

基于数字孪生技术的变电站 三维可视化技术研究

谢宗喜^{1†}, 章婷²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 国网咸宁供电公司, 湖北 咸宁 437100)

摘 要:针对变电站三维可视化中变电站三维模型精确度低、数据计算复杂、建模效率不高的问题,提出了一种基于数字孪生技术的变电站三维可视化框架。设计一种同步采样装置应用到变电站数据采集单元,简化数据处理;利用希尔伯特-黄变换提取变电站设备特征,通过改变人工神经网络(ANN)结构进行改进,改进后的 ANN 模型根据设备特征进行设备识别;基于数字孪生技术构建变电站三维模型,通过多叉树和渲染实现变电站三维可视化。实验表明:本文方法的变电站三维建模精确度为 99.3%,比基于建筑信息模型的变电站三维建模精确度高 1.8%,比基于电网信息模型的变电站三维建模精确度高 1.7%,本文方法具有优越性。

关键词:数字孪生技术;变电站三维可视化;变电站三维建模;变电站设备特征

中图分类号:TP13

文献标识码:A

Research on 3D Visualization Technology of Substation Based on Digital Twin Technology

XIE Zongxi¹, ZHANG Ting²

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. State Grid Xianning Power Supply Company, Xianning, Hubei 437100, China)

Abstract: In view of the problems of low accuracy of substation 3D model, complex data calculation and low modeling efficiency in substation 3D visualization, this paper proposes a framework for substation 3D visualization based on digital twin technology. A synchronized sampling device is designed to be applied to the substation data acquisition unit to simplify data processing; the substation equipment features are extracted using the Hilbert-Huang transform, and the ANN is improved by changing the structure, and the improved ANN model carries out the equipment identification according to the equipment features; based on the figure double technique construct the 3D model of substation, and realize the 3D visualization of substation through multinomial tree and rendering. Experiments show that the accuracy of substation 3D modeling of this paper's method is 99.3%, which is 1.8% higher than that of substation 3D modeling based on building information model, and 1.7% higher than that of substation 3D modeling based on grid information model, and this paper's method is superior.

Key words: digital twin technology; three dimensional visualization of substations; three dimensional modeling of substations; characteristics of substation equipment

变电站是电网稳定安全运行的重要影响因素, 变电站三维可视化可以全方位的监控变电站,使得

工作人员能快速响应各种情况,维护电网正常运行。

文献[1]和[2]对变电站数据进行编码,采用 ArcGIS 软件提供变电站内设备坐标,3DMAXS 软件建立变电站三维模型,通过色调—色饱和度—亮度算法处理变电站三维模型,最后对模型进行渲染,实现变电站三维可视化。该方法建模精度高但数据处理复杂。文献[3]采集变电站激光点云数据并进行数据处理,采用四元素法转换变电站激光点云数据坐标,3DMAXS 软件建立变电站三维可视化模型,通过可视化浏览器查看。该方法建模效率较高但建模精度易受环境影响。文献[4]构建变电站三维可视化系统框架,通过集成建筑信息模型与物联网传感设备采集的数据,实现了变电站三维场景可视化。该方法建模效率较高但具有依赖性,存在兼容性问题。文献[5]利用改进深度残差网络重建白噪声信号的波形图像,改进双向门控循环单元结构,识别变电站设备信号。利用 3DMAXS 软件建立变电站三维模型,通过色调—色饱和度—亮度算法对变电站三维模型的颜色进行处理,实现变电站三维可视化。该方法适用范围广但计算复杂。

本文设计一种基于数字孪生技术的变电站三维可视化技术,设计一种同步采集装置提高变电站数据采集准确性与实时性;将其通过数据传输通信单元传输到设备识别单元进行识别;利用数字孪生技术中的非统一均分有理性 B 样条(Non-Uniform Rational B-Splines,NURBS)曲面重构法对变电站进行三维建模,通过多叉树混合和渲染完成变电站三维可视化。

1 变电站三维可视化总体设计

数字孪生技术是利用物理模型和数据,集成多物理量的仿真过程。变电站三维可视化是指将变电站内的数据点转换为可视化的三维空间的立体模型。本文提出一种基于数字孪生技术的变电站三维可视化框架,包含了变电站数据采集与传输、变电站三维建模和变电站三维可视化三个模块,每个模块由不同技术实现。基于数字孪生技术的变电站三维可视化框架如图 1 所示。

利用传感器和电压、电流互感器等采集工具经数据采集与传输模块中的采集单元采集变电站数据[6],采集单元内有本文设计的同步采样装置,以提高变电站设备数据的准确度和采集效率。按照通信协议经数据采集与传输模块的传输与通信单元传输至卫星发射端;卫星发射端发射变电站设备数据报文信息,接收端接收信息;变电站设备识别模块采用希尔伯特—黄变换提取设备特征,利用改

进人工网络识别变电站设备;根据数字孪生技术原理,利用 NURBS 曲面重构法构建变电站三维模型[7-8],经渲染和多叉树重构,最终实现变电站三维可视化。

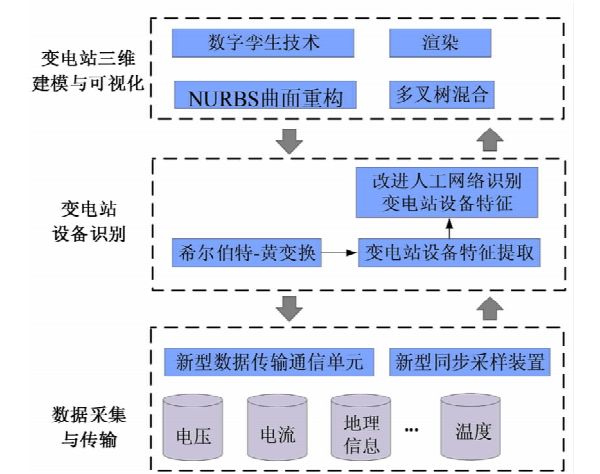


图 1 基于数字化孪生技术的变电站三维可视化框架

2 变电站数据采集与传输

为实现电站数字孪生模型的构建和三维可视化,需实时采集、传输变电站内设备与线路数据。

在进行变电站数据实时采集时,易产生变电站数据误差。因此,本文设计一种同步采样装置,降低变电站数据实时采集误差。本文设计的同步采样装置的结构如图 2 所示。

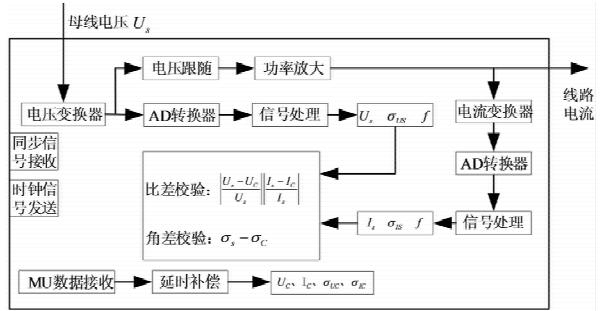


图 2 采样同步装置

在同步采样装置中输入传感器采集到的变电站母线电压信号,进行信号处理,获得信号的电压、频率、幅值信息;将获得的信息分为 2 路进行处理,一路为校验值,进行模数转化和信号处理[9];另一路对信号采用电压跟随,通过功率放大、电流变化和模数转换后,将信号调制成频率、相位相同后,输出到同步采样装置的合并单元进行合并;对合并单元电压、电流信号进行延时补偿;分析装置内合并单元的报文,完成校验,实现变电站数据实时采集

的同步性。

为增强变电站数据传输通信能力,本文设计一种新型数据传输通信单元,该单元主要包括卫星发射端和接收段。经同步采样装置采集到变电站数据后,对数据进行二进制转换,经数据传输通信单元传输至卫星发射端,接收端接收发射端传输的报文信息并进行分析^[10],得到变电站的相关信息。本文监测识别模块中数据传输通信单元结构如图 3 所示。

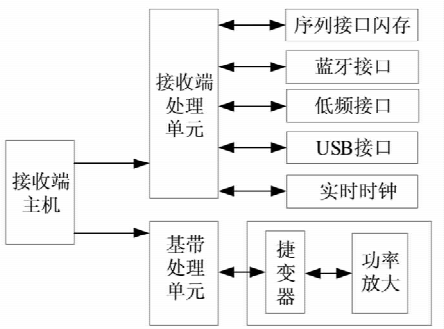


图 3 数据传输通信单元结构图

接收端主机可进行数据接收与发送,由基带处理单元和接收端处理单元组成。接收端接收卫星发射端发送的报文信息,经基带处理单元传送到频率捷变器^[11]。频率捷变器将报文信息对应的变电站数据经射频天线传送到接收端。接收端接收完数据后,将解码后的数据通过 USB 接口发送到用户端。

3 变电站设备识别

本文设计一种基于希尔伯特-黄变换(Hibert-Huang Transform,HHT)和改进 ANN 模型的变电站设备识别方法。通过数字孪生技术学习变电站电子设备数据,利用 HHT 对变电站设备数据进行提取,建立变电站电子设备特征知识图谱;利用改进 ANN 模型对变电站电子设备进行识别,便于后续变电站三维可视化的实现^[12-13]。HHT-改进 ANN 模型还可以用于变电站设备的故障诊断。

本文利用 HHT 提取变电站设备报文信息中的电气量特征,设正序电流即为变电站设备的综合电流 I_h ,可表示为:

$$I_h = \frac{1}{3} [1 \quad \beta \quad \beta^2] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, I_a 、 I_b 、 I_c 分别为变电站设备报文信息的三相电流; $\beta = e^{\frac{2\pi j}{3}}$ 。

先对 t 时刻第 n 个变电站设备报文信息的综

合电流 $I_{h_n}(t)$ 的原始信号进行经验模态分解,然后对分解后的固有模态函数(Intrinsic Mode Function,IMF)进行 HHT 变换,得到重构后的信号。

$$G(t) = f(t)e^{j\vartheta(t)} \quad (2)$$

式中, $f(t)$ 为幅值; $\vartheta(t)$ 为相角。

利用式(2)可得出经 HHT 变换后, t 时刻第 n 个变电站设备报文信息的综合电流 $I_{h_n}(t)$ 的瞬时频率为:

$$\omega(t) = \frac{d\vartheta(t)}{dt} \quad (3)$$

式中, $\vartheta(t)$ 为相角; $\omega(t)$ 为变电站设备的特征。

传统人工神经网络在面对复杂模式时,难以捕捉数据的非线性特征,存在预测误差^[14]。本文改变 ANN 的拓扑结构,增加 2 个特征输入量,改进后的 ANN 结构如图 4 所示。

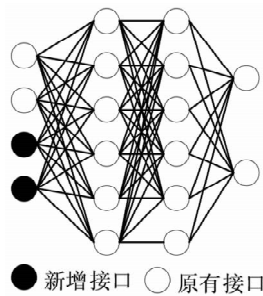


图 4 改进后的 ANN 结构

本文设计的基于 HHT 特征提取和改进 ANN 模型的变电站设备识别框架如图 5 所示。

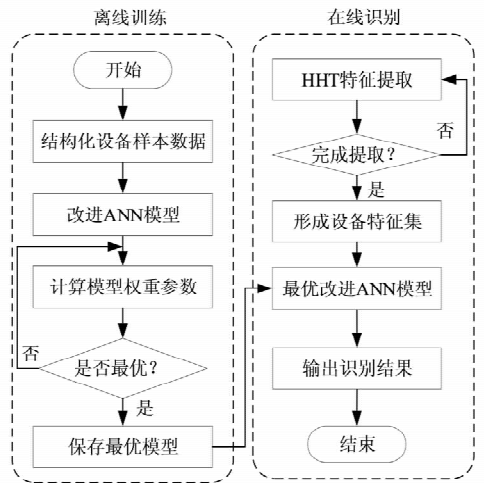


图 5 变电站电子设备识别框架图

4 变电站三维可视化

利用数字孪生技术构建变电站三维模型是实现变电站三维可视化的基础,通过本文第 2 章节得到变电站数据并经由第 3 章节识别后,选用非统一均分有理性 B 样条(NURBS)曲面重构方法,对变电站实体进行虚拟建模,得到变电站三维模型^[15-16]。

NURBS 曲线有 3 种表示方法,本文选用分式表示:

$$p(t)=\frac{\sum_{i=0}^n\sum_{j=0}^mN_{ij,s}(t)\eta_{ij}P_{ij}}{\sum_{i=0}^n\sum_{j=0}^mN_{ij,s}(t)\eta_{ij}},t\in[0,1] \quad (4)$$

式中, P_{ij} 为控制点, $i=0,1,\cdots,n,j=0,1,\cdots,m$; η_{ij} 为权因子, $i=0,1,\cdots,n,j=0,1,\cdots,m$; $\eta_0=\eta_n=\eta_j=1$ 时, NURBS 曲线为标准 NURBS 曲线,其余为非标准 NURBS 曲线; $N_{ij,s}(t)$ 为节点矢量的 s 次规范 B 样条基函数。

利用八叉树将变电站实体部分对应的孪生数据分为多个区域,通过 NUBRS 曲面重构法拟合这些区域的孪生数据,最后采用四叉树数据结构合并各拟合曲面,完成变电站三维建模。具体过程如下。

设变电站数据点为 $r(x,y,z)$, 八叉树结点编码为 $w=w_0,w_1,\cdots,w_{i-1}$, 空间索引值为 (a,b,c) , 计算该变电站数据点的八叉树结点的坐标:

$$\begin{cases} a=\sum_{i=1}^{n-1}(w_i\text{mod }2)\times2^i \\ b=\sum_{i=1}^{n-1}\left(\left\lceil\frac{w_i}{2}\right\rceil\text{mod }2\right)\times2^i \\ c=\sum_{i=1}^{n-1}\left(\left\lceil\frac{w_i}{4}\right\rceil\text{mod }2\right)\times2^i \end{cases} \quad (5)$$

式中, mod 为取余运算; w_i 为八叉树结点 i 的编码。将八叉树 4 个叶结点当作 NURBS 曲面重构的控制点,并使用样条基函数的插值处理获取。

为更准确构建变电站三维模型^[17-20],采用多次均匀 B 样条得到变电站各孪生区域曲面,设变电站实体部分对应的孪生数据区域曲面的采样点集合中,存在某点为 $k_s(x_s,y_s,z_s)$, $x_s\in[a,a+1]$, $y_s\in[b,b+1]$,则控制点可使式(6)成立:

$$z(z_s,y_s)=\sum_{i=a-1}^{a+2}\sum_{j=b-1}^{b+2}B_i(x_s)B_j(y_s)p_{ij} \quad (6)$$

式中, B_i 、 B_j 均为样条基函数。

当控制点满足式(6)时,计算控制点:

$$\begin{cases} \min\sum_{i=a-1}^{a+2}\sum_{j=b-1}^{b+2}(p_{ij})^2 \\ p_{ij}=\frac{B_i(x_s)B_j(y_s)k_s}{\sum_{i=a-1}^{a+2}\sum_{j=b-1}^{b+2}B_i(x_s)B_j(y_s)p_{ij}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, B_i 、 B_j 均为样条基函数; p_{ij} 为控制点。

通过式(4)~式(7)构建变电站孪生数据曲面后,每 4 个曲面可组成 1 个四叉树的叶结点,经后序遍历遍历完所有四叉树,合并各变电站孪生数据曲面并拼接,实现变电站三维模型的构建^[21]。最后采用 Unity3D 引擎对变电站三维模型进行渲染,提高变电站三维模型的仿真效果。选用多叉树混合结构对变电站三维模型进行可视化处理。

5 应用与分析

实验操作系统为 Windows11,程语言为 python,处理器为 Intel i9-10900X,内存为 64.0 GB,显卡为英伟达 GPU NVIDIA L20 48G,MATLAB 仿真软件。实验环境如图 6 所示。



图 6 实验环境图

本文实验对象为某 500 kV 变电站,该变电站共 300 个实验样本,包括断路器、避雷针、电压/电流互感器等。最优改进 ANN 模型的参数见表 1。

表 1 最优改进 ANN 模型参数

参数	数值
输入层神经元数量	414
隐藏层神经元数量	512
输出层神经元数量	60
隐藏层层数	1
学习率	0.03
Dropout	0.1
损失函数	交叉熵

为验证本文设计的同步采样装置的可靠性,利用仿真软件搭建同步采样装置。设母线和线路 L_1 正常,线路 L_2 停电,输入不同频率的信号到同步采样装置进行实验,记录比差和角差^[22-23]。根据规范要求,判断本文同步采样装置的可靠性,实验数据记录见表 2。

表 2 同步采样实验结果			
频率/Hz	数据项	最大比差/%	最大角差/%
45	U	-0.201	-10.302
	I	-0.208	-11.417
48	U	-0.187	-10.312
	I	-0.165	-9.127
51	U	-0.139	-8.769
	I	0.177	-9.325
54	U	-0.191	-9.564
	I	-0.201	-10.876
57	U	-0.264	-11.691
	I	-0.283	-11.992

规范要求频率改变 $\pm 10\%$ 时,被测电压和电流的最大误差应小于其准确度等级误差限值的一半。由表 2 数据可知,不同频率的同步采样结果存在误差,但误差符合规范要求,因此,本文设计的同步采样装置具有可靠性与实用性。

选取 3 张变电站二维图像的前视图($U_1 \sim U_3$)和 3 张变电站实时监测的前视图($V_1 \sim V_3$),采用 HHT 进行特征提取。设边缘像素数 λ 、4 连同域数 γ 、8 连同域数 ϵ 为特征提取的评价指标,特征提取结果见表 3。

表 3 变电站图像特征提取结果					
图像编号	λ	γ	ϵ	$\frac{\epsilon}{\lambda}$	$\frac{\epsilon}{\gamma}$
U_1	12365	48546	1463	0.1183	0.0301
U_2	18653	20645	1503	0.0806	0.0728
U_3	13482	5288	921	0.0683	0.1741
V_1	11656	11574	998	0.0856	0.0862
V_2	12741	13546	1435	0.1058	0.1059
V_3	13658	22566	1402	0.1026	0.0621

由表 3 可知,利用 HHT 对变电站二维图像的前视图和变电站实时监测前视图进行特征提取后,图像的 $\frac{\epsilon}{\lambda}$ 最高为 0.1183,最低为 0.0683, $\frac{\epsilon}{\gamma}$ 值最高为 0.1741,最低为 0.0301。表明本文变电站三维可视方法的特征提取效果较好。

利用 HHT 提取变电站电子设备的特征后,根

据特征利用改进 ANN 模型对变电站电子设备进行识别,其中避雷器的识别结果如图 7 所示。

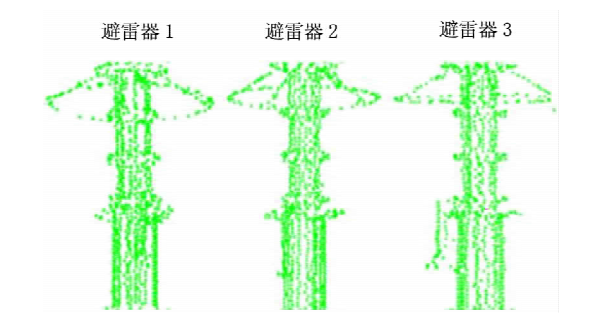


图 7 避雷器的识别结果

根据变电站电子设备识别结果,利用 NURBS 曲面重构法对变电站进行三维建模,建模结果如图 8 所示。

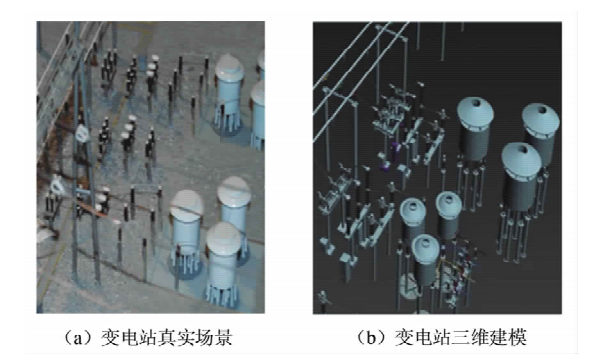


图 8 变电站三维建模结果

对变电站三维模型进行渲染,增强三维模型的真实感。以变电站中断路器为例,断路器三维模型的前、后渲染对比结果如图 9 所示。

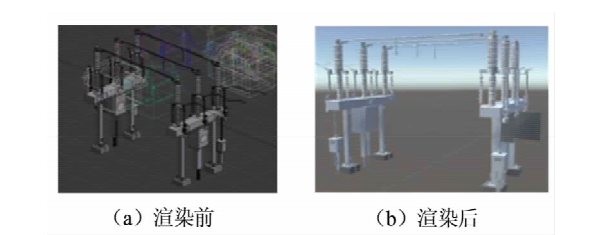


图 9 断路器三维模型前、后渲染对比

基于上述实验过程最终完成变电站三维可视化,登录用户端即可观测,可视化结果如图 10 所示。

由图 7~图 10 可知,本文迭代下的变电站三维可视化结果清晰、变电站三维建模精度较高。

为验证本文方法的优越性,利用本文方法与基于建筑信息模型的变电站三维可视化技术、基于电网信息模型的变电站三维可视化技术分别对某 500 kV 变电站进行三维可视化,实验对比结果见表 4。



图 10 变电站三维可视化结果

表 4 不同方法下变电站三维可视化结果

指标	变电站三维可视化技术		
	本文方法	基于建筑信息模型	基于电网信息模型
精确度/%	99.3	97.5	97.6
耗时/s	0.83	0.15	0.17

由表 4 可知,采用本文方法对变电站三维可视化的准确率最高,为 99.3%;可视化显示耗时最低,为 0.83s。相比于基于建筑信息模型的变电站三维可视化技术和基于电网信息模型的变电站三维可视化技术,本文方法在变电站三维可视化方面更优越。

6 结 论

提出了一种基于数字孪生技术的变电站三维可视化方法。基于同步采样装置、HHT 特征提取、改进人工网络模型和 NURBS 曲面重构等技术,利用数字孪生技术构建变电站三维模型,实现变电站三维可视化。本文设计的基于数字孪生技术的变电站三维可视化方法只立足于当下研究,后续仍需改进。

参考文献

[1] 刘成林,金连文,白翔,等. 文档智能分析与识别前沿:回顾与展望[J]. 中国图象图形学报,2023,28(8):2223—2252.

[2] 李伟,周晓虎,宋勤. 基于多源数据融合的变电站三维可视化模型设计[J]. 制造业自动化,2021,43(9):20—2365.

[3] 李翠翠,李飞,李瀚源. 基于激光点云数据的建筑物三维可视化系统[J]. 激光杂志,2024,45(4):243—247.

[4] LUO X, MAO H, WANG F, et al. Development and application of three-dimensional visualization system for substation construction control based on “BIM+ Smart site” technology[C]//2021 4th International Symposium on Traffic

Transportation and Civil Architecture (ISTTCA). IEEE, 2021: 410—417.

[5] ZHANG C, CHANG X, CHANG J, et al. A three-dimensional dynamic modeling method for substation GIS equipment based on improved Res-BiGRU model[C]//Fourth International Conference on Mechanical, Electronics, and Electrical and Automation Control (METMS 2024). SPIE, 2024, 13163: 995—1000.

[6] ZHANG H, XU C, SHI C, et al. HSCA-Net: a hybrid spatial-channel attention network in multiscale feature pyramid for document layout analysis[J]. Journal of Artificial Intelligence and Technology, 2023, 3(1): 10—17.

[7] 赵雪峰,侯笑,孙哲,等. 基于熵权-AHP 与云模型的国产 BIM 建模软件多维度评价研究[J]. 计算机科学,2023,50(S1): 892—900.

[8] 王浩森,桑胜举,段晓东,等. 虚拟现实环境下的协同式三维建模方法[J]. 图学学报,2024,45(1):169—182.

[9] 郝金鹏,坎标. 基于点阵激光的弱纹理对象三维建模研究[J]. 仪表技术与传感器,2024(10):100—104.

[10] 赵不机. 激光点云语义与结构参数提取方法及三维建模应用研究[J]. 测绘学报,2024,53(10):2040—2040.

[11] 黄凯歌,惠延波,刘永刚,等. VR 交互式三维虚拟起重装备建模与仿真[J]. 计算机工程与应用,2024,60(7):204—211.

[12] HU C, XIE F, CAI L, et al. A 3D modeling method for substations[C]//The Proceedings of 2023 4th International Symposium on Insulation and Discharge Computation for Power Equipment (IDCOMPU2023), 2023, 1102: 51.

[13] SHI Z, WU D, WANG Y, et al. Research on the construction of substation equipment model library based on BIM three-dimensional modeling [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 692(2): 022066.

[14] WANG D H, HAN G C, FAN Z Z, et al. Key technology research of VR-Based substation practice teaching system [C]//Chinese Intelligent Systems Conference. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 291—303.

[15] 陈浩楠,朱映映,赵骏骐,等. 基于多模态关系建模的三维形状识别方法[J]. 软件学报,2024,35(5):2208—2219.

[16] 王庭松,惠小东,曾乔迪,等. 基于改进 ICP 算法的变电站设备三维识别方法研究[J]. 电测与仪表,2024,61(5):65—70.

[17] 于虹,龚泽威一,张海涛,等. 基于 Faster R-CNN 算法的变电站设备识别与缺陷检测技术研究[J]. 电测与仪表,2024, 61(3):153—159.

[18] 朱艳冰. GeoSLAM 激光点云的三维可视化数字影像融合目标细部重建[J]. 激光杂志,2024,45(7):233—239.

[19] 李翠翠,李飞,李瀚源. 基于激光点云数据的建筑物三维可视化系统[J]. 激光杂志,2024,45(4):243—247.

[20] 刘曰木,翟强顺,乔江,等. 三维可视化孪生系统在青龙寺洗煤厂的建设研究[J]. 煤炭工程,2024,56(8):190—196.

[21] KOVAEV N, GAVRI M, LENDÁK I. Algorithm for visualizing substation areas in electric power systems[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 212: 118733.

[22] 任春光,孟长虹,史卓鹏,等. 智能变电站施工控制的三维可视化系统研究和设计[J]. 制造业自动化,2023,45(9):79—83.

[23] 章剑光,陈晓宇,朱松涛,等. 基于 GIM 模型的智能变电站二次回路三维可视化系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(19):179—186.