

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415603

# 保持细节特征的输电铁塔三维网格模型轻量化算法<sup>\*</sup>

王彦海<sup>1,2</sup> 张宇昊<sup>1,2</sup> 李成<sup>3</sup> 陈树平<sup>3</sup> 龚昕玺<sup>1,2</sup>

(1.三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2.三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心 宜昌 443002;

3.中国南方电网超高压输电公司梧州局 梧州 543002)

**摘要:**针对输电铁塔三维网格模型简化后出现模型细节特征大量缺失的问题,以QEM算法为基础,提出了一种保持细节特征的输电铁塔三维网格模型轻量化算法。该算法首先确定了输电铁塔三维网格模型中的细节特征定义,然后提出了输电铁塔细节特征提取策略,并且引入细节特征显著因子和顶点近似曲率因子对QEM算法中的简化代价进行优化。实验结果表明,优化后的算法可以有效保留输电铁塔三维网格模型的重要几何特征和细节特征,避免了简化后模型出现大面积的特征缺失问题,并且相较于普通QEM算法,优化后的算法所简化的模型在最大误差、平均误差和均方差上分别至少下降了39.77%、10.64%和64.99%,实现了输电铁塔三维网格模型的高质量轻量化。

**关键词:**输电铁塔三维网格模型;模型轻量化;边折叠;二次误差度量算法;细节特征

中图分类号: TN27; TP391.41 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6

## Lightweight algorithm for 3D mesh model simplification with preserved detail features in transmission towers

Wang Yanhai<sup>1,2</sup> Zhang Yuhao<sup>1,2</sup> Li Cheng<sup>3</sup> Chen Shuping<sup>3</sup> Gong Xinxi<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical &amp; New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. China Southern Power Grid Extra High Voltage Power Transmission Company Wuzhou Branch, Wuzhou 543002, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that a large number of detail features are missing after the simplified three-dimensional grid model of transmission towers, a lightweight algorithm for the three-dimensional grid model of transmission towers is proposed based on Quadric Error Metrics algorithm. The algorithm firstly defines the detail features in the 3D grid model of the transmission tower, then proposes the detail feature extraction strategy of the transmission tower, and introduces the detail feature significance factor and vertex approximate curvature factor to optimize the folding cost in the QEM algorithm. The experimental results show that the improved algorithm can effectively retain the important geometric features and detailed features of the three-dimensional grid model of the transmission tower, avoiding the problem of large-area feature loss in the simplified model, and compared with the ordinary QEM algorithm, the maximum error, mean error and mean square error of the simplified model are reduced by at least 39.77%, 10.64% and 64.99% respectively, which realizes the high quality and lightweight of the three-dimensional grid model of the transmission tower.

**Keywords:** transmission tower three-dimensional grid model; model lightweight; edge fold; quadratic error measurement algorithm; detail feature

## 0 引言

随着全国建设的快速发展,电力安全已经成为社会发展建设的重要支柱<sup>[1]</sup>,输电线路作为电网运行中的重要一

环,输电线路的稳定运行对于电力系统安全具有重要意义<sup>[2-4]</sup>,目前各省市电力公司都在加快建设输电线路智能化安全监测平台<sup>[5-7]</sup>,输电铁塔三维网格模型作为输电线路可视化的重要组成部分,被大规模运用在输电线路智能化安

收稿日期:2024-03-09

\*基金项目:国家自然科学基金(U22A20600,52079070)、防灾减灾湖北省重点实验室开放资金(2022KJZ07)项目资助

全监测平台中,然而大量的三维网格模型数据不仅会对数据的存储和管理带来困难,还会延长计算机渲染模型时间,对输电线路智能化安全监测平台的流畅运行带来巨大挑战,因此如何轻量化处理输电铁塔三维网格模型具有重要意义。

目前针对三维网格模型的轻量化算法主要分为网格重构法、顶点聚类法、边折叠法和三角形折叠法<sup>[8-10]</sup>,国内外学者在这些轻量化算法的基础上,进行了许多研究工作。Garland等<sup>[11]</sup>提出了一种二次误差度量(quadric error metrics, QEM)算法,该算法凭借高简化效率和良好的简化效果被广泛使用,但是由于该算法简化过于均匀,导致其难以保持模型细节特征;杨煜等<sup>[12]</sup>利用监督学习法对三维网格模型局部区域的几何特征进行分类提取,然后对不同分类的几何特征进行自适应简化率预测,从而实现了三维网格模型的局部特征自适应轻量化处理,该方法虽然较好的保留了模型几何特征,但是由于复杂度较高,难以大规模应用;Li等<sup>[13]</sup>设计了一种网格滤波技术用于提取三维建筑网格模型轮廓并产生分段平面结构,然后利用平面结构对三维网格模型简化操作进行约束,该方法较好的保持了建筑模型的几何特征,并且有效控制了模型简化后的误差;李大军等<sup>[14]</sup>提出了一种基于结构变化信息的三维网格模型简化算法,该算法通过考虑三角网格折叠前后法向量和形状变化情况对边的简化代价进行优化,较好的保持了模型边缘完成性和网格形状,但是对于结构更加复杂的输电铁塔模型难以保持细节特征;兰峰等<sup>[15]</sup>利用马尔可夫随机场对实景三维模型中的植被区域进行提取,然后利用QEM算法对植被区域进行简化,该算法虽然考虑了模型的纹理信息,但是并不能很好的保持模型细节特征,并且算法整体简化程度有限,难以有效降低模型数据量;Bai等<sup>[16]</sup>针对三维建筑模型简化后难以保持视觉特征的问题,提出了一种考虑模型视觉特征的边折叠改进算法,该算法引入顶点重要度因子、边长和纹理因子等约束条件,最大限度的对建筑模型视觉特征进行保留,但是该算法引入的改进因子主要是针对三维建筑模型,对于输电铁塔三维网格模型效果一般;姜艺诺等<sup>[17]</sup>在三角形折叠算法的基础上引入体积误差因子和网格显著度因子对折叠代价进行优化,优化后的算法较好的控制了简化后模型的误差,但是不能很好的保留模型几何细节特征;朱天晓等<sup>[18]</sup>利用谱聚类算法对三维网格模型进行聚类分割,然后根据各分割区域曲率变化情况设定合适简化率,从而实现保持细节特征的区域分割模型简化处理,该算法对于简单的三维网格模型简化效果优秀,但是难以对复杂度极高的输电铁塔三维网格模型进行聚类分割处理;张韵等<sup>[19]</sup>在QEM算法的基础上引入顶点邻接三角网格平均面积和曲线近似曲率对边折叠代价进行优化处理,该算法虽然在一定程度上保留了模型几何细节特征,但是难以处理细节特征极多的输电铁塔三维网格模型;李世俊等<sup>[20]</sup>引入尖锐度和网格质量优化方法对QEM算法进

行改进,虽然提升了简化后模型的网格质量,但是对于复杂度较高的三维模型,整体细节留存效果一般。

针对上述改进算法无法有效简化输电铁塔三维网格模型,会导致简化后的输电铁塔三维网格模型出现细节特征丢失的问题,本文提出了一种保持细节特征的输电铁塔三维网格模型轻量化算法。本文首先确定了输电铁塔的细节特征,然后提出了一种输电铁塔特征提取策略,可以将输电铁塔模型的细节特征有效提取出来,接着以QEM算法为基础,引入细节特征显著因子和顶点近似曲率因子对边折叠代价进行优化,优化后的算法可以有效降低模型的简化误差,并且保留模型的细节特征,避免模型简化后出现大范围特征缺损问题,从而实现对输电铁塔三维网格模型的高质量轻量化。

## 1 二次误差度量算法

边折叠算法的处理思路是将待折叠边的两个顶点用一个新顶点取代,从而降低模型的三角网格数量,进而实现三维网格模型的轻量化目的。传统的边折叠算法采用能量函数度量边的折叠代价,简化效果较差且效率很低,因此Garland在此基础上提出使用二次误差度量计算边的折叠代价<sup>[11]</sup>,然后将边的折叠代价从低到高进行排序,每次折叠时选取折叠代价最小的边进行简化,直至模型简化率达到期望值。

定义三维空间中某一顶点  $v_i = [x \ y \ z \ 1]^T$  的二次误差  $\Delta(v_i)$  为  $v_i$  到所有包含顶点  $v_i$  的三角网格的距离平方和,  $\Delta(v_i)$  计算公式如下:

$$\Delta(v_i) = \sum_{p \in planes(v_i)} (\mathbf{p}^T v_i)^2 = v_i^T \left( \sum_{p \in planes(v_i)} \mathbf{K}_p \right) v_i = v_i^T \mathbf{Q}(v_i) v_i \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{p} = [a \ b \ c \ d]^T$  是三维空间中方程为  $ax + by + cz + d = 0$  ( $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ ) 的平面的系数矩阵;  $planes(v_i)$  表示所有包含顶点  $v_i$  的三角面的集合;  $\mathbf{K}_p = \mathbf{p} \mathbf{p}^T$  是一个  $4 \times 4$  的对称矩阵;  $\mathbf{Q}(v_i) = \sum_{p \in planes(v_i)} \mathbf{K}_p$  表示顶点  $v_i$  的二次误差矩阵。

假设三维模型的待折叠边  $(v_1, v_2)$  折叠后新生成顶点为  $\bar{v}$ ,为了提升计算速度,定义新生成顶点  $\bar{v}$  的二次误差矩阵为  $\mathbf{Q}(\bar{v}) = \mathbf{Q}(v_1) + \mathbf{Q}(v_2)$ ,同时  $\mathbf{Q}(\bar{v})$  也作为边  $(v_1, v_2)$  的二次误差矩阵参与计算,则边  $(v_1, v_2)$  的折叠代价为:

$$\Delta(\bar{v}) = \bar{v}^T \mathbf{Q}(\bar{v}) \bar{v} = \bar{v}^T \left( \sum_{p \in planes(v_1)} \mathbf{K}_p + \sum_{p \in planes(v_2)} \mathbf{K}_p \right) \bar{v} = q_{11}x^2 + 2q_{12}xy + 2q_{13}xz + 2q_{14}x + q_{22}y^2 + 2q_{23}yz + 2q_{24}y + q_{33}z^2 + 2q_{34}z + q_{44} \quad (2)$$

式中:  $q_{11} \sim q_{44}$  是顶点  $\bar{v}$  的二次误差矩阵  $\mathbf{Q}(\bar{v})$  中的元素。

为了保证由新生成顶点组成的边的折叠误差最小,可以对式(2)采用求偏导的方式得到新生成顶点  $\bar{v}$  坐标的计算公式为:

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

当式(3)中矩阵出现不可逆情况时,可以在边( $v_1, v_2$ )的两个端点或中点里面选取使折叠代价最小的点作为新生成顶点 $\bar{v}$ 的坐标。

## 2 保持细节特征的输电铁塔三维网格模型简化算法

### 2.1 输电铁塔细节特征

在对输电铁塔三维网格模型轻量化处理之前,首先应确定模型中哪些部分属于对视觉效果有较大影响的重要细节特征,在后续处理过程中对这些特征应该重点保留,从而保证模型轻量化处理后的视觉呈现质量。

输电铁塔作为一种空间桁架结构体,角钢是其最重要的基本组成单元,如图 1(a)和(b)所示,角钢端部连接区域和角钢交叉区域是构成输电铁塔三维模型视觉效果的重要部分,如果在后续轻量化处理过程中上述两区域出现明显缺损或形变,将极大程度影响模型最终的视觉呈现效果。

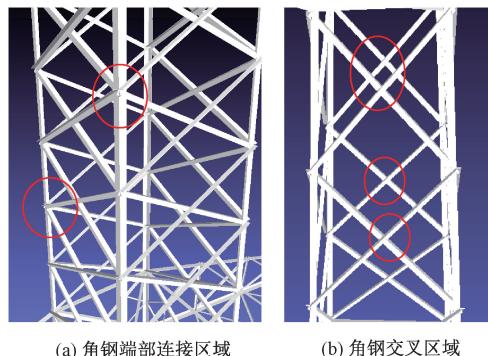


图 1 模型细节特征

因此本文定义输电铁塔三维模型中的角钢端部连接区域和角钢交叉区域为输电铁塔三维网格模型的细节特征,在后续轻量化过程中首先将细节特征提取出来,然后引入细节特征显著因子对折叠代价进行优化,尽量减少对这些细节特征的简化,尽可能多的保留模型细节特征。

### 2.2 输电铁塔细节特征提取策略

输电铁塔三维网格模型细节特征众多,为了在轻量化处理过程中准确的保留细节特征,首先应该制定细节特征提取策略,将处于细节特征区域的顶点提取出来,为后续轻量化处理奠定基础。

对于输电铁塔三维网格模型中的角钢端部连接区域和角钢交叉区域,处于这两个区域的角钢部分在视觉呈现上会产生相连接的效果,但是在拓扑结构上两角钢上的顶点并没有产生实质性的连接关系,它们之间更像是点云模型的邻接点,虽然没有实质性的拓扑连接关系,但是在视觉呈

现上却共同构建出了模型的几何特征。为了精准的提取出处于角钢端部连接区域和角钢交叉区域的顶点,本文提出一种输电铁塔细节特征提取策略,将处于同一细节特征区域的顶点分为一类,从而实现对输电铁塔细节特征的提取,策略具体流程如图 2 所示。

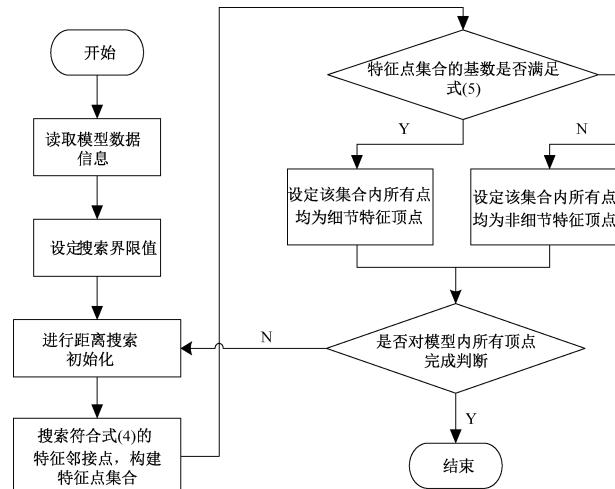


图 2 输电铁塔细节特征提取策略

步骤 1) 读取输电铁塔三维网格模型数据信息。

步骤 2) 设定搜索界限值 $\alpha$ , 防止在后续细节特征提取过程中出现过度分类的情况。对于 $\alpha$ 的取值,可以根据输电铁塔三维网格模型实际情况进行选取,一般情况下应该采用输电铁塔三维网格模型中最短角钢上两个顶点集合之间的最短距离作为搜索界限值。

步骤 3) 进行距离搜索初始化,对于模型中任意顶点 $v$ ,计算该顶点到模型中其他所有未完成分类的顶点的欧式距离,并将这些距离及其对应的顶点信息置入存储容器中。

步骤 4) 从 0 开始,以 $l$  为步长在存储容器内进行搜索,每次搜索将距离符合式(4)的顶点 $v_i$ 作为 $v$  的特征邻接点,直到增加一次步长后无法搜索到满足条件的顶点或者达到搜索界限值 $\alpha$  后停止搜索,然后将顶点 $v_i$  及其特征邻接点组成特征点集合 $A$ 。

$$0 + nl < d_{v \rightarrow v_i} \leq (n+1)l \quad (4)$$

式中:  $d_{v \rightarrow v_i}$  表示顶点 $v$  到顶点 $v_i$  的欧式距离;  $n$  表示已经搜索过的次数。

步骤 5) 判断特征点集合 $A$  是否满足式(5),若满足则表示集合 $A$  中所有顶点都处于角钢端部连接区域或角钢交叉区域,这些点都属于细节特征顶点;若不满足则表示集合 $A$  中所有顶点不是细节特征顶点。

$$card(A) \geq Z \quad (5)$$

式中:  $Z$  表示细节特征顶点判断阈值,可根据输电铁塔模型实际情况自由调整,一般情况下由专业工程设计软件建立的输电铁塔模型中细节特征区域顶点数量会高于其他区域顶点数量,但是在总体上非细节特征顶点数量会明显高于细节特征顶点数量,故本文只需要在模型完成特征点集

合分类后,统计特征点集合基数分布情况,找到细节特征区域和非细节特征区域的集合基数分界点作为 Z 的取值即可。

步骤 6) 循环步骤 3)~5) 直至使模型中所有顶点均完成是否为细节特征顶点的判断,最终完成输电铁塔细节特征提取。

### 2.3 细节特征显著因子

由于输电铁塔三维网格模型包含大量细节特征,且不同的细节特征区域包含的顶点数量也不一致,因此细节特征之间也应该在折叠代价上对保留的重要性做出区分,而不是所有细节特征顶点都使用同样的折叠策略,为了实现输电铁塔三维网格模型简化后优秀的细节特征保留效果,本文引入细节特征显著因子 F 对折叠代价进行优化。

输电铁塔三维网格模型中任意顶点  $v_i$  可以分为非细节特征顶点和细节特征顶点,由于非细节特征顶点不属于需要重点保留的区域内顶点,故该类顶点的细节特征显著因子应取  $F_{v_i} = 1.0$ , 即该类顶点的  $F_{v_i}$  不对折叠代价产生影响;对于细节特征顶点,此类顶点需要重点保留,但是为了对细节特征顶点之间进行重要性区分,  $F_{v_i}$  不能取固定值,应该按照下式进行计算:

$$F_{v_i} = 1 - \frac{M_{v_i}}{M_{\max}} \quad (6)$$

式中:  $M_{v_i}$  表示顶点  $v_i$  所处的特征点集合的基数;  $M_{\max}$  表示模型中所有特征点集合基数的最大值。

当顶点的细节特征显著因子  $F_{v_i}$  越趋近于 0, 表示该顶点所处区域的细节特征越重要, 在后续轻量化处理过程中应该重点保留,进而使得简化后模型的视觉效果更加优秀。

### 2.4 顶点近似曲率因子

输电铁塔三维网格模型不仅包含角钢区域的细节特征,还会在塔头或模型折痕等其他尖锐区域包含重要的几何特征,为了衡量顶点周围区域尖锐程度,本文引入顶点近似曲率因子对边折叠代价进行优化,顶点近似曲率因子越高,表示该顶点一阶领域内三角网格起伏程度越大,该区域越尖锐,包含重要几何特征的概率越高。

顶点  $v_i$  的近似曲率因子  $Cur_{v_i}$  计算公式如下:

$$Cur_{v_i} = \sum_{j \in vertexs(v_i)} \frac{\langle N_{v_i}, N_{v_j} \rangle}{\| v_i - v_j \|} \quad (7)$$

式中:  $\langle N_{v_i}, N_{v_j} \rangle$  是顶点  $v_i$  的法向量和顶点  $v_j$  的法向量之间的夹角;  $vertexs(v_i)$  表示顶点  $v_i$  一阶领域内邻接点的集合;  $\| v_i - v_j \|$  表示顶点  $v_i$  和顶点  $v_j$  之间的欧式距离;  $card(vertexs(v_i))$  是顶点  $v_i$  一阶领域内邻接点的个数。

观察式(7)可知,顶点法向量将直接影响顶点近似曲率因子的准确性,为了考虑三角网格面积和形状对顶点法向量计算的影响,本文引入顶点一阶领域内三角网格面积 S 和与顶点与三角网格相关联的内角角度  $\theta$  到法向量计算公式中,得到优化后的顶点法向量计算公式为:

$$N_{v_i} = \frac{\sum_{k \in planes(v_i)} \theta_k S_k n_k}{\| \sum_{k \in planes(v_i)} \theta_k S_k n_k \|} \quad (8)$$

式中:  $\theta_k$  为第  $k$  个三角网格与顶点  $v_i$  相关联的内角角度;  $S_k$  表示第  $k$  个三角网格的几何面积;  $n_k$  表示第  $k$  个三角网格的法向量,  $n_k$  可由式(9)求出。

$$n_k = \frac{(v_0 - v_1) \times (v_2 - v_0)}{\| (v_0 - v_1) \times (v_2 - v_0) \|} \quad (9)$$

式中:  $v_0, v_1, v_2$  是第  $k$  个三角网格的 3 个顶点。

### 2.5 优化后的边折叠代价

本文后续处理模型为利用道亨和 Abaqus 搭建的输电铁塔三维网格模型,由于使用普通 QEM 算法无法有效衡量与保留模型细节特征,轻量化处理后的模型会出现严重的细节特征丢失问题,进而大幅降低模型视觉呈现效果,因此针对输电铁塔三维网格模型特点,本文引入细节特征显著因子 F 和顶点近似曲率因子 Cur 对折叠代价进行优化。

其中细节特征显著因子是衡量不同细节特征之间重要程度的指标,由于细节特征显著因子越趋近于 0 表示该顶点所处区域的细节特征越重要,因此本文算法让细节特征显著因子与折叠代价负相关,可以更多的简化非细节特征区域顶点,更好的保留模型中的细节特征;顶点近似曲率因子是衡量顶点一阶领域内三角网格尖锐程度的重要指标,在输电铁塔三维网格模型中顶点近似曲率因子越高,则表示在该顶点一阶领域内包含重要几何特征的概率越高,本文算法令该因子与折叠代价正相关,进一步提升模型简化后的视觉呈现质量。综上所述,本文优化后的边折叠代价  $Cost(v_i, v_j)$  如下:

$$Cost(v_i, v_j) = \bar{v}^T \left( \frac{Cur_{v_i} Q(v_i)}{F_{v_i}} + \frac{Cur_{v_j} Q(v_j)}{F_{v_j}} \right) \bar{v} \quad (10)$$

式中:  $\bar{v}$  表示边  $(v_i, v_j)$  折叠后的生成顶点;  $Q(\cdot)$  表示顶点二次误差矩阵;  $Cur$  为顶点近似曲率因子;  $F$  表示细节特征显著因子;

### 2.6 算法流程

本文算法流程如图 3 所示。

步骤 1) 首先对模型进行预处理,获取模型中几何元素信息以及拓扑连接关系,并按照 2.2 节中的方法对输电铁塔细节特征进行提取。

步骤 2) 计算模型中各顶点的二次误差矩阵、细节特征显著因子和顶点近似曲率因子。

步骤 3) 计算待折叠边中各边的生成顶点位置和优化后的折叠代价,并将待折叠边按折叠代价从小到大进行排序。

步骤 4) 每次均选取折叠代价最小的边进行折叠操作,折叠完成后更新受影响的几何元素的所有信息。

步骤 5) 重复折叠操作直至模型的简化率达到目标期望值,最后输出简化后的倾斜摄影模型。

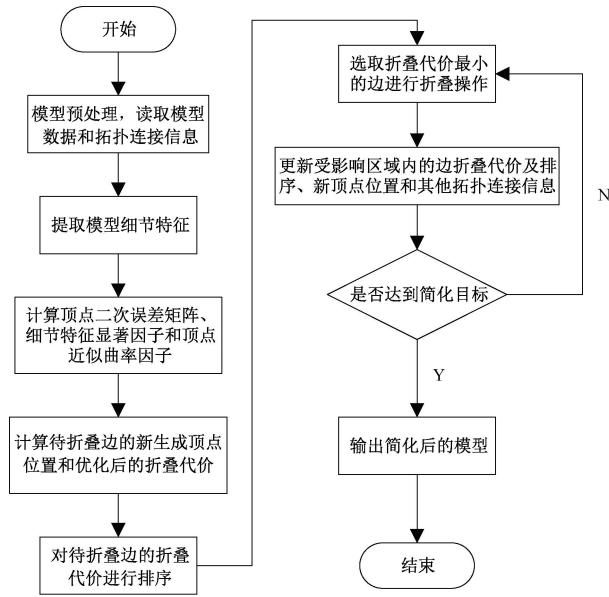


图 3 算法流程图

### 3 实验结果与分析

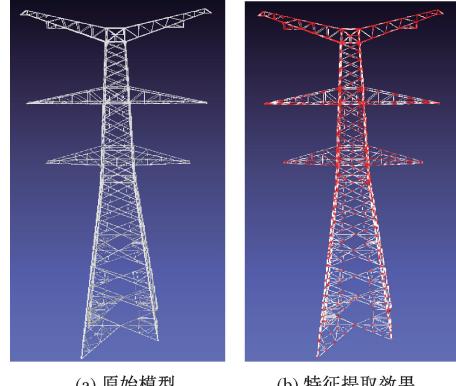
#### 3.1 实验环境

本文算法在处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU@2.20 GHz、操作系统为 Windows10、内存为 8 GB 的计算机环境下,以 Visual Studio 2019 为平台,配置第 3 方拓展库 Armadillo 用于矩阵运算,使用 C++ 实现算法。算法处理的模型均为利用 Abaqus 自建的输电铁塔三维网格模型,格式为 .OBJ。

#### 3.2 输电铁塔细节特征提取效果验证

为了验证输电铁塔细节特征提取效果,本文采用了如图 4(a)所示的 500 kV 直线塔作为实验对象,该模型共包

含 346 352 个三角网格。利用 2.2 节中输电铁塔细节特征提取策略,根据模型实际情况,设定搜索界限值  $\alpha = 0.2$ ,搜索步长  $l = 0.05$ ,顶点判断阈值  $Z = 40$ ,为了展示效果本文将处于细节特征区域的顶点颜色设置为红色,提取效果具体如图 4(b)所示,可以发现输电铁塔模型中角钢端部连接区域和角钢交叉区域的内顶点被准确提取出来了,而其他非特征区域内顶点没有被提取出来,为后续计算细节特征显著因子奠定了基础。



(a) 原始模型 (b) 特征提取效果

图 4 输电铁塔模型特征提取效果

#### 3.3 改进因子效果验证

图 5 展示了加入细节特征显著因子对模型轻量化效果的影响,其中图 5(a)为±800 kV 转角塔的原始模型,共包含 93 676 个三角网格;图 5(b)是未加入细节特征显著因子时模型轻量化 70% 的效果;图 5(c)是加入细节特征显著因子后模型轻量化 70% 的效果。观察图 5(a)~(c)三图可以发现,加入细节特征显著因子后,输电铁塔三维网格模型中的角钢交叉区域和角钢端部连接区域保留效果相较于图 5(b)有明显提升,整体模型视觉呈现质量也更加优秀。

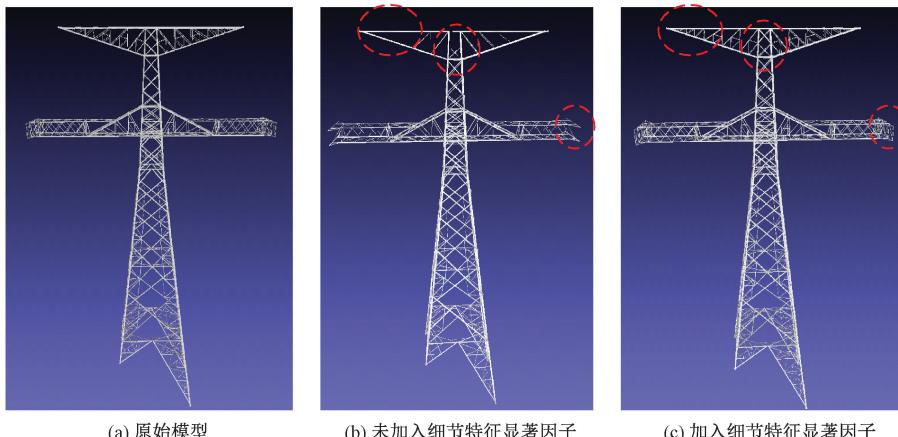


图 5 顶点一环领域内三角形平均面积效果验证图

图 6 展示了加入顶点近似曲率因子对模型轻量化效果的影响。其中图 6(a)为±800 kV 直线塔的原始模型,共包含 74 580 个三角网格;图 6(b)是未加入顶点近似曲率

因子时模型轻量化 80% 的效果;图 6(c)是加入顶点近似曲率因子时模型轻量化 80% 的效果。对比图 6(a)~(c)三图可以发现,在输电铁塔塔头区域中存在一些尖锐度较高的

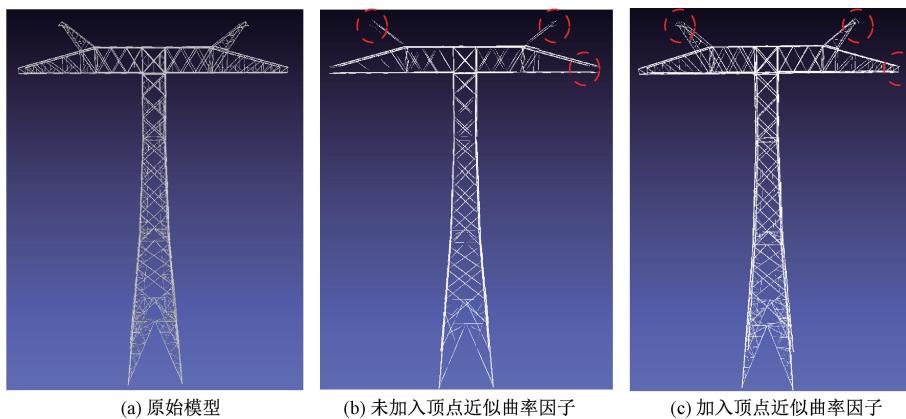


图 6 顶点近似曲率因子效果验证图

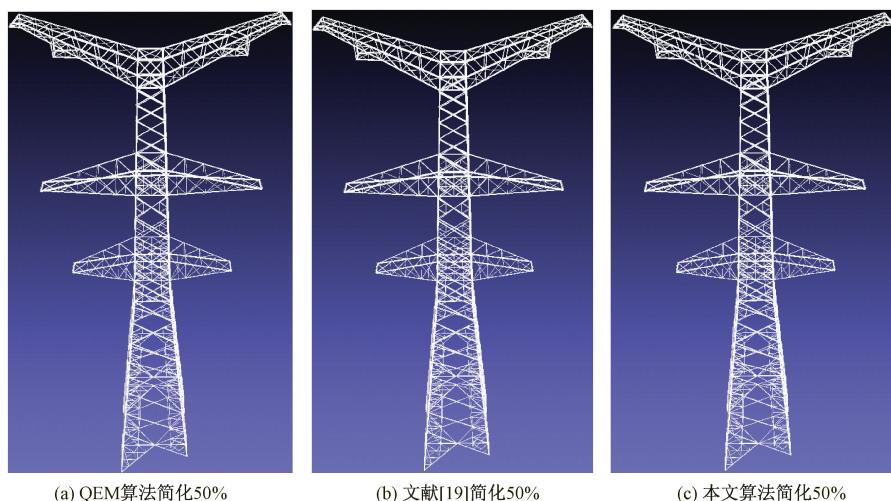
几何特征,在没有加入顶点近似曲率因子的情况下,简化后的模型对于尖锐度较高的几何特征无法有效保留,模型塔头区域整体特征缺损较为严重,在加入顶点近似曲率因子后,模型对于塔头区域尖锐的几何特征保留效果优秀,相较于图 6(b)模型整体视觉呈现质量提升明显。

### 3.4 算法对比与结果分析

本节采用图 4 中的 500 kV 直线塔原始模型作为处理对象,与 QEM 算法和文献[19]算法进行简化后视觉效果对比。本文算法与对比算法均在 3.1 节的实验环境下运行,为了更加直观的展示出模型轻量化处理后的简化误差,本文采用 Metro 网格比较工具衡量简化误差。Metro 网格比较工具是目前使用最广泛的网格模型误差比较工具<sup>[21]</sup>,Metro 通过计算原始模型到简化后模型中各顶点的最小距离,从而得到模型简化后的最大误差、平均误差和均方差作为模型误差衡量指标。

观察图 7 中(a)~(c)可以发现,在简化率为 50% 的情况下,3 种算法处理的模型效果相差不大,基本没有出现明显的模型细节特征或其他几何特征缺损现象。对比

图 7(d)~(f)三图可以发现,使用 QEM 算法简化模型 70% 时,简化后模型无法很好的保留塔头区域内尖锐的几何特征,出现了明显的几何特征缺损,并且对于角钢交叉区域和角钢端部连接区域的细节特征也无法有效保留,模型视觉呈现效果较差;文献[19]算法简化的模型由于引入了曲线近似曲率,可以在一定程度上保留模型塔头区域的尖锐几何特征,但是无法保留角钢交叉区域和角钢端部连接区域的细节特征;而本文算法则很好的保持了模型塔头区域的尖锐几何特征和角钢区域的细节特征,整体效果明显优于对比算法。对比图 7(g)~(i)三图可以发现,当简化率达到 90% 的情况下,QEM 算法和文献[19]算法简化的模型特征缺损情况进一步加剧,模型整体塔头区域和角钢区域出现大面积缺失,严重影响了模型视觉呈现效果,而本文算法针对塔头区域尖锐的几何特征和角钢区域细节特征都引入相应的改进因子,在简化率高达 90% 的情况下,本文算法仍然有效保留了模型中大部分的重要特征,模型整体简化效果明显优于对比算法。



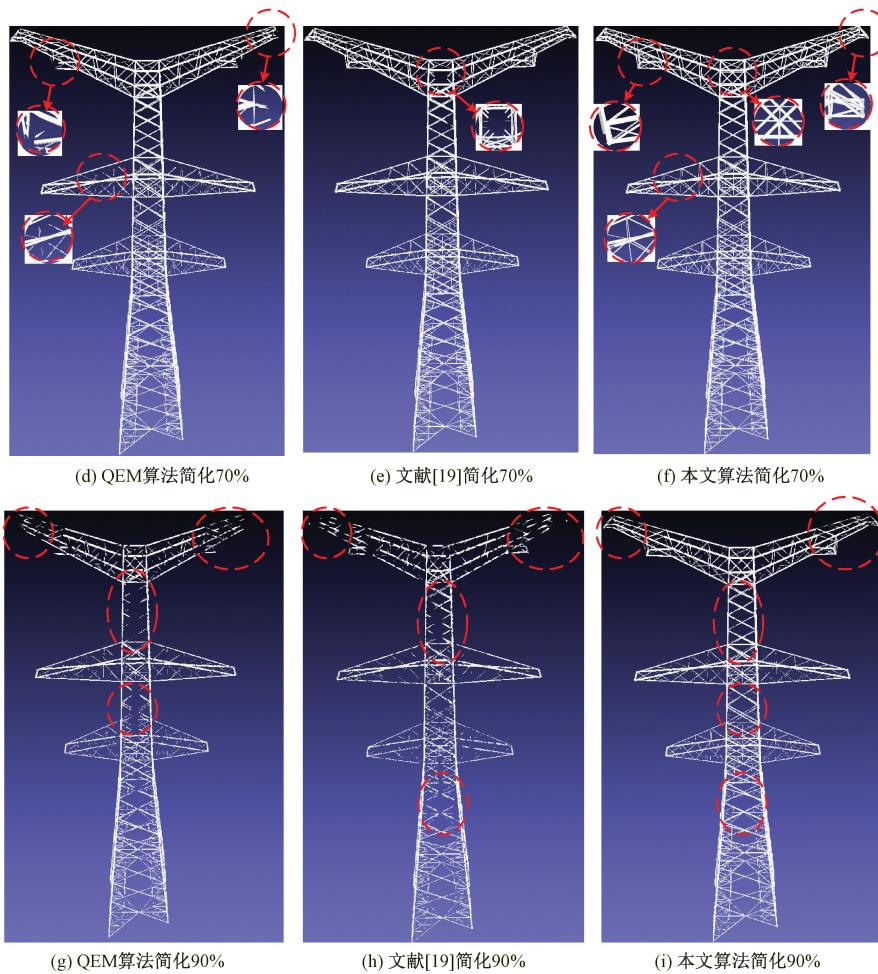


图 7 算法效果对比图

本文采用简化后模型与原始模型之间的最大误差、平均误差和均方差来量化各算法的简化效果,由表 1 可知,本文算法和其他 4 种对比算法处理模型所用时间差距不大,但本文算法对比 QEM 算法、文献[17]算法、文献[19]

算法和文献[20]算法,最大误差分别至少降低了 39.77%、28.04%、11.95% 和 45.44%,平均误差分别至少降低了 10.64%、13.76%、14.29% 和 26.96%,均方差分别至少降低了 64.99%、56.24%、52.98% 和 73.03%。

表 1 算法的误差及简化所用时间对比

算法	对比项	简化率		
		50%	70%	90%
QEM 算法	最大误差	0.005 628	0.008 132	0.077 393
	平均误差	0.000 047	0.000 128	0.000 412
	均方差	0.000 551	0.001 132	0.002 545
	简化时间/s	148.3	191.4	230.7
文献[17]算法	最大误差	0.004 727	0.005 692	0.060 366
	平均误差	0.000 029	0.000 102	0.000 298
	均方差	0.000 358	0.000 849	0.002 036
	简化时间/s	165.7	226.1	264.8

续表1

算法	对比项	简化率		
		50%	70%	90%
文献[19]算法	最大误差	0.003 850	0.005 241	0.054 006
	平均误差	0.000 049	0.000 134	0.000 348
	均方差	0.000 256	0.000 966	0.001 895
文献[20]算法	简化时间/s	150.8	210.6	244.3
	最大误差	0.006 214	0.007 736	0.063 324
	平均误差	0.000 057 5	0.000 173	0.000 578
本文算法	均方差	0.000 771 4	0.001 857	0.003 304
	简化时间/s	189.3	252.6	295.2
	最大误差	0.003 390	0.004 096	0.007 982
本文算法	平均误差	0.000 042	0.000 071	0.000 257
	均方差	0.000 120	0.000 315	0.000 891
	简化时间/s	161.9	218.7	258.2

## 4 结 论

针对目前模型轻量化算法无法有效简化输电铁塔三维网格模型,会导致简化后的模型出现细节特征丢失的问题,本文提出了一种保持细节特征的输电铁塔三维网格模型轻量化算法,通过制定输电铁塔细节特征提取策略,同时引入细节特征显著因子和顶点近似曲率因子对QEM算法进行优化。实验结果表明,本文算法对输电铁塔三维网格模型的细节特征与几何特征保留效果优秀,在降低模型数据量的同时,有效保留了塔头区域内尖锐的几何特征和角钢区域内的细节特征,避免了模型出现大范围特征缺损现象,极大提升了模型简化后的视觉显示效果,并且在模型简化误差控制方面相较于对比算法更加优秀,实现了输电铁塔三维网格模型的高质量简化。但是本文算法目前简化用时仍然较高,不利于大规模应用,未来可以对如何提升算法处理模型效率,降低算法简化用时进行研究。

## 参考文献

- [1] 辛保安,李明节,贺静波,等.新型电力系统安全防御体系探究[J].中国电机工程学报,2023,43(15):5723-5732.
- [2] 李梦源,董瑞科,王彦海,等.基于ISSA-BP神经网络的滑坡区输电铁塔状态预测模型[J].电子测量技术,2023,46(11):74-82.
- [3] 刘丹丹,梁爽,季堂煜.基于秩分解和强语义信息融合的电力巡检算法[J].国外电子测量技术,2023,42(2):16-22.
- [4] 张翼,刘富州,朱永利,等.广域行波信息与图注意力网络相结合的输电网故障定位[J].仪器仪表学报,2022,43(6):140-150.
- [5] 胡夏恺,杨聃,朱悦林,等.基于BIM+WebGIS的输电系统结构安全监测可视化平台构建[J].中国农村水利水电,2020(12):185-188,192.
- [6] 刘义艳,郝婷楠,张伟.融合RMT特征值的电网异常状态检测[J].电子测量与仪器学报,2023,37(12):242-252.
- [7] 谢景海,袁敬中,郭嘉,等.一种输电线路多参数可视化物联网监测系统[J].科学技术与工程,2021,21(12):4975-4981.
- [8] 陈博,余江峰,谈俊忠,等.三维场景中建筑物模型简化研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(9):1429-1437.
- [9] LYU W, WU W, ZHANG L, et al. Laplacian-based 3D mesh simplification with feature preservation[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2019, 10(2): 1950002.
- [10] LIU H, GILLESPIE M, CHISLETT B, et al.

- Surface simplification using intrinsic error metrics[J]. ACM Transactions on Graphics, 2023, 42(4):118.
- [11] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface simplification using quadric error metrics [C]. Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1997: 209-216.
- [12] 杨煜,洗楚华,李桂清.结合局部区域特征的自适应简化率网格简化算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2020,32(6):857-864.
- [13] LI M L, NAN L L. Feature-preserving 3D mesh simplification for urban buildings[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 173: 135-150.
- [14] 李大军,苟国华,吴天辰,等.结构信息约束的三角网格模型简化方法[J].测绘科学,2021,46(8):88-95,164.
- [15] 兰峰,张帆,高云龙,等.顾及地物类别的倾斜摄影三维模型简化方法[J].测绘通报,2022(4):44-50.
- [16] BAI H Y, SHEN T, HUO L, et al. Improved edge folding algorithm for 3D Building Models Taking into account the visual features [J]. Buildings, 2023, 13(11):2739.
- [17] 姜艺诺,王伟,田泽.保持几何特征的导弹发射车模型简化算法[J].兵器装备工程学报,2023,44(3):150-157.
- [18] 朱天晓,闫丰亭,史志才.特征保持的区域分级网格简化算法[J].图学学报,2023,44(3):570-578.
- [19] 张韵,王淑营,郑庆,等.保持细节几何特征的三维网格模型轻量化算法[J].计算机应用,2023,43(4):1226-1232.
- [20] 李世俊,姜晓彤,唐慧.保持细节特征的带纹理模型的高质量简化算法[J].计算机应用研究,2020,37(1): 300-303,312.
- [21] ARIGE A, LAVRIC T, PREDA M, et al. Analysis of 3D CAD MESH simplification approaches within the framework of AR applications for industrial assembly lines [C]. Proceedings of the IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway: IEEE 2021:1-6.

### 作者简介

王彦海(通信作者),博士,副教授,硕士生导师,主要从事输电线路三维建模方面研究。

E-mail:45245356@qq.com

张宇昊,硕士研究生,主要从事三维模型轻量化方面的研究。

E-mail:435776470@qq.com

李成,工程师,主要从事输电线路运行与维护方面的研究。

E-mail:470191690@qq.com

陈树平,助理工程师,主要从事超高压输电线路运维管理方面的研究。

E-mail:1340933938@qq.com

龚昕玺,硕士研究生,主要从事输电线路工程方面的研究。

E-mail:1799284446@qq.com