

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0078-05

基于八叉树的电网三维虚拟可视化系统设计

谢丹, 张召环, 陈庆伟, 胥金坤, 王文洋

(国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021)

摘要: 为了提升电网企业电力系统运行安全的安全性, 提出了基于八叉树的电网三维虚拟可视化系统设计方案。利用文件型地理数据库对整个系统的空间数据进行集成存储与规范化管理, 并在三维场景中构建对应的可视化图层。通过拓扑部件生成设备框架图、网络拓扑图, 在实例化的逻辑节点中加入三维虚拟元素, 获得不同级别的加载协议。自适应规则约束电网三维虚拟化, 将数据存储至八叉树纹理结构内, 分割出不同的子域, 改进三维虚拟原体块数据积累的光强积分, 增加三维虚拟可视化系统性能。实验结果表明, 该方法识别精度在95%以上, 准确率高于其他方法, 能够精准呈现出电网部件形态, 方便判断故障从而及时做出应对措施, 确保电网工作稳定。

关键词: 八叉树算法; 电网三维虚拟; 可视化系统; 传输函数; 数据虚拟

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0078-05

Design of power grid 3D virtual visualization system based on octree

XIE Dan, ZHANG Zhaohuan, CHEN Qingwei, XUN Jinkun, WANG Wenyang

(Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, Shandong, China)

Abstract: In order to enhance the safety of power system operation in power grid enterprises, a design scheme for a three-dimensional virtual visualization system of power grid based on octree is proposed. It integrates, stores, and standardizes the spatial data of the entire system using a file based geographic database, and constructs corresponding visualization layers in the 3D scene, eneralates device framework diagrams and network topology diagrams through topological components, adds 3D virtual elements to instantiated logical nodes, and obtains loading protocols at different levels. It also daptives rules constrain the 3D virtualization of the power grid by storing data in an octree texture structure, segmenting different subdomains, improving the light intensity integration of 3D virtual primitive block data accumulation, and enhancing the performance of the 3D virtual visualization system. The experimental results show that the recognition accuracy of this method is over 95%, and the accuracy is higher than other methods. Being able to accurately present the form of power grid components, facilitating fault diagnosis and timely response measures, ensuring stable operation of the power grid.

Keywords: octree algorithm; three-dimensional virtual power grid; visualization system; transfer function; data virtual

随着我国电力市场的迅速发展, 电网的规模越来越大, 组成越来越复杂, 管理工作也越来越困难, 人力、物力的消耗也越来越大。面临这样的困境, 电力行业迫切需要找到更新颖^[1]、更有效的解决方案、方法和工具。而智能化电网的信息可视化系统, 不仅能够实现对电网的实时监测, 而且能够确保电力网络的安全、可靠地工作。为此, 电网信息三维虚拟可视化技术成为电力市场发展的一项关键技术^[2], 受到了电力公司和科研人员的广泛关注。

国外电网三维虚拟可视化系统偏向于商业化, 对自然、地理环境要求较高, 应用范围存在局限性; 国内电网三维虚拟可视化系统缺乏交互与场景呈现的能力, 导致工业领域的发展进程迟缓。例如, 章剑光等^[3]以广义集成 (generalized integrated model, GIM) 模型为基础, 设计了一

套智能化变电站二次环的三维可视化系统。主要包括, 系统的硬件部分、核心处理器、变压器取样等; 系统级软件承担着多项关键功能, 涵盖空间数据的整合与管控、几何要素的相交运算、模型裁剪处理以及模型精准匹配等。借助 GIM 架构搭建时序模型, 进而生成面向智能变电站二次回路的三维可视化图层, 以直观呈现其空间形态与动态特征。郭庆华等^[4]利用大数据云计算平台, 以选煤信息模型 (coal preparation information model, CPIM) 为基础, 建立智能选煤厂的三维可视化管理系统, 进而实现选煤系统在全生命周期数据中的运行。

但上述文献存在可视化效果不佳, 在使用系统过程中出现漏检错检的情况, 因此, 提出了基于八叉树的电网三维虚拟可视化系统设计方案。设计三维虚拟可视化硬件

收稿日期: 2024-05-07; 录用日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52208192)

作者简介: 谢丹 (1984—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 输变电工程三维设计、水土保持、绿色建造。

引用本文: 谢丹, 张召环, 陈庆伟, 等. 基于八叉树的电网三维虚拟可视化系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(2): 78-82. (XIE Dan, ZHANG Zhaohuan, CHEN Qingwei, et al. Design of power grid 3D virtual visualization system based on octree[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(2): 78-82.)

系统,在电网实例化逻辑节点内加入数据,提高设备纹理细节显著度,利用八叉树算法建立可视化软件系统,在传递函数中,将数据标量值进行转换,提高可视化清晰度。

1 系统设计理论基础

当前,针对电网的虚拟可视化系统,多采用光线投影法进行虚拟可视化绘制,大部分场景可以得到较好的效果。但是,传统的光线投影方法是将一束光从一个视点投射到电网目标上的每一个像素点,在光束的方向上按照一定的步长取样,用传递函数把取样值映射成对应的色彩和不透明度,按照式(1)、(2)将相对观察点的位置色彩和不透明度混合,从而获得重建后的电网目标像素值。

$$C'_i = C'_{i-1} + (1 - A'_{i-1}) \times C_i \tag{1}$$

$$A'_i = A'_{i-1} + (1 - A'_{i-1}) \times A_i \tag{2}$$

式中, C, A 描述的是区域范围, i 描述的是大于 1 的正整数。

在传统方法中,采用固定的步长对电网目标数据取样,会导致一些关键的目标细节被忽略,而且还会造成不必要的计算步骤。如图 1 所示,当取样步长为 L_1 或 L_2 时, C 位置处信息将被忽略;当取样步数为 L_3 时, A, B, D 的运算量会增大。其中, $L_1 = 2 \times L_2, L_2 = 2 \times L_3$ 。

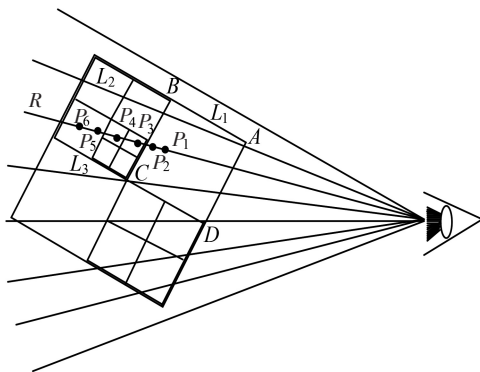


图 1 基于八叉树的三维虚拟光线投射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D virtual ray projection based on octree

本文采用自适应正则化方法,对初始电网数据进行处理,使其转变为具有一定规则性的半结构化数据,随后将这些数据存储于八叉树的纹理架构之中。针对不同区域的各种深度,给出不同步长的电网现场图像采集方法。

利用八叉树中所属节点的深度不一样的特点,对取样的电网数据步长进行自动调节。假设采集电网目标的视角的深度 $d_s = 1$, 并且在给定的初始取样步长 L_s 的条件下,在特定的光线到达 Z 区域时,得到目前的取样点 P 。通过对八叉树的三维结构进行定位,可以获得其所在区域的 A 成分,也就是 P 的深度 d 。再确定 d 与上一个取样点的深度值是否一样,如果相同,则取样步长不改变,取样持续进行;如果不同,就返回上一个取样点,然后用式(3)求出新的取样步长,获得新的取样点。不断重复以上步骤直到新获得的取样点,直至新的取样步长中取样点的深度小于或等于原始取样点的八叉树节点深度。

$$L = L_s / 2^{d-1} \tag{3}$$

式中, L 描述的是实际取样步长, L_s 描述的是初始阶段, d 描述的是八叉树中叶片节点深度。如图 3 所示,在使用上述方法取样电网可视化虚拟目标时,射线 R 的最后取样点是 P_1, P_2, P_3, P_4, P_6 。保证计算精度的同时,也能在一定程度上改善电网三维虚拟可视化效果。

在得到八叉树节点深度信息后,采用直接体绘制技术,通过传递函数将电网三维虚拟可视化数据上的标量值转换为不同的色彩和不透明度,然后进行色彩积累。在不确定取样步长的情况下,将电网三维虚拟原区块数据积累的光强积分公式改进,使得部分预积分的查询表不受转移函数影响,凸显电网三维虚拟可视化细节纹理,增加检测缺陷精度。

2 系统设计逻辑框架

在设计好理论基础后,针对系统的功能设计逻辑框架,采用客户端/服务器结构。系统分为 3 个层次。负责收集原始数据的信息采集层、对收集到的数据进行清理的数据处理、存储层以及将存储的数据以可视化的方式展示的数据虚拟展示层。设计的系统以 ArcGIS 引擎^[5]为基础,采用 Visual C#语言实现,采集的电网目标数据是通过文件地理数据库完成储存和管理。

分析数据采集层的功能。基础地理信息涵盖道路中心线、建筑物轮廓及宗地界址等核心要素;电缆专题数据则包含电缆走向路径、电缆连接节点、井室边界等元素类型;该模块可以从外部传感器中自动读取元素类,并在场景中生成图层,用于下一模块使用^[6]。

数据处理、存储层功能如下。在对电网虚拟重构系统所需要的数据和功能全面地分析后,利用文件地理数据库对整个系统进行数据的存储和管理。文件地理数据库中包括多个数据集,每一个数据集都含有相同的分类,或者是由多个元素类组成的。

数据虚拟展示层功能。利用 ArcEngine 环境,通过 GlobeControl 来构建 3D 场景。三维场景包含了各个地区的电网区域地表影像数据、电网区域道路模型层、地表模型层、电力设备模型层等,构成一个三维互动场景。在此基础上,将已引入的三维模型转化成 Multipatch 模型,使得电缆、井室等根据原始数据自动生成并完成展示。

三维虚拟可视化仿真系统逻辑设计流程如图 2 所示。

3 系统关键模块设计

3.1 数据虚拟展示模块设计

在数据虚拟展示模块设计中, Twaver3D 在 Flex 需要进行 3D 显示的时候被调用。在 Twaver3D 中,使用模型视图控制器(model-view-controller, MVC)^[7]的概念实现数据方式。Twaver3D 中的网络元件作为 MVC 中的视图,而数据容器是模型。利用 Flex 将虚拟重构电网元器件指令发送至三维显示模块,在此过程后,拓补部件将该请求进行

控制器转发,以选取与该电网虚拟重构数据容器相对应的三维虚拟对象,在三维虚拟对象处理完毕之后,该控制装置将数据返回给拓扑部件。

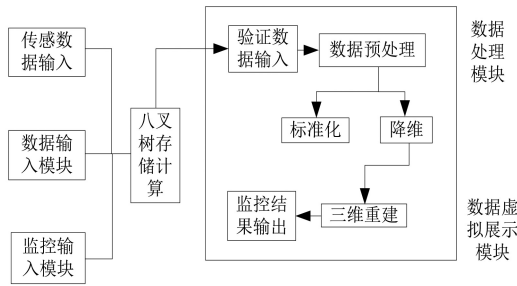


图 2 配电网运行三维虚拟可视化系统设计流程图
Fig. 2 Design flowchart of 3D virtual visualization system for distribution network operation

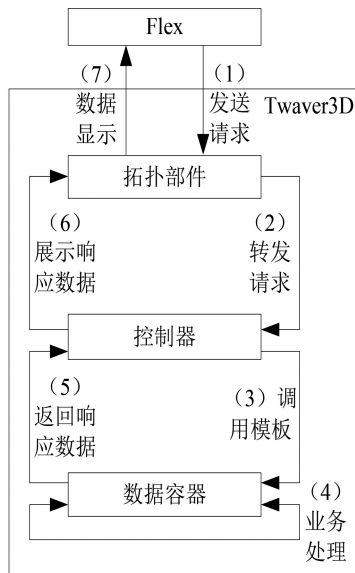


图 3 Twaver3D 虚拟可视化模块设计思路

Fig. 3 Design concept of Twaver3D virtual visualization module

拓扑部件结构的基本功能包括。定义事件交互、平移、缩放、旋转速度、灯光和镜头的参数设置。事件互动是指与控制器进行电网目标虚拟重构信息交流的规范,可以分为预设互动、选择互动、编辑互动。另外,还能够控制坐标轴,选择电网现场背景和生成位图。通过拓扑部件能够使设备框架图、网络拓扑图完成得更简便,并具有良好的用户交互机制和丰富接口显示能力。

3.2 电网虚拟数据采集模块设计

电网数据的采集模块在 Twaver3D 中设计完成,作为管理电网三维虚拟重构 3D 对象的有效采集与存储容器,如表 1 所示。电网虚拟数据采集业务处理主要是在三维物体上进行数据坐标的计算。在电网虚拟数据的采集过程中,Twaver3D 为了增强分组能力,使得模块可以将三维虚拟对象以分组与除分组的形式整体采集^[8-10]。在数据监视上不但可以监视和控制电网数据的输入、输出、修改、清空等,而且可以批量进行电网数据,远程网络数据支持等操作。

表 1 Twaver3D 中常见的 3D 对象

Tab. 1 Common 3D objects in Twaver3D

内容	描述
基本对象	常见三维对象,包含各种形状。
连线	属于一类网元,三维场景内连接物体,包含各种线路。
粒子系统	特殊网元,无详细的面,由各顶点构成。
广告牌	特殊三维物体,仅由图像构成,一直面向相机设备。
灯光	虚拟的光照效果,包括各类灯光。
镜头	三维虚拟场景内相机的效果。
告警	电信拓扑系统的对象,保证实际发生故障的及时性。

3.3 电网虚拟数据的处理模块

在电网数据处理过程中,由于 XML 的优势,因此选择其作为电网虚拟数据与其他模块远程交互协议的载体,在模块加载过程^[11-12]中,由于使用者的权限不同,会传送不同的接口。基于可视化模型渲染引擎加载电网实景三维场景时,每个模型单元均采用双重属性架构进行定义,既包含基础通用属性集,又支持子类扩展属性的个性化配置,如表 2 所示。

表 2 三维虚拟可视化协议表述

Tab. 2 Description of 3D virtual visualization protocol

属性	属性名	说明
普通公共属性	可视化模板 ID	唯一性
	模板类型	类别
	模板名称	名称
	存储格式	3DS、Plane
	程序	显示状态
	通道	网络存储路径
	目录	数据库存储位置
选择扩充属性	反射	—
	漫反射	—
	阴影	—
	纹理	—

在电网三维虚拟可视化场景数据的处理中,每个可视化的、可操作的电网内部三维物体都被看作是一个逻辑节点。因此,模块中设计的三维虚拟可视化场景加载协议是一个特定的、开放的、多层次的逻辑节点。指的是按照每种逻辑节点描述电网三维虚拟可视化对象进行相关特征。多层次表示电网内的三维虚拟可视化对象,有一定的上下级或同级的联系。尽管各个电网的虚拟对象的最终逻辑级别也有一些差别,但都符合图 2 中所描述的架构。

在该模块的设计架构中,三维虚拟可视化场景的加载协议底层部分,对电网系统内部各类节点进行了详尽描述,涵盖信息机房节点、所有环境设备节点、全部机柜节点、各类动力设备节点以及其他相关设备节点。在三维虚拟可视化场景加载协议中,电网环境设备集和电源设备集的下一层又包括空调设备节点集、传感器节点集、线路节点集。然后,在相应集合的下一层中,对节点特征进行特

定说明。

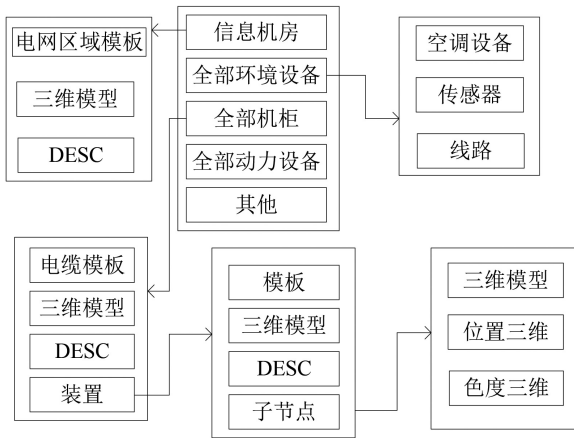


图4 电网三维虚拟场景加载协议

Fig. 4 Loading protocol for 3D virtual scene of power grid

与其他模块设计不同,在三维虚拟数据处理中,每个实例化的逻辑节点都要加入相应电网元素,以完成电网三维虚拟的实例化。从图4可以看出,每个实例化的逻辑节点都需要有三维坐标、三维旋转角度等数据,并将其整合到三维模型上。电网三维虚拟可视化场景,除了在结构化内容数据库引擎(database engine for structured content, DESC)中具有在模型图像协议中描述信息以外,在三维虚拟可视化场景中提供了描述信息,尽管在三维虚拟数据处理模块中,虽然电网场景数据加载机制采用了虚拟电网描述标准 DESC 进行命名,但在三维可视化环境加载协议中仍需通过分级架构实现差异化层级管理,既延续了原有命名体系的规范性,又实现了复杂电网元素在高维空间中的清晰辨识需求。

4 系统的应用测试实验

为了验证可视化系统实际使用中的有效性进行以下实验。若要查看绝缘子的状况,选择进入绝缘子的三维虚拟可视化影像界面,如图5所示。



图5 绝缘子三维虚拟可视化图像

Fig. 5 Three dimensional virtual visualization image of insulator

当系统检测到绝缘子的缺陷时,自动进行标注。检测绝缘子三维虚拟可视化影像界面中的具体故障问题和故障产生位置,选择有问题的可视化图像进行识别,从而看到故障的具体情况,如图6所示。

在工作人员确定有绝缘子自爆等故障时,调出三维虚拟线路巡检可视化图,如图7所示。可在操作页面按下异

常报表键,填写故障问题,并将故障的具体位置和时间记录下来。缺陷记录文档集成了巡检目标设备、线路走廊范围、缺陷现象影像及巡检工单的全流程电子存档功能,并构建了多维缺陷分类体系与智能统计模块。系统抛弃了以往的慢吞吞的工作方式,由系统自动记录,提高了巡检的工作效率,避免了误填、漏填等问题,提高电网巡检的可信度。图8中显示电网线路导线三维虚拟可视化监控界面。

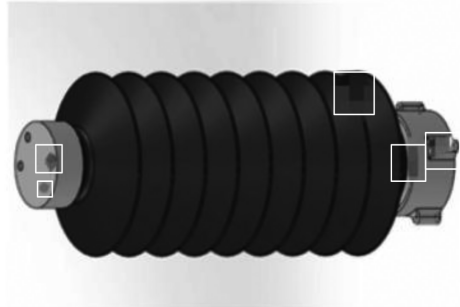


图6 三维虚拟可视化下绝缘子缺陷识别

Fig. 6 Identification of insulator defects under 3D virtual visualization



图7 三维虚拟线路巡检可视化图

Fig. 7 Visualization of 3D virtual line inspection



图8 电网线路导线三维虚拟可视化监控界面

Fig. 8 Three dimensional virtual visualization monitoring interface for power grid line conductors

当输电线路出现断股、散股等损伤时,实时监测系统立即对故障点进行精准定位并自动触发预警标识。该系统构建了全数字化的巡检档案库,完整保存每次巡检轨迹与故障记录,实现缺陷信息的全生命周期管理。巡检人员

通过移动终端实时采集缺陷数据,经巡线经理审核确认后自动转入追踪处置流程。依托三维可视化平台,系统对缺陷进行空间定位与模式识别,结合专家系统算法生成包含故障机理分析的诊断报告。智能化上报引擎的引入,有效解决了人工操作可能存在的信息滞后问题,确保故障数据实时传递至指挥中心,为及时检修提供决策支持。

系统同时设计智能报警装置。一是系统后台的在线报警和报告形式,通过系统的提示和声音向后台员工发送警报;二是以短信形式报警,当数据故障时将报警信息自动传送到工作人员的手机中,及时提醒工作人员电网发现错误,避免了发生危险的可能。

同时,所设计系统还通过大面积电网设施验证可视化识别的有效性,确定能否正确找出缺陷、发生故障的设备和线路,迅速查找到该区域内的故障位置,以便及时维修电网设备,如图9所示。

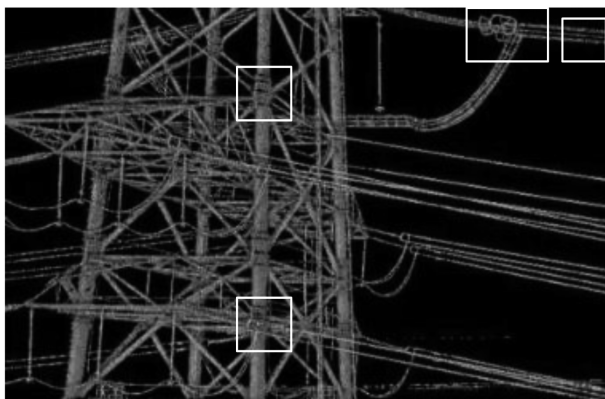


图9 整体电网三维虚拟可视化识别缺陷结果

Fig. 9 Defect identification results of three dimensional virtual visualization of the whole power grid

图8直观展示了系统对缺陷位置的厘米级定位能力,可同步完成对输电线路本体、附属设施及周边地理环境的全要素智能识别。解决了传统人工检测方法的局限性,包括劳动强度过大、危险系数较高、周期较长和天气影响,地质因素等无法进行高效检查的问题,该设计不仅让电网监测工作高效可靠,同时也保证了电力运行的稳定安全。同时所设计系统能够避免手工判断误差的缺点,精准找出故障及需要维修的位置,减少检测作业的繁重,能够及时、全面地发现问题,实现检测效能与规范性的双重提升,为电网企业创造显著经济价值。

为了进一步验证本文方法的先进性,将电网三维虚拟可视化识别缺陷的精确度作为指标,分别采用本文方法、文献[3]方法、文献[4]方法对电网进行可视化缺陷识别,其识别精度如图10所示。

根据图10的实验结果可以看出,本文方法在电网三维虚拟可视化缺陷识别时,识别精度为95%以上,且波动远远小于其他方法,文献[3]方法和文献[4]方法的识别精度相较于本文方法差距较大。说明本文方法更具先进性。

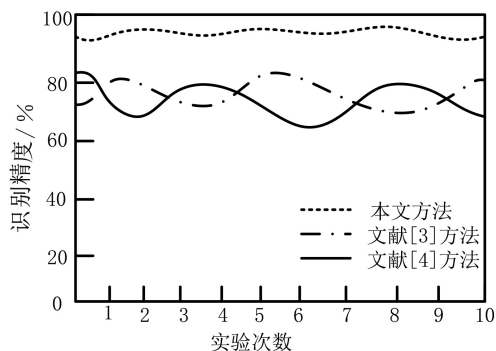


图10 电网三维虚拟可视化识别缺陷精度

Fig. 10 Accuracy of defect recognition in three dimensional virtual visualization of power grid

5 结论

电力系统中存在着海量的空间数据,在现代电力工业的数字化、信息化水平不断提高的今天,如何将电网空间数据进行科学地利用,并实现其可视化是当前企业发展的一个重大课题。因此,文章提出了基于八叉树的电网三维虚拟可视化系统设计,构建三维虚拟可视化硬件系统,将数据添加到电网的实例化逻辑节点中,并采用八叉树方法设计三维虚拟可视化软件,三维数据标量值通过传输函数变换成不同颜色和轮廓,增强可视化的视觉效果。

参考文献

- [1] 毕东月. 基于三维可视化技术的典型生产安全事故防控与应急处置场景设计与实现[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(10): 165-171.
- [2] 杨茂男, 贾庆轩, 李旭龙, 等. 基于上下文强化八叉树网络三维模型语义分割算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(12): 3586-3589, 3596.
- [3] 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.
- [4] 郭庆华, 卫中宽, 张树森, 等. 基于选煤信息模型的智能化选煤厂三维可视化管理平台设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 54-62.
- [5] 胡涛, 梁森, 万波. 基于MCNP的空间辐射效应可视化仿真系统设计[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48(1): 72-80.
- [6] 李弘祖, 郭立新, 董春雷, 等. 基于八叉树优化的MoM-PO/PTD混合算法分析目标电磁散射及辐射问题[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3033-3039.
- [7] 李晶, 黄杰, 袁慧, 等. 大数据环境下网络威胁可视化分析系统设计与实现[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 79-86.
- [8] 杨鸿珍, 王云桦, 吴建伟, 等. 电网有限空间作业可穿戴环境监测及报警系统设计和实现[J]. 电子器件, 2022, 45(3): 760-766.
- [9] 郭敬东, 刘文亮, 罗富财, 等. 基于轻量级微服务架构的设备运行信息可视化交互系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(4): 178-182.
- [10] 覃拓, 兰小鲜, 潘一琦, 等. 基于数据加密技术的配网可视化同步验收联调系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(1): 92-96.
- [11] 张星炜, 王海楠, 孟悦, 等. 基于数字孪生的输变电线路三维数字化仿真系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(2): 94-99.
- [12] 曲艺, 徐强, 谢青, 等. 基于可视化技术的电力用户信息安全预警系统构建[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(10): 143-147.