 闽粤联网电力运营有限公司, 福建 漳州 363000)

**摘要:** [目的] 针对于大数据与互联网背景下的数字化转型, 分析了数字孪生技术在电网工程中的应用现状。[方法] 基于构建的映射实际工程的三维模型, 通过融合设备本体以及生产数据, 形成现实与虚拟空间的数据纽带, 并建立匹配电网运维工作需求的智能化电网数字孪生运维平台。[结果] 平台通过对各子系统数据的调用传输与集中处理, 实现了站端数据的深度融合。通过全景信息展示功能, 实现了电网数据的可视化展示。通过智能辅助监控, 实现了全场景的设备监控与人员管制。通过智能运维作业功能, 实现了虚拟空间对现实工程的反向干预指导。[结论] 数字孪生技术在电网工程中的应用, 实现了数字化转型中的电网可感、可看、可控, 有效地提升了新型电力系统下的电网日常运维作业的工作效率与系统智能化集成度。

**关键词:** 数字化转型; 电网工程; 数字孪生; 智能辅控; 智能运维系统

中图分类号: TM7; F426.61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0136-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on the Application of Digital Twin Technology in Power Grid Engineering

GUO Juntao<sup>1,✉</sup>, ZHANG Jue<sup>1</sup>, ZHENG Ningmin<sup>2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, JIAN Siliang<sup>1</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Fujian-Guangdong Networking Power Operation Co., Ltd., Zhangzhou 363000, Fujian, China)

**Abstract:** [Introduction] In view of the digital transformation under the development of big data and the Internet, the application status of digital twin technology in power grid engineering is analyzed. [Method] The equipment and production data was integrated based on the constructed 3D model which maps the actual project. Therefore, a data link between reality and virtual space was formed, and an intelligent digital twin based power grid operation and maintenance platform was established which matches the needs of power grid operation and maintenance work. [Result] The platform realizes the deep integration of the station-side data through the invocation, transmission and centralized processing of the data of each subsystem. The function of panoramic information display realizes the visual display of power grid data. The function of intelligent auxiliary monitoring realizes the full-scene equipment monitoring and personnel control. The function of intelligent operation and maintenance realizes the reverse intervention guidance by the virtual space to the real project. [Conclusion] The sensitivity, visibility and controllability of power grid can be enabled in the digital transformation because of the application of digital twin technology in power grid projects. At the same time, the digital twin technology can also effectively improve the work efficiency and the intelligent integration of system in daily power grid operation and maintenance operations under the new power system.

**Key words:** digital transformation; power grid engineering; digital twin; intelligent auxiliary control; intelligent operation and maintenance system

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-10-13 修回日期: 2022-11-23

基金项目: 中国能建广东院科技项目“数字孪生技术在智能电网中的应用研究”(EV06421W)

## 0 引言

伴随着移动互联网和物联网(Internet of Things, IOT)技术的迅速发展,大数据、数字化等概念被提出应用。国内企业纷纷开展了包括机器学习、数据资产管理等技术开发,总体规模与数据体量均呈现爆发式增长。因此,“十四五”期间,南方电网针对“云、大、物、移、智”新型电网体系以及电网业务痛点,展开了其数字化工作的部署<sup>[1-2]</sup>。

目前在变电站、换流站等电网工程中,业务需求主要集中在设备监视与巡检任务两个方面。对于巡检工作来说,目前国内已出现具有一定信息化、规范化程度的巡检系统。陈一宁<sup>[3]</sup>于2009年提出了一种基于PDA的巡检系统,基于RFID技术初步解决了人员对巡检工作状况的信息掌握需求。张朋<sup>[4]</sup>进一步利用RFID加Wi-Fi等无线通信技术,提升了巡检的方便程度。随着技术的发展,也逐渐出现了利用可穿戴设备AR、MR等的辅助巡检设备。同时,随着摄像头以及智能算法技术的提升,各类巡检机器人被逐步运用到固定路线的巡检任务中,形成规范化、流程化的巡检方案<sup>[5]</sup>。

而为了进一步可以结合设备监视数据,实现集成化的运维能力,我国在经过数十年电力设备的自动化改造与升级后<sup>[6]</sup>,一定程度实现了不同层级的城乡变电站、换流站等电网工程的智能化运行与自动化管理,逐渐形成了具备安全可靠运行能力的智能型电网。

然而伴随着电力需求的不断增加,造成电网规模持续扩张,以及电力设备数量的不断增多。首先站内相应的运行后台子系统数量也逐渐增多,各系统之间不断出现业务交叉冗余。目前缺少统一的管理平台承接各子系统间的信息传输与数据调用。其次,虽然电网智能化工程中改造了大量智能化设备,但也意味着指数性上涨的数据量需要在系统中不断的流通与反馈。由于目前电网设备的网络化程度仍然不足,并且数据传输需要横跨不同安全等级的生产大区。不论信息共享还是数据传输方式均较为繁琐,容易出现数据堆积与传输错误。最后由于传统运维巡检工作流程、耗时均较长,导致设备日常巡视管理工作在人员成本较高的同时,效率较低。虽然目前已实现巡检机器人进行部分人工工作的替代,

但是在深度的电网业务应用与灵活能力方面仍然存在较大的不足。

在此需求下,南方电网公司率先提出“数字电网”概念,并于2020年发布首份《数字电网白皮书》<sup>[7]</sup>,该白皮书对数字电网的技术特征与发展方向进行了明确的定义与描述,即形成数字化、网络化、智能化的新型能源生态系统。国家电网于2021年在构建以新能源为主体的新型电力系统行动方案也提出数字电网的建设方案<sup>[8]</sup>。与已形成一定规模的智能电网形态<sup>[9]</sup>不同的是,数字电网强调的是数据的感知、分析与融合,体现在数据流在整个电网运行环节的穿透。可以认为数字电网是对智能电网的进一步结构化整合,同时也是与智能电网相互辅助的融合发展方向。而在此进程中,“数字孪生技术”是承载数据驱动下的电网数字化转型的重要载体与实现方式。

## 1 数字孪生技术

数字孪生(Digital Twin, DT)技术是在2000年左右为了解决工程问题而被提出的,并被逐渐认为是实现智能制造和工业4.0最具有发展空间与需求的先进技术之一<sup>[10]</sup>。从2017年开始,在Gartner每年发布的“十大战略技术趋势”的报告中,“数字孪生”就一直位列榜单<sup>[11]</sup>。其以真实状态的物理模型为基础,在虚拟空间中利用计算机语言进行模型搭建以及数据分析,有效地将生活中的可视化现象与虚拟进行结合,将监视数据与机器学习算法进行结合,形成了从数据层面的可操作性能力。

数字孪生技术原理结构如图1所示。其主要包含3个部分:反应真实空间中的物理产品、虚拟空间中的虚拟模型以及将两者联系在一起的数据纽带。

来自真实空间的数据将被实时收集,通过通信链接发送给虚拟模型,交由其处理。调整后的信息或者过程将被发送回现实空间,用于决策支持,从而形成了闭环的控制。相比于其他数字化系统,数字孪生系统具有的优势主要体现在:(1)现实与虚拟模型相互独立,使孪生虚拟空间具有一定的鲁棒性;(2)独立的虚拟空间可以提供现实空间无法实现的模拟场景;(3)由数据纽带相互连接的两个空间,为实时数据的交互提供了基础;(4)具有与虚拟空间交互的能力;(5)模块化的架构与数据存储能力,为大数据应用与智能化算法模块提供了框架基础。这些优势极

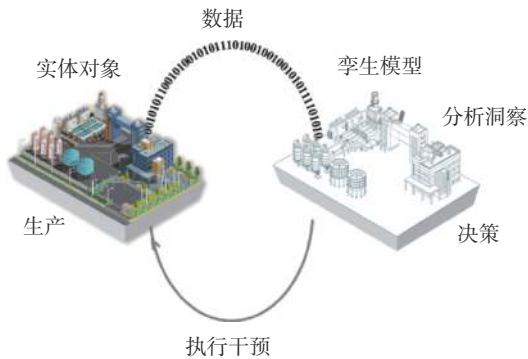


图 1 数字孪生技术框架图

Fig. 1 Framework of digital twin technology

大地响应了目前电网中场景模拟、运动操作、无人巡检等需求,因此各研究开始探索数字孪生技术在电网工程中的应用。

“数字电力系统”作为最早具有孪生电网雏形的概念,就已经提出了对实际运行的电力系统再现的特点<sup>[12]</sup>。随后,数字孪生电网(Digital Twin Grid, DTG)的概念应运而生,即以多维度、多时间尺度的动态虚拟仿真体,实现对电网实体设备的实时感知、推演并提供决策参考<sup>[13]</sup>。刘宇凝等<sup>[14]</sup>基于数字孪生技术,提出一种混合储能的控制策略,对储能设备在不确定的风电出力下的运行效率进行优化。齐波<sup>[15]</sup>分析了电网设备的状态评估方法与数字孪生技术的融合现状,并对目前仍然存在的挑战进行了总结与展望。黄文德<sup>[16]</sup>结合了北斗系统数据与物联网传感器,形成了结合多个数据采集终端的数字孪生运维平台。在新型电力系统的建设下,数字孪生技术也被应用在了抽水蓄能电站、分布式能源发电等应用场景。

目前国内的数字孪生电网的应用研究,包括国家电网、南方电网等企业都已经开始开展数字孪生技术在电网工程中的实际应用开发与落地<sup>[17-19]</sup>。纷纷探索数字孪生技术与电网数据的深度融合和应用绑定,实现电力企业、电网运维的数字化转型。

## 2 数据融合

在图 1 所示的数字孪生架构映射到电网工程中,现实模型即代表电网设备,虚拟世界代表 1:1 还原设备的三维软件模型。同时在今后的电网工程中,将智能运维平台作为数据纽带连接两者,将实际的生产数据融合到三维模型中去,形成数据正向传输

的基于数据驱动的五维数字孪生系统<sup>[20]</sup>。

### 2.1 三维模型

建立电网设备三维模型的方式主要分为图样型和测绘型。图样型指的是利用 3D MAX、REVIT 等三维引擎,基于 CAD 图纸、厂家资料等,对设备进行模型构建。测绘型采用激光扫描及倾斜摄影等技术,快速对现场实际环境进行数据采集,后期利用现场采集的点云图生成高精度三维模型,可精确重现变电站内各设备、仪表、线缆、铭牌等细节。测绘型建模方式相比于图样型具有更加精确的外观效果与同步定位,但是难以做到反应设备内部的构造与电气连接逻辑。而图样型的效果则相反,其可以很好地反映设备复杂的内部原理结构,但是模型较为简单,若进行效果处理将对三维引擎的加载能力有较高的要求。因此,在目前的电网工程中,常将两种方法相结合,形成多层次化、结构化的可视化三维模型。其步骤如图 2 所示。

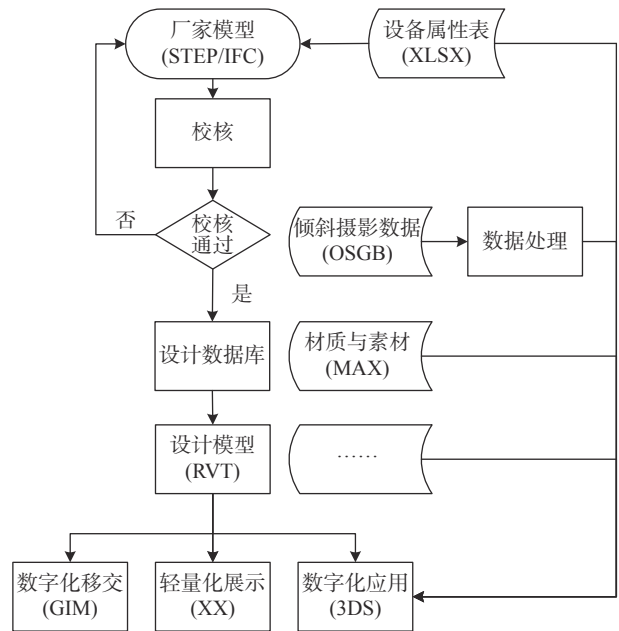


图 2 三维模型设计流程图

Fig. 2 Flow chart of 3D model design

首先根据运维管控需要确认模型范围,包括设备模型和非设备模型。其中,非设备模型包括变电站设施(如电缆沟)、建筑(高压室)地面等。设备、材料、建筑物及其他设施的三维模型应包含设备状态监控关键零部件以及准确的几何外形和尺寸。其次,根据国家电网或南方电网的模型设计规范,利用



软件构建符合颗粒度要求与几何细度要求的 Revit 三维模型。再次,对模型场景进行分析与整合,三维模型进行轻量化处理<sup>[21]</sup>,提高模型导入的运行流畅度。最后将现场扫描后得到的设备点云数据进行数据处理与解算,与其他三维模型结合,对模型进行精细化处理。

## 2.2 本体数据融合

获得的三维模型有效地映射了真实电网的设备外观,但是对于孪生虚拟空间而言,缺少了数据映射,因此需要将设备本体的数据信息与模型进行融合,形成包含设计属性、工程属性和模型属性的三维模型。

设计属性即设备的本体信息,表示在设计阶段获得的设备的物理属性,主要包括型号规格、额定容量、额定电流/电压等出厂信息。工程属性主要为设备所属工程获得的建设信息,包括工程名称、参建单位、电压等级等。模型属性则是将虚拟空间与现实空间所绑定的映射链接,包括模型参数、设备编码等。

设备编码即为其测点完整标识,包括设备标识、部件标识和测点标识:(1)设备标识 ID 由数据库定义,其与投运前由集成商固化的实物 ID 所关联,全平台唯一;(2)部件标识为设备的细化部件在站内设备的唯一标识,主要由设备的层级编码以及后缀构成;(3)测点标识编码主要包括测点类型与其实例编号。

## 2.3 生产数据融合

数字孪生电网工程实现的最重要功能目标之一就是作为平台将主设备运行与辅控系统的生产数据整合,即将原辅助控制相关的多个子系统在不改变前端设备的前提下取消原先独立的后台,并将前端设备直接接入新的一体化平台中,共享数据存储,统一操作与控制。

### 1) 设备监测数据

设备监测数据包括变压器油色谱、变压器油温、SF<sub>6</sub> 气压、GIS 气室气体密度、避雷器等设备在线监测。在线监测数据通过传感器终端将数据上送至在线监测 IED, IED 收集数据后对数据进行处理,再通过对接协议上传至数字孪生平台。

### 2) 安防与环境监视类数据

安防监视类数据主要包括人脸识别、电子围栏、

安防门禁、环境温湿度、水浸信息等数据。但是由于该类设备的市场通用性,目前对该部分终端设备与后台间的数据接口尚未存在规范。因此在电网工程中,一般增加智能接口装置,完成规约转换与数据的统一上传。

### 3) 巡检类数据

巡检类数据主要包括摄像头、机器人、无人机采集的图像视频类数据,设备红外测温数据和音频类信息等。该部分数据首先上传至硬盘录像机,再由硬盘录像机向后台主机上传至平台调用。

### 4) 业务管理类数据

业务管理类数据一般依靠上层运维中心或电网管理平台的数据接入。该类数据主要包含了全站设备台账信息、操作票与工作票的详细信息和设备缺陷统计信息等。

### 5) 智能控制类数据

站内的智能控制即控制锁具、照明、空调等智能化设备。智能锁具系统的数据包括全站所有锁具状态信息的上传及站端授权令的下发,实现智能锁具在平台上的监视控制功能。智能照明的数据包括全站户内、外照明灯具的统一控制,该系统的终端设备包括照明控制器、无线 AP 等,接入设备包括网关机、无线 AC 通信设备。另外,可同时打通空调等环境设备,实现空调等智能楼宇类设备的远程监视与控制。

### 6) 消防类数据

消防类的数据包括火灾报警系统、消防泵等各类阀门的信息。一般这类数据具有独立的一体化消防自动化平台,因此平台直接与消防系统做数据接入,由消防自动化平台实现消防类信息的统一监视。

## 3 孪生应用研究

精细化的三维模型在融合了电网数据后,形成了数字孪生电网的虚拟空间模型和正向数据纽带。与此同时,基于电网日常运维需求,可形成一系列的数字孪生电网应用功能,对现实空间进行反向执行干预,从而形成了基于闭环反馈的双向数据纽带。

### 3.1 全景展示

基于构建的三维模型可实现场站的场景缩放漫游、显隐地下电缆与消防管道等功能。同时基于运维类数据提供的台账、历史巡检、设备缺陷等信息

建立关联关系,实现综合信息的展示及查询,全景信息展示功能如图 3 所示。



图 3 全景信息展示功能

Fig. 3 Function of panoramic information display

### 3.2 智能辅助监控

基于正向收集上传的监测、监视类生产数据,三维孪生平台按照全景监测、视频监控、人员定位、智能安防、消防监控等业务划分形成智能型辅助监控系统功能。

#### 1) 辅控数据展示

将主设备监控系统中的 SCADA 数据、在线监测数据利用硬件隔离装置从站内的安全生产大区接入到运维系统,并融合到三维实景模型中,与接入的环境监测数据一同直观、实时、高效地展示电网运行情况。

#### 2) 视频监控

在三维模型中利用点位标记将摄像机安装位置、名称等信息与模型匹配,使其直接关联至相关摄像机视频通道,实现视频监视信息的查看查询。同时,将其与事故告警信息关联,当设备发生故障或环境变化时,可高亮显示告警位置并随时实时调用现场画面,整体实现触发调用、联动报警的功能,视频监控关联功能如图 4 所示。



图 4 视频监控关联功能

Fig. 4 Function of video surveillance association

#### 3) 人员定位

数字孪生应用平台通过获得的人员定位数据实时更新人员位置,并结合虚拟场景实现人员的位置

追踪、轨迹回溯。目前的电网工程中常用的是 UWB(Ultra Wide Band)高精度定位技术。

UWB 为一种测距技术,其通过超宽带脉冲通信对信标物体进行距离定位,并利用非正弦波窄脉冲进行数据反传。因此在多个 UWB 基站范围中,利用数据时间差与定位距离进行算法解析,从而获得某物体的精确定位。其原理如图 5 所示。

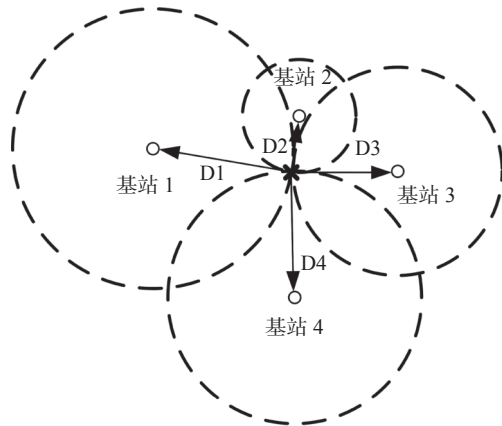


图 5 人员定位原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of personnel location

#### 4) 安防管控

基于安防类与智能控制类数据,可实现人员入站作业的全流程安防管控。首先基于深度学习算法,对工作类人员进行与虚拟模型的身份录入绑定、人脸识别与验核以及智能锁具的授权。其次在人员进站工作过程中,利用虚拟模型对工作位置、行进路线进行展示与记录,并可以实时调用其所在位置录像,并对人员作业的安全规范措施以及行为进行识别与告警显示。

### 3.3 智能运维作业

建立基于电网工程的数字孪生平台,可以极大地满足提升电网在日常运维、巡视的工作效率的需求。

#### 1) 智能巡检

根据设置的巡检任务点,以漫游的形式在站内三维模型中巡视,但同时系统自动推送每个巡视点的现实感知信息,包括摄像头或巡检机器人获得的实时视频跟踪、红外热成像信息、外观分析;在线监测设备的实时数据、异常设备信息等。

#### 2) 检修模拟

由于孪生三维模型在建模过程中可以精确到部件级。因此基于正向的数据获取,可以实现三维模

型状态与实时运行状态的映射,即根据获取例如刀闸开关等设备的实时位置状态更新三维模型状态。同时,可以实现设备的拆解,展示设备的部件安装结构构造,如图6所示。并且,基于前期的精细化建模,可进一步对设备的检修过程步骤进行模拟展示,做到对检修工作内容的提前评估与步骤确认,形成对现实操作的反向指导。



图6 检修模拟功能

Fig. 6 Function of maintenance simulation

### 3)空间分析

利用三维模型对照实际工程1:1建模的特性,可实现远程的工程勘测和测量。即对三维场景下的设备,可以进行视角旋转、缩放,对所运维的站内各处空间距离、面积、角度提供精确的测量结果,空间分析功能如图7所示。



图7 空间分析功能

Fig. 7 Function of spatial analysis

## 4 结论

数字孪生技术作为电网实现数字化转型的关键,针对其在电网工程中的应用研究正在不断被推进。该技术利用三维模型,在虚拟空间对现实工程进行了1:1的高精度还原,实现在便携设备远程对现实场景进行查看。同时,以三维模型作为实体与虚拟的纽带,融合设备参数、实际生产数据和业务管理数据,实现数据的正向传输展示;以巡检与运维工作需求作为应用场景,结合三维模拟、分析数据和智能决策对现实情况进行反向指导和干预。其功能应用相

互独立,但内部数据流向呈现高度融合关联。总体来说,通过对电网数字孪生共建,真正实现了对电网全生命周期的观测、立体化全方位的感知以及自动化便捷式的控制,极大程度地适应了新型电力系统的发展需求,有效地提高了电力系统运维工作效率与其经济效益。

### 参考文献:

- [1] 中国南方电网有限责任公司. 数字化转型和数字南网建设行动方案(2019年版) [R]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2019.  
China Southern Power Grid Co., Ltd. Action plan for digital transformation and digital south network construction (2019 edition) [R]. Guangzhou: China Southern Power Grid Co. Ltd., 2019.
- [2] 黄敬志, 冯国平, 黄小强, 等. 广东电网“十四五”数字化建设规划研究 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 132-138. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.020.  
HUANG J Z, FENG G P, HUANG X Q, et al. Research on digital construction planning of guangdong power grid in the 14<sup>th</sup> five year plan [J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(Supp. 1): 132-138. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.020.
- [3] 陈一宁. 基于PDA和.NET平台的变电站设备巡检管理系统的设计与实现 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009.  
CHEN Y N. The design and implementation of transformer substation inspection system based on PDA and .NET platform [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [4] 张朋, 常静, 范福玲. 基于无源无线声表面波RFID技术的变电站巡检系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(9): 2557-2560. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2013.09.043.  
ZHANG P, CHANG J, FAN F L. Research on the substation inspection system based on wireless passive SAW RFID technology [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(9): 2557-2560. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2013.09.043.
- [5] 吴迪, 潘建乔, 余方召, 等. 基于HoloLens的变电站巡检系统 [J]. 计算机与现代化, 2020(7): 50-54+60. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2020.07.010.  
WU D, PAN J Q, YU F Z, et al. Substation inspection system based on hololens [J]. Computer and Modernization, 2020(7): 50-54+60. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2020.07.010.
- [6] 曾湘聪. 自动化技术在数字化变电站中的应用研究 [J]. 数字技术与应用, 2021, 39(5): 1-3. DOI: 10.19695/j.cnki.cn12-1369.2021.05.01.  
ZENG X C. Application of automation technology in digital substation [J]. Digital Technology & Application, 2021, 39(5): 1-3. DOI: 10.19695/j.cnki.cn12-1369.2021.05.01.
- [7] 中国南方电网有限责任公司. 数字电网白皮书 [R]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2020.  
China Southern Power Grid Co., Ltd. Digital power grid white paper [R]. Guangzhou: China Southern Power Grid Co. Ltd, 2020.
- [8] 国家电网公司. 构建以新能源为主体的新型电力系统行动方案(2021—2030年) [R]. 北京: 国家电网公司, 2021.



- State Grid Corporation of China. Action plan for building a new power system with new energy as the main body (2021-2030) [R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2021.
- [9] 黄翔, 陈志刚. 智能电网大数据信息平台研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(1): 17-21. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.003.
- HUANG X, CHEN Z G. Research on big data information platform for smart grid [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(1): 17-21. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.003.
- [10] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [11] ZHOU M K, YAN J F, FENG D H. Digital twin framework and its application to power grid online analysis [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 391-398. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2018.01460.
- [12] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-498. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211594.
- SHEN C, CAO Q N, JIA M S, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-498. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211594.
- [13] 李江成, 刘建戈, 张鹏宇, 等. 变电站数字孪生技术研究与应 用 [J]. 电气应用, 2022, 41(7): 29-36.
- LI J C, LIU J G, ZHANG P Y, et al. Research and application of digital twin technology in substation [J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(7): 29-36.
- [14] 刘宇凝, 王迎丽, 徐明文, 等. 基于数字孪生混合储能的风电功率波动平抑策略 [J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2503-2513. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0188.
- LIU Y N, WANG Y L, XU M W, et al. Wind power fluctuation smooth strategy based on digital twin hybrid energy storage [J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2503-2513. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0188.
- [15] 齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望 [J]. 高压技术, 2021, 47(5): 1522-1538. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210093.
- QI B, ZHANG P, ZHANG S Q, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210093.
- [16] 黄文德, 张晓飞, 庞湘萍, 等. 基于北斗与数字孪生技术的智能电网运维平台研究 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(21): 31-35. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2107047.
- HUANG W D, ZHANG X F, PANG X P, et al. Smart grid operation and maintenance platform based on Beidou and digital twin technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(21): 31-35. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2107047.
- [17] 高赛. 数字孪生的变电站巡检系统数字化模型 [D]. 保定: 华北电力大学, 2021. DOI: 10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000735.
- GAO S. Digital model of digital twinning substation inspection system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021. DOI: 10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000735.
- [18] 邵天睿, 尚涛, 李显旭. 数字孪生电网安全分析 [J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(8): 60-65. DOI: 10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2022.08.006.
- SHAO T R, SHANG T, LI X X. Security analysis of digital twin of power systems [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(8): 60-65. DOI: 10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2022.08.006.
- [19] 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. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.12.002.
- PENG Z X, WANG S, CHEN J L, et al. Thinking and prospect of digital power equipment based on digital twin [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 9-15. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.12.002.
- [20] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18. DOI: 10.13196/j.cims.2019.01.001.
- TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18. DOI: 10.13196/j.cims.2019.01.001.
- [21] 李磊. Revit三维模型LOD简化及WEB可视化 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020. DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000434.
- LI L. The LOD simplification and WEB visualization of 3D Revit model [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000434.

## 作者简介:



郭俊韬

郭俊韬 (第一作者, 通信作者)

1996-, 男, 山西太原人, 电气工程硕士, 主要从事电网工程电气设计以及电网数字化研究工作(e-mail)guojuntao@gedi.com.cn。

## 张珏

1992-, 女, 广东广州人, 工程师, 电机工程硕士, 主要从事电网工程电气设计以及电网数字化研究工作(e-mail)zhangjiue@gedi.com.cn。

## 郑宁敏

1976-, 男, 江西吉安人, 高级工程师, 华北电力大学电力系统及其自动化工学学士, 主要从事电力系统智能、低碳运行, 闽粤联网经济调度等工作(e-mail)13625017571@139.com。

## 张浩

1983-, 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 学士, 主要从事电网工程电气设计以及电网数字化研究工作(e-mail)zhanghao@gedi.com.cn。

## 简思亮

1994-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事电气二次设计、变电站智能运维的研究工作(e-mail)673148376@qq.com。

(编辑 孙舒)