

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220111

## 基于 GIM 模型的智能变电站二次回路三维可视化系统设计

章剑光<sup>1</sup>, 陈晓宇<sup>1</sup>, 朱松涛<sup>1</sup>, 卢笛<sup>1</sup>, 董晓红<sup>2</sup>

(1. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 省部共建电工装备可靠性与智能化  
国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300130)

**摘要:** 由于智能变电站内二次回路需要模拟的对象较多, 并且具有时序性特征与非时序性特征, 导致智能变电站二次回路三维可视化效果较差。基于此设计了一个基于电网信息模型(grid information model, GIM)模型的智能变电站二次回路三维可视化系统。系统硬件部分, 重点设计处理器、互感器采样模块与互感器采样模块; 系统软件部分, 对空间数据组织与管理、几何元素间求交计算、模型切割、模型贴合。在此基础上采用 GIM 模型建立时序模型, 完成智能变电站二次回路三维可视化系统的设计。实验结果表明, 所提基于 GIM 模型的智能变电站二次回路三维可视化系统不仅提高了建模帧速、可视化效率与可视化效果, 所设计系统的可视化结果基本不存在缺陷。所设计系统还减少了施工变更次数、施工成本与施工周期, 施工成本最大降幅接近 0.5 倍。因此, 说明所设计系统提高了变电站二次回路三维可视化效果, 可以满足系统设计需求。

**关键词:** GIM 模型; 智能变电站; 二次回路; 三维可视化; 时序模型

### Design of a three-dimensional visualization system for the secondary circuit of an intelligent substation based on a GIM model

ZHANG Jianguang<sup>1</sup>, CHEN Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHU Songtao<sup>1</sup>, LU Di<sup>1</sup>, DONG Xiaohong<sup>2</sup>

(1. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** There are many objects to be simulated in the secondary circuit of a smart substation, and it has the characteristics of timing and non timing. This leads to the poor three-dimensional visualization. A three-dimensional visualization system of the secondary circuit of a smart substation based on a GIM model is designed. The hardware part of the system focuses on the design of processor, transformer sampling module and transformer sampling module. In the system software part, the spatial data organization and management, intersection calculation between geometric elements, model cutting and fitting are carried out. The timing model is established using the GIM model to complete the design. The experimental results show that the proposed system not only improves the modeling frame rate, visualization efficiency and effect, but also has no defects in the visualization results. It also reduces the number of construction changes, cost and period, and the maximum reduction of the construction cost is close to 0.5. Therefore it shows that the designed system improves the three-dimensional visualization and can meet the requirements of system design.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 062901-DMSJY).

**Key words:** GIM model; smart substation; secondary circuit; three-dimensional visualization; time series model

## 0 引言

在智能变电站中, 二次回路能够监测一次回路中相关的运行参数, 对提高变电站运行安全性有重要意义<sup>[1-2]</sup>。基于其这个优点, 二次回路已经逐渐替

代了传统的电缆回路, 因此对二次回路的监测具有重要的研究价值。当前, 三维可视化技术已经被广泛应用到各行各业中, 但是在智能变电站中还没有系统地开展, 并且在设计时, 三维模型构建起来比较困难。

针对二次回路三维可视化存在的问题, 有较多学者进行了相关研究, 文献[3]研究了基于网络拓扑

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(062901-DMSJY)

的数字化变电站虚回路三维可视化系统设计方法，针对变电所网络结构和二次回路特点，设计了数字化变电站回路三维可视化系统。文献[4]研究了智能变电站二次电缆回路可视化系统，该系统建立二次回路模型，然后设定二次电缆线路的配置流程，通过可视化工具实现变电站二次回路的多维可视化显示。文献[5]研究智能变电站三维可视化系统，将回路模型投影，生成正投影图。采用聚合度函数聚合投影后的回路模型，利用多叉树混合模型建立索引并生成三维展示模型。

上述研究虽然能够实现二次回路三维可视化设计，但是可视化效果较差，已经不能满足二次回路三维可视化的应用需求。电网信息模型(grid information model, GIM)技术能够结合对象的时序性特征进行三维可视化模型设计，具有协同设计、信息共享等优点。基于 GIM 技术的特点，设计一个基于 GIM 模型的智能变电站二次回路三维可视化系统。该系统设计共分为两部分：硬件部分设计处理器、互感器采样模块与振动监测仪；软件部分主要采用 GIM 模型建立时序模型，从而实现智能变电站二次回路的三维可视化。通过上述设计可以有效解决当前变电站二次回路三维可视化设计时存在的问题。

### 1 系统结构

本文研究的基于 GIM 模型的智能变电站二次回路三维可视化系统结构如图 1 所示。

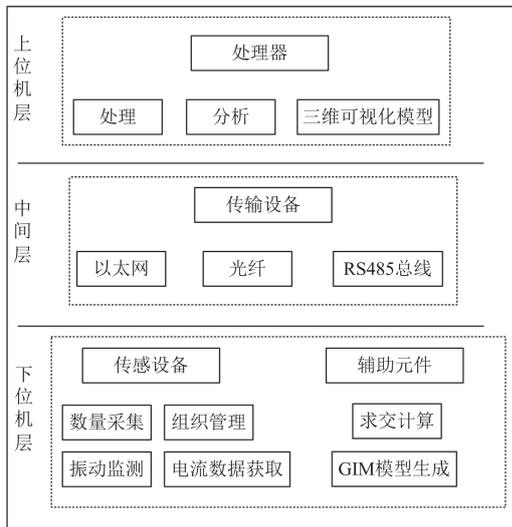


图 1 系统结构  
Fig. 1 System structure

所设计的系统主要由上位机层、下位机层与中间层 3 个层次构成。

上位机层。该层能够对发送过来的智能变电站

二次回路运行数据进行分析与处理，生成三维可视化模型，并能够展示可视化模型，为智能变电站管理提供基础依据。

中间层。该层主要用于发送系统运行的全部数据，是整个系统的连接纽带。

下位机层<sup>[6]</sup>。下位机层中包含有较多的传感设备，能够实时采集系统内部信息，并能够生成模型，具有实时收集信息的功能。

### 2 系统硬件设计

本文所设计的系统硬件结构如图 2 所示。

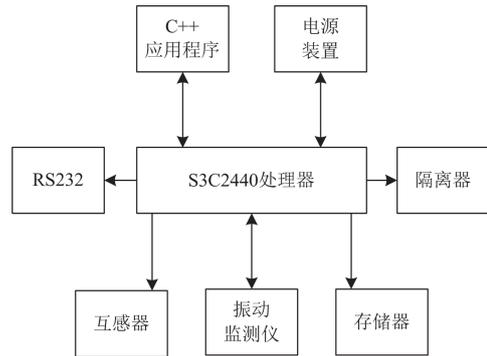


图 2 系统硬件结构

Fig. 2 System hardware structure

从图 2 中可以看出，系统硬件部分主要由 S3C2440 处理器、电源装置、C++ 应用程序、RS232 通信接口、隔离器、振动监测仪及存储器组成。其中，S3C2440 处理器是系统硬件的核心控制单元，也是系统的核心组成部分，主要负责变电站二次回路运行数据的处理；电源装置为系统提供稳定的电源；RS232 接口主要为系统提供通信功能；隔离器可以避免其他信号产生的干扰；摄像头与振动监测仪主要负责采集变电站二次回路运行的相关数据<sup>[7]</sup>。

#### 2.1 处理器设计

在系统硬件中，将 S3C2440 处理器作为核心器件，该器件主要包含内存、以太网卡与声卡等<sup>[8]</sup>。该处理器具有数据通道高速与处理速度快的优点，同时在该处理器上构建嵌入式平台，实现图像采集功能，并能够在图像采集后将压缩后的图像传输至终端<sup>[9]</sup>，通过上位机显示。

#### 2.2 互感器采样模块设计

在系统设计中，互感器能够连接一次回路与二次回路，采样模块主要由电流装置<sup>[8]</sup>、滤波器等组成，能够对二次数据进一步采集，二次数据主要包括信号接口发送、接收振动强度数据、通信口运行状态数据、接口温度数据、面向通用对象的变电站事

件(generic object oriented substation event, GOOSE)数据<sup>[10-11]</sup>、采样值报文速度等, 采集后将数据传输到二次设备中。研究采用的互感器型号为 AKH 互感器, 其额定电流比为 100 A/5 A, 准确级为 1 级, 本身未含有辅助电源。

### 2.3 振动监测仪设计

本研究采用型号为 AMS20192410 的振动监测仪, 该监测仪具有较高精确度, 采用可充电锂电池, 振幅动态范围为 0~120 dB, 最小频率范围为 0~10 Hz, 最大频率范围为 0~80 Hz, 内存为 1 GB, 数据监控频率为 6 s/次<sup>[12]</sup>。所采用的 AMS20192410 振动监测仪搭载了 Peak Vue Plus 技术, 可通过冲击脉冲对虚拟二次回路的运行状态进行实时监测, 并且该监测仪的外部接线可以直接与虚拟二次回路连接, 实现监测信息的采集与同步处理。为了提高采集和处理信息的在线监测精度, 将测量精度设在 6400 线或 12 800 线上, 提高了二次回路监测信息的准确性。虚拟二次回路监控信息采用融合共享机制, 以适应智能变电站设备的运行状态<sup>[13]</sup>。

## 3 系统软件设计

### 3.1 空间数据组织与管理

在绘制三维可视化场景时, 采用金字塔层次结构对 DEM 进行分层分割<sup>[14]</sup>, 以保证三维场景的绘制效率。在创建层次结构时, 将每个像素基于第一层采样结果重新进行像素分割, 然后再进行分组处理, 从而构成完整的金字塔层次结构。当场景间隔较小时, 加载分辨率较高的图像, 如果场景间隔越大, 则该图像的分辨率越高, 反之, 该图像的分辨率越低<sup>[15]</sup>。

### 3.2 变电站二次回路三维实景模型构建

#### 3.2.1 几何元素间求交计算

进行上述分割后进行实体建模, 在实体建模过程中, 采用 GIM 模型构建<sup>[16]</sup>。构建前需要对几何元素进行求交计算, 主要通过点线面进行求交<sup>[17]</sup>。求交基础是集合元素相互之间所处的位置关系, 通过元素之间位置关系对元素是否相交进行判断<sup>[18]</sup>。将空间中的两个点分别记作  $A(x_1, y_1)$  与  $B(x_2, y_2)$ , 求交计算实质就是判断这两个点是否重合, 用公式表示为

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

上述计算可用于判断两点之间的距离是否为零, 如果计算结果等于 0 则代表空间上两个点是重合的, 否则是不重合的<sup>[19]</sup>。

点与线求交计算<sup>[20]</sup>。该计算的实质就是对点到

线的最小距离进行计算<sup>[21]</sup>, 计算过程中将点记作  $Q$ , 计算公式表示为

$$Q = P + t_0 \vec{d} \quad (2)$$

式中:  $P$  代表其中的一个点;  $\vec{d}$  代表线;  $t_0$  代表最小距离计算参数。

点与面的求交计算。该计算就是对该点到该平面的最小距离进行计算, 平面外点  $Q(x, y, z)$  到平面  $Ax + By + Cz + D = 0$  的距离为

$$d = \frac{Ax + By + Cz + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (3)$$

上述计算结果等于零, 则表明  $Q$  点落在平面内。

#### 3.2.2 模型切割

在实际工况下, 由于变电站二次回路中有大量曲线以及曲面的相关结构<sup>[22]</sup>, 如不能正确处理, 则会影响可视化效果。因此在本小节中进行模型的切割处理, 模型切割的一般原则是根据模型上 3 个共线的点进行切割, 3 个不共线点构成的平面为切割平面, 一个切割平面可将模型切割为两个部分, 因此切割算法能够将一个实体至少分割为两个<sup>[23]</sup>, 其计算公式表示为

$$t = \frac{f(x_k)}{p(t) \cdot p(t)'} \quad (4)$$

式中:  $f(x_k)$  代表附近的一个近似值;  $p(t)$  代表求解点;  $p(t)'$  代表初始点到该点的距离参数。

通过上述迭代计算, 能够实现变电站二次回路三维实景模型的切割, 直至满足模型的构建要求。

#### 3.2.3 模型贴合

模型贴合的主要步骤如下:

(1) 对两个实体进行求交运算<sup>[24]</sup>, 找到实体重合的顶点。由于重合顶点是成对存在的, 因此仅需计算顶点对中一个顶点的位置即可, 以提高运算效率。

(2) 从新的数组中选取两个顶点, 将这两个重合的顶点连接, 连接后形成一条新的边<sup>[25]</sup>。判断形成的边是否与原来两个贴合实体的边重合, 如果重合, 则将原链表中的边删除。

(3) 遍历所有顶点与原实体模型中所有的边, 如果有重复的边则将其全部删除。

(4) 在数组中提取出一个顶点<sup>[26]</sup>, 判断该顶点与删除后的实体模型剩余的边是否是相交的, 如果相交则说明这条边上有顶点。在顶点判断上, 将顶点定义为  $\nu = [\nu_x, \nu_y, \nu_z, 1]^T$ , 作为误差度量, 对新顶点到该边的所有平面距离的平方和进行计算<sup>[27]</sup>, 计算公式为

$$\Delta(\mathbf{v}) = \sum_{p \in S(\mathbf{v})} (\mathbf{v}^T \mathbf{p})(\mathbf{p}^T \mathbf{v}) \sum_{p \in S(\mathbf{v})} \mathbf{K}_p \quad (5)$$

式中： $S(\mathbf{v})$  表示相关面片； $\mathbf{K}_p$  表示空间中任意一个点对平面距离的计算矩阵。将  $\mathbf{K}_p$  表示为

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(5) 遍历所有顶点和边，如果两条半边的顶点重合，则将这一组的半边组合成一个新的边，并将原来的边删除。根据产生的新顶点可以计算出贴合点位置，如式(7)。

$$Q' = Q_i \cdot Q_j \quad (7)$$

式中， $Q_i$ 、 $Q_j$  表示产生的新顶点。

基于上述过程得到贴合模型，通过贴合面的处理能够生成新的面信息。

### 3.2.4 基于 GIM 的三维可视化模型构建

由于在智能变电站模型构建中，既有时序性又有非时序性特征，为此需要进一步分析建模<sup>[28]</sup>。为了不失一般性，假设在模型构建中某个序列随着自变量变化而形成的序列为

$$y(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

在此基础上，将上述序列进行微分拟合为

$$\frac{dy}{dx} (dx, dy) \quad (9)$$

数学解析式如式(10)所示。

$$\vec{y} = p x_4^{-3} + q x_4 \quad (10)$$

式中： $p$ 、 $q$  分别代表待辨识的灰度系数； $(dx, dy)$  代表空间坐标值。

经上述计算，得到优化后的 GIM 模型，基于上述过程建立起三维模拟场景。工作人员能够对设备的状态信息进行巡视，并能够根据预设路线对智能变电站进行模拟巡视。同时可以采用鼠标加上键盘的方式对视角进行控制，生动地展示变电站设备状态信息，使巡视过程更加直观。

## 4 实验

分析所研究的基于 GIM 模型的智能变电站二次回路三维可视化系统在实际场景中的应用效果，并将所设计系统与文献[3]提出的基于网络拓扑的可视化系统和文献[4]提出的智能变电站二次电缆回路可视化系统进行对比。

该实验以某 220 kV 智能变电站为实验对比对

象，在变电站内设置下位机硬件设备，并采用网状方式对其进行布局，避免了监控盲点的发生。然后打开变电所内部传感装置及辅助元件，采集实验数据与图像，并将采集到的信息传送至上位机进行分析处理，得到实验数据。

### 4.1 建模效果对比

将本文所提出的方法与基于网络拓扑法及传统二次回路可视化方法相比较，检测模型的模拟帧速对比结果如表 1 所示。

表 1 帧速对比

Table 1 Frame rate comparison

模拟场景	帧速/s		
	所设计系统	基于网络拓扑的可视化系统	智能变电站二次电缆回路可视化系统
场景 1	96.54	89.25	78.36
场景 2	96.24	86.32	78.32
场景 3	93.15	84.21	74.21
场景 4	95.35	82.25	82.02
场景 5	95.31	83.21	80.21
场景 6	96.12	89.36	74.35
场景 7	94.12	84.12	71.02
场景 8	97.12	72.12	70.15
场景 9	92.54	74.21	82.14
场景 10	93.21	78.31	81.21

由表 1 可知，所提出的变电站二次回路三维可视化系统帧速数值非常理想，且数值都较为接近，在 10 个场景的可视化设计中，帧速没有较大的波动，说明所研究的系统性能非常稳定。其他两种系统在模拟过程中，帧速数值变化较大，一些数值不是很接近，模拟稳定性较提出的系统差。

### 4.2 三维可视化效率对比

分析在模拟对象数据量不断增加的情况下，所提出的系统与其他两种系统在变电站二次回路三维可视化设计中消耗的时间，分析所提出系统的建模效率，时间消耗对比结果如图 3 所示。

分析图 3 可知，随着数据量增加，所提出的智能变电站二次回路三维可视化系统消耗的时间无明显增长，并且所花费的时间都是最少的。将其他两种系统与所设计系统相比可知，其他两种系统均表现出随着数据量增多时间也增多的现象，可视化效率均低于所提出的变电站二次回路三维可视化系统。

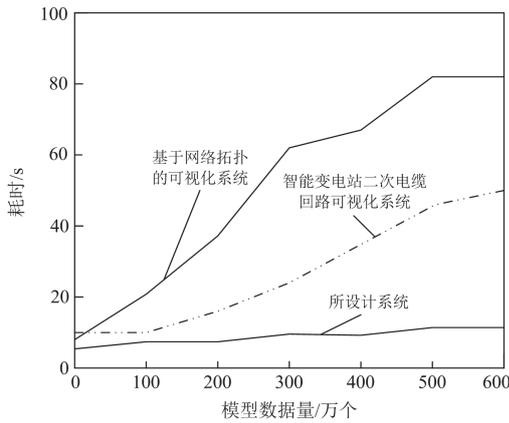


图 3 可视化效率对比

Fig. 3 Comparison of visualization efficiency

### 4.3 三维可视化效果对比

在本文研究过程中, 三维可视化效果的评价主要从三维可视化清晰度、完整度两方面进行。在该部分实验中, 将手动电控回路保护装置作为模拟对比, 对比 3 种系统在手动电控回路保护装置上的可视化模拟效果, 可视化效果的对比结果如图 4 所示。

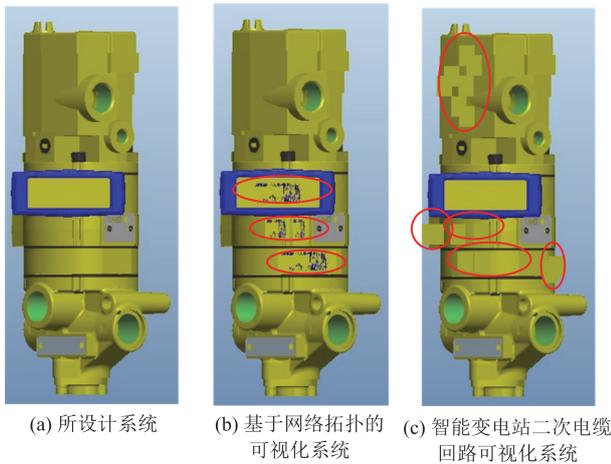


图 4 手动电控回路保护装置模拟效果对比

Fig. 4 Comparison of simulation effects of manual electronic control loop protection devices

由图 4 可知, 另外两种系统模拟后的手动电控回路保护装置在不同地方均出现了模糊现象, 并且出现的次数较多。而所研究的系统在模拟设计中呈现出的装置表面非常清晰, 没有出现模糊情况, 比其他两种系统的模拟效果好。

### 4.4 施工变更次数对比

对比所设计的系统与其他两种系统在可视化模拟后 10 个场景的施工变更次数, 变更次数越少说明系统的可视化效果越好, 变更次数越多说明可视化

效果越差, 可视化效果与实际场景有明显差距, 对比结果如表 2 所示。

表 2 施工变更次数对比

Table 2 Comparison of construction change times

场景	变更次数		
	所设计系统	基于网络拓扑的可视化系统	智能变电站二次电缆回路可视化系统
场景 1	0	1	3
场景 2	0	1	3
场景 3	0	1	2
场景 4	0	2	2
场景 5	0	2	4
场景 6	0	2	4
场景 7	0	0	1
场景 8	0	0	0
场景 9	0	1	1
场景 10	0	2	2

通过分析表 2 能够发现, 经过所研究的三维可视化系统设计后, 没有出现施工变更情况。其他两种系统均发生了不同次数的施工变更情况。说明所研究的三维可视化系统能够准确建立变电站二次回路三维实体模型, 并能够理解设备之间的空间关系, 及时避免了各个设备之间的碰撞问题, 从而减少了施工变更次数。

### 4.5 施工工程造价对比

应用 3 种系统对 10 个场景三维可视化设计, 对比设计后 10 个场景在实际中花费的成本, 对比结果如表 3 所示。

表 3 施工工程造价对比

Table 3 Comparison of construction cost

场景	施工成本/万元		
	所设计系统	基于网络拓扑的可视化系统	智能变电站二次电缆回路可视化系统
场景 1	20	35	38
场景 2	22	36	40
场景 3	25	34	40
场景 4	23	38	39
场景 5	24	35	38
场景 6	23	38	38
场景 7	25	40	36
场景 8	20	35	34
场景 9	23	32	35
场景 10	25	35	38

由表 3 可知, 经过所研究的系统设计后, 明显降低了施工成本, 说明所研究的系统可视化效果好, 能够最大限度地避免平面设计的盲区, 并能够避免设备、电路之间的碰撞问题, 减少不必要资金的花费, 从而降低了施工成本。而基于网络拓扑的可视化系统、智能变电站二次电缆回路可视化系统花费的成本较多, 原因可能是在可视化过程中出现盲区或者碰撞问题, 增加施工变更情况从而增加了施工的成本。

#### 4.6 施工周期对比

应用 3 种系统对 10 个场景三维可视化设计, 对比应用 3 种系统后这 10 个场景的施工周期, 对比结果如表 4 所示。

表 4 施工周期对比

Table 4 Comparison of construction period

场景	施工周期/天		
	所设计系统	基于网络拓扑的可视化系统	智能变电站二次电缆回路可视化系统
场景 1	5	8	9
场景 2	5	9	9
场景 3	6	9	10
场景 4	6	10	12
场景 5	5	10	12
场景 6	5	11	13
场景 7	6	12	14
场景 8	5	13	12
场景 9	5	14	13
场景 10	6	10	14

由表 4 可知, 所研究系统的施工周期明显少于其他两种系统的施工周期, 经过所研究系统可视化设计后, 在几个场景的施工上都能够有效减少施工周期, 因为所研究的三维可视化系统设计更加方便。在设备布置发生改变时, 需要对模型改变就能够生成平面图、剖面图以及材料表, 出图速度更快, 从而缩短了施工的时间。另两种系统施工周期比本文研究的系统施工周期长, 原因可能是三维设计时各个设备布置和电路走向不明确, 出现变更情况, 从而增加了变电站的施工周期。

综上所述, 所研究的智能变电站二次回路可视化系统不仅有效提高了三维可视化效果与可视化效率, 而且减少了施工变更次数、施工成本和施工周期。所研究系统获得较好效果的原因是: 该设计方法重点设计了系统软件, 并将 GIM 模型应用到了系

统中, 规划了可视化流程, 同时提出碰撞检测算法, 从根本上提高了三维可视化效果。

## 5 结语

本文主要完成智能变电站二次回路三维可视化系统的设计, 该系统有效提高了二次回路可视化效果, 在实际应用中降低了施工周期、施工成本与施工次数。本文所设计系统的主要创新贡献如下:

1) 在系统硬件部分将 S3C2440 处理器作为系统的核心部分, 使三维可视化系统具有更快的响应速度。

2) 在系统软件部分, 提出了碰撞检测算法, 在模型模拟后就能够避免二次回路三维模拟时出现碰撞情况。

3) 将 GIM 模型应用到了二次回路可视化设计中, 充分考虑了二次回路的时序性特征, 提高了系统的应用效果。

## 参考文献

[1] 李重庆, 董如亚, 卞秋野, 等. 基于 IEC 61850 的智能变电站高压线路保护建模[J]. 山东电力技术, 2020, 47(5): 12-17.  
LI Chongqing, DONG Ruya, BIAN Qiuye, et al. Modeling of high voltage line protection in intelligent substation based on IEC 61850[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(5): 12-17.

[2] 王洪俭, 王森, 吕超. 变电站二次电压并列和切换回路应用策略研究[J]. 山东电力技术, 2021, 48(1): 15-21.  
WANG Hongjian, WANG Sen, LÜ Chao. Strategy research of secondary voltage parallel and switching circuits usage[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(1): 15-21.

[3] 韩文军, 王磊, 李达锋, 等. 基于网络拓扑的数字化变电站虚回路三维可视化方法[J]. 科技通报, 2019, 35(7): 122-125.  
HAN Wenjun, WANG Lei, LI Dafeng, et al. Digital substation virtual circuit three-dimensional visualization method based on network topology[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(7): 122-125.

[4] 郝晓光, 耿少博, 任江波, 等. 智能变电站二次电缆回路建模方法研究与应用[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 161-168.  
HAO Xiaoguang, GENG Shaobo, REN Jiangbo, et al. Research and application of modeling method of secondary cable loop in intelligent substation[J]. Journal

- of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 161-168.
- [5] 孙小虎, 韩文军, 潘娟, 等. 基于聚合与动态调度的变电站三维可视化研究[J]. 计算机工程, 2019, 45(12): 300-307.  
SUN Xiaohu, HAN Wenjun, PAN Juan, et al. Research on three-dimensional visualization of substation based on aggregation and dynamic scheduling[J]. Computer Engineering, 2019, 45(12): 300-307.
- [6] 方贞泽, 万淑娟, 邱新娟, 等. 适应智能变电站就地化线路保护的双模高密度预制光缆研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 123-128.  
FANG Zhenze, WAN Shujuan, QIU Xinjuan, et al. Analysis of the dual-mode high-density prefabricated optical cable for outdoor installation line protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 123-128.
- [7] 李彦, 许宗光, 李广华, 等. 二次设备网络压力防护技术方案研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 82-86.  
LI Yan, XU Zongguang, LI Guanghua, et al. Research on the technical scheme of network pressure protection for secondary equipment[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 82-86.
- [8] 姚庆华, 董林会. 现代智能变电站中二次回路延时检测方法的研究分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 188-192.  
YAO Qinghua, DONG Linhui. Research and analysis of the secondary circuit delay detection method in modern intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 188-192.
- [9] CELEITA D, PEREZ J D, RAMOS G. Virtual relay design for feeder protection testing with online simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 143-149.
- [10] 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.
- [11] 陈宏山, 余江, 姜淼, 等. 基于 GOOSE 通信的分布式接地选线应用[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 192-199.  
CHEN Hongshan, YU Jiang, JIANG Miao, et al. Application study of distributed grounding line selection method based on GOOSE communication[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 81-91.
- [12] PANDAKOV K, ADRAH C M, HØIDALEN H K, et al. Experimental validation of a new impedance-based protection for networks with distributed generation using co-simulation test platform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 35(3): 1136-1145.
- [13] 苏谟, 刘宇, 王其乐, 等. 面向 IT 系统结构可视化的实时渲染方法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(4): 769-774.  
SU Mo, LIU Yu, WANG Qile, et al. Real-time rendering method for IT system structure visualization[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(4): 769-774.
- [14] 刘溟, 张锡洋, 邹建明, 等. 三维定位方法在变电站局部放电检测中的应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 111-118.  
LIU Ming, ZHANG Xiyang, ZOU Jianming, et al. Application of three-dimensional location method of partial discharge detection in substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 111-118.
- [15] 林钟扬, 金翔龙, 朱朝晖, 等. MapGIS K9 平台在三维地质可视化模型构建中的应用[J]. 中国科技论文, 2019, 14(9): 998-1003.  
LIN Zhongyang, JIN Xianglong, ZHU Chaohui, et al. Application of MapGIS K9 platform in construction of 3D geological visualization model[J]. China Science Paper, 2019, 14(9): 998-1003.
- [16] NOUGAIN V, JENA M K, PANIGRAHI B K. Synchronizers assisted back-up protection of transmission line[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(14): 3414-3420.
- [17] 周柯, 王晓明, 巫聪云, 等. 智能变电站改扩建镜像调试技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 168-176.  
ZHOU Ke, WANG Xiaoming, WU Congyun, et al. Research and application of image debugging technology for reconstruction and extension of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 168-176.
- [18] 付文龙, 谭佳文, 吴喜春, 等. 基于图像处理与形态特征分析的智能变电站保护压板状态识别[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 203-207.  
FU Wenlong, TAN Jiawen, WU Xichun, et al. Protection platen status recognition based on image processing and morphological feature analysis for smart substation[J].

Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 203-207.

[19] 同嘉. 基于 BIM 全景可视化的架空电力线磁场三维仿真计算研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 169-175.  
TONG Jia. Study of overhead power line magnetic field 3D simulation calculation based on BIM panoramic visualization[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 169-175.

[20] 梁文武, 朱维钧, 李辉, 等. 基于粗糙集的智能变电站保护设备仿生故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 132-140.  
LIANG Wenwu, ZHU Weijun, LI Hui, et al. A rough set-based bio-inspired fault diagnosis method for smart substation protection equipment[J]. Power system Protection and Control, 2021, 49(21): 132-140.

[21] 冯正伟, 汪铭峰, 梁慧, 等. 智能变电站 MMS 通信异常案例分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(10): 6-10.  
FENG Zhengwei, WANG Mingfeng, LIANG Hui, et al. Case analysis of abnormal MMS communication in intelligent substation[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(10): 6-10.

[22] 王鸣誉, 李铁成, 任江波, 等. 利用 Apriori 算法实现变电站二次系统故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(11): 145-150.  
WANG Mingyu, LI Tiecheng, REN Jiangbo, et al. Realization of fault diagnosis of substation secondary system using Apriori algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(11): 145-150.

[23] 付豪, 俞一峰, 纪陵, 等. 基于可配置规则的变电监控故障分析系统[J]. 浙江电力, 2020, 39(11): 61-67.  
FU Hao, YU Yifeng, JI Ling, et al. Substation monitoring fault analysis system based on configurable rules[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(11): 61-67.

[24] 阴锡君, 刘郁, 王一珺. 图像融合技术在变电站设备热故障监测中的应用研究[J]. 科技通报, 2019, 35(12): 121-124.  
YIN Xijun, LIU Yu, WANG Yijun. Application research of image fusion technology in thermal fault monitoring of substation equipment[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(12): 121-124.

[25] 周飞飞, 何迎利, 赵华, 等. 基于时间敏感网络的流量调度机制在智能变电站中的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 107-114.  
ZHOU Feifei, HE Yingli, ZHAO Hua, et al. Research and implementation of traffic scheduling mechanism based on time-sensitive network in intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 107-114.

[26] 陈碧云, 张福勇. 云模型在变电站作业风险感知中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(7): 23-29.  
CHEN Biyun, ZHANG Fuyong. Application of cloud model in risk awareness of substation operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(7): 23-29.

[27] 冯跃, 吴跃康, 任杰, 等. 基于无线同步技术的数字化变电站二次系统新型测试方法[J]. 中国测试, 2020, 46(1): 117-123.  
FENG Yue, WU Yuekang, REN Jie, et al. A new testing method based on wireless synchronization technology for the secondary system of digital substation[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(1): 117-123.

[28] 简学之, 刘子俊, 文明浩, 等. AR 增强现实技术在变电站二次设备运检中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 170-176.  
JIAN Xuezhi, LIU Zijun, WEN Minghao, et al. Application of operation and maintenance of intelligent substation equipment based on augmented reality technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 170-176.

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-03-14

作者简介:

章剑光(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电网故障诊断与规划设计; E-mail: 83100440@qq.com

陈晓宇(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程;

朱松涛(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统。

(编辑 魏小丽)