



工程与应用

## 面向智能化变电站的数字孪生技术应用

高杨, 赵旷怡, 付玉红, 张金伟, 刘洪雨, 郭嘉  
(国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100038)

**摘要:** 变电站作为电网系统的核心枢纽, 承担着电网数字化转型的关键任务。深入探讨了数字孪生技术在智能化变电站中的应用, 以提升变电站的运维管理效率和设备故障诊断能力。首先, 介绍了数字孪生技术的基本概念及应用特性, 并细致地分析了变电站应用数字孪生技术的关键业务需求点。接着, 搭建了变电站数字孪生模型的基本架构, 详细地描述了模型各层级的构成要素。通过数据过滤机制对变电站采集的基础数据进行预处理, 并基于地物模型集群算法开展变电站的三维建模。实验结果表明, 所提方法显著地提高了变电站业务场景中的三维建模精度, 提升了建模效率。同时, 所提模型在设备故障状态诊断方面展现出了高度的可靠性。数字孪生技术在变电站中的应用能够有效地提升变电站的智能化水平, 为电网数字化转型提供有力的支持。

**关键词:** 变电站; 数字孪生; 数据采集; 三维建模; 精度; 可靠性

**中图分类号:** TM75

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025145

## Research on the application of digital twin technology for intelligent substations

GAO Yang, ZHAO Kuangyi, FU Yuhong, ZHANG Jinwei, LIU Hongyu, GUO Jia  
State Grid Jibei Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Beijing 100038, China

**Abstract:** As the core hub of the power grid system, substations undertake the key task of digital transformation of the power grid. The application of digital twin technology in intelligent substations was explored deeply to improve the efficiency of substation operation and maintenance management and equipment fault diagnosis capabilities. Firstly, the basic concepts and application characteristics of digital twin technology were introduced, and the key business requirements for the application of digital twin technology in substations were analyzed. Secondly, the basic architecture of the digital twin model of the substation was built, and the constituent elements of each level of the model were described. The basic data collected from the substation was pre-processed through a data filtering mechanism, and the 3D modeling of the substation was carried out based on the ground model cluster algorithm. The experimental

收稿日期: 2024-12-31; 修回日期: 2025-02-07

通信作者: 高杨, 472256603@qq.com

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目 (No.B3018F240024)

**Foundation Item:** The Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (No.B3018F240024)

results show that the proposed method significantly improves the accuracy of 3D modeling in substation business scenarios and enhances modeling efficiency. Meanwhile, the constructed model has demonstrated high reliability in equipment fault diagnosis. The application of digital twin technology in substations can effectively enhance the intelligence level of substations and provide strong support for the digital transformation of the power grid.

**Key words:** substation, digital twin, data collection, 3D modeling, accuracy, reliability

## 0 引言

随着新一代自主可控智能变电站工程的推进,现有辅控在国产化、智能化和功能应用上已无法满足自主可控智能变电站的需求<sup>[1-2]</sup>。在满足现有功能及最新架构的前提下,通过对设备、系统、通信协议的国产化建设,集成物联网、数据加密、数字孪生、AI和现有辅控系统的技术手段,实现国产化、智能化的深度应用的辅控系统的建设,从而为新一代自主可控智能变电站的系统建设提供标准、翔实、稳健的辅助监控系统建设方案<sup>[3-5]</sup>。

在变电站的优化管理领域,人工智能技术和数字孪生技术正发挥着越来越重要的作用,两者相互融合、相互促进,共同推动变电站的智能化发展。文献[6]探讨了基于人工智能技术的变电站二次设备智能巡检技术,提出了一个结合深度学习、图像识别和自然语言处理等技术的智能巡检方案,旨在实现二次设备的自动化和智能化巡检,从而提升巡检的效率和准确性。文献[7]从人工智能技术的角度出发,针对变电站二次设备的智能巡检技术进行了研究,深入分析了该技术在装置功能、特点和组成方面的应用,有效地降低了事故发生率,并提高了故障检出率。文献[8]将人工智能技术融入变电站的运维管理中,显著地提升了数据分析处理的能力,并结合实际情况制定了全面的运维管理方案,满足了变电站智能化管理的实际需求。另一方面,数字孪生技术在变电站运维管理中也展现出巨大的潜力。在文献[9]的工业制造中,数字孪生技术被广泛用于设备的全生命周期管理,实现数字化智能化。数字孪生

使企业能精准模拟设备状态,优化参数,提高效率,降低故障率与维修成本。文献[10]在城市规划中,将数字孪生技术结合交通、环境、能源等多个领域的的数据,实现对城市运行状态的综合分析和优化。

人工智能在数字孪生中扮演着关键角色,在智能变电站的构建领域内,主要体现在数据处理、建模、系统优化等方面。传统的手工建模方法主要依赖于设计人员根据二维图纸和现场数据进行三维模型的构建。这种方法对设计人员的专业技能要求较高,建模效率较低,人为因素容易导致模型精度不足<sup>[11-12]</sup>。为了应对传统三维建模过程中的问题,本文建立了一种创新的变电站三维实景建模方案,通过分析变电站应用数字孪生技术的关键业务需求点,搭建了变电站数字孪生模型,通过数据过滤机制对变电站采集的基础数据进行预处理,并基于地物模型集群算法开展变电站的三维建模。

## 1 数字孪生技术

### 1.1 基本概念及应用特性

基于数字孪生技术能够创建与智能变电站物理世界精确对应的虚拟镜像,实时追踪并映射变电站内设备的变化。这不仅限于复刻设备的几何形态和外观细节,更深入剖析了设备的电气特性、热学属性、机械强度等多维属性,并与来自各类传感器的实时数据无缝集成。数据通过高效采集和处理,被精确融入虚拟模型中,实现物理世界与数字世界的实时同步。工作人员通过监控虚拟模型,能够直观掌握智能变电站的运行状态,及



时提炼关键信息，如设备故障预警、能效优化建议等，并将这些信息反馈给物理实体，从而实现变电站运行状态的前瞻性预测和精准控制。这不仅提高了变电站的运行效率，还显著地增强了在面对各类故障和扰动后的自我恢复能力<sup>[13]</sup>。

数字孪生模型特性见表1，数字孪生技术具备实时性、动态性、互动性和综合性特征<sup>[14]</sup>。

## 1.2 变电站数字孪生关键需求分析

数字孪生变电站建设经历了多个阶段。2017年以前为早期探索阶段，主要聚焦于理论研究和初步应用。2018年至2020年进入试点建设阶段，2020年南方电网完成全网首座数字孪生变电站建设，验证了技术路线的可行性。2021年至2023年进入标准化与推广阶段，相关标准，如《变电站

数字孪生系统架构及数据采集技术导则》发布，技术应用进一步深化。经过几个阶段的发展，各省的电力公司已经在数字孪生变电站的建设上积累了一定的经验。然而，由于缺少顶层设计和统筹规划，数字孪生变电站技术的进一步提升受到限制。数字孪生变电站关键问题分析见表2。

## 2 变电站数字孪生模型基本架构

在第1节的问题剖析基础之上，本文通过制定变电站的数字化设计方案配置文件，建立涵盖二次设备过往记录、即时状态和预测信息的全方位时空模型，以构建一个综合性的数据管理体系<sup>[15]</sup>。该体系致力于融合变电站内部所有主要及辅助设备，以及二次系统全域设备的实时运行状

表1 数字孪生模型特性

特性	描述
实时性	能够即时地反映对应物理对象的实时状态，利用传感器网络汇聚数据并传输给模型，以保证模型与物理对象之间的紧密同步
动态性	能够实时地模拟与预测物理对象在不同环境下的表现特征，依据新获得的数据或事件自动调整，同时实施趋势分析与行为预测，以应对未来的变化
互动性	构建了一个交互性平台，使工作人员能够与模型进行实时互动，包括调整各项参数、模拟运行场景和测试可能的变更，而这一切操作均不会对实际的物理对象造成任何影响
综合性	融合物联网、大数据、云计算、人工智能等前沿科技，打造了一个全面的解决方案，该方案能够模拟、深入分析并优化物理对象的多种性能指标
预测性	通过深入挖掘历史与实时数据，能够准确预测物理对象未来的性能表现及潜在问题，这对于故障预防、维护规划和操作流程优化具有至关重要的作用
个性化	每个数字孪生模型都是根据其对应的物理对象量身定制的，根据对象的独特特性和行为模式进行精确设计，以确保模型的高度准确性和相关性，从而为客户提供定制化的解决方案
可扩展性	该模型具备高度的可扩展性，能够根据实际需求整合多样化的数据源、复杂的分析工具以及先进的模拟技术，以灵活应对物理对象及其运行环境的不断变化
可视化	提供了一个先进的可视化技术平台，为工作人员直观地展示物理对象和运行状态数据，帮助工作人员更深入地理解并辅助做出高效决策

表2 数字孪生变电站关键问题分析

问题分类	问题描述
应用场景问题	尚未形成以业务需求为导向的建设模式，缺少高价值的应用场景。目前，仅实现了设备外观和运行状态的全景展示，以及基础的设备状态评估，但建设水平仍停留在数字化和智能化变电站的初级阶段。尚未充分利用多物理场仿真技术，实现设备状态的深度反演和预测诊断功能
重复建模问题	目前电网各专业基于不同需求提出各自的数字孪生系统架构，因缺乏统一架构和标准化顶层设计，导致模型集成和共享互用性差，存在重复建模和数据开环壁垒问题。亟须规范架构，加强标准化顶层设计，建立统一的数字孪生底座
数据融合问题	实时准确掌握变电站状态需要整合大量不同类型的多模态数据，并应用高效算法和快速仿真。解决数据融合中的格式、协议和时间差异问题，确保数据链路的实时、高效和安全。当前的数据存储、计算资源分配和网络安全难以满足数字孪生变电站需求，亟须加强数字孪生数据基础设施建设，以支持物理和虚拟数据的实时交互

态数据，同时纳入运行记录、维护历史和台账资料等历史信息<sup>[16]</sup>。除此之外，它整合智能录波装置等多元数据来源，以实现跨学科数据的综合集成。

数字孪生模型的基本架构如图1所示。从下到上依次为：感知层、网络层、数据层、平台层和示范应用层。变电站数字孪生业务应用描述见表3。

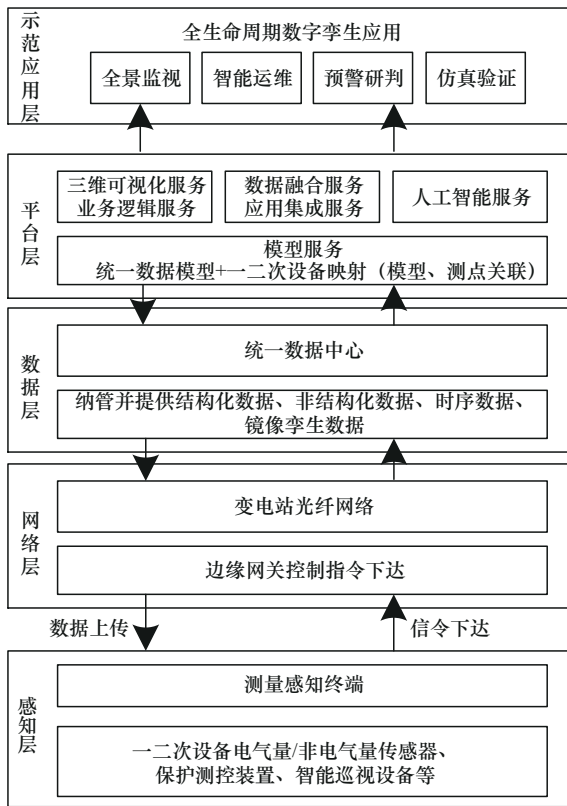


图1 数字孪生模型的基本架构

### 3 变电站三维模型建立

#### 3.1 基于过滤机制的数据预处理

数字孪生技术是一种在信息化平台上，通过数字化手段来建立实际物体的信息和数据的数学模型的方法。本节着重讨论如何应用数字孪生技术对变电站的数据实施采集和预处理工作。数字孪生技术架构如图2所示<sup>[17]</sup>。

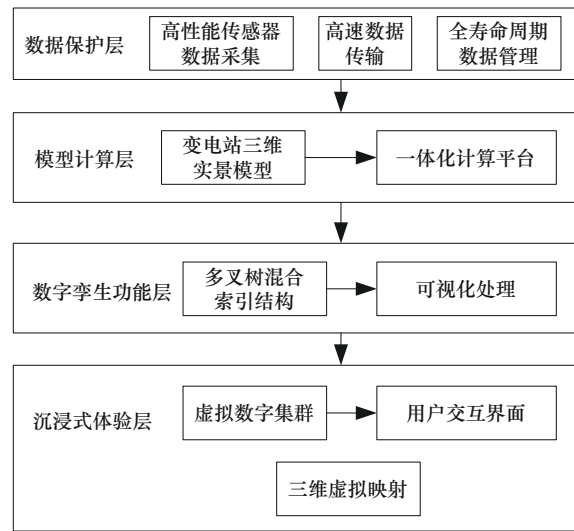


图2 数字孪生技术架构

由于变电站的运作涉及复杂的电力网络和众多的电气设备，因此，需要从不同的角度和层面来收集和分析数据，以确保变电站能够高效、安

表3 变电站数字孪生业务应用描述

层级	功能描述
示范应用层	示范应用层旨在满足变电站二次设备的多元化业务需求，实现设备全生命周期的数字孪生管理。根据不同阶段的具体需求，提供互动式展示，从而有效提升运维效率并加强风险管控。结合智能运维等业务，该应用利用三维可视化技术，能够直观地分析故障的根本原因，迅速定位故障点，并根据诊断结果实施远程控制，满足智能运维检查的高级需求
平台层	作为数字孪生技术的核心支撑，平台层集成了三维可视化、数据整合、业务逻辑处理和人工智能增强功能，全面支持数字施工、验收、运维等关键应用场景的各项需求
数据层	负责提供各类型结构化和其他非结构化数据，涵盖实时与历史两个时间维度的数据以及镜像孪生数据的综合管理与高效访问
网络层	通过创新的边缘网关模块开发，构建了一个连接多个系统并实现数据通信的桥梁。这个桥梁能够使整个领域内的数据实现无缝的接入，意味着数据可以顺畅无阻地在各个系统之间传输。同时，这个系统还确保了控制指令能够准确无误地传达和执行，保证了整个系统的高效和稳定运行
感知层	结合使用各种先进的测量和感知设备来整合电气和非电气的数据信息。这些设备包括传感器和测控保护装置等，它们能够收集和与电气相关的量（比如电压、电流等）和与电气无关的量（比如温度、压力、流量等）。通过这些设备的协同工作，可以实现对一个系统或设备的全面监控和保护



全地运行。这包括但不限于电压、电流、温度等电气参数，以及设备状态、运行环境等信息。

$$U_i = U_{i,x} + U_{i,y} \quad (1)$$

其中， $U_i$ 表示变电站整体的总能量， $U_{i,x}$ 表示变电站内部每个区域的能量计算与实际值之间的差异， $U_{i,y}$ 表示每个区域中能量的实际状态。

在处理点云数据时，经常遇到数据中夹杂着很多无用的信息，如噪声和多余的数据点，这些都可能会影响数据处理的质量和准确性。为了提升数据处理的效率和结果的准确性，本节提出了一种数据过滤机制。该机制的作用就是去除不必要的噪声和多余的点，使最终处理的数据更干净、准确，数据预处理流程如图3所示。

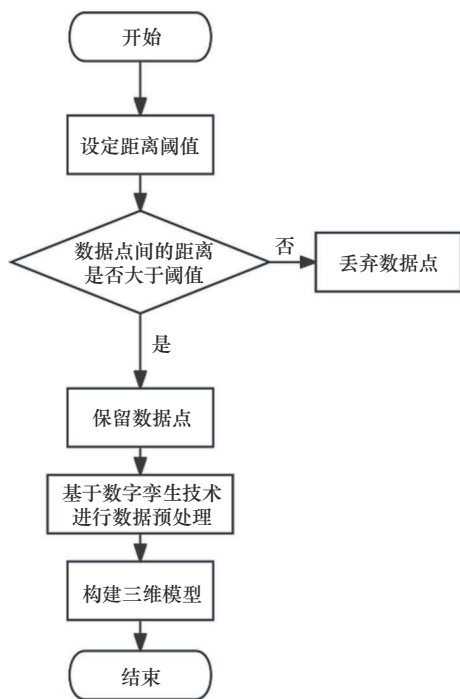


图3 数据预处理流程

首先，为了筛选出有效数据，设定了一个距离阈值，只有当数据点之间的距离大于这个阈值时，才会保留这个数据点。这样做是为了去除那些距离太近、可能不够独立或准确的数据。接着，考虑到变电站数据中存在噪声，使用数字孪生技术来进行数据预处理。数字孪生技术是一种

通过创建虚拟模型来模拟真实世界对象的方法，可以有效地去除噪声，提升数据的精确度和质量。最后，将这些经过预处理的高质量数据用于构建变电站的三维模型，使模型更贴近真实的变电站环境。这样的三维模型对于提高变电站管理的准确性具有重要作用。

### 3.2 基于聚合方法的三维孪生建模

通过将预处理过的数据整合到变电站的三维模型中，可以有效地提高模型的准确性和可靠性<sup>[18]</sup>。为了使模型在使用时更加流畅和高效，采用了聚合方法来创建地物模型，这涉及将多个变电站的三维模型合并，创造出一个更全面、更精确的三维场景模型。

由于变电站在实际运行中缺乏统一的视觉标准规范，部分线路未能充分发挥其实用价值，因此，在数据预处理之后，采用三维模型进行投影处理显得尤为重要<sup>[19]</sup>。投影处理遵循以下具体步骤。

首先，将变电站的所有组成部分按照垂直方向投影到地面上，形成一个封闭的多边形区域，这个区域代表变电站占据的平面空间。接着，对这个多边形区域进行处理，去除它的边缘轮廓和曲线部分，得到一个简化版的模型，能够以正投影的视角呈现，也就是说，从正上方看下去，模型的形状和大小能够直观地反映变电站的平面布局。最后，依据投影所得的最高点来确定模型的高度，并据此计算出目标模型的总体面积。模型算法的详细步骤如图4所示，正投影图生成算法如图4(a)所示，地物模型集群算法如图4(b)所示。

将两个地物模型的面积相加，即可计算出合并后地物模型的总面积。

$$S = S_1 + S_2 \quad (2)$$

其中， $S$ 代表总面积， $S_1$ 和 $S_2$ 分别表示两个模型各自的面积。

在完成数据的聚合整合后，基于加权处理的算法，确定模型的最终高度 $h$ 为：

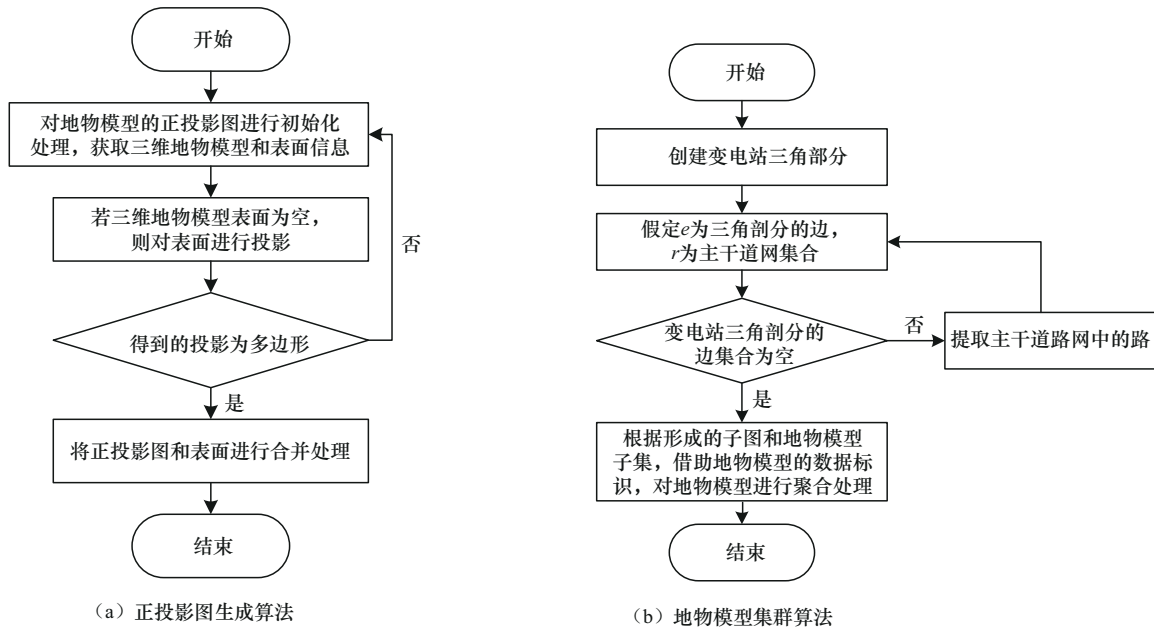


图4 模型算法的详细步骤

$$h = \frac{S(h_1 + h_2)}{U_i} \quad (3)$$

其中， $h_1$  和  $h_2$  为两个模型的高度。

模型中的相对面积参数  $Y$  为：

$$Y = dh \frac{s_{\min}}{s_{\max}} \quad (4)$$

其中， $d$  表示模型间的欧氏距离， $s_{\min}$  表示模型正投影面积的最小值， $s_{\max}$  表示模型正投影面积的最大值。

运用聚合度函数来评估模型是否需执行聚合操作。

$$D = \sqrt{Y + t(s_{\max} - s_{\min})} \quad (5)$$

其中， $t$  表示模型的种类。

如果聚合度值  $D$  未达到预设的阈值标准，则需严格遵循前述的聚合规范来执行相应的聚合操作<sup>[9-10]</sup>；如果聚合度值  $D$  达到或超过该阈值，则无须再进行聚合处理。

建立变电站三维场景模型为：

$$I = \frac{e}{r} D(s, i, h, S, t) \quad (6)$$

其中， $e$  表示三角剖分的边， $r$  表示主干道网集合， $s$  表示三维模型的正面投影图， $i$  表示三维模

型的名称。

完成上述步骤后，采用多叉树混合索引结构来整合场景数据，并对地物模型进行可视化优化<sup>[20]</sup>。具体操作流程如下：首先，将复杂的三维场景模型表示为多叉树结构。然后通过算法计算场景中各个元素到观察点（视点）的距离。如果某个元素到观察点（视点）的距离小于预设的阈值，说明这个元素在视图中足够近，需要被渲染。此时需构建一个场景树，对场景树中的每个节点（即场景中的各个元素）进行遍历，确保所有需要显示的元素都被考虑到。最后，遍历完成后，将这些元素渲染成三维图像，实现变电站的三维可视化展示。

## 4 算例分析

以某 500 kV 变电站为例，应用 Autodesk 3DS Max 建模软件和 MATLAB 数据仿真工具，对本文所提的三维建模方法开展建模验证。

### 4.1 有效性及快速性验证

三维建模效果对比如图 5 所示，展示了变电站的真实场景图像与通过本文提出的方法构建的



三维场景模型。从图5中可以看出,本文所提方法能够有效地消除背景干扰,准确地恢复变电站场景中各个虚拟实体的形状、接线布局 and 它们的相对位置。

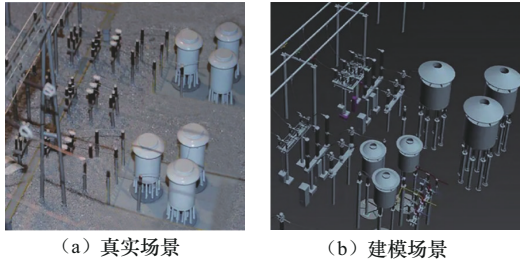
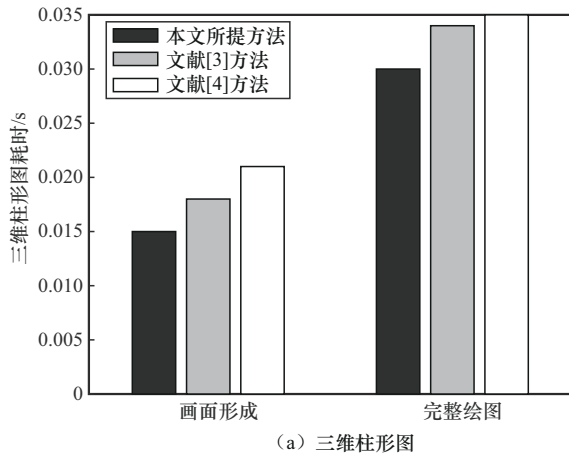
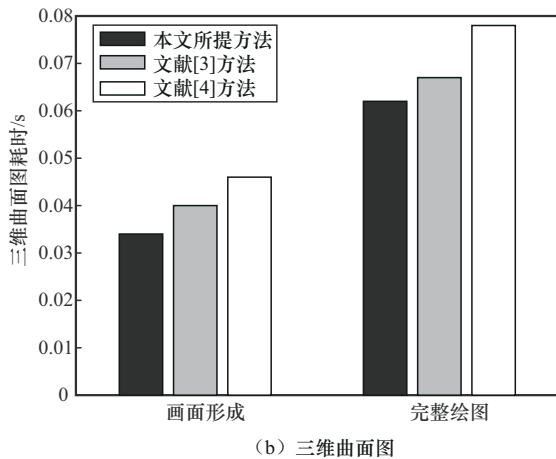


图5 三维建模效果对比

对厂站电压幅值的测量结果开展对比测试,对比不同算法下的测量消耗时长,不同绘图方法的耗时对比如图6所示。



(a) 三维柱形图



(b) 三维曲面图

图6 不同绘图方法的耗时对比

图6的数据显示,本文所提方法在厂站电压幅值的可视化显示上耗时最短,其次是文献[3]所提的方法,而文献[4]的方法耗时最长。这表明,本文所提方法能够以更高的效率完成变电站的三维建模,且具有有效性。

#### 4.2 模型状态评估可靠性验证

以某故障变压器设备为例,对于变压器高压和低压绕组异常的情况,分别使用基于随机矩阵理论的评估方法和数字孪生评估模型与原测量值进行对比分析,不同方法下的变压器绕组响应值对照见表4。

表4 不同方法下的变压器绕组响应值对照

评估方法	绕组类型	响应最大值/dB	响应最小值/dB
实测值	高压绕组	5	-70
	低压绕组	-2	-46
基于随机矩阵理论的评估方法	高压绕组	2	-65
	低压绕组	-27	-61
数字孪生评估模型	高压绕组	5	-71
	低压绕组	-2	-47

表4的比对分析结果显示,采用数字孪生评估模型所得到的变压器绕组响应结果与真实数值之间的最大误差为1 dB。而基于随机矩阵理论的评估方法的评估值与真实值存在较大的差异,说明使用本文所提的数字孪生模型的评估结果更精准。

## 5 结束语

本文提出了一种创新的变电站三维实景建模方案,即运用前沿的数字孪生技术,针对传统三维建模过程中耗时长的痛点,巧妙借助数字孪生技术,实现了数据的迅速采集与高效预处理,显著地缩短了建模周期。此外,方案还融入了先进的聚合技术,以精确构建变电站地物模型,进一步提升了建模效果。所提的建模方法能够生成高精度的三维模型,同时大幅地缩短可视化展示的时间,并实现对故障的高度可靠评估。

## 参考文献:

- [1] 李奕炜, 骆立实, 赵波, 等. 基于YOLO v8算法的变电站视频监控多目标智能跟踪技术[J]. 电信科学, 2025, 41(3): 179-189.  
LI Y W, LUO L S, ZHAO B, et al. Multi object intelligent tracking technology for substation video surveillance based on YOLO v8 algorithm[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(3): 179-189.
- [2] 郭江涛, 王涛, 贾俊强, 等. 基于数字孪生技术的变电站巡检路径冲突检测研究[J]. 电子设计工程, 2024, 32(9): 101-104, 109.  
GUO J T, WANG T, JIA J Q, et al. Research on route conflict detection of substation inspection based on digital twin technology[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(9): 101-104, 109.
- [3] 何业慎, 梁琨, 谭威, 等. 基于物联网技术的智能变电站安防监控系统[J]. 电信科学, 2018, 34(9): 179-185.  
HE Y S, LIANG K, TAN W, et al. Security monitoring system of intelligent substation based on IoT[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(9): 179-185.
- [4] 杨梓瀚. 一种基于倾斜摄影的变电站三维实景建模方法[J]. 电子测试, 2022(9): 126-128.  
YANG Z H. A 3d real-scene modeling method for substation based on tilt photography[J]. Electronic Test, 2022(9): 126-128.
- [5] 张恬波, 姜雄伟, 陈孝信, 等. 变电站数字孪生框架构建与关键技术研究[J]. 机械设计, 2024, 41(S1): 171-176.  
ZHANG T B, JIANG X W, CHEN X X, et al. Research on digital twin frame construction and key technologies of substation[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(S1): 171-176.
- [6] 孙林. 基于人工智能技术的变电站二次设备智能巡检技术[J]. 通讯世界, 2024, 31(8): 100-102.  
SUN L. Intelligent inspection technology of secondary equipment in substation based on artificial intelligence technology[J]. Telecom World, 2024, 31(8): 100-102.
- [7] 卢乾坤. 人工智能技术视角下变电站二次设备智能巡检技术[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(19): 171-174.  
LU Q K. Intelligent inspection technology of secondary equipment in substation from the perspective of artificial intelligence technology[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(19): 171-174.
- [8] 张威. 人工智能技术在变电站运维管理中的应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024(7): 227-229.  
ZHANG W. Research on application of artificial intelligence technology in substation operation and maintenance management[J]. Electrical Equipment and Economy, 2024(7): 227-229.
- [9] TAO F, ZHANG M, LIU Y, CHENG Y. Digital twin and its applications to manufacturing. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2406-2417.
- [10] SCHROEDER G, STEINMETZ C, TATGE N. Digital twin in production: benefits and challenges. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(13): 13-18.
- [11] 邓彬, 张宗包. 基于变电站机房室内外一体的建模技术研究[J]. 中国测试, 2023, 49(S1): 158-162.  
DENG B, ZHANG Z B. Research on modeling technology based on indoor and outdoor integration of substation computer room[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(S1): 158-162.
- [12] 曹凯, 李波, 马玉慧, 等. 基于三维建模技术的交流变电站无人机飞行安全策略[J]. 机械与电子, 2024, 42(12): 55-60.  
CAO K, LI B, MA Y H, et al. Unmanned aerial vehicle flight safety strategy for AC substations based on 3D modeling technology[J]. Machinery & Electronics, 2024, 42(12): 55-60.
- [13] 张冀, 马也, 张荣华, 等. 数字孪生变电站框架设计与关键技术研究[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(6): 15-30.  
ZHANG J, MA Y, ZHANG R H, et al. Framework design and key technology research of digital twin substation[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(6): 15-30.
- [14] 王璐, 苗淞. 基于数字孪生技术的变电站智能管理与运维优化研究[J]. 电工电气, 2024(5): 69-73.  
WANG L, MIAO S. Research on substation intelligent management and operation and maintenance optimization based on digital twin technology[J]. Electrotechnics Electric, 2024(5): 69-73.
- [15] 刘志仁, 曹海欧, 俞力珉, 等. 数字孪生驱动的主设备保护状态判别专家模型构建方法[J]. 电气工程学报, 2014, [2024-08-09].  
LIU Z R, CAO H O, YU L M, et al. Construction method of expert model for main equipment protection status discrimination driven by digital twins[J]. Journal of Electrical Engineering, 2014, [2024-08-09].
- [16] 涂潜, 李俊, 范东亮, 等. 面向数字孪生的变电站三维场景自动目标识别[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2594-2601.  
TU Q, LI J, FAN D L, et al. Automatic target recognition of



substation 3D scene for digital twin[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2594-2601.

- [17] ZHENG X, ZHANG H H, SHI J Y. Application based on artificial intelligence in substation operation and maintenance management[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 7509532.

- [18] 周达明. 智能变电站继电保护数字孪生仿真推演与状态预测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

ZHOU D M. Research on digital twin simulation deduction and state prediction technology of relay protection in smart substation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

- [19] 张一茗, 金喜洋, 李少华, 等. 面向数字孪生的变电站开关设备综合监测系统设计[J]. 高压电器, 2024, [2024-03-19].

ZHANG Y M, JIN X Y, LI S H, et al. Design of comprehensive monitoring system for substation switchgear for digital twins[J]. High Voltage Apparatus, 2024, [2024-03-19].

- [20] 高赛. 数字孪生的变电站巡检系统数字化模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.

GAO S. Digital twin digital model of substation inspection system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

### [作者简介]



高杨 (1979-), 男, 博士, 国网冀北电力有限公司经济技术研究院高级工程师, 主要研究方向为变电设计、继电保护与控制、电力系统自动化、智能电网、数字化技术。

赵旷怡 (1988-), 女, 国网冀北电力有限公司经济技术研究院高级工程师, 主要研究方向为电力系统通信设计。

付玉红 (1988-), 女, 国网冀北电力有限公司经济技术研究院高级工程师, 主要研究方向为变电站工程设计、三维设计、智能设计。

张金伟 (1985-), 女, 国网冀北电力有限公司经济技术研究院高级工程师, 主要研究方向为变电站工程设计。

刘洪雨 (1992-), 男, 国网冀北电力有限公司经济技术研究院工程师, 主要研究方向为变电站结构设计。

郭嘉 (1989-), 男, 国网冀北电力有限公司经济技术研究院高级工程师, 主要研究方向为输电线路设计、输电新技术。