

1-5-2022

## Design of intelligent substation management and control system based on 3D model

Chen CHEN

*Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China*

Kai LI

*Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China*

Zheng ZHOU

*Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China*

Chong ZHAO

*Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China*

Yilong KANG

*Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

*See next page for additional authors*

---

### Recommended Citation

CHEN, Chen; LI, Kai; ZHOU, Zheng; ZHAO, Chong; KANG, Yilong; and ZHOU, Hui (2022) "Design of intelligent substation management and control system based on 3D model," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 36: Iss. 6, Article 23.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.024

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol36/iss6/23>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

---

# Design of intelligent substation management and control system based on 3D model

## Authors

Chen CHEN, Kai LI, Zheng ZHOU, Chong ZHAO, Yilong KANG, and Hui ZHOU

# 基于三维模型的变电站智能管控系统设计

陈晨<sup>1</sup>, 李凯<sup>1</sup>, 周正<sup>1</sup>, 赵冲<sup>1</sup>, 康祎龙<sup>1</sup>, 周辉<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450006; 2. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**当前变电站智能管控系统存在信息获取时间长、管控效率不高等问题,为解决此类问题,设计一种基于三维模型的变电站智能管控系统。首先,通过3D Max构建变电站三维模型,以便用户查看与获取变电站的相关信息。然后,在三维模型的基础上,根据CityGML标准进行语义Schema信息、隐式几何、中文标注及纹理、场景管理以及变电站模型操作设计,并完成变电站智能管控系统的搭建。实验结果表明,该文所设计系统的信息获取时间较短,管控效率以及管控质量高,可以在实际中得到进一步推广。

**关键词:**三维模型; 变电站; 智能管控; 系统设计; CityGML标准

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.024 中图分类号:TN929 文章编号:1673-9140(2021)06-0196-08

## Design of intelligent substation management and control system based on 3D model

CHEN Chen<sup>1</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, ZHOU Zheng<sup>1</sup>, ZHAO Chong<sup>1</sup>, KANG Yilong<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>2</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The intelligent control system of substations faces several challenges, such as the long information collection time and low control efficiency. In order to solve these problems, this paper designs an intelligent management and control system of substation based on three-dimensional (3D) model. Users can flexibly access the relevant information of substations by using 3D model built in 3D Max. On the basis of the 3D model, multiple tasks, including semantic Schema information design, implicit geometric design, and so on, can be achieved to accomplish the intelligent management and control system of substations according to CityGML standard. The experimental results show that the information acquisition time of the proposed system is significantly reduced, and management and control efficiency and quality are improved. Hence the proposed system can be further applied in practice.

**Key words:** 3D model; substation; intelligent control; system design; CityGML standard

现今变电站智能化已经成为变电站发展建设的重要趋势,而智能电网具有互动化、自动化和信息化特征,是以各级电网协调发展为基础,因此信息通信

平台是变电站的重要支撑<sup>[1]</sup>。智能变电站是智能电网中的重要组成部分,在信息数字化、信息共享标准化和通信平台网络化的基础上,通过低碳、环保、可

靠的设备保证变电站的基本功能,包括信息采集、控制、监测、保护、计量和测量等,在此基础上利用多种高级功能实现各部门之间的高效互动。其中,高级功能包括协同互动、智能调节、自动控制和在线分析与决策等,变电站中的关键部门包括电网调度、管理及检修部门等。随着智能变电站的进一步发展,国家对能源互联网的发展愈来愈重视,这对变电站智能管控系统进行设计具有重要的现实意义<sup>[2]</sup>。

国内相关学者也对此展开了研究,如文献[3]设计了基于 IEC 61850 的变电站智能管控系统,该变电站智能管控系统包括电器设备温度在线监测、变电站安全信息管理及周界安防子系统,按照 IEC 61850 标准对设备温度在线信息和变电站周界安全信息进行建模,集成安全测控系统平台,利用激光围栏对系统中存在的入侵信号进行检测,分别采用声表面波温度传感器和网络摄像机对温度和入侵动作进行采集,实现变电站智能管控,但是该系统由于没有构建变电站三维模型,获取变电站信息所用的时间较长,存在信息获取效率低的问题。文献[4]设计了基于分布式技术的变电站智能管控系统,对变电站智能管控系统进行分层设计,统一处理检测单元采集的数据,以此建立一体化信息网络,对采集的数据进行整合,并对设备状态进行评价,实现变电站智能管控系统的搭建,但是由于该系统的建设没有考虑构建三维建模,使得变电站智能管控效率不高、信息获取时间长等问题。

为解决上述系统中存在的问题,现设计一种基于三维模型的变电站智能管控系统。该系统通过 3D Max 构建变电站三维模型,根据 CityGML 标准进行语义 Schema 信息、隐式几何、中文标注及纹理、场景管理和变电站模型操作设计,完成变电站智能管控系统的搭建,并对系统的各项功能进行测试,测定系统的信息获取时间、管控效率和管控质量。

## 1 变电站三维模型的构建

基于三维模型的变电站智能管控系统将 Ulead COOL360 作为全景合成软件,支持多种格式输出的使用简单的全景无缝拼合。采用索尼 Alpha 7 III

数码相机将某一个地方按照 360° 旋转拍摄一周,运用 Ulead COOL360 软件可以将这些图片拼接成一张完整的图片,从而获得 360° 全景影像,进而将获得的全景影像作为纹理素材构建三维模型<sup>[5]</sup>。

为了实现场景漫游,该文将采用 3D Max 构建三维模型,并将其作为全景图像的载体。到目前为止,柱面全景图像已经被广泛应用在变电站智能管控系统中,因此,构建的三维模型通常为中空的柱面体,全景图像由柱面体的内部纹理合成。当拍摄变电站实际场景时,需要获取取景高度  $h$  和相机取景半径  $r$ 、柱面体高度  $H$  和半径  $R$  之间的对应关系。漫游时的视点位置就是相机的取景点,其对应关系为

$$\frac{R}{H} = \frac{r}{2h} \quad (1)$$

开放场景图源码(open scene graph, OSG)为变电站智能管控系统开发图形渲染优化和场景管理提供保证,属于开源的场景图形管理开发库。OSG 的跨平台性较好,可以在 Linux、UNIX、Window、Mac OS X 操作系统上运行<sup>[6]</sup>。变电站智能管控系统根据 OSG 的场景管理,通过控制节点组织方式对三维场景进行管理。利用相关插件将 3D Max 创建的场景模型文件转换为 osg 格式的文件,OSG 场景节点的管理示意如图 1 所示。

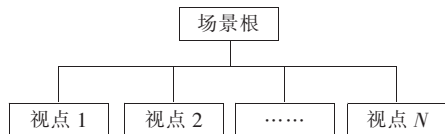


图 1 OSG 场景节点管理示意

Figure 1 Schematic diagram of node management in OSG scene

OSG 场景中视点的控制是至关重要的,可以利用 Matrix Manipulator 的派生类实现这一重要功能<sup>[7]</sup>。Matrix Manipulator 能够提供操作控制视点,属于抽象基类,包括 3 个服务功能:

1) homeEye 为观察者的位置,其主要作用是对视点位置进行定位;

2) homeCenter 的主要作用是对摄像机瞄准的参考点进行设置,并对摄像机的朝向进行定位;

3) homeUp 的主要作用是对摄像机平面向上的

单位法向量进行赋值。

假设场景模型包围盒数量为  $n$ , 则包围盒第  $i$  个面的运算方程为

$$A_i X + B_i Y + C_i Z + D = 0 \quad (2)$$

则有

$$N_i P + D = 0 \quad (3)$$

其中,  $\beta_i$  平面内的法向量用  $N_i(A_i, B_i, C_i)$  描述,  $\beta_i$  内的点是  $P(x, y, z)$ ,  $0 \leq i \leq n$ 。若该平面的法向量指向前, 则  $N_i P + D > 0$ , 说明  $P$  点处于平面的前端; 否则  $N_i P + D < 0$ ,  $P$  点处于平面的后端。以此检验待检测对象同场景是否存在碰撞问题。

视点方向的控制 在变电站场景漫游过程中极为重要, 主要通过对上述 3 个服务功能进行调整和控制实现。利用键盘和鼠标对场景中的方向和位置进行控制, 同时, 需要在渲染场景过程中对摄像机的属性进行设置, 实现虚拟漫游<sup>[8]</sup>, OSG 场景漫游流程如图 2 所示, 通过场景中的操作器添加进行矩阵控制, 将获取的信息反馈至 Viewer 改变场景, 再构建三维模型。构建三维模型后需要注重对三维模型数据库的建立, 在构建的变电站三维模型数据库的基础上, 通过模糊自相关检测和 信息融合的方法, 融合变电站智能管控系统的大数据信息。

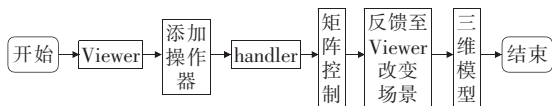


图 2 OSG 场景漫游流程

Figure 2 Flowchart of OSG scene roaming

结合统计分析方法进行变电站智能管控系统中综合信息的融合, 其表达式为

$$f(s) = \sum_{s=1} (P_s + Q_s)^2 + \frac{V_s + A_s}{2} \quad (4)$$

式中  $P$  为差异度属性;  $Q$  为智能管控的决策集合;  $s$  为变电站中需要管控的对象。

变电站三维模型智能管控的信息分布论域满足收敛条件  $A = P \& Q$ 。当  $X \subseteq U$ ,  $R \subseteq A$  条件成立时, 变电站三维模型智能管控信息融合的边界条件为

$$R_\beta(x) = \sqrt{X^2 + A^2} - \int_\beta U(x) + \frac{R(x)}{2} dx \quad (5)$$

式中  $U(x)$  为变电站三维模型智能管控综合信息调度的对象解的集合;  $R_\beta(x)$  为满足变电站三维模型智能管控信息融合的边界集合;  $R(x)$  为变电站三维模型智能管控信息融合的总数集。

结合条件属性决策分类方法, 得到变电站三维模型智能管控的信息对象解为

$$s_P(X) = \frac{1}{2} \sqrt{s_\beta(Q) + 1} - s_t(Q) \quad (6)$$

式中  $\beta$  为关联度属性;  $s_\beta(Q)$ 、 $s_t(Q)$  分别为变电站三维模型智能管控的决策集合关联度和差异度。

通过对变电站三维模型智能管控信息对象解的融合处理<sup>[8]</sup>, 可以得到对应的信息存储模型, 其表达式为

$$Y(P, Q, \beta) = \sum_x \frac{P_x + Q_x + \beta_x}{2} + s_\beta(X), X \subseteq U \quad (7)$$

式中  $P_x$  为满足差异度属性的信息总数;  $Q_x$  为满足管理决策的信息总数;  $\beta_x$  为满足关联度属性的信息总数,  $X \subseteq U$ 。

通过上述分析, 建立变电站三维模型智能管控模型和信息存储模型, 再通过信息调度进行变电站智能管控系统的设计及优化。

## 2 变电站智能管控系统设计

在三维模型搭建的基础上, 根据 CityGML 标准设计变电站智能管控系统。

### 2.1 雷电网格化统计落雷数据

CityGML 文档中通常存在扩展、核心和专题模型, 一般的专题模型中包括城市对象组、数字地形、城市设施、建筑物、植被、桥梁和隧道等模块。变电站设备语义 Schema 示意如图 3 所示, 分析可知, CityGML Core 模块主要从 Extensible Address Language 和 Geograohy Markup Language 中继承, 模块内部存在一些类型不同的专题模块, 如外观、建筑物和土地模块等。根据三维模型获得变电站实际信息, 删除城市设施模块中存在的相关性较弱的属性信息, 并将语义属性信息添加到城市设施模块中, 以此构建变电站场景设备的专题模块<sup>[9]</sup>。

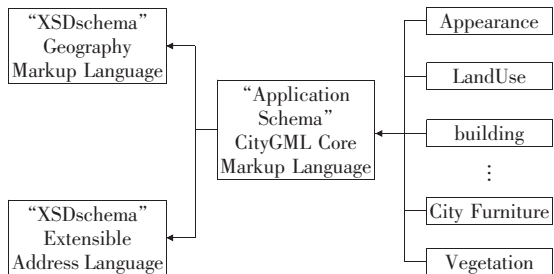


图 3 变电站设备语义 Schema 示意

Figure 3 Semantic Schema diagram of substation equipment

### 2.2 隐式几何设计

变电站场景中存在电缆分支箱、隔离开关和电流互感器等许多具有相同形状的元器件<sup>[10]</sup>。重复对相同实物进行建模需要消耗的时间与精力较大,同时模型文件的增加也会使得物理存储空间消耗过多。CityGML 标准中存在隐式几何概念,通过姿态变换、位置变换、引用原型获得其他模型,减少物力和人力的同时能够有效避免数据冗余程度过高的问题,在几何体的表达过程中更合理、方便。隐式几何原理如图 4 所示。

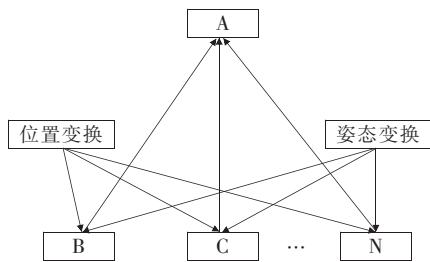


图 4 隐式几何原理

Figure 4 Diagram of the implicit geometry principle

### 2.3 中文标注及纹理设计

#### 2.3.1 中文标注

存有物体语义信息的变电站文件可以通过转换成 CityGML 格式直接展现给用户,用户在变电站智能管控系统中可以直观地观察到变电站场景信息,变电站场景空间显示可以通过变更变电站场景标注得以改变,以方便用户更为快捷地获取相关信息<sup>[11]</sup>。

FerrType 可以为系统的字体相关业务提供支持,通过格式化字符将其映射为位图,其属于字体

库,但不包含图像处理和文字布局功能,系统提供 CFF、OpenType 和 TrueType 等统一接口对多种字体格式文件进行访问,降低访问字体内容的复杂度以及提升访问效率。

文字显示是在 OSG 中创建一个关联文字与 Font 的字体文件 simhei.ttf,建立绘制字符串图形的纹理帖,根据字符的形状在文字渲染过程中生成纹理坐标,并将添加纹理的四边形引入每个字符中<sup>[12]</sup>。在包围盒原理的支持下确定标注位置,中文标注流程如图 5 所示。

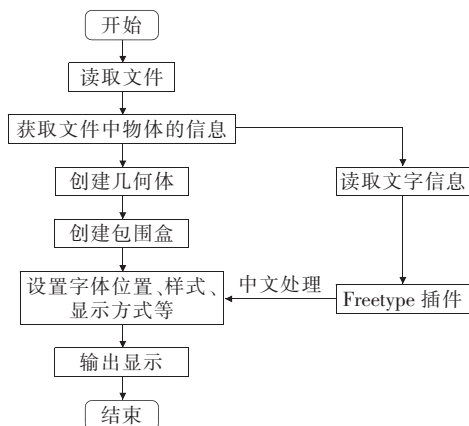


图 5 中文标注流程

Figure 5 Flowchart of Chinese labeling

#### 2.3.2 纹理设计

一般情况下几何物体包括纹理、材质及形状这 3 种特征,通过纹理映射可以获取几何物体特征。映射方法已在三维图像中得到了广泛的运用,可以提高物体的真实感。在大部分应用程序中,纹理数据都是从外部获取的图像文件<sup>[12]</sup>,而基于三维模型的变电站智能管控系统利用以 CityGML 标准为基础的外观模块在 OSG 中描述其纹理。

### 2.4 场景管理设计

场景图像通过分层、自顶向下的树状数据结构对空间数据集进行组织,由不同的物体构成变电站场景,因此,需要组合并划分这些物体,并将其归类为不同的模块<sup>[13-14]</sup>。将变电站虚拟场景划分为断路器与隔离开关、围墙与地面、电线与线架、电流与电压互感器以及变压器与建筑物模块,变电站场景设计如图 6 所示。

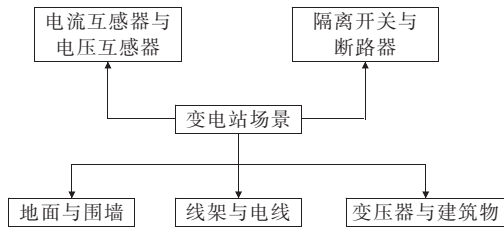


图 6 场景设计

Figure 6 Diagram of scene design

## 2.5 智能交互操作设计

智能交互系统主要是应用现代互联网技术采集各类现场施工要素,为数据分析模块提供与三维工程模型相对应的现场施工要素数据,并将相关数据分析结论向管理和现场人员进行反馈,从而建立四维施工管理模型与施工现场的联系<sup>[15]</sup>。智能交互系统主要包括以下子模块。

1)人、机、物场内定位子模块。

2)现场环境信息采集模块。主要通过图像识别、激光扫描等技术实时采集施工成品及措施引起的施工现场地形地貌变化信息与现场作业情况,通过互联网技术获取周边气温、风速、气压、降水、湿度等环境参数。

3)无纸化办公模块。主要是通过移动互联网技术采集、生成的各类质量检查、验收阶段的电子表单形式的结构化测量数据。

4)人机交互模块。主要包括 VR、AR 等人机交互设备。应用人工智能和 AR 技术实现变电站故障的自动检测,并通过 3D 成像展示变电站运行故障问题。

采用 ZigBee 协议栈进行智能交互系统的信息交互设计,将变电站智能管控系统不同层定义的协议集合,以函数的形式实现,构成一个变电站智能管理函数库,并给用户提供一些应用层编程接口,以供变电站智能管理用户调用<sup>[16-17]</sup>。采用分组交换技术进行三维工程模型的总线设计,采用 Android 操作系统进行变电站智能管控系统的底层模块设计,基于物联网技术进行海量变电站智能管理资源检索设计,MAC 层采用总线控制设计,在 MVB 总线控制协议下进行进程管理和总线调度,完成的变电站三维工程智能管控系统的在线接口设计和程序交叉编译,得到基于 ZigBee 协议的变电站智能管控系统的智能交互系统结构,如图 7 所示。

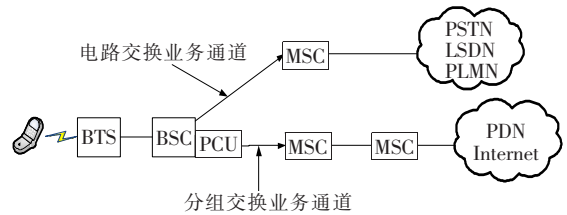


图 7 变电站智能管控系统的智能交互系统结构

Figure 7 Diagram of the structure of the intelligent interactive system

由图 7 可见,通过无线方式连接到 GPRS 蜂窝电话上,GSGSN、GPRS 网关支持节点(GGSN)进行通信,MT 通过 Um 接口接入 GPRS PLMN,R 则是 MT 和 TE 之间的参考点,GPRS 网络通过 Gi 参考点和 GP 接口实现同其他网络的互通,在网络设计的基础上,应用全景视频和 VR 的遥感技术实现施工现场远程检查,并将最终电力工程建设信息顺利移交到工程数据中心,供运检等业务部门应用。综上分析,实现了变电站智能管控系统的三维工程模型设计。

## 3 实验及分析

为验证所提设计的基于三维模型的变电站智能管控系统的实际应用效果,需要对系统各项功能测试,实验中采用 TCP/IP(transmission control protocol/internet protocol)传输控制协议建立变电站智能管理资源采集和数据加载子程序,设置 PWM 相关缓存器,调用 sip\_call 接口创建 INVITE 消息呼出,调用 channel\_bridge 函数连接 2 个通道,由此构建变电站智能管控系统的测试环境,调用 Task-Basic.postTask() 返回的是 SUCCESS,用 task 或者 post 关键字声明 TinyOS 的通信任务,设定某 220 kV 变电站智能管理的作业参数,如表 1 所示。

表 1 作业参数设置

Table 1 Task parameter settings

作业数	任务数	项目管理作业所占比例/%
43	1~5	54.4
16	5~30	27.8
12	31~60	23.7
10	61~90	12.7
6	91~100	6.9

设定现场管理的传感器节点数为 200,施工现场的 VR+全景巡查覆盖范围为  $200 \times 200 \text{ m}^2$ ,数据处理中心的采样变电站管理样本数为 1 024,训练样本集为 100,数据采集的时间间隔为 0.24 s,供电电压范围为 3.0~5.5 V,VR 视景仿真平台的转换分辨率为 12 位,仿真迭代次数为 1 000。根据仿真参数设定进行该系统测试,得到变电站智能管理的测试输出界面,三维模型中某处的可视化效果如图 8 所示。

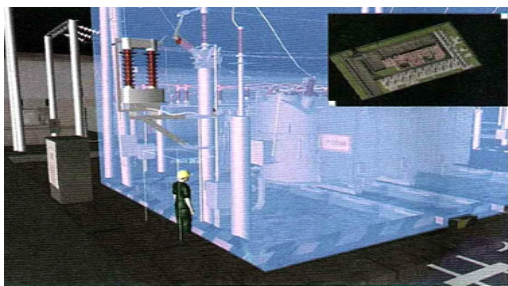


图 8 变电站中某处可视化效果

Figure 8 Visualization effect of substation in somewhere

将信息获取时间作为测试指标,选择该文所设计、基于 IEC 61850 的变电站智能管控(文献[3])以及基于分布式技术的变电站智能管控系统(文献[4])进行测试,测试结果均满足性能要求,但对于信息获取的时间有所不同,具体如图 9 所示,可知在多次实验中,该文所设计系统采集变电站信息所用时间均低于文献[3]、[4]系统采集变电站信息所用时间。因该文所设计系统构建了三维模型,三维模型中包含大量变电站信息,用户可以通过三维模型直观、方便地获取变电站相关信息,从而缩短信息获取所用时间,提高该文所设计系统的信息采集效率。

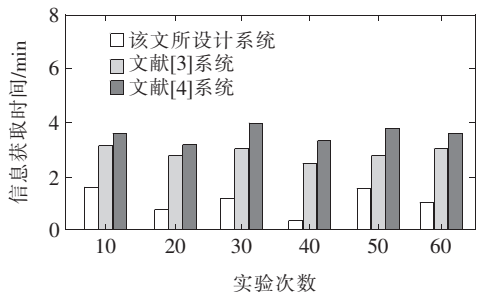


图 9 信息获取时间测试结果

Figure 10 Test results of information acquisition time

为进一步验证该文所设计系统的有效性,将管控效率作为测试指标,测试结果如图 10 所示,可知该文所设计系统全面管控变电站所需时间均在 10 min 之内,文献[3]、[4]中系统的全面管控变电站所用时间较长。对比 3 种系统的测试结果,可知该文所设计系统的管控时间较低,因为该系统采用 3D Max 构建变电站三维模型,根据 OSG 的场景管理通过控制节点组织方式对三维场景进行管理,缩短了管控所需的时间,提高了系统管控效率。

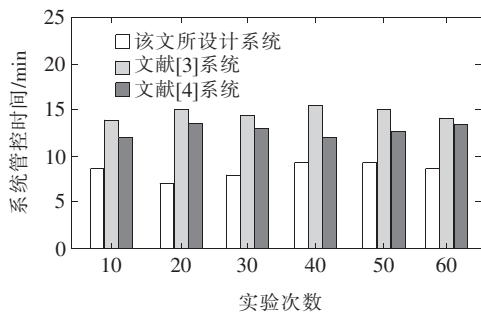


图 10 系统管控时间的测试结果

Figure 11 Test results of system control time

设置管控质量因子  $a$ ,其取值范围为  $[0, 1]$ ,管控质量因子越大,表明变电站智能管控系统的管控质量越高,不同系统的测试结果如图 11 所示,可知在多次实验中,该文所设计系统的管控质量因子均在 0.8 以上,文献[3]中系统在第 10 次实验中的管控质量因子低至 0.4,文献[4]中系统在第 20 次实验中的管控质量因子低至 0.35。对比该文所设计、文献[3]、[4]中系统的测试结果,可知该文所设计系统的管控质量因子较高,表明该系统的管控质量好,原因在于在变电场三维模型的基础上该系统根据 CityGML 标准设计变电站智能管控系统,提高了变电站管控质量。

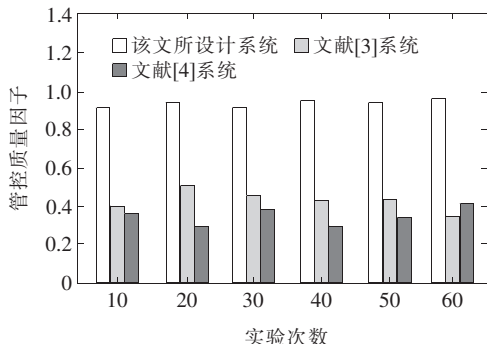


图 11 管控质量因子测试结果

Figure 12 Test results of control quality factors



## 4 结语

随着数字电网和智能电网理念的提出,三维仿真在变电站设计和施工中的应用越来越广泛。传统三维仿真方法无法将模型信息与语义信息自然地连接在一起,缺乏相应的语义信息描述,只是从模型几何层面进行描述,因此,在虚拟现实领域对变电站三维场景使用的语义信息进行描述已经成为目前研究的重点。传统变电站智能管控系统存在信息获取所用时间长、管控效率不高等问题,为此设计了一种基于三维模型的变电站智能管控系统,根据 CityGML 标准在三维模型的基础上实现变电站智能管控系统的搭建,实验结果表明:该系统的信息获取时间较短、管控效率高、管控质量好以及三维模型所表现的可视化效果好,解决了目前系统中存在的问题,为变电站的智能管控提供了有效平台。

### 参考文献:

- [1] 马娜,陈亮,鲁方林,等. 基于改进人工鱼群算法的配电站三维空间的传感器优化布置[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(1):145-151.  
MA Na, CHEN Liang, LU Fanglin, et al. Optimal placement of sensors in three-dimensional space of distribution station based on improved artificial fish swarm algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 145-151.
- [2] 张政健,程龙. 声表面波技术在变电站温度检测系统中的应用设计[J]. 现代电子技术,2018,41(9):117-120+126.  
ZHANG Zhengjian, CHENG Long. Application design of surface acoustic wave technology in substation temperature detection system[J]. Modern Electronic Technology, 2018, 41(9): 117-120+126.
- [3] 郑伟烁,郑文悦,李志伟,等. 光伏电站在线监测技术现状与进步趋势展望[J]. 电测与仪表,2021,58(9):1-7.  
ZHENG Weishuo, ZHENG Wenyue, LI Zhiwei, et al. The status quo and progress prospect of photovoltaic power station online monitoring technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 1-7.

- [4] 丁登伟,庞理声,莫乔卫,等. 水电站 GIS 特快速暂态过电压在线监测系统构建及监测数据分析[J]. 高压电器,2020,56(6):57-65.  
DING Dengwei, PANG Lisheng, MO Qiaowei, et al. Construction of very fast transient overvoltage on-line monitoring system and data analysis for GIS in the hydropower substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 57-65.
- [5] 申晓杰,廖华,袁卫义. 500 kV 变电站集中监控模式的指挥策略及系统设计[J]. 科学技术与工程,2020,20(7):2740-2748.  
SHEN Xiaojie, LIAO Hua, YUAN Weiyi. Command strategy and system design of 500 kV substation centralized monitoring mode[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2740-2748.
- [6] 刘宏君,高旭,杜丽艳,等. 智能变电站 SCD 文件管控系统模块化设计[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(3):154-159.  
LIU Hongjun, GAO Xu, DU Liyan, et al. Modular design of SCD file management and control system for smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 154-159.
- [7] 何金栋,王宇,赵志超,等. 智能变电站嵌入式终端的网络攻击类型研究及验证[J]. 中国电力,2020,53(1):81-91.  
HE Jindong, WANG Yu, ZHAO Zhichao, et al. Type and verification of network attacks on embedded terminals of intelligent substation[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 81-91.
- [8] 李勇,陈雨,蔡晔,等. 基于信息物理接口矩阵的 IEC 61850 变电站自动化系统可靠性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):90-96+104.  
LI Yong, CHEN Yu, CAI Ye, et al. Reliability analysis of IEC 61850 substation automation system based on cyber-physical interface matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 90-96+104.
- [9] 王剑雄,王玉兰,赵翊君,等. 基于无线传感网的无人值守变电站监控系统[J]. 电源技术,2017,41(2):316-317.  
WANG Jianxiong, WANG Yulan, ZHAO Yijun, et al. Unmanned substation monitoring system based on wire-

- less sensor network[J]. Power Supply Technology, 2017,41(2):316-317.
- [10] 罗珊珊,冷佳. 基于数字孪生机房的三维可视化监控系统的设计与实现[J]. 计算技术与自动化,2021,40(1):135-139.
- LUO Shanshan, LENG Jia. Design and implementation of a three-dimensional visual monitoring system based on the digital twin computer room[J]. Computer Technology and Automation, 2021,40(1):135-139.
- [11] 李宝潭,赵丹,李宝伟,等. 智能变电站在线防误系统关键技术的研究[J]. 智慧电力,2020,48(6):73-78+111.
- LI Baotan, ZHAO Dan, LI Baowei, et al. Key technologies of online error prevention system in smart substation[J]. Smart Power, 2020,48(6):73-78+111.
- [12] 白静芬,林繁涛,徐英辉,等. 新一代智能变电站数字化计量系统[J]. 电测与仪表,2017,54(17):40-45.
- BAI Jingfen, LIN Fantao, XU Yinghui, et al. A new generation of smart substation digital metering system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17):40-45.
- [13] 戴相龙,朱富云,胡广,等. 基于视频的变电站内红马甲检测系统的实现[J]. 电网与清洁能源,2018,34(10):83-88.
- DAI Xianglong, ZHU Fuyun, HU Guang, et al. Implementation of red vest detection system in substation based on video[J]. Power System and Clean Energy, 2018,34(10):83-88.
- [14] 张春晓,陆志浩,刘相财. 智慧变电站联合巡检技术及其应用[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(9):158-164.
- ZHANG Chunxiao, LU Zhihao, LIU Xiangcai. Joint inspection technology and its application in a smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(9):158-164.
- [15] 王光亮,陈文,唐明帅,等. 基于相关间隔解耦的SCD文件管控系统设计与开发[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(11):157-164.
- WANG Guangliang, CHEN Wen, TANG Mingshuai, et al. Design and development of SCD file management and control system based on correlation interval decoupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11):157-164.
- [16] 习伟,姚浩,陈波,等. 基于零延时切换的可测交换网在智能变电站的应用[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(4):42-47.
- XI Wei, YAO Hao, CHEN Bo, et al. Delay measurable exchange network based on zero delay switching in the intelligent substation utilizing HSR technology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(4):42-47.
- [17] 据泽立,邢伟,金鸿鹏,等. 基于轻量化网络的变电站缺陷图片检测算法[J]. 电网与清洁能源,2020,36(8):43-49.
- JU Zheli, XING Wei, JIN Hongpeng, et al. Detection of substation faults image based on lightweight network [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 43-49.