



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法
作者： 谢亚坤，张杨，胡语依，詹妮，孙婷，朱军，朱庆
DOI： 10.13203/j.whugis20240254
收稿日期： 2024-11-15
网络首发日期： 2024-11-26
引用格式： 谢亚坤，张杨，胡语依，詹妮，孙婷，朱军，朱庆. 顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240254>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240254

引用格式：

谢亚坤, 张杨, 胡语依, 等. 顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240254 (XIE Yakun, ZHANG Yang, HU Yunong, et al. A Lightweight Approach to Railway Infrastructure BIM Models Considering Geometric Detail Features[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240254)

顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法

谢亚坤¹ 张杨¹ 胡语依¹ 詹妮¹ 孙婷¹ 朱军¹ 朱庆¹

¹ 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都, 611756

摘要: 铁路基础设施 BIM 模型的轻量化对于数据高效处理具有重要意义, 然而现有轻量化算法存在几何特征保持能力弱、细节信息丢失严重等问题。因此, 提出一种顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM (Building Information Modeling) 模型轻量化方法, 重点探讨了轨道、路基、隧道和桥梁 BIM 模型几何细节特征及其轻量化需求, 构建边界保持、角度误差控制、邻域三角形平均面积等简化规则, 设计多类型铁路基础设施简化方法, 并通过 5 种评价标准对方法有效性进行了详细分析。实验结果表明, 本文方法在保留更多几何细节特征的同时, 可有效降低轻量化模型的几何误差, 同时方法具有高质量的视觉效果, 能够适用于铁路基础设施模型轻量化。

关键词: 铁路基础设施; BIM; 模型轻量化; 几何特征; 细节特征

A Lightweight Approach to Railway Infrastructure BIM Models Considering Geometric Detail Features

XIE Yakun¹ ZHANG Yang¹ HU Yunong¹ ZHAN Ni¹ SUN Ting¹ ZHU Jun¹ ZHU Qing¹

¹ Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Objectives: Railway infrastructure is diverse in type, large in data volume, and complex in structure. Lightweighting its Building Information Modeling (BIM) models is crucial for efficient data processing. However, existing lightweighting algorithms face issues such as poor retention of geometric features and significant loss of detailed information. **Methods:** This paper proposes a lightweighting method for railway infrastructure BIM models that considers geometric detail features. The method first focuses on the geometric detail features and lightweighting needs of track, roadbed, tunnel, and bridge BIM models, identifying the challenges faced by lightweighting different models. Secondly, based on the geometric and detail features of different types of railway infrastructure, it establishes rules such as boundary preservation, angle control, and neighborhood area. The boundary preservation factor helps retain the contour features of the model to a greater extent and reduces the occurrence of hollow parts in

收稿日期: 2024-11-15

项目资助: 国家重点研发计划项目(2023YFB2603700)

第一作者: 谢亚坤, 博士, 讲师, 主要从事铁路孪生建模研究。yakunxie@163.com

通讯作者: 朱军, 博士, 教授。vgezj@163.com

the model. The angle error control factor prevents the loss of triangular faces caused by large rotation angles during edge folding. The neighborhood triangular average area factor helps retain more local detail features of the model. Finally, it designs simplification methods for various types of railway infrastructure based on different model needs and analyzes the method's effectiveness using five evaluation criteria. **Results:** Comparative analysis of the three algorithms shows that the method proposed in this paper simplifies the railway infrastructure model more effectively. The method retains more geometric detail features, effectively reduces the geometric error of the lightweight model, and provides high-quality visual effects. Furthermore, the test results of the simplification factors demonstrate that the boundary preservation, angular error control, and average area of neighboring triangles introduced in this paper effectively reduce model voids and maximize the retention of model contours, surface features, and local details. **Conclusions:** The methodology proposed in this paper effectively simplifies the model and is well-suited for lightweighting railway infrastructure models.

Key words: railway infrastructure, building information modeling, model lightweighting, geometric features, detail features

随着我国“一带一路”倡议和“西部大开发”战略的实施，铁路建设和管理的需求不断增加^[1-4]。BIM (Building Information Modeling) 因其在设计施工、控制成本、提升协同效率等方面优势被广泛应用于铁路设计、建设和运维阶段^[5-6]。然而，由于铁路基础设施类型多样、数据量大且结构复杂，BIM 模型在实际应用中存在加载速度慢、存储需求高、传输效率低等问题^[7-8]。因此，铁路基础设施 BIM 模型轻量化对于铁路建设和管理具有重要意义。

目前，BIM 模型的轻量化主要通过优化属性信息和简化几何数据两种方式实现^[9]，可有效提升模型的加载速度、存储效率和传输效率。针对 BIM 模型属性信息的优化，部分学者采用数模分离的思想，提取模型所需的属性信息并存储在数据库中，同时建立几何和属性的数据关联，可有效剔除模型冗余属性信息^[10-11]；也有学者通过遍历模型构件，筛选模型所需构件的属性信息，去除与几何无关的属性，进一步减小模型数据量^[12-13]。针对 BIM 模型几何数据的简化，部分学者采用构件复用的策略，相同构件存储一份信息，其余构件通过引用参考构件实现信息调用，从而减少重复的几何数据^[14-16]；也有学者通过网格简化的手段减小模型几何数据量，方法具体可分为几何元素删除法（顶点、边、三角形）、顶点聚类法和采样法^[17-18]。在最初的研究中，Schroede 等人提出了顶点删除的方式简化网格^[19]，但该方法可能出现网格结构的破坏和拓扑错误；同年学者 Turk 利用重新划分多边形的方式对顶点重采样^[20]，但其在处理复杂模型时简化效果不佳；随后 Rossignac^[21]提出了顶点聚类的网格简化方法，但对于模型细节的保持能力较弱；Hoppe 等人利用能量函数来确定边折叠顺序来实现网格简化^[22]，但由于能量计算复杂，导致应用效果差。

在此基础上，Garland 和 Heckbert 提出了基于二次误差度量 (Quadric Error Metrics, QEM) 边折叠算法^[23]，该算法计算折叠点到邻接面的距离表示二次误差矩阵，通过计算误差代价来确定边的折叠顺序，得到了广泛应用。然而，QEM 算法仍然存在模型简化后细节信息丢失、边界退化、狭长三角面等问题，使得其在处理复杂结构和需要高精度细节保留的模型时效果不佳。众多学者们在 QEM 算法基础上进行改进，对于模型存在狭长三角面的问题，学者们通过边分割操作，避免模型出现局部特征丢失、异常三角面，提高模型的几何精度^[24-25]；对于模型面片翻转的问题，学者们利用角度误差因子调整边折叠的优先级，避免边折叠前后面片角度变化过大，提升模型整体视觉效果^[26-27]；对于模型曲面区域细节丢失的问题，学者们通过引入类曲率、顶点曲率、高斯曲率、多邻域曲率等反映模型曲率的因子，或者通过引入邻域三角形平均面积因子加入二次误差度量中，避免细节特征过度简化，提高模型的精细度^[28-35]；对于模型典型特征区域特征丢失的问

题，学者们添加顶点权重改变边的简化次序，避免了特征区域过度简化，提升模型简化质量^[36-37]。

本文主要针对铁路基础设施 BIM 模型几何数据量大的问题，通过网格简化方式进行轻量化处理，但由于铁路基础设施类型多样且几何结构复杂，现有的网格简化方法在实际应用中仍然存在不足。例如，轨道和路基模型几何结构平整，现有方法简化后线形和结构特征难以保持；隧道模型曲面特征丰富，突兀和三角面片缺失问题严重；桥梁模型多元结构复杂，简化后对于细节特征的保持能力不足。

针对上述问题，本文重点研究顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法，通过分析轨道、路基、隧道和桥梁 BIM 模型几何及细节特征，厘清不同模型特征关联与轻量化需求，构建边界保持、角度误差控制、邻域三角形平均面积等简化规则，设计多类型铁路基础设施简化方案，提高简化后模型几何及细节特征完整性。

1 铁路基础设施模型轻量化算法

铁路基础设施模型简化算法总体思路图如图 1 所示。首先详细介绍二次误差度量算法，并深入分析轨道、路基、隧道和桥梁模型的特征，明确不同模型轻量化时面临的难点问题；其次，以不同类型铁路基础设施几何与细节特征为基础，建立边界保持、角度控制、邻域面积等规则条件；最后，根据不同模型轻量化需求，建立多类型基础设施轻量化方案，实现铁路基础设施模型的高效轻量化。

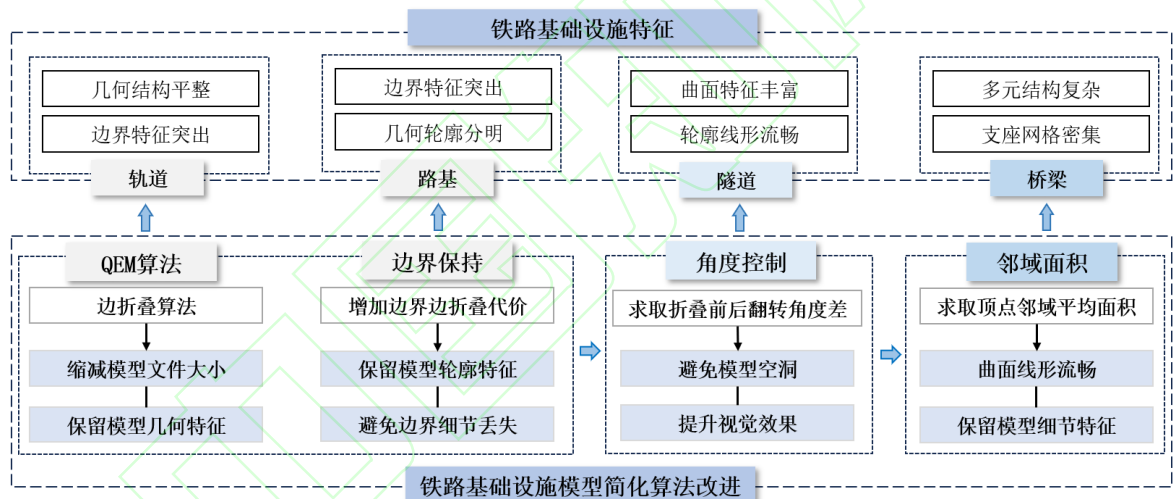


图 1 总体研究思路

Fig.1 General Research Ideas

1.1 二次误差度量算法

二次误差度量 (QEM) 算法，通过迭代的方式计算每条边折叠后的误差代价，找出误差最小的新顶点位置，选取误差代价值最小的边进行折叠以实现模型轻量化^[23]。如图 2 所示，当边 (U, V) 折叠后，新顶点为 V_0 ，原与边 (U, V) 相连的顶点将与新顶点 V_0 相连，并调整邻接三角形。重复这一过程，直到达到简化目标。

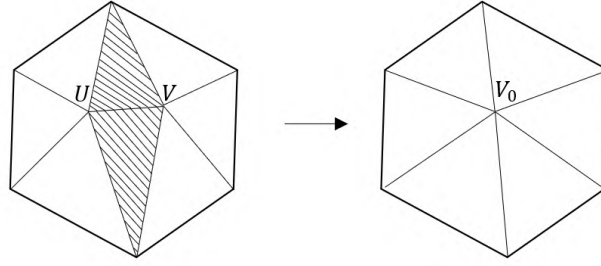


图2 网格边折叠过程

Fig.2 Folding Process of Grid Edge

首先，定义模型顶点的初始误差度量矩阵，用 $P=(a\ b\ c\ d)^T$ 来表示 $\text{Planes}(V)$ 中每个三角形所在面的平面方程。设平面方程为 $ax+by+cz+d=0$ ，其中 $a^2+b^2+c^2=1$ 。边 (V_α, V_β) 折叠后的顶点为 $V_p(x\ y\ z\ 1)^T$ ，顶点 V_p 到平面 P 的距离的平方如式 (1) 所示：

$$d^2(V_p) = (P^T V_p)^2 = V_p^T (PP^T) V_p \quad (1)$$

其中 PP^T 为 4×4 的对称矩阵，如式 (2) 所示：

$$PP^T = \begin{pmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ad & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其次，获取折叠后顶点 V_p 的误差矩阵 $Q(V_p)$ ，如式 (3) 所示，其中 $\text{Planes}(V)$ 是所有包含顶点的三角面的集合。

$$Q(V_p) = \sum_{P \in \text{Planes}(V)} PP^T = \sum_{P \in \text{Planes}(V_\alpha) \cup P \in \text{Planes}(V_\beta)} PP^T \quad (3)$$

最后，通过顶点 V_α 和 V_β 的误差矩阵可计算边 (V_α, V_β) 的折叠误差代价 $\Delta(V_p)$ ，根据代价值进行排序，代价值越小的边则优先简化。其中边折叠代价的大小取决于新顶点 V_p 的位置，新顶点与边 (V_α, V_β) 所关联平面 P 距离越大，折叠代价也越大。求取新顶点 V_p 使 $\Delta(V_p)$ 达到局部最小值，可通过式 (4) 求偏导并转换为矩阵形式得到式 (5)，如果矩阵 q 不可逆，则从边 (V_α, V_β) 的中点和两个端点中选择使折叠代价 $\Delta(V_p)$ 最小的点作为新顶点的位置。

$$\Delta(V_p) = V_p^T \left(\sum_{P \in \text{Planes}(V_\alpha)} PP^T + \sum_{P \in \text{Planes}(V_\beta)} PP^T \right) V_p \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} V_p = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中，若式 (5) 的 q 矩阵可逆，就可以得到新顶点的位置如式 (6) 所示：

$$V_p = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

1.2 铁路基础设施特征分析

铁路基础设施包括轨道、路基、桥梁和隧道^[38]，其特征主要表现为在几何形态、结构特征和表面特性等方面的差异，不同类型的基础设施模型在轻量化算法上有不同的需求，为实现高效的轻量化表达，本文对不同基础设施模型特征进行了详细分析。

(1) 轨道模型由轨枕和钢轨两部分构成，几何结构平整。轨枕排列整齐，间隔均匀，具有明显的几何线条；钢轨整体几何形态平整，但模型需要保持线形流畅，以确保模型轮廓不受破坏，如图3所示。然而，QEM算法简化过程中，由于缺乏对边界的有效处理，模型表面三角面片缺失严重，因此，在轨道模型轻量化过程中，需要更多的关注边界处理，避免三角面片的缺失，保持轨道轮廓特征。

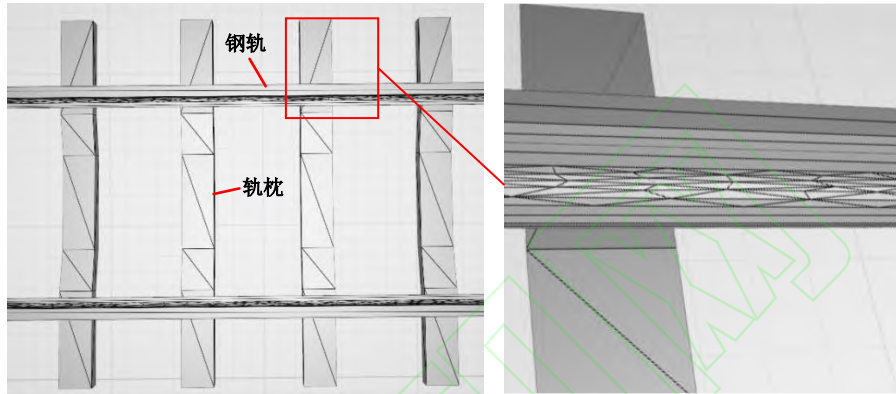


图3 轨道模型基本结构

Fig.3 Basic Structure of the Track Model

(2) 路基模型主要由路基本体、防护结构和加固结构组成，边界特征突出。路基模型整体几何形态相对平坦，但其内部结构复杂；防护结构如护坡较为平整，但包含大面积三角面片，需要特别关注其几何轮廓特征；加固结构通常嵌入在路基内部，具有隐蔽性，但在模型中需要准确表现其位置和形态，如图4所示。QEM算法简化过程中同样忽略了边界的处理，模型表面出现三角面片缺失问题严重，因此，在路基模型轻量化过程中，需要特别关注边界处理，减少三角面片的缺失，提高模型的完整性。

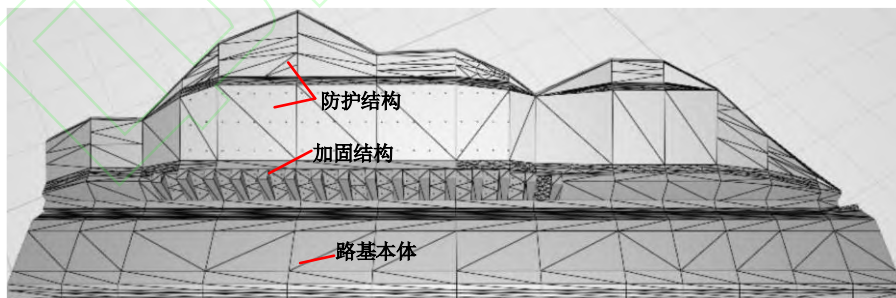


图4 路基模型基本结构

Fig.4 Basic Structure of the Roadbed Model

(3) 隧道模型主要由洞门、洞身和底座组成，曲面特征丰富。隧道表面曲率变化较大，尤其在洞门和洞身的连接处，需要保持流畅的曲线过渡；隧道底座结构平整，需保证其轮廓和结构完整性；此外，隧道模型表面三角网格密集，需精细刻画几何特征，如图5所示。QEM算法简化过程中忽略了边界和三角面之间的邻接关系，导致模型表面三角面片缺失和轮廓细节丢失，因此，在轻量化过程中，需要对模型边界进行重点处理，保证模型轮廓特征及隧道底座结构完整性，并且需控制三角面片翻转的角度，避免模型表面三角面片缺失的问题。

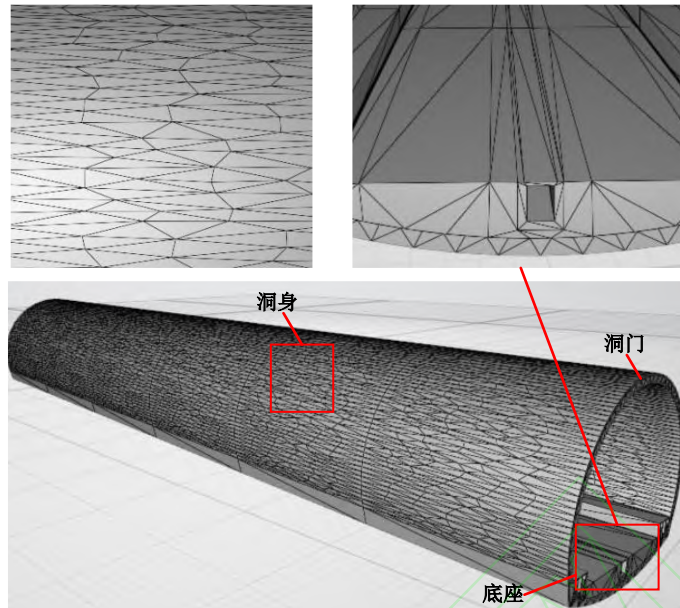


图 5 隧道模型基本结构

Fig.5 Basic Structure of the Tunnel Model

(4) 桥梁模型由桥面、支座、桥墩、承台和桥台组成，多元结构复杂。桥面平整宽广，三角网格分布稀疏，但需保持平整性和线形流畅性；支座连接桥面和承台，侧边三角网格密集，曲面特征明显，需详细刻画；桥墩和承台作为支撑结构，具有较强的垂直性和稳定性，模型中需准确反映其尺寸和形态，以确保桥梁的整体结构完整性和功能性；桥台支撑桥面和连接路面，三角网格密集且曲面特征明显，需保持其曲面细节以及结构完整性，如图 6 所示。QEM 算法不仅忽略了边界和三角面的邻接关系，且难以在优先简化三角面小的细节特征区域的同时保留三角面片大的结构平整区域，从而导致细节丢失。因此，在桥梁简化过程中，需要对模型边界进行重点处理，特别是增加边界边的折叠代价，保持模型的轮廓特征，此外，通过控制三角面片的翻转角度，避免三角面片的缺失，并利用顶点邻域三角形平均面积因子调整边折叠优先级，以更大程度保留桥梁模型的细节特征，防止简化过度导致的模型空洞现象。

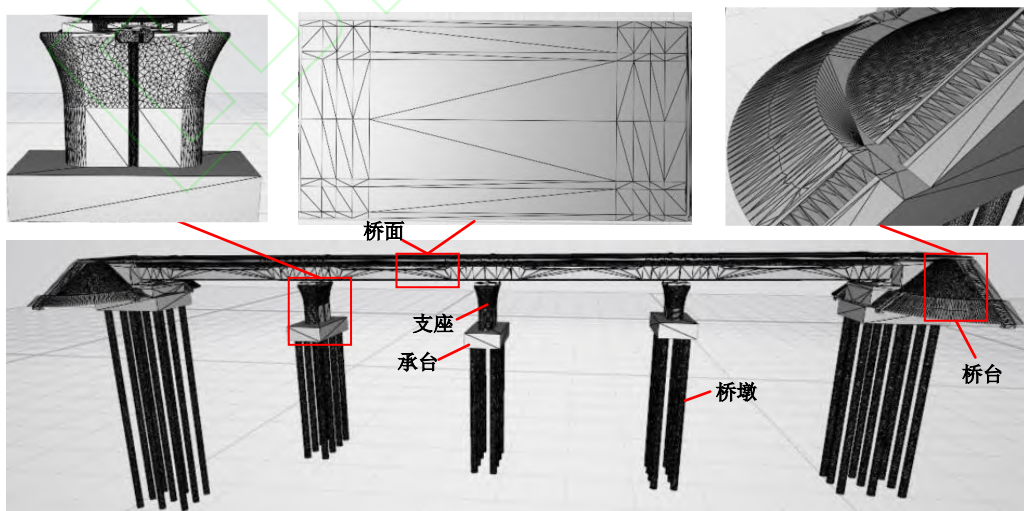


图 6 桥梁模型基本结构

Fig.6 Basic Structure of the Bridge Model

综上所述，铁路基础设施几何特征体现在模型的整体形态、结构轮廓的完整性，如轨道模型

的平整几何线条、路基模型的整体平坦形态、隧道模型的曲线过渡和桥梁模型的结构轮廓等。细节特征则侧重于模型局部区域的细微结构和特征保留，如轨道模型中的钢轨的线形流畅性，路基模型中防护结构的几何轮廓和加固结构的位置，隧道模型表面的三角网格密集性以及桥梁模型中支座和桥墩的细节刻画。因此，在模型轻量化过程中，需特别关注这些几何细节特征，以提高算法的有效性与适用性。

1.3 顾及几何细节特征的模型轻量化

面向不同类型基础设施模型简化需求，结合几何结构平整、边界特征突出、曲面特征丰富、多元结构复杂等铁路基础设施模型特征，建立边界保持、角度误差控制及邻域三角形平均面积三个简化因子，并根据不同类型设施建立多类型铁路基础设施简化方案。

1.3.1 边界保持

轨道、路基、隧道和桥梁模型都存在轮廓特征明显的区域，若忽略模型的边界，简化后的模型易出现边界退化、模型细节丢失的情况。因此，本文通过增加边界边的折叠代价，尽可能保持模型的轮廓特征。边界边的端点增加的代价值如式（7）所示，即为边界边 (V_a, V_b) 到新顶点 $V_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 距离的平方，边界边新的折叠代价如式（8）所示：

$$D_i = (X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 + (Z_i - Z_c)^2 \quad (7)$$

$$Cost_{new} = Cost + D_a + D_b \quad (8)$$

其中 X_i, Y_i, Z_i 为边界边的端点坐标， D_a 和 D_b 分别为端点 V_a 和 V_b 到收缩后的顶点 V_c 的距离的平方， $Cost$ 为原始边的折叠代价， $Cost_{new}$ 为边新的折叠代价。

1.3.2 角度误差控制

铁路隧道和桥梁模型中存在较多曲面区域，QEM算法在进行边折叠的过程中，伴随三角面片的删除和生成，当新生成的三角面片旋转角度较大时，存在三角面片缺失的问题，简化后丢失大量模型细节，视觉效果较差。本文通过控制三角面片的翻转角度，避免三角面片缺失，提高模型细节保持率。

图7中，当顶点 V_7 和 V_8 所在的边折叠成新的顶点 V_9 后， $\Delta V_7V_3V_4$ 、 $\Delta V_7V_8V_4$ 相应的简化成 $\Delta V_9V_3V_4$ 。其中边 (V_7, V_8) 的邻域三角形 $\Delta V_7V_1V_2$ 、 $\Delta V_7V_2V_3$ 、 $\Delta V_7V_3V_4$ 、 $\Delta V_8V_4V_5$ 、 $\Delta V_8V_5V_6$ 、 $\Delta V_8V_6V_1$ 变化为 $\Delta V_9V_1V_2$ 、 $\Delta V_9V_2V_3$ 、 $\Delta V_9V_3V_4$ 、 $\Delta V_9V_4V_5$ 、 $\Delta V_9V_5V_6$ 、 $\Delta V_9V_6V_1$ 。其中各三角形 $(\Delta V_iV_jV_k)$ 法向量计算公式如式（9）所示，折叠前后三角形法向量变化最大的角度 α_{max} 计算公式如式（10）所示。

$$\frac{(V_j - V_i) \times (V_k - V_j)}{\|(V_j - V_i) \times (V_k - V_j)\|} \quad (9)$$

$$\alpha_{max} = \max \left\{ \begin{array}{l} \arccos(n_1 \times n_1') \\ \arccos(n_2 \times n_2') \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \arccos(n_i \times n_i') \end{array} \right\} \quad (10)$$

其中 n_1, n_2, n_i 为边折叠前三角形法向量， n_1', n_2', n_i' 为边折叠后对应生成的新三角面的法向量。根据隧道和桥梁模型的结构特征，设置三角面片旋转角度阈值，避免模型简化时因三角面片旋转角度过大出现模型空洞的问题。

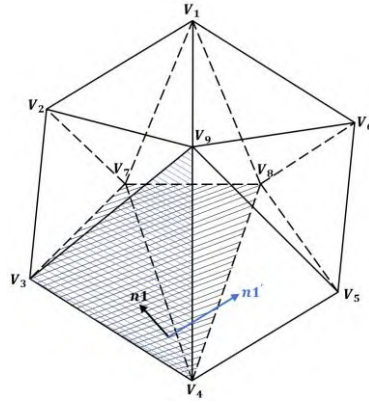


图7 边折叠前后角度变化

Fig.7 Angle Change Before and after Side Folding

1.3.3 邻域三角形平均面积

铁路隧道、桥梁模型中存在较多光滑的曲面，QEM 算法简化后部分区域会出现大面积的三角面片，导致该区域细节信息丢失。为了最大程度地保留模型特征，本文设计了邻域三角形平均面积因子，该因子在细节信息较多区域，邻域三角形平均面积较小；在模型平坦区域，邻域三角形平均面积较大，顶点 v_s 邻域三角形如图8所示，可进保留模型更多的特征，更少简化邻域平均面积较小的区域。求取模型中顶点的邻域三角形平均面积计算公式如下：

$$S_{v_s} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i(v_s)}{k} \quad (11)$$

其中 k 为顶点 v_s 的邻域三角形数量， $S(v_s)$ 为顶点 v_s 的邻域三角形面积之一。在计算边折叠代价时，引入顶点邻域三角形平均面积因子进行修正。根据式(12)、(13)，计算两顶点邻域面积平均值得到对应边的加权因子，将误差代价乘以邻域三角形平均面积，得到新的边折叠误差代价。

$$S_i = \frac{(S_{\delta} + S_{\theta})}{2} \quad (12)$$

$$\text{Cost}_{new} = \text{Cost} * S_i \quad (13)$$

其中 S_i 为边 (V_{δ}, V_{θ}) 的邻域三角形平均面积， S_{δ} 和 S_{θ} 分别为顶点 V_{δ} 和 V_{θ} 的邻域平均面积。

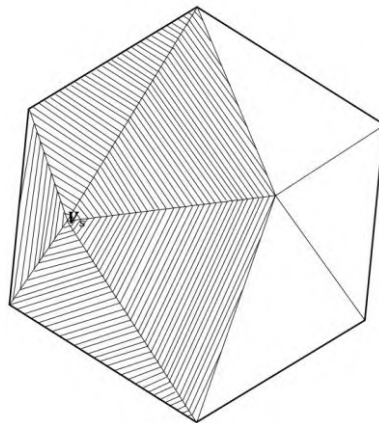


图8 顶点邻域三角面片

Fig.8 Vertex Neighborhood Triangle Sheet

2 实验结果与分析

2.1 实验环境

本文实验在 AMD Ryzen 9 7945HX with Radeon Graphics 处理器和 16 GB 内存的硬件环境下进行,以 Visual Studio 2019 作为开发平台,使用 C++语言实现本文算法。操作系统为 Windows 11,显卡为 GeForce RTX 4060,使用 3D 查看器软件显示模型。

2.2 实验数据与评价标准

本文所采用的铁路基础设施模型原始数据,来源于中国福建省至厦门市的福厦铁路某特定截取段,数据以.rvt 格式存储,为满足后序模型简化需求,利用 Autodesk Revit 2018 软件将.rvt 格式转换为.obj 格式,作为本文的模型文件。为全面详细分析方法的有效性与适用性,本文主要从顶点数目、面片数量、文件大小、几何误差和视觉效果等角度对模型简化效果展开分析。从定量角度来看,顶点数目和面片数量反映了模型简化过程中三角面片的变化情况。在相同的简化率下,简化模型的面片数量几乎相同。但由于不同算法引入的简化因子不同,影响了边的折叠优先级,导致简化模型面片结构存在差异,其顶点数目也不同。当顶点数目较多时,表明简化模型保留了更多细节信息,直接影响模型文件大小。几何误差表示原始模型和简化模型之间的几何距离,反映模型简化的质量,最大误差反映偏离原始模型的最大程度,平均误差反映与原始模型几何差异的平均水平。本文采用 Metro 网格比较工具分析简化模型,获取简化后模型的最大误差和平均误差^[39]。此外,通过模型简化后呈现的视觉效果,从定性角度对模型的完整性、平滑度等进行分析,以评估简化效果的优劣。

2.3 算法对比分析

为全面验证方法的有效性,本文针对轨道、路基、隧道、桥梁 4 种铁路基础设施模型,将本文算法与 QEM 算法^[23]、文献[30]算法进行对比,并从 5 个方面进行了详细的定量和定性分析。

2.3.1 轨道轻量化分析

从表 1 可以看出,在相同的简化率下,三种简化算法生成的面片数量几乎相同,本文轨道简化算法得到的模型保留了更多的顶点,虽然会导致文件大小略微增加,但也更多地保留了模型的细节特征。Metro 比较工具结果表明,本文轨道算法在几何误差方面表现更优,与 QEM 算法和文献[30]算法相比,本文算法处理后的模型最大误差分别至少降低了 80.93%和 64.78%。此外,本文算法的平均误差比 QEM 算法至少降低了 65.28%,且在较高简化率时,其平均误差始终优于文献[30]算法。

由图 9 可以看出,与 QEM 算法和文献[30]算法相比,本文算法简化轨道模型效果更好。简化率为 20%和 40%时,QEM 算法简化模型后钢轨侧面出现狭长三角形,并且由于钢轨变形,视觉上会出现黑色空洞的情况;文献[30]算法简化模型后,在钢轨侧面存在三角面片缺失的情况,而本文算法能够有效改善这些问题。在简化率 60%时,由于轨道模型三角面片数量较少,在高简化率时不能顾及模型的轮廓特征,以至于 QEM 和文献[30]算法的简化结果都出现了钢轨变形,视觉效果差。但本文算法添加了边界保持因子,能够保证钢轨线形流畅与轮廓完整性,有效改善了模型表面三角面片缺失的问题,更大程度地保留模型的轮廓细节特征。

表 1 轨道模型简化数据对比

Tab.1 Comparison of Simplified Data for Track Models

对比内容	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/KB	最大误差	平均误差	
原模型	9870	5692	350			
简化 20%	QEM	7896	4579	280	0.028999	0.00123
	本文算法	7896	4705	284	0.004834	0.000427

	文献[30]	7895	4567	280	0.013729	0.000367
	QEM	5922	3414	208	0.101167	0.007923
简化 40%	本文算法	5921	3712	218	0.005018	0.000647
	文献[30]	5922	3333	205	0.101167	0.008253
	QEM	3948	2256	136	0.104051	0.013167
简化 60%	本文算法	3948	2655	150	0.019835	0.001657
	文献[30]	3947	2148	132	0.104095	0.01703

2.3.2 路基轻量化分析

从表 2 可以看出, 在相同的简化率下, 三种简化算法生成的面片数量几乎相同, 本文路基简化算法得到的模型保留了更多的顶点, 虽然会导致文件大小略微增加, 但也更多的保留了模型的细节特征。几何误差结果表明, 本文算法和文献[30]算法整体差别较小, 但与 QEM 算法相比, 本文算法几何误差方面表现更优, 最大误差和平均误差至少降低了 99.18%和 96.31%。其中, 在不同简化率下, QEM 算法简化的模型的最大误差均为 4.231398, 主要是由于该算法在简化路基模型防护结构时, 出现大面积的三角面片缺失, 导致与原始模型几何差异较大。

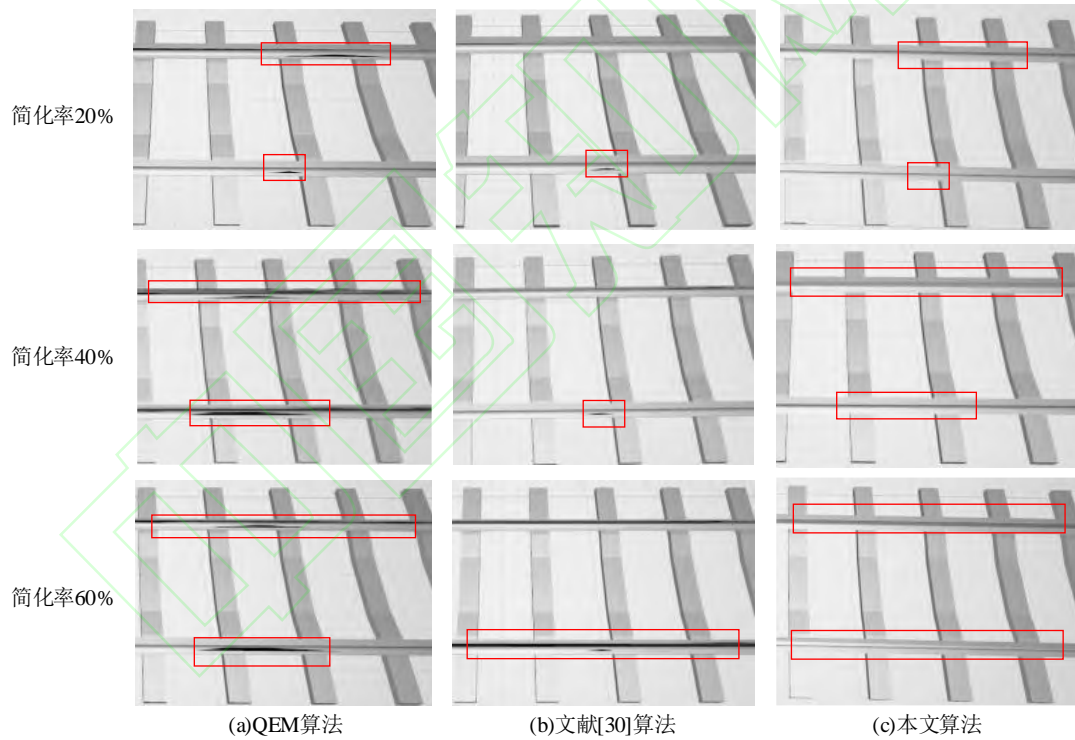


图 9 轨道模型简化结果

Fig.9 Track Model Simplification Results

表 2 路基模型简化数据对比

Tab.2 Comparison of Simplified Data for Roadbed Models

对比内容	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/KB	最大误差	平均误差	
原模型	849338	449124	34214			
简化 20%	QEM	679469	356317	27141	4.231398	0.016662
	本文算法	679470	364241	27418	0.016383	0.000099

	文献[30]	679470	364178	27415	0.016383	0.000095
	QEM	509602	269116	20265	4.231398	0.017732
简化 40%	本文算法	509601	279717	20639	0.021347	0.000293
	文献[30]	509602	279290	20624	0.020045	0.000295
	QEM	339734	180800	13353	4.231398	0.017697
简化 60%	本文算法	339735	194110	13830	0.034534	0.000653
	文献[30]	339735	193544	13811	0.034534	0.000653

由图 10 可以看出，本文算法和文献[30]算法对于路基模型简化效果较好。QEM 算法在简化率为 20%时，路基模型防护结构出现大面积的三角面片缺失；在 40%和 60%简化率时，加固结构和防护结构简化后都存在三角面片缺失，导致模型的视觉效果较差。相比之下，本文算法与文献[30]算法处理模型后，有效改善了护坡和加固结构大量三角面片缺失的问题，从而保证了路基模型的完整性。

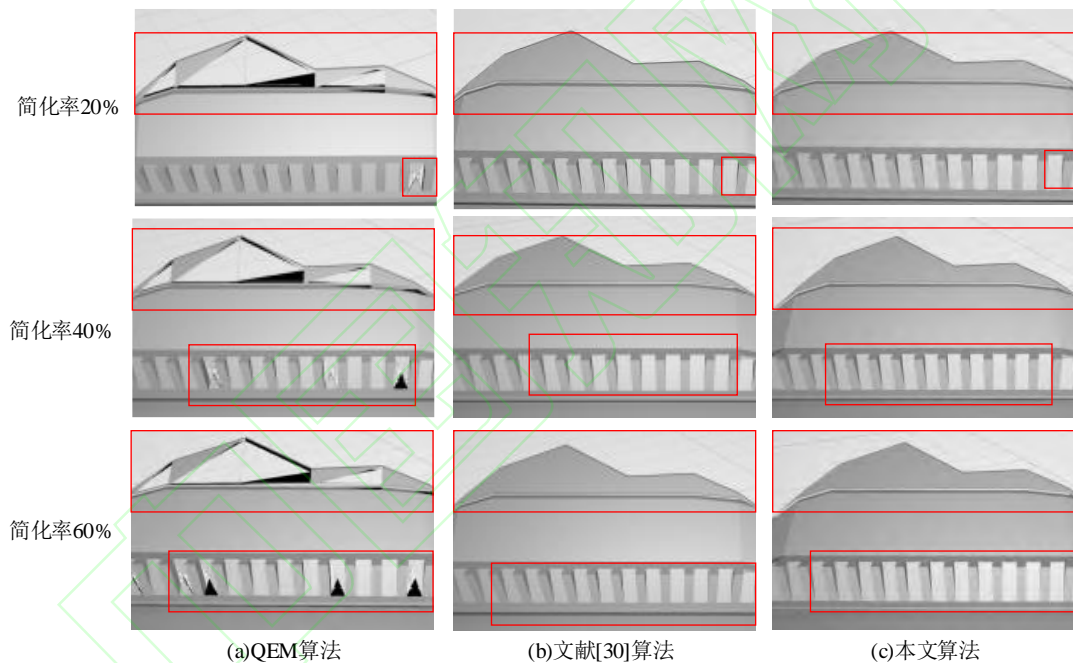


图 10 路基模型简化结果

Fig.10 Roadbed Model Simplification Results

2.3.3 隧道轻量化分析

从表 3 可以看出，在相同的简化率下，三种简化算法生成的面片数量几乎相同，而本文隧道简化算法得到的模型保留了更多的顶点，虽然会导致文件大小略微增加，但也更多地保留了模型的细节特征。本文隧道算法在几何误差方面表现更优，与 QEM 算法和文献[30]算法相比，最大误差分别至少降低了 87.28%和 81.02%，平均误差分别至少降低了 93.12%和 83.81%，表明本文算法简化后的模型更接近于原始模型。

由图 11 可以看出，与 QEM 算法和文献[27]算法相比，本文算法对于隧道模型简化效果更好。具体来说，QEM 算法在 40%和 60%简化率下，模型简化后洞身结构出现三角面片空洞，底座结构存在面片缺失现象；而文献[30]算法添加了顶点曲率和平展度因子，能够有效保留模型的细节特征和平滑度，对地铁信号设备模型简化效果较好，但对于隧道模型，简化后模型视觉效果不佳。相

比之下，本文隧道简化算法添加了边界保持和角度误差控制因子，有效改善了隧道模型洞身表面三角面片缺失的问题，最大限度地保留了模型的曲面细节特征，并且保证了隧道底座结构完整性，呈现较好的视觉效果。

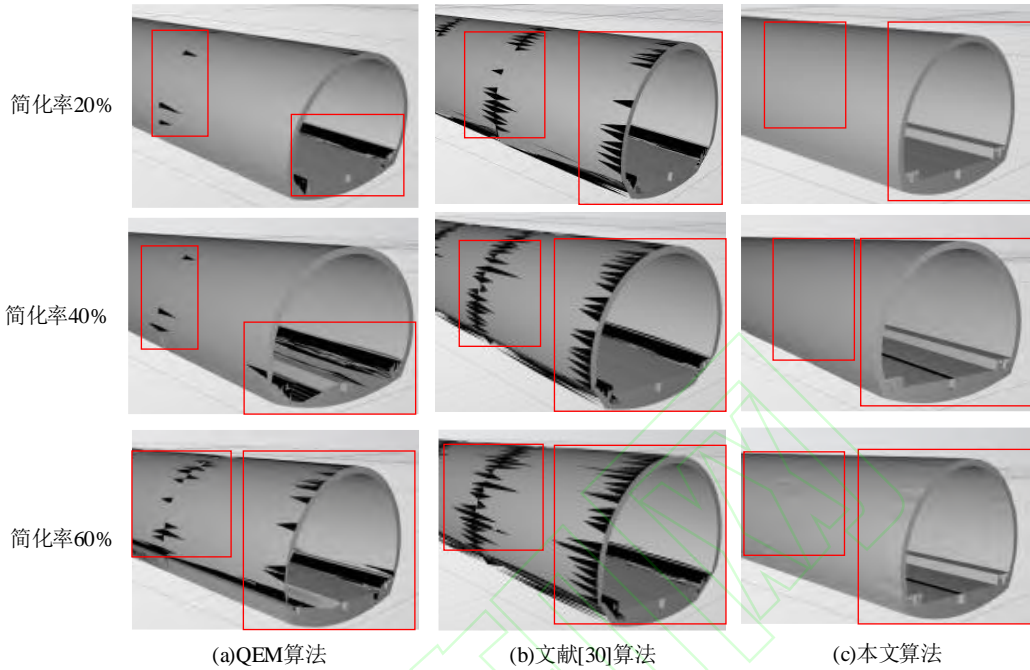


图 11 隧道模型简化结果
Fig.11 Tunnel Model Simplification Results

表 3 隧道模型简化数据对比

Tab.3 Comparison of Simplified Data for Tunnel Models

对比内容	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/KB	最大误差	平均误差	
原模型	85411	44373	3205			
简化 20%	QEM	68327	35062	2535	0.401136	0.003794
	本文算法	68328	35824	2563	0.017561	0.000071
	文献[30]	68328	34461	2514	0.803918	0.013591
简化 40%	QEM	51245	25736	1865	1.192501	0.040899
	本文算法	51243	26949	1910	0.111480	0.001030
	文献[30]	51246	25803	1868	0.803918	0.021196
简化 60%	QEM	34163	16768	1207	1.199906	0.063700
	本文算法	34164	17758	1245	0.152512	0.004378
	文献[30]	34163	17144	1221	0.803918	0.027056

2.3.4 桥梁轻量化分析

由表 4 可以看出，在相同的简化率下，三种简化算法生成的面片数量几乎相同，而本文轨道简化算法得到的模型保留了更多的顶点，虽然会导致文件大小略微增加，但也更多地保留了模型的细节特征。此外，在几何误差方面，本文算法表现更优，与 QEM 算法和文献[30]算法相比，最大误差分别至少降低了 44.71%和 67.1%。随着模型简化率不断提高，本文算法和文献[30]算法简

化模型的平均误差差别较小，且两者的平均误差均小于 QEM 算法的结果。

由图 12 和图 13 可以看出，与 QEM 算法和文献[27]算法相比，本文算法简化桥梁模型整体效果更好。对于桥梁的桥面、支座和承台结构，QEM 算法和文献[27]算法模型简化后，存在三角面片缺失的问题，而本文算法显著保留了支座结构曲面的细节特征，避免了桥面结构出现空洞。对于桥台结构，文献[30]算法添加了顶点曲率和平展度因子，难以保留桥台的曲面特征，且存在大量面片缺失；QEM 算法模型简化后，也会出现少数狭长三角面片缺失的问题。本文算法有效避免了三角面片空洞现象，最大限度地保留了模型的细节特征，呈现更好的视觉效果。

表 4 桥梁模型简化数据对比

Tab.4 Comparison of Simplified Data for Bridge Models

对比内容	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/KB	最大误差	平均误差
原模型	317470	162819	11994		
QEM	253975	128824	9418	0.108180	0.000170
简化 20% 本文算法	253975	131113	9495	0.059803	0.000120
文献[30]	253976	126777	9340	0.365877	0.000221
QEM	190482	95787	6892	0.366086	0.000755
简化 40% 本文算法	190481	99304	7004	0.073160	0.000530
文献[30]	190482	94506	6852	0.365877	0.000528
QEM	126988	63447	4561	0.366086	0.001868
简化 60% 本文算法	126988	67077	4678	0.120342	0.001843
文献[30]	126988	62395	4528	0.365877	0.001752

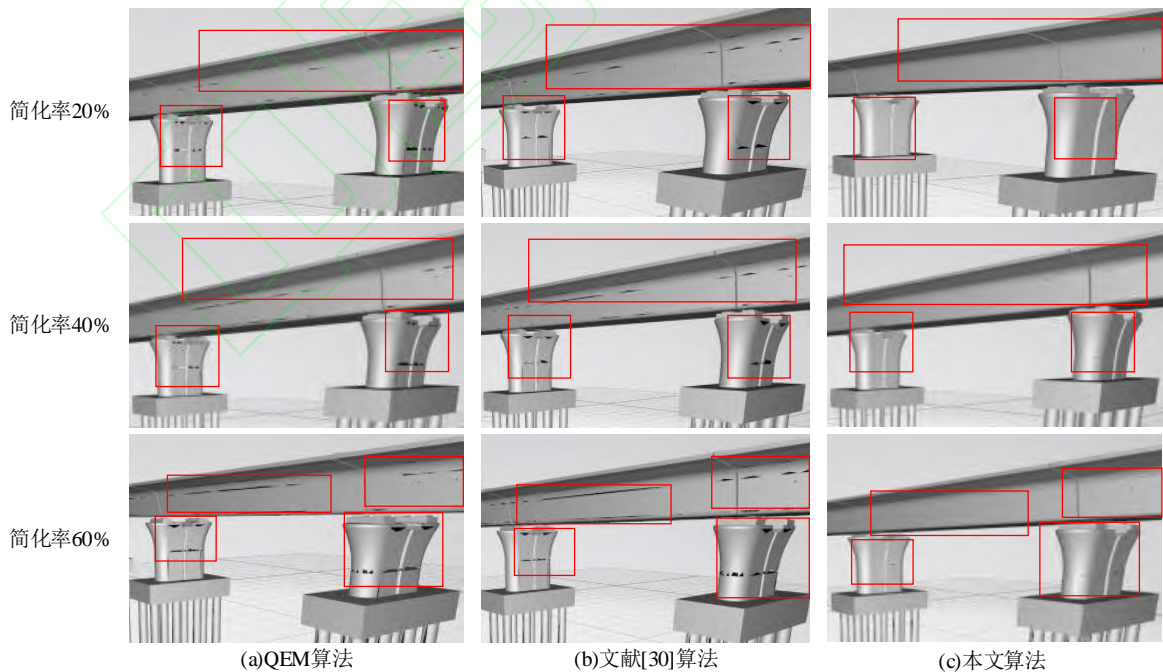


图 12 桥面支座结构简化结果

Fig.12 Bridge Deck Bearing Structure Simplification Results

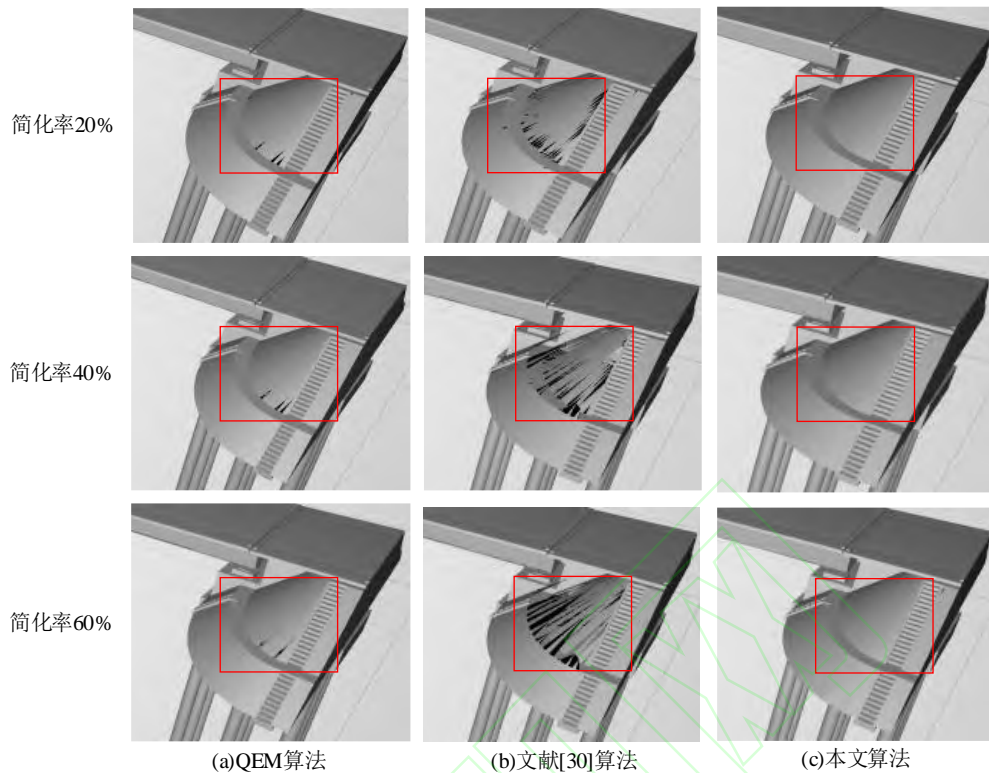


图 13 桥台结构简化结果

Fig.13 Bridge Abutment Structure Simplification Results

2.4 简化因子作用检验

为进一步验证方法有效性及各因子的作用，本文对各因子进行了详细分析，需要说明的是，对于轨道和路基模型，仅添加了边界保持手段进行简化，从算法对比分析可以看出边界保持因子能更好地保留模型的几何特征，对于更为复杂的隧道和桥梁模型，除边界保持处理因子外还引入了其他因子，因此以桥梁和隧道为例进行简化因子作用分析。

对于隧道模型，本文对比未加入边界保持因子、未加入角度误差控制因子以及本文隧道简化算法的差异，并以 60% 简化率为例进行了可视化分析。如表 5 所示，从表中可以看出在加入各控制因子后，平均误差与最大误差有明显降低，其中未添加边界保持因子的简化算法几何误差较大，且简化后隧道洞身表面和底座会存在大量空洞现象，视觉效果差（图 14（a）），边界保持因子的保留有效避免了模型空洞现象，提升了模型整体视觉效果（图 14（c））。未添加角度误差控制因子的简化算法在几何误差上总体略大于本文隧道简化算法，隧道洞身表面存在少量三角面片缺失和面片翻转现象，导致表面细节信息丢失（图 14（b）），角度误差控制因子则避免了边折叠后面片翻转角度过大，模型表面三角面片缺失和突兀三角面片的问题（图 14（d）），有效保证了模型轮廓特征及结构完整性。

表 5 隧道模型简化因子作用对比

Tab.5 Comparison of the Role of Tunnel Model Simplification Factors

简化率	最大误差			平均误差		
	无边界	无角度	本文算法	无边界	无角度	本文算法
20%	0.401136	0.031770	0.017561	0.003088	0.000107	0.000071
40%	1.192501	0.111480	0.111480	0.038851	0.001804	0.001030

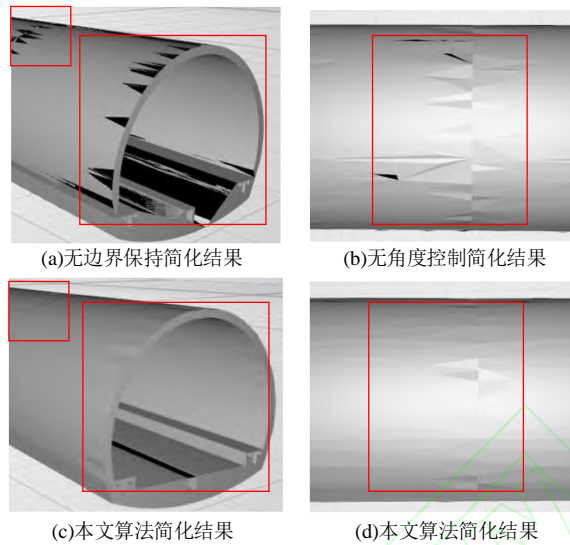


图 14 隧道模型简化 60%不同算法效果对比

Fig.14 Comparison of the Effects of Different Algorithms for 60% Simplification of Tunnel Models

对于桥梁模型，本文对比未加入边界保持因子、未加入顶点邻域平均面积因子、未加入角度误差控制因子与本文桥梁简化算法在大块空洞现象（图 15（a））；边界保持因子保留了模型边界区域的细节特征与支的差异，并以 60%简化率为例进行了可视化分析。如表 6 所示，未添加边界保持因子的算法几何误差较大，且简化后桥梁的支座部分会存座区域的更多细节（图 15（d））。未添加邻域三角形平均面积因子的算法几何误差与本文桥梁简化算法接近，但简化率较高时，支座部分会出现大面积三角面片（图 15（b））；邻域面积因子维持了大面积区域的特征，如承台和桥面等结构平整区域，也更大程度保留了支座区域的细节特征（图 15（e））。未添加角度误差控制因子的简化算法几何误差略大于本文算法，当简化率较高时，桥台结构缺失三角面片，导致几何特征丢失（图 15（c））；角度误差控制因子则避免了边折叠前后面片翻转角度过大造成的模型空洞和细节丢失现象（图 15（f）），进一步提高了模型简化完整性及视觉效果。

表 6 桥梁模型简化因子作用对比

Tab.6 Comparison of the Role of Bridge Model Simplification Factors

简化率	最大误差				平均误差			
	无边界	无面积	无角度	本文算法	无边界	无面积	无角度	本文算法
20%	0.186424	0.019482	0.059803	0.059803	0.000700	0.000069	0.000190	0.000120
40%	0.186424	0.073160	0.073160	0.073160	0.001434	0.000564	0.000639	0.000530
60%	0.385022	0.130800	0.124789	0.120342	0.002454	0.001913	0.002128	0.001843

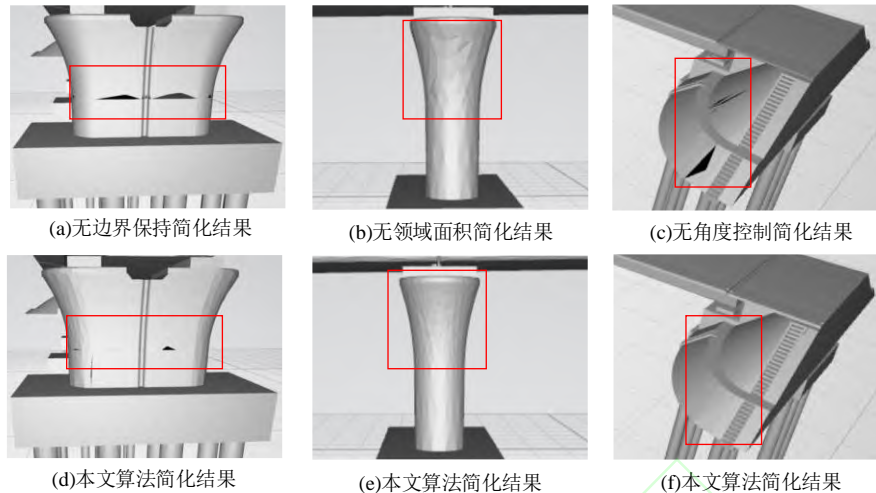


图 15 桥梁模型简化 60%不同算法效果对比

Fig.15 Comparison of the Effects of Different Algorithms for 60% Simplification of Tunnel Models

3 结语

本文提出了顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法，分析了轨道、路基、隧道和桥梁模型的不同几何结构特征，并针对不同模型需求提出了适宜性模型轻量化方法。利用边界保持因子，增加边界边的折叠误差，更大程度地保留模型的轮廓特征，同时一定程度减少了模型曲面部分空洞的情况；利用角度误差控制因子，设置旋转角度阈值，避免边折叠前后旋转角度过大导致的三角面片缺失现象；通过邻域三角形平均面积因子，调整边折叠的优先级，更多地保留模型的局部细节特征。本文方法可在相同简化率和面片数的情况下，保留基础设施模型更多的几何细节特征，输出了质量较高的简化模型。然而，BIM 模型构件之间具有丰富的语义关系，在未来研究中，将进一步探索 BIM 模型多层次结构和语义关系，通过以模型语义信息为主导，简化模型的几何和属性信息，在剔除冗余信息的同时，保留构件的关联关系，以提升模型的综合性能和应用效果。

参考文献

- [1] LIU Yongzheng, LI Yan. High-speed Rails and City Economic Growth in China [J]. Journal of Financial Research, 2017, (11): 18-33. (刘勇政,李岩. 中国的高速铁路建设与城市经济增长[J]. 金融研究, 2017, (11): 18-33.)
- [2] TU Wei, BAO Zhuoyuan, GAO Wei, et al. Coupling Big Data and Synthetic Spatial Simulation for Guangzhou-Shenzhen- Hong Kong High-speed Railway Alignment[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-13[2024-10-17]. (涂伟,包卓远,高位,等. 耦合大数据与空间综合模拟的广深港第二高铁选线方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 1-13[2024-10-17].)
- [3] LI Yongwei, XU Linrong, CHEN Yunhao, et al. Intergrated Space-Air-Train-Ground Muti-source Techniques for Early Detection of Subgrade Disasters and ServiceStatus of Railway Subgrade [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49 (8): 1392-1406+1421. (李永威,徐林荣,陈昀灏,等. 基于天-空-车-地一体化铁路路基灾害隐患早期识别与服役状态监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49 (8): 1392-1406+1421.)
- [4] ZHU Qing, CHEN Junhua, GUO Yongxin, et al. Efficient Line-Tile-Component Multi-Granularity Spatiotemporal Indexing Method for Digital Twin Railroad Tunnel Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48 (11): 1844-1853. (朱庆,陈俊桦,郭永欣,等. 数字孪生铁路隧道线路-瓦片-构件多粒度时空数据高效索引方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48 (11): 1844-1853.)

- [5] WANG Tongjun. Innovation and Practice of Railway Engineering Construction Management Based on BIM Technology[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41 (1): 1-9. (王同军. 基于 BIM 技术的铁路工程建设管理创新与实践[J]. 铁道学报, 2019, 41 (1): 1-9.)
- [6] NING Xinwen, ZHU Qing, REN Xiaochun, et al. Graphical Processing Method of High-Speed Railway Construction Progress Data[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53 (2): 414-419. (宁新稳, 朱庆, 任晓春, 等. 高速铁路施工进度数据图形化处理[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53 (2): 414-419.)
- [7] Zhi Peng. Research on the BIM-based Railway Construction Management Platform and its Key Technologies [D]. China Academy of Railway Sciences, 2018. (智鹏. 基于 BIM 的铁路建设管理平台及关键技术研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2018.)
- [8] Zhou Ying. Research on the digitalcollaborative management system of railway construction project based on BIM[D]. Beijing Jiaotong University, 2017. (周颖. 基于 BIM 的铁路建设项目数字化协同管理体系研究[D]. 北京交通大学, 2017.)
- [9] CHEN Ke, ZHANG Li, GUAN Linjie, et al. BIM simplification method considering geometric characteristics[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(2): 209-213.(陈科, 张力, 管林杰, 等. 考虑几何特征的 BIM 模型轻量化方法研究[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 209-213.)
- [10] ZENG Wenqu, ZHANG Zezhou, DENG Zhuoping. Web lightweight strategy and loading optimization method for subway BIM model[J]. *Railway Computer Application*, 2023, 32(5): 26-31.(曾文驱,张泽州,邓卓平. 地铁 BIM 模型 Web 端轻量化策略及加载优化方法研究[J]. 铁路计算机应用, 2023, 32 (5): 26-31.)
- [11] JIAN Yunshuo, FAN Wenjie, XU Haifeng, et al. Research on Lightweight Technology of BIM Model for Railway Engineering[J]. *Railway Transport and Economy*, 2023, 45 (5): 99-104.(菅云硕, 范文杰, 许海丰, 等. 铁路工程 BIM 模型轻量化技术研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45 (5): 99-104.)
- [12] ZHAO Qiang, HE Chenzhao, YANG Shizhi, et al. Transformation of Underground Space Models Based on IFC and CityGML——A Case Study of Utility Tunnel[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45 (7): 1058-1064.(赵强, 何陈照, 杨世植, 等. 利用 IFC 和 CityGML 进行地下空间模型转换——以城市综合管廊为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45 (7): 1058-1064.)
- [13] Shi Lei. Research on Object Oriented Semantic Mapping of Architectural Structures: Taking IFC and CityGML as Examples[D]. Shandong Jianzhu University, 2023.(石磊. 面向对象的建筑结构语义映射研究[D]. 山东建筑大学, 2023.)
- [14] FAN Dengke, ZHANG Heng, ZHANG Li. A Geometric Lightweight Method of BIM Models Based on Multiplexing Elements[J]. *Railway Standard Design*, 2023, 67 (6): 60-65.(范登科, 张恒, 张丽. 基于构件复用与边折叠的 BIM 模型几何轻量化方法[J]. 铁道标准设计, 2023, 67 (6): 60-65.)
- [15] HU Xiakai, CHEN Juntao, YANG Dan, et al. Research on BIM + WebGIS converged application based on secondary development of Revit[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2021, 52 (11): 3930-3942.(胡夏恺, 陈俊涛, 杨聃, 等. 基于 Revit 二次开发的 BIM + WebGIS 融合应用研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52 (11): 3930-3942.)
- [16] Wang Xuejian, Wang Jiayuan, Zhang Yuyu, et al. Visualization Key Technology and Application of Real Scene 3D in Subway Engineering Based on GIS+BIM[J/OL]. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 1-6[2024-08-27].(王雪健, 王家远, 张育雨, 等. 基于 GIS+BIM 的地铁工程实景三维可视化关键技术及应用[J/OL]. 土木建筑工程信息技术, 1-6[2024-08-27].)
- [17] Guo Lizhen, Wu Enhua. Survey of Polygonal Model Simplification Algorithms[J]. *Application Research of Computers*, 2005, 22(8): 20-23. (郭力真, 吴恩华. 多边形模型简化算法综述[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(8): 20-23.)
- [18] DONG Fangmin, ZHANG Rui, LIU Yong, et al. A Summarization of Mesh Simplification Algorithms [J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2007, (1): 54-59. (董方敏, 张蕊, 刘勇, 等. 网格模型简化算法

综述[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, (1): 54-59.)

- [19] Schroeder W J, Zarge J A, Lorensen W E. Decimation of triangle meshes[C]//Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1992: 65-70.
- [20] Turk G. Re-tiling polygonal surfaces[C]//Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1992: 55-64.
- [21] Rossignac J, Borrel P. Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes[M]//Modeling in computer graphics: methods and applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993: 455-465.
- [22] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, et al. Mesh optimization[C]//Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1993: 19-26.
- [23] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics[C]//Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1997: 209-216.
- [24] Liang Y, He F, Zeng X. 3D mesh simplification with feature preservation based on whale optimization algorithm and differential evolution[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2020, 27(4): 417-435.
- [25] ZHANG Youran. Improved Quadric Error Metrics Algorithm Combining Edge Splitting[J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(6): 271-278.(张悠然. 结合边分割的改进二次误差测度算法[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(6): 271-278.)
- [26] LI Shaoqing, HUO Liang, SHEN Tao, et al. A Simplification Algorithm for Edge Collapse of 3D Building Model Considering Angle Error[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(8): 1209-1215. (李少卿, 霍亮, 沈涛, 等. 顾及角度误差的三维建筑模型边折叠简化算法[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2021, 46(8): 1209-1215.)
- [27] Bai H, 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.
- [28] JIAO Yue, WANG Huiqing, WU Yuhao, et al. Mesh Simplification Algorithm Combined with Area Measurement and Error Correction[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55 (17): 221-226.(焦越, 王慧青, 吴煜豪, 等. 结合面积度量 and 误差校正的网格简化算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (17): 221-226.)
- [29] CHU Surong, NIU Zhixian, SONG Chunhua, et al. Progressive mesh simplification algorithm for mobile devices[J]. journal of Computer Applications, 2020, 40(3): 806-811.(褚苏荣, 牛之贤, 宋春花, 等. 面向移动端的渐进网格简化算法[J]. 计算机应用, 2020, 40(3): 806-811.)
- [30] Ding YingYing. Research on Lightweight and Visualization of BIM Model of Subway Signal Equipment[D]. Lanzhou Jiaotong University, 2023.(丁莹莹. 地铁信号设备 BIM 模型轻量化及可视化研究[D]. 兰州交通大学, 2023.)
- [31] ZHANG Wenxin, WEN Peizhi, HUANG Jia, et al. An improved quadric error metric mesh simplification algorithm[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2015, 35(1): 59-63.(张文新, 温佩芝, 黄佳, 等. 一种改进的二次误差测度简化算法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2015, 35(1): 59-63.)
- [32] Xu Kai. Research on Lightweight BIM Model of Traction Substation[D]. Lanzhou Jiaotong University, 2021.(徐凯. 牵引变电所 BIM 模型轻量化研究[D]. 兰州交通大学, 2021.)
- [33] MA Yujie, WANG Shandong, OUYANG Tao. 3D Surface Model Simplification Algorithm Based on Improved QEM[J]. Journal of Gansu Sciences, 2022, 34(2): 28-33.(马煜杰, 王山东, 欧阳涛. 基于改进 QEM 的三维表面模型简化算法[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(2): 28-33.)
- [34] Liu Jinqun. Research and Implementation of BIM Model Lightweighting basd on WebGL[D]. Lanzhou Jiaotong University, 2023.(刘金泉. 基于 WebGL 的 BIM 模型轻量化研究与实现[D]. 兰州交通大学, 2023.)
- [35] Pei Guanxiang. Lightweight quantification of the BIM model based on the QEM algorithm Research and application of the methods[D]. Lanzhou Jiaotong University, 2023.(裴冠翔. 基于 QEM 算法的 BIM 模型轻量化方法研究与应用[D]. 兰州交通大学, 2023.)

- [36] CHEN Yu, ZHANG Jianwei, TAN Shihan. A Simplification Algorithm for Edge Collapse of 3D Airport Model Considering Local Characteristics[J]. Modern Computer, 2021.(陈雨, 张建伟, 谭诗瀚. 顾及局部特征的机场三维模型边折叠算法[J]. 现代计算机, 2021.)
- [37] Xiang H, Huang X, Lan F, et al. A shape-preserving simplification method for urban building models[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2022, 11(11): 562.
- [38] Chen Huapeng, Lu Shoushan, Lei Xiaoyan, et al. Advance in Research on Applications of Digital Twin in Intelligent Railway Operation Management[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 27-44.(陈华鹏, 鹿守山, 雷晓燕, 等. 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 27-44.)
- [39] Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: measuring error on simplified surfaces[C]//Computer graphics forum. Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers, 1998, 17(2): 167-174.

网络首发:

标题: 顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法

作者: 谢亚坤, 张杨, 胡语依, 詹妮, 孙婷, 朱军, 朱庆

收稿日期: 2024-11-15

DOI:10.13203/j.whugis20240254

引用格式:

谢亚坤, 张杨, 胡语依, 等. 顾及几何细节特征的铁路基础设施 BIM 模型轻量化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240254 (XIE Yakun, ZHANG Yang, HU Yunong, et al. A Lightweight Approach to Railway Infrastructure BIM Models Considering Geometric Detail Features[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240254)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

面向小样本高光谱影像分类的轻量化关系网络

孙一帆, 余旭初, 谭熊, 刘冰, 高奎亮

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1336-1348.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210157>

一种应用传感器网和实景三维模型的复杂建筑物实时动态监测方法

徐敬海, 杜东升, 李枝军, 王曙光

武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(5): 630-639.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200462>

三维场景中建筑物模型简化研究进展

陈博, 余江峰, 谈俊忠, 马劲松, 吴国平

武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1429-1437.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190470>