



基于聚合与动态调度的变电站三维可视化研究

孙小虎¹, 韩文军¹, 潘 娟², 许 刚²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘 要: 为加快变电站三维场景可视化的加载速度, 提出一种地物模型集群聚合与多叉树混合索引结构动态调度的数据组织方法。将地物模型投影生成正投影图得到集群划分子集, 基于聚合度函数聚合集群后的地物模型, 利用多叉树混合结构建立索引并动态调度生成场景树进行三维展示。对特高压输变电工程案例进行三维测试的结果表明, 集群聚合地物模型和动态调度多叉树混合索引结构能够提高三维输变电场景的加载速度, 可有效支撑电网工程数字化移交中三维场景交互可视化的应用。

关键词: 数字化移交; 多叉树混合索引结构; 细节层次模型; 地物模型; 聚合度函数

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 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.

英文引用格式: 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.

Research on Three-Dimensional Visualization of Substation Based on Aggregation and Dynamic Scheduling

SUN Xiaohu¹, HAN Wenjun¹, PAN Juan², XU Gang²

(1. State Grid Economic and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

[Abstract] In order to accelerate the loading speed of three-dimensional visualization scene of substation, this paper proposes a data organization method based on the clustering and aggregation of ground object model and the dynamic scheduling of n-ary tree hybrid index structure. First, the orthographic map of the ground object model is formed and its clustering is achieved. Then, the clustered ground object model is aggregated by the aggregation degree function. Then, the index is built by utilizing the n-ary tree hybrid structure, and so is the three-dimensional display by dynamic scheduling. The three-dimensional test of a UHV power transmission project shows that the clustered aggregated ground object model and the dynamic scheduled n-ary tree hybrid index structure can improve the loading speed of three-dimensional power transmission scene, and effectively support the application of three-dimensional scene visualization in the digital handover of power grid engineering.

[Key words] digital handover; multi-fork tree hybrid index structure; Level of Detail (LOD) model; ground object model; aggregation degree function

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0053323

0 概述

当前输变电工程数字化设计成果移交体系已基本建立, 各阶段成果不断汇集, 数字化设计成果的数据量越来越大, 三维可视化作为数字化成果移交的一部分, 其数据量也随之变大。受限于软硬件技术

的发展水平, 计算机无法一次性加载海量数据, 加之变电站场景具有线路繁复、设备形状不规则且数量庞大等特点, 使得变电站场景中地物模型的数据组织更加困难。因此, 必须寻求一种适用于输变电工程的三维数据组织和调度方法, 实现场景的显示和交互。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“输变电工程数字化设计成果在运维管理中的研究应用”(B3441617K003)。

作者简介: 孙小虎(1978—), 男, 高级工程师, 主研方向为三维场景可视化技术、遥感数据; 韩文军, 高级工程师; 潘娟, 硕士研究生; 许刚, 教授、博士生导师。

收稿日期: 2018-12-06

修回日期: 2019-01-12

E-mail: 18813170271@163.com

目前对变电站三维可视化的研究主要有基于点云数据的可视化技术^[1]、基于细节层次模型的可视化技术^[2]等,文献[3-4]对变电站三维设计过程进行了介绍。对于加快可视化加载速度的现有研究集中于使用瓦片金字塔、LOD 技术解决三维场景加载问题,提高场景加载速度。文献[5]提出三维自适应金字塔模型,将三维地形数据转换为地形数据逻辑单元,通过多源异构数据融合,实现三维地理信息系统中海量三维地形数据的快速显示。文献[6]以金字塔结构为基础建立地物模型的空间划分及层级索引的构建方法,有效地控制了索引冗余,使大量三维地物模型能够高效显示。文献[7-8]通过研究计算机缓存和显示策略,提高三维场景的载入速度,一定程度上缓解了计算机存储的压力。文献[9-10]通过改进 LOD 技术解决了加载三维场景时不同细节层次的要求而引起的数据量过大问题。上述方法一定程度上提高了三维数据加载速度,但是存储数据量较大。瓦片金字塔模型需要存储大量具有不同分辨率的瓦片,而 LOD 技术需要存储大量地物模型不同细节层次的数据,加载三维场景时需要占用大量的计算机缓存空间,影响加载速度。提高三维场景加载速度需运用合适的索引方法,如格网索引^[11]、四叉树索引^[12]、八叉树索引^[13]、R 树索引^[14]等,上述索引方法及其改进算法能较好地适用于影像的空间划分和索引,但是根据变电站中地物模型的特点,需要建立特定的地物模型索引方法。

本文提出一种地物模型集群聚合与多叉树混合索引结构动态调度的数据组织方法。通过对变电站中的地物模型集群聚合,减少不同 LOD 中地物模型的数据量,并基于聚合算法生成多叉树混合索引结构变电站地物模型数据,利用多叉树混合索引结构动态调度生成场景树进行三维展示。

1 变电站场景三维地物模型聚合算法设计

为加快变电站三维场景的加载速度,通过聚合变电站地物模型,减少加载模型的数据量。本文在地物模型 LOD1 中进行地物模型的聚合,聚合算法同样适用于 LOD2、LOD3 等高细节层次。适当地组织各个抽象层次下的模型聚合程度,可以在不引起三维场景地物模型失真的情况下加快三维场景的展示。

1.1 变电站场景中三维地物模型投影和集群

1.1.1 变电站场景中三维地物模型的投影

用 $I = \{gp, name, height, area, type\}$ 来表示变电站三维场景中的模型,其中, gp 表示模型的正投影图, $name$ 表示模型的名称, $height$ 表示模型的高度, $area$ 表示模型的占地面积, $type$ 表示模型的类型。为了便于之后模型的聚合,对变电站三维场景中的

模型进行投影,得到地物模型的正投影图。由于变电站中的架空线路在 LOD1 中没有视觉贡献,因此去除繁多的架空线路达到简化的目的。投影规则如下:

1) 将变电站地物模型的所有表面投影到地面,形成封闭的多边形。

2) 取封闭多边形的外轮廓,删除外轮廓内部的边和曲线,作为地物模型的正投影图。

3) 取投影前地物模型的最高点作为模型的高度,投影后的多边形面积作为地物模型的面积。

正投影图生成算法如算法 1 所示。

算法 1 正投影图生成算法

输入 变电站中的地物模型数据集

输出 地物模型的正投影图

步骤 1 初始化地物模型正投影图 gp , 三维地物模型 b , 三维地物模型的表面 s

步骤 2 $s \leftarrow getNextSurface(b)$ // 得到三维地物模型的表面

步骤 3 若 s 不为空, 对 s 投影 $p \leftarrow project(s)$

步骤 3.1 若 p 是多边形, 将 gp, p 合并 $gp \leftarrow unify(gp, p)$

步骤 3.2 若不是多边形返回步骤 2, 直到 s 为空

步骤 4 $gp \leftarrow merge(gp)$ 将 gp 中的多边形合并到一个正投影图中

以变电站三维场景中某型号的电流互感器、隔离开关和变压器为例,其依据投影规则形成的正投影图效果如图 1~图 3 所示。图 1(a)、图 2(a)、图 3(a)分别为各地物的三维模型;图 1(b)、图 2(b)、图 3(b)分别为各地物模型在原始精细状态下的投影图;图 1(c)、图 2(c)、图 3(c)分别为各地物模型按照本节的投影规则将原始精细状态下的投影图形成正投影图,以便之后的模型聚合过程,从图中可知,正投影图保留了实际投影图的轮廓,在一定程度上降低了地物模型的失真效果。

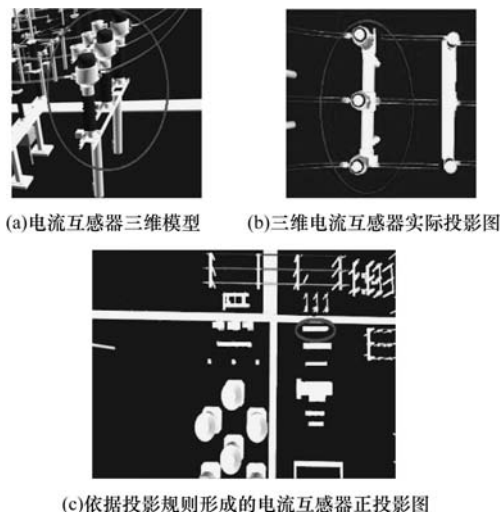


图 1 某型号电流互感器投影效果

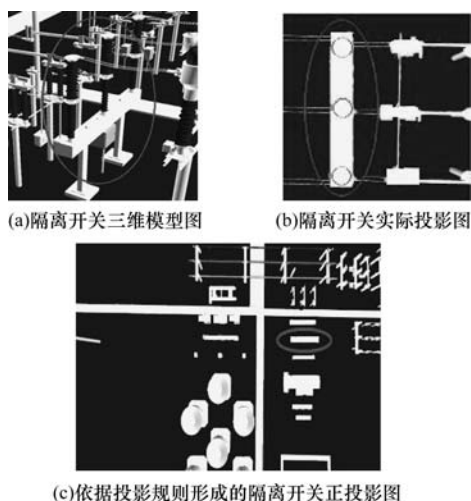


图 2 某型号断路器投影效果

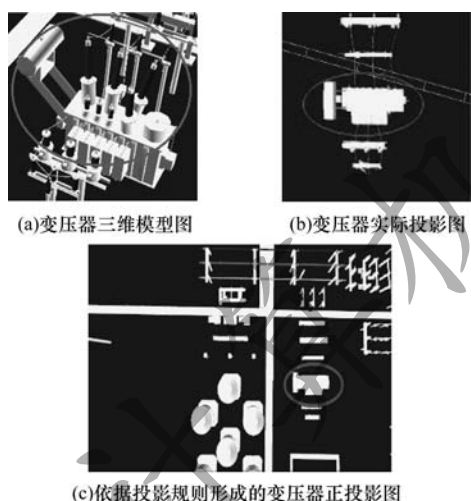


图 3 某型号变压器投影效果

1.1.2 变电站场景中三维地物模型的集群

在对三维变电站场景进行聚合前,需要对变电站中的地物模型进行集群划分,使位于道路同侧且属于同一类型的地物模型方可进行聚合。变电站地物模型的类型分为设备模型、设施模型,其中设备模型包括主变压器、GIS、电抗器、电压互感器、电流互感器、避雷器、隔离开关、接地开关、电容器、站用变压器、开关柜等,设施模型包括防火墙、建筑物、围墙、避雷针、道路、电缆沟、给排水管道、HVAC 等^[15],属于设备模型的 $type$ 值为 0,属于设施模型的值为 1。集群划分依据如下:

1) 基于主干道路网络的初划分。由于位于主干道两侧的变电站地物模型进行聚合会影响三维场景的整体面貌,因此通过变电站中的主干道路网交叉所形成区域将变电站地物模型进行分区形成地物模型子集。

2) 基于设备类型的进一步划分。规定不同类别的变电站地物模型不可进行聚合,对初划分得到地物模型子集进一步依据设备类型 $type$ 再划分,最终得到地物模型集群划分子集 I_i 。

地物模型集群算法如算法 2 所示。

算法 2 地物模型集群算法

输入 地物模型投影图以及地物模型投影图质心

输出 地物模型集群划分子集

步骤 1 $G(V, E) = \text{Delaunay_triangulation}(P)$ 创建所有建筑物的三角剖分。

步骤 2 用 e 表示建筑物三角剖分的边,用 r 表示主干道路网集合。

步骤 3 若建筑物三角剖分的边集合 E 不为空, $\text{LineString road} \leftarrow \text{get_Next_Road}(R)$ 取主干道路网中的路。

步骤 3.1 若 road 不为空, road 与 E 相交, $\text{delete}(E)$ 并返回步骤 3;反之 $\text{LineString road} \leftarrow \text{get_Next_Road}(R)$ 再执行步骤 5。

步骤 3.2 若 road 为空,返回步骤 3。

步骤 4 若建筑物三角剖分的边集合 E 为空,算法终止。

步骤 5 通过删除边生成子图,形成地物模型子集;通过地物模型的数据类型标识,对地物模型进一步划分。

1.2 基于聚合度函数的地物模型聚合算法

本文通过投影和集群对地物模型进行预处理,为了降低地物模型数据复杂度,依据聚合度函数对地物模型进行聚合。

1.2.1 地物模型聚合规则

地物模型聚合规则如下:

1) 正投影图聚合时的几何规则

假设 P_{s1} 和 P_{s2} 是 2 个地物模型的正投影图, P_s 是聚合后模型。聚合过程的几何规则具体有 3 种情况:

情况 1 遍历 1 个变电站模型正投影图的所有边,找出 2 个正投影图中距离最近的 2 条边,如图 4(a)所示的 a_1b_1 和 a_2b_2 。将距离最近的 2 条边的顶点连接,使得连接的 2 条边和最小,形成凸包;然后将最近边的各自相邻的 2 条边向凸包方向延长,如果延长线与投影图相交则保留,否则删除。重新连接顶点和交点,使得连边和最小。如图 4(b)中顶点和交点的连边和最小,即 a_1z_1 、 b_1z_2 连边和。

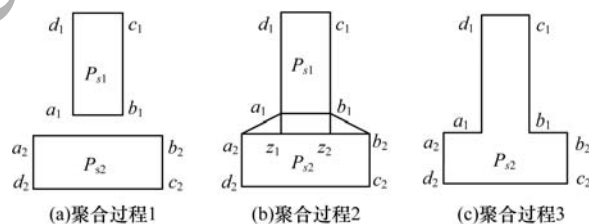


图 4 地物模型聚合过程

情况 2 若聚合时模型的正投影图出现圆形时,过圆心作到多边形边的垂线,选择最短的垂线,得到垂直于该垂线的直径,将该直径作为圆的边按照上述方法进行聚合,如图 5 所示。

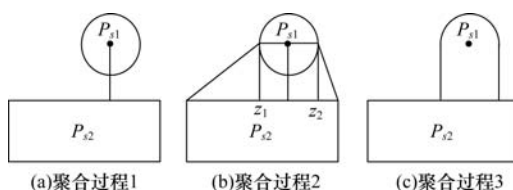


图 5 地物模型投影图为圆形时的聚合过程

情况 3 若出现正投影图中的 2 条边都距离另一个正投影图的边距离最短,则任选其一。如图 6 所示, a_1a_2 和 a_2a_3 2 条边距离多边形 P_{s2} 的距离都为最短时,选择 a_1a_2 边进行聚合。

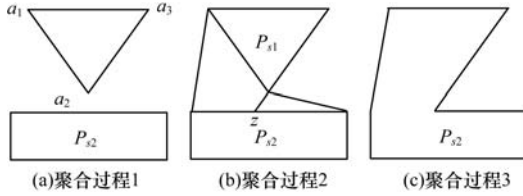


图 6 正投影图中多条边之间距离最小的聚合过程

2) 聚合后模型面积和高度的定义规则

变电站场景中聚合高度差异较大的 2 个地物模型,可能引起不同 LOD 层级切换时地物模型显示差异较大,出现模型突变与跳跃。因此,需要设计合适的聚合规则,使得地物模型聚合前后的面积与高度间关系不发生严重失真。

聚合后的地物模型的面积定义为聚合前 2 个地物模型的面积和,如式(1)所示,将聚合后地物模型的高度通过式(2)以加权的方式定义。取 2 个地物模型 I_{11} 、 I_{12} ,聚合成新的地物模型 G_{ij} , $area_{11}$ 、 $height_{11}$ 、 $area_{12}$ 、 $height_{12}$ 、 $area$ 、 $height$ 为地物模型 I_{11} 、 I_{12} 、 G_{ij} 的面积和高度。

$$area = area_1 + area_2 \quad (1)$$

$$height = \frac{area_1 \times height_1 + area_2 \times height_2}{area} \quad (2)$$

1.2.2 地物模型聚合流程

依据变电站地物模型集群划分后的一个子集 I_i ,将其中面积差异较大的地物模型通过相对面积参数 d 进行加权处理,如式(3)所示。

$$d = d_e \times \frac{A_{\min}}{A_{\max}} \quad (3)$$

其中, d_e 表示 2 个模型正投影图中心的欧氏距离, $A_{\min}$ 、 $A_{\max}$ 分别为子集中 2 个模型正投影图面积的较小值与较大值。若 d 小于阈值,则将面积较小的模型投影图删除,将较大模型正投影图的面积扩展到 2 个模型面积和;若 d 大于阈值,则依据聚合度函数式(4)判断是否聚合。通过设定阈值,实现不同 LOD 层级下的地物模型的聚合状态。

$$D = \sqrt{d_e^2 + weight(height_i - height_j)} \quad (4)$$

其中, d_e 表示 2 个模型正投影图中心的欧氏距离, $height_i$ 、 $height_j$ 为满足上述条件的子集中 2 个地物模型的高度, $weight$ 表示高度在聚合度函数中占有的权值,设置适当的权值使得模型显示时不会出现严重失真。若聚合度值小于阈值,则 2 个地物模型按照第 1.2.1 节中聚合规则进行聚合,否则不进行聚合。

2 地物模型数据组织和动态调度方法设计

本文基于聚合度函数提出一种加快三维模型加载速度的聚合算法,并给出一种地物模型数据组织方法快速调度地物模型。为支持多个 LOD 的实时可视化,在集群聚合算法基础上,设计多叉树混合索引结构组织地物模型数据。

2.1 多叉树混合索引结构的构建

多叉树混合索引结构的生成过程基于聚合算法,变电站三维场景中具体的地物模型作为叶子节点,依据聚合度函数对集群划分后的子集进行聚合,自下而上地生成二叉树,直到所有的地物模型都进行聚合为止。二叉树生成过程如图 7 所示,开始时地物模型的集合为 $I = \{1, 2, 3, 4, 5\}$,根据聚合度值,将 1 和 2 合并为 d ,集合变为 $\{d, 3, 4, 5\}$;然后根据聚合度值将 4 和 5 合并为 b ,集合变为 $\{d, 3, b\}$;再根据当前的最小聚合度值,将 d 和 3 合并为 c ,集合变为 $\{c, b\}$;最后将 c 和 b 合并,形成最终的聚合后地物模型集合 $G_i = \{a\}$ 。

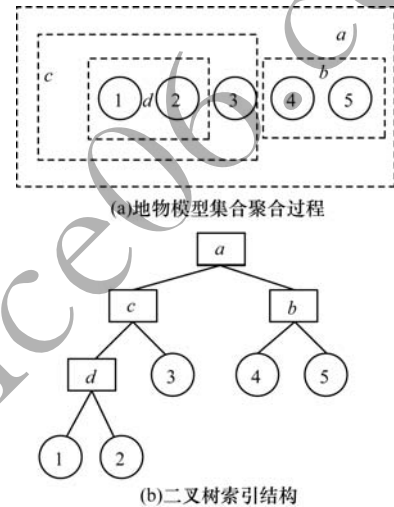


图 7 集群聚合后子集内二叉树索引结构的建立过程

每一个地物集群划分子集由一颗二叉树结构索引组织地物模型数据,有 N 个集群划分后,地物模型子集就有 N 棵二叉树,将 N 棵二叉树根节点用一个节点索引生成多叉树混合结构。通过多叉树混合结构组织地物模型的过程如图 8 所示。

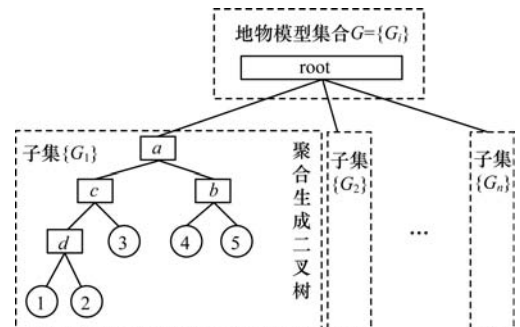


图 8 多叉树混合索引结构组织地物模型的过程

地物模型的聚合过程实际上就是指它们索引的地物模型节点的聚合过程,定义多叉树混合结构的节点 $node = \{ gp, type, height, area, father, lchild, rchild \}$,其中, gp 、 $height$ 、 $area$ 、 $type$ 分别为该节点表示的地物模型的正投影图、类型及正投影图的高度和面积, $father$ 指向二叉树中的父节点, $lchild$ 和 $rchild$ 指向左右子节点。节点的成员通过“.”进行引用,例如 $node_i.father$ 表示节点 i 的父节点。多叉树混合结构生成过程的算法如算法 3 所示。

算法 3 基于多叉树混合结构的地物模型聚合算法

输入 集群划分后的地物模型子集

输出 聚合后的地物模型集

步骤 1 取变电站地物模型集群划分后的节点集中的 2 个节点 $node1, node2$

步骤 2 若 $node1 == node2$ 是同一个节点,输出 $node1$

步骤 3 否则聚合两节点并计算聚合后新节点的高度和面积

$node.gp \leftarrow aggregate(node1.gp, node2.gp) // 1.2.2$ 节中
// 整个聚合算法通过函数 $aggregate()$ 实现

计算:

$newnode.area = node1.area + node2.area$
 $newnode.height \leftarrow (node1.area * node1.height + node2.area * node2.height) / newnode.area$

步骤 4 建立新节点的属性

$node.father \leftarrow null$
 $node.lchild \leftarrow node1$
 $node.rchild \leftarrow node2$
 $node1.father \leftarrow node$
 $node2.father \leftarrow node$

步骤 5 重复步骤 1 ~ 步骤 4,直到所有子集都形成二叉树索引

步骤 6 用一个节点索引 N 棵二叉树的根节点形成多叉树混合结构

2.2 地物模型动态调度的场景树构建

构建的多叉树结构索引存储在计算机中,在可视化过程中,从多叉树混合索引结构中自上而下地选择合适的节点实现三维可视化过程。变电站三维可视化的场景树构建与用户查看三维场景的视点以及地物模型的面积有关,定义视点因子 k 为正投影图的面积和到视点之间距离平方的比值。从根节点开始测试,若根节点的视点因子 k 值小于阈值,则显示整个场景区域;若视点因子 k 值大于阈值,则测试子节点。在三维交互过程中,根据视点的移动,动态地选择多叉树混合结构的节点,实时地生成场景树进行可视化。具体规则如下:

1) 测试树的根节点,计算根节点索引的地物模型正投影图面积 $area$ 和正投影图的中心到视点的距离 d_{vp} ,依据式(5)计算视点因子 k :

$$k = \frac{area}{d_{vp}^2} \quad (5)$$

2) 如果视点因子 k 小于设定的阈值,则该节点被显示在三维场景中;否则计算该节点的两子节点的 k 值,判断是否显示在三维场景中。

3) 如果当前节点没有子节点,则直接显示当前节点,不再计算子节点。

通过以上规则,可根据不同的视点实时动态测试混合结构节点的视点因子 k ,形成变电站三维场景树。基于视点显示三维场景,距离视点较远的模型加载聚合状态的模型,距离视点较近的模型加载分离的精细化地物模型,减少地物模型的加载量和计算机的缓存开销。

地物模型聚合流程如图 9 所示。

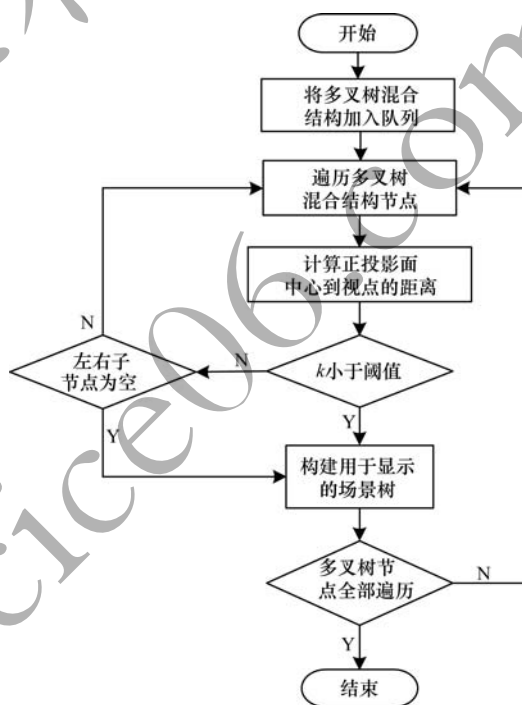


图 9 地物模型聚合流程

3 实验结果与仿真分析

3.1 实验环境与数据来源

三维输变电工程可视化平台通过三维海量空间信息平台 EV-Globe V5.0 实现,以 Java 为开发语言,在多源地理信息上精细化快速地展示三维场景。具体软硬件配置如表 1、表 2 所示。

表 1 硬件配置

分类	处理器	显卡/存储	内存
服务端	Intel Xeon E5-2690v3	硬盘接口	DDR4
	CPU 频率 2.6 GHz	硬盘容量 512 GB	8 × 16 GB
客户端	Intel Core i7-7700HQ	NVIDIA GTX1060	DDR4 2 × 8 GB

表 2 软件配置

分类	软件配置
服务端	Red Hat Linux6.8
客户端	IE:9.0 及以上,Chrome:50 及以上

本文的实验仿真基于某 1 000 kV 特高压直流输电工程数字化移交中的三维可视化案例,运用本文方法对变电站建模并实现可视化。本案例原始场景中的数据量为 2 G,三维地物模型的数量为 675 个。

3.2 结果分析

地物模型的集群聚合与多叉树混合索引结构调度过程如图 10 所示。

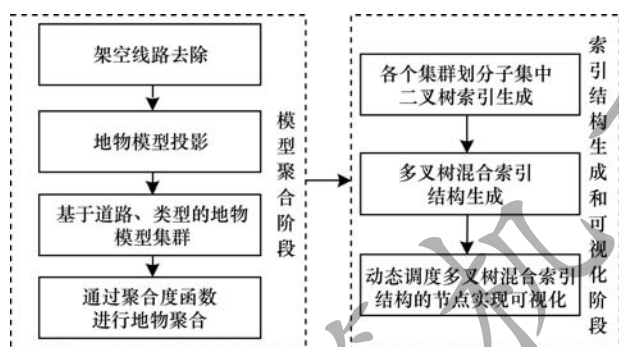


图 10 三维场景模型组织和可视化过程

基于本文的变电站三维场景的数据组织方法,进行以下 3 个实验测试。

实验 1 变电站三维场景图和集群测试

图 11(a)为三维变电站场景中某一视点的三维场景全貌图,图 11(b)、图 11(c)、图 11(d)为三维变电站场景的细节图,在整个漫游缩放过程中,变电站地物模型显示流畅,可实现与用户的良好交互;在实现聚合算法之前,通过道路和设备类型对变电站地物模型进行集群划分,从图 12(a)、图 12(b)中可清楚地分辨变电站中的主道路,变电站地物模型根据道路被划分在各个区域中。

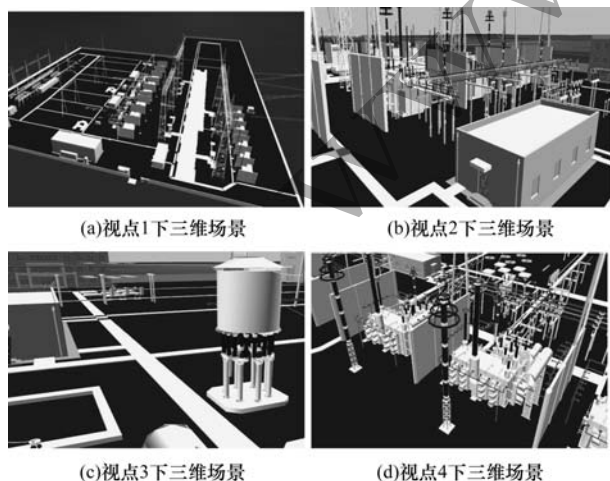
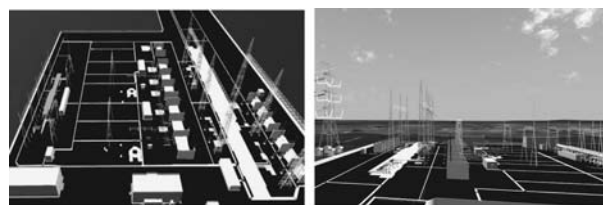


图 11 变电站三维场景效果测试结果



(a)视点1下集群测试

(b)视点2下集群测试

图 12 变电站道路集群三维效果展示

实验 2 使用本文算法和 LOD 模型的变电站三维场景对比测试

1) 加载帧率的对比测试

通过 Chrome Dev tools 对三维变电站场景加载时间进行记录,对使用文中算法和使用 LOD 技术的三维变电站场景漫游过程分别记录加载帧率,结果如图 13 所示,使用聚合算法实现的三维场景的加载帧率总体上比使用 LOD 模型实现的三维场景的加载帧率要高,基本保持在 38 frame/s 左右,使用聚合算法实现的三维场景提高了加载速度。

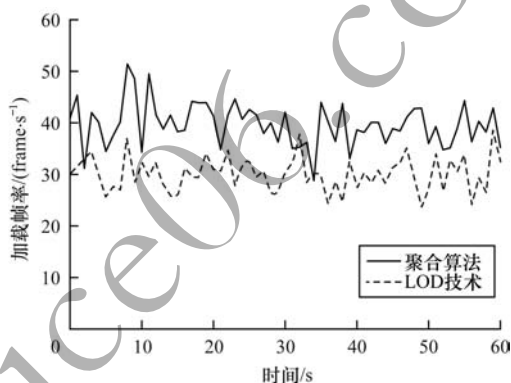


图 13 变电站三维场景漫游帧率对比测试

2) 三维可视化效果对比测试

图 14 对比了 3 组可视化效果,左侧图像为 LOD 技术实现的三维场景图,右侧图像为使用本文算法实现的三维场景图,3 组场景图都基于视点生成不同细节层次。左侧图像中距离视点近的是精细化的地物模型,视点远的是粗糙的单个地物模型,单个加载远距离地物模型并没有对视觉效果提供太大的贡献度,而且加大了计算机的内存开销;右侧图像通过判断 k 值,距离视点近的为单个精细化模型,在距离视点远的位置变电站地物模型是聚合状态,显示了地物模型的完整轮廓,使用聚合算法实现的变电站场景保持了三维场景的整体显示效果,同时无需加载多个单一地物模型。图 15 对比了 2 种方法实现的三维场景在从全局场景逐渐推近视点,最后到达原始场景过程中 5 个视点下需要加载的模型数量和加载时间,其中全局场景的加载时间是指三维场景启动时加载整个全局场景所需的时间,从图 15 中可以看出,使用本文算法实现的三维场景所需要加载的

模型数量少且加载时间快于 LOD 技术实现的三维场景,本文算法在不造成三维场景失真的情况下提高了变电站三维场景的加载速度。

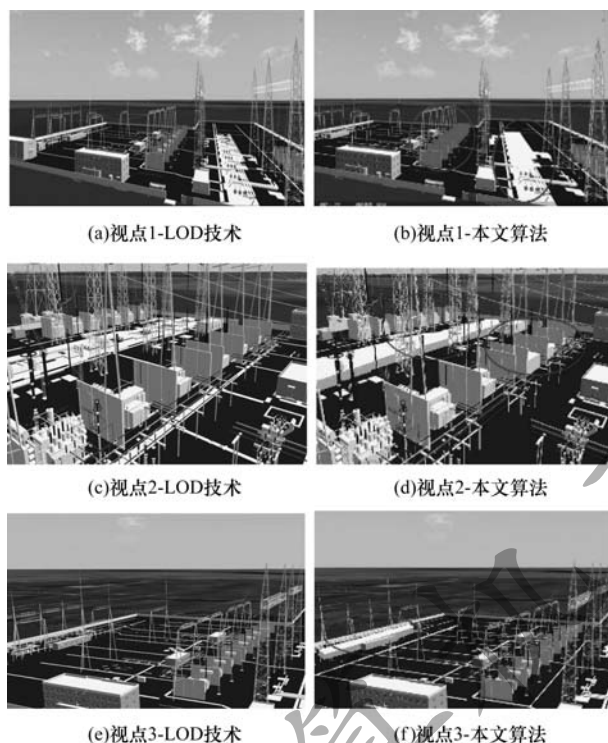


图 14 变电站三维场景测试结果

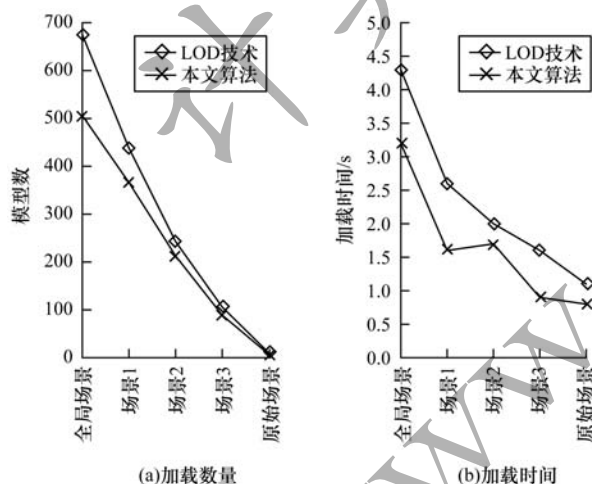


图 15 变电站三维场景模型加载数量和加载时间

实验 3 基于视点的三维地物模型动态调度效果测试

调整用户视点对户外 GIS、电抗器、变压器不同视点下的聚合状态进行效果测试,分别如图 16 ~ 图 18 所示。首先在最低细节层次 LOD1,由于用户视点较高,场景树大部分由多叉树混合索引结构深度较小的节点构成,图中的变电站地物模型都呈现聚合状态,如图 16(a)、图 17(a)、图 18(a)所示;随着用户视点的推近,在多叉树混合结构中深度较小的节点的 k 值已

大于设定的阈值,对其子节点及深度更大的节点进行测试,使得原本聚合的地物模型视点的推近部分出现分离状态,如图 16(b)、图 17(b)、图 18(b)所示;然后继续推近视点,达到原始场景,场景树大部分由多叉树混合结构的叶节点构成,靠近视点的各个地物模型都呈现单个状态且具有精细化的细节,如图 16(c)、图 17(c)、图 18(c)所示。

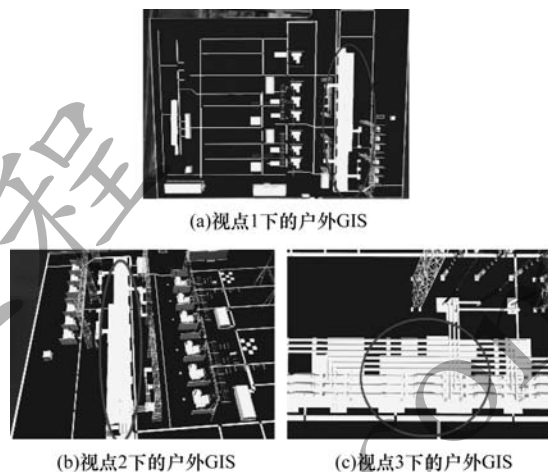


图 16 动态调度户外 GIS 的聚合状态效果测试

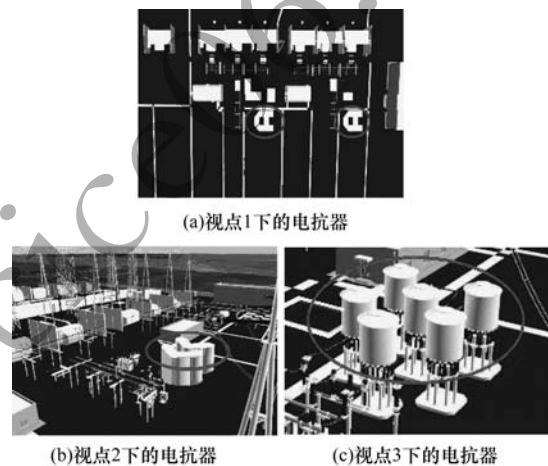


图 17 动态调度电抗器的聚合状态效果测试

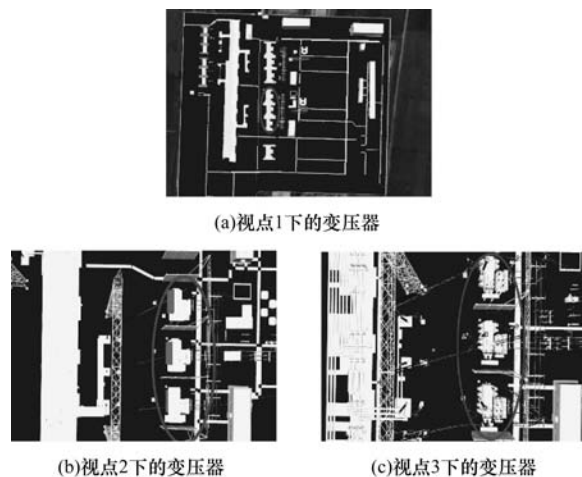


图 18 动态调度变压器的聚合状态效果测试

4 结束语

针对变电站三维场景加载速度慢的问题,本文提出一种地物模型集群聚合与多叉树混合索引结构调度的数据组织方法。对变电站中的地物模型进行投影,按照变电站场景中的道路和地物模型的类型划分地物集群。依据聚合度函数对模型进行聚合,自下而上地建立多叉树混合组织结构。通过判断视点因子 k 值是否大于阈值,自上而下地调度混合结构的节点,形成基于视点的动态可视化场景。对某1 000 kV 特高压输变电工程进行可视化测试的结果表明,该方法在网络环境下能够有效地提高变电站三维场景的加载速度,可为电网工程数字化移交中三维场景的交互可视化提供支撑。

参考文献

- [1] PENG Lei, HUANG Zhenhui, CHENG Ping. Three-dimensional visualization of substation based on 3D laser point cloud data [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2018(4): 65-67. (in Chinese)
彭磊,黄真辉,程平. 基于点云数据的变电站三维可视化实现[J]. *工程勘察*, 2018(4): 65-67.
- [2] TAO Songmei, ZHANG Wei. Application of substation 3D visual interaction technology based on CIM model [J]. *Guangxi Electric Power*, 2014, 37(6): 22-24. (in Chinese)
陶松梅,张炜. 基于CIM模型的变电站三维可视化交互技术应用[J]. *广西电力*, 2014, 37(6): 22-24.
- [3] CAO Quanlin, LUO Qingbing, BAI Biao, et al. Application of 3D visualization digital in substation handover [J]. *Yunnan Electric Power*, 2015, 43(2): 108-110. (in Chinese)
曹权林,罗庆兵,白彪,等. 三维可视化数字在变电站移交中的应用[J]. *云南电力技术*, 2015, 43(2): 108-110.
- [4] GAO Yundong. Application and practice of 3D design in power grid and substation construction [J]. *Anhui Electric Power*, 2018(3): 20-24. (in Chinese)
高运动. 三维设计在电网和变电站建设中的应用与实践[J]. *安徽电力*, 2018(3): 20-24.
- [5] DANG Quanying, HUANG Feilong, PENG Weifeng, et al. Design and implementation of 3D terrain data self-adaption pyramid technology [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2014(5): 12-15. (in Chinese)
党全营,黄飞龙,彭伟峰,等. 三维地形数据自适应金字塔技术的设计与实现[J]. *北京测绘*, 2014(5): 12-15.
- [6] GONG Guirong, DU Ying, OUYANG Feng. Organization of feature models in virtual terrain environment [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2014, 31(2): 198-202. (in Chinese)
- 龚桂荣,杜莹,欧阳峰. 地形金字塔中地物模型的空间划分及层级索引研究[J]. *测绘科学技术学报*, 2014, 31(2): 198-202.
- [7] ZHOU Zaiqiang. Management and service release of massive data in network 3D GIS [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. (in Chinese)
周再强. 网络三维GIS中海量数据的管理与服务发布[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [8] BILJECKI F, LEDOUX H, STOTER J. An improved LOD specification for 3D building models [J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2016, 59: 25-37.
- [9] ZHU Qing, CHEN Xingwang, DING Yulin, et al. Organization and scheduling method of 3D urban scene data driven by visual perception [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52(5): 869-876. (in Chinese)
朱庆,陈兴旺,丁雨淋,等. 视觉感知驱动的三维城市场景数据组织与调度方法[J]. *西南交通大学学报*, 2017, 52(5): 869-876.
- [10] LI Xinran. Research on massive data 3D-visualization [C]// *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 231-243.
- [11] LI Qiuji, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Point cloud recognition of street tree target based on variable-scale grid index and machine learning [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6): 39-44. (in Chinese)
李秋洁,郑加强,周宏平,等. 基于变尺度格网索引与机器学习的行道树靶标点云识别[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 39-44.
- [12] DONG Lihong, HU Huikai, PENG Yexun. A quadtree index scheduling and crack elimination algorithm of massive city models [C]// *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Design*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 158-167.
- [13] HAN Xiangquan, YANG Shengmin, ZHOU Fangfang, et al. An effective approach for rock mass discontinuity extraction based on terrestrial LiDAR scanning 3D point clouds [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 26734-26742.
- [14] GONG Jun, ZHANG Hanwu. A method for LOD generation of 3D city model based on extended 3D R-tree index [C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 26-28.
- [15] PENG Liyan. Substation electrical equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010. (in Chinese)
彭理燕. 变电站电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.