引文格式:谢亚坤,张杨,胡语侬,等.顾及几何细节特征的铁路基础设施BIM简化算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(4):826-839.DOI:10.13203/j.whugis20240254

Citation:XIE Yakun,ZHANG Yang,HU Yunong,et al.A Simplified Algorithm to Railway Infrastructure BIM Considering Geometric Detail Features[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(4):826-839.DOI:10.13203/j.whugis20240254

顾及几何细节特征的铁路基础设施BIM简化算法

谢亚坤[1] 张 杨[1] 胡语侬[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:铁路基础设施建筑信息模型(building information modeling,BIM)的简化对于数据高效处理具有重要意义,然而现有简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。提出了一种顾及几何细节特征的铁路基础设施BIM简化算法,重点探讨了轨道、路基、隧道和桥梁BIM几何细节特征及其简化需求,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算法,并通过5种评价标准对算法的有效性进行了详细分析。实验结果表明,所提算法在保留更多几何细节特征的同时,可有效降低简化模型的几何误差。此外,所提算法展现出优异的视觉效果,适用于铁路基础设施模型的简化。

关键词:铁路基础设施;建筑信息模型;模型简化;几何特征;细节特征

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-02-15

DOI:10.13203/j.whugis20240254 **文章编号**:1671-8860(2026)04-0826-14

A Simplified Algorithm to Railway Infrastructure BIM Considering Geometric Detail Features

XIE Yakun[1] *ZHANG Yang*[1] *HU Yunong*[1] *ZHAN Ni*[1] *SUN Ting*[1] *ZHU Jun*[1] *ZHU Qing*[1]

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. Simplifing its building information modeling (BIM) models is crucial for efficient data processing. However, existing simplifing algorithms face issues such as poor retention of geometric features and significant loss of detailed information. **Methods:** We propose a simplifing method for railway infrastructure BIM that explicitly accounts for geometric detail features. First, we identify the specific simplifing challenges associated with track, roadbed, tunnel, and bridge models. Second, based on the unique geometric characteristics of railway infrastructure, establish a set of optimization rules including boundary preservation, angle control, and neighborhood area metrics. Specifically, the boundary preservation factor maintains model contours and prevents the formation of voids. The angle error control factor prevents the loss of triangular faces caused by excessive rotation during edge collapse. The neighborhood triangular average area factor helps retain local fine-grained details. Finally, customized simplification strategies are designed for different infrastructure types, and the method's effectiveness is evaluated using five distinct criteria. **Results:** Comparative analysis of three algorithms shows that our proposed method simplifies the railway infrastructure model more effectively. The method retains more geometric detail features, effectively reduces the geometric error of the simplified 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

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB2603700)。

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

通信作者:朱军,博士,教授。vgezj@163.com

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 proposed method effectively simplifies the model and is well-suited for simplifing railway infrastructure models.

Key words: railway infrastructure; BIM; model simplifing; geometric features; detail features

随着中国“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]。建筑信息模型(building information modeling, BIM)因其在施工设计、成本控制、协同效率提升等方面的优势而被广泛应用于铁路设计、建设和运维方面[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 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 简化对于铁路建设和管理具有重要意义。

目前,BIM 的简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 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];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 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少模型几何数据量,具体方法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]。文献[19]提出了顶点删除的方式简化网格,但该方法可能出现网格结构的破坏和拓扑错误;文献[20]利用重新划分多边形的方式对顶点重采样,但其在处理复杂模型时简化效果不佳;文献[21]提出了顶点聚类的网格简化方法,但其对于模型细节的保持能力较弱;文献[22]利用能量函数确定边折叠顺序来实现网格简化,但能量计算复杂,应用效果差。在此基础上,文献[23]提出了基于二次误差度量(quadric error metrics,QEM)的边折叠算法。该算法通过计算折叠点到邻接面的距离表示二次误差矩阵,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。众多学者在 QEM 算法基础上进行了改进:对于模型存在狭长三角面的问题,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,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,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,通过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]。

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 简化算法,通过分析轨道、路基、隧道和桥梁 BIM 几何及细节特征,厘清不同模型特征关联与简化需求,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的完整性。

1　铁路基础设施 BIM 简化算法

铁路基础设施 BIM 简化算法总体思路如图 1 所示。首先,详细介绍 QEM 算法,并深入分析轨道、路基、隧道和桥梁模型的特征,明确不同模型简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,在 QEM 算法中建立边界保持、角度控制、邻域面积等规则条件;最后,根据不同模型简化需求,建立多类型基础设施简化方案,实现铁路基础设施 BIM 的高效简化。

1.1　QEM 算法

QEM 算法通过迭代的方式计算每条边折叠

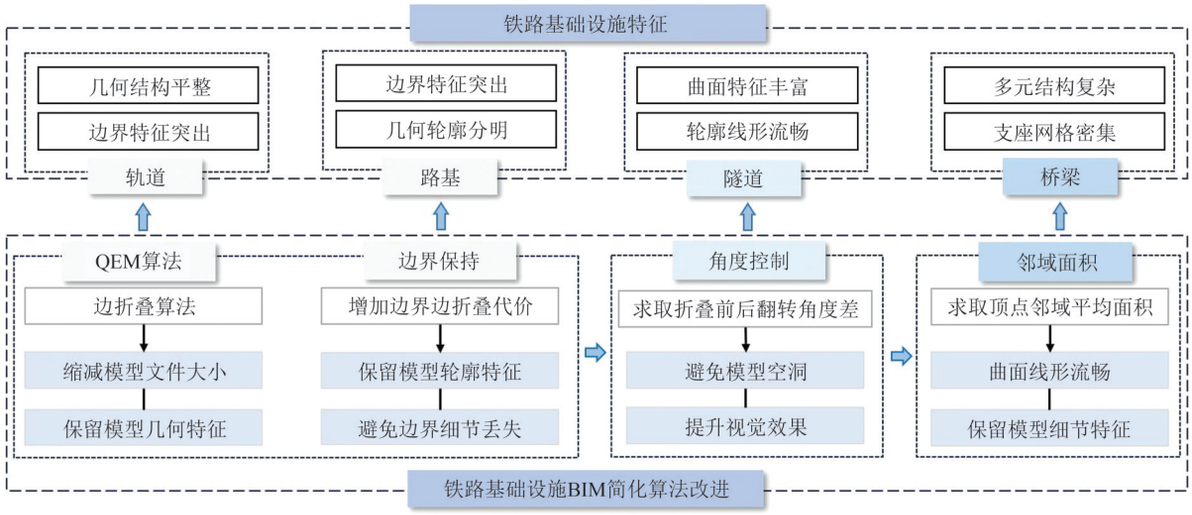


图1 总体研究思路

Fig. 1 General Research Ideas

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,以实现模型简化[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。

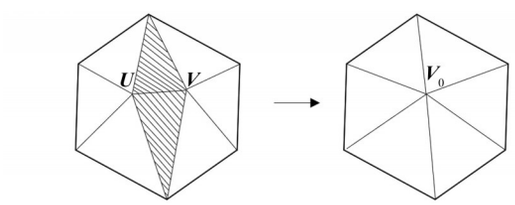


图2 格网边折叠过程

Fig. 2 Folding Process of Grid Edges

首先,定义模型顶点的初始误差度量矩阵。$P(V)$为包含顶点V的所有三角面集合。对于该集合中的任意一张平面,其平面方程可表示为$P^{\mathrm{T}}V=0$,其中$P=\left[a\ b\ c\ d\right]^{\mathrm{T}}$为平面的参数向量,满足$a^2+b^2+c^2=1$,$V=\left[x\ y\ z\ 1\right]^{\mathrm{T}}$为顶点的齐次坐标向量。顶点$V_0$到平面$P$的距离的平方$M^2(V_0)$的计算式为:

$$M^2(V_0)=(P^{\mathrm{T}}V_0)^2=V_0{}^{\mathrm{T}}(PP^{\mathrm{T}})V_0 \tag{1}$$

式中,PP^{T}为4×4的对称矩阵,表达式为:

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

其次,获取待折叠边(V_α, V_β)塌陷后新顶点V_0的二次误差矩阵$\boldsymbol{Q}$。该矩阵由两个端点关联平面的基础误差矩阵累加得到,其计算式为:

$$\boldsymbol{Q}=\sum_{P\in P(V_\alpha)}PP^{\mathrm{T}}+\sum_{P\in P(V_\beta)}PP^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{Q}_\alpha+\boldsymbol{Q}_\beta \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{Q}_\alpha$、$\boldsymbol{Q}_\beta$分别为顶点V_α、V_β的累积误差矩阵。

最后,计算边(V_α, V_β)的折叠误差代价ΔV_0。该代价定义为新顶点V_0到其关联平面集合的总距离平方和,其计算式为:

$$\Delta V_0=V_0{}^{\mathrm{T}}\left(\sum_{P\in P(V_\alpha)}PP^{\mathrm{T}}+\sum_{P\in P(V_\beta)}PP^{\mathrm{T}}\right)V_0 \tag{4}$$

通过求取新顶点V_0,使ΔV_0达到局部最小值,将式(4)求偏导并转换为矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}V_0=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

如果矩阵不可逆,则从边(V_α, V_β)的中点和两个端点中选择使折叠代价ΔV_0最小的点作为新顶点的位置。若式(5)的矩阵可逆,新顶点位置的计算式为:

$$V_0=\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

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,其特征主要表现为几何形态、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简化算法上有不同的需求,为实现高效的简化表达,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。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,在轨道模型简化过程中,需要更多关注边界处理,避免三角面片的缺失,保持轨道轮廓特征。

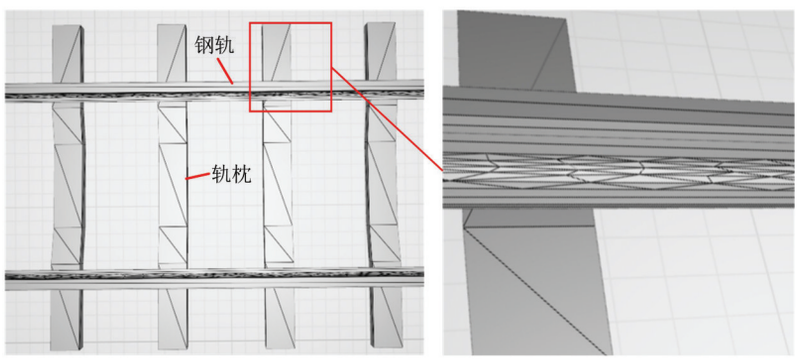


图 3　轨道模型基本结构

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,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,模型表面三角面片缺失严重。因此,在路基模型简化过程中,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。

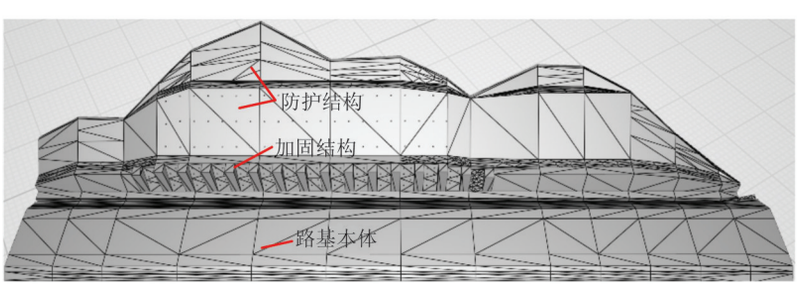


图 4　路基模型基本结构

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,尤其是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,在简化过程中,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。

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

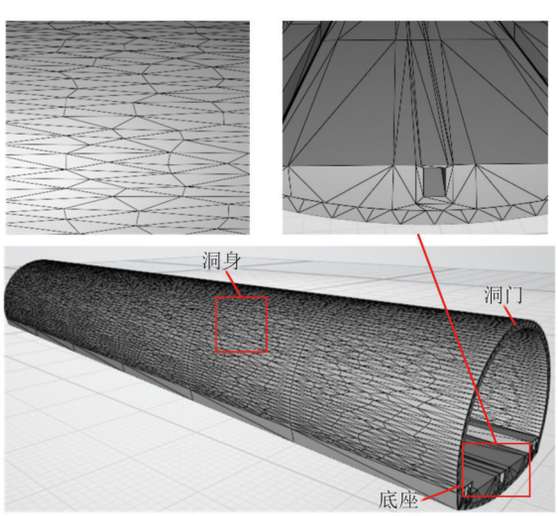


图 5　隧道模型基本结构

Fig. 5　Basic Structure of the Tunnel Model

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片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。

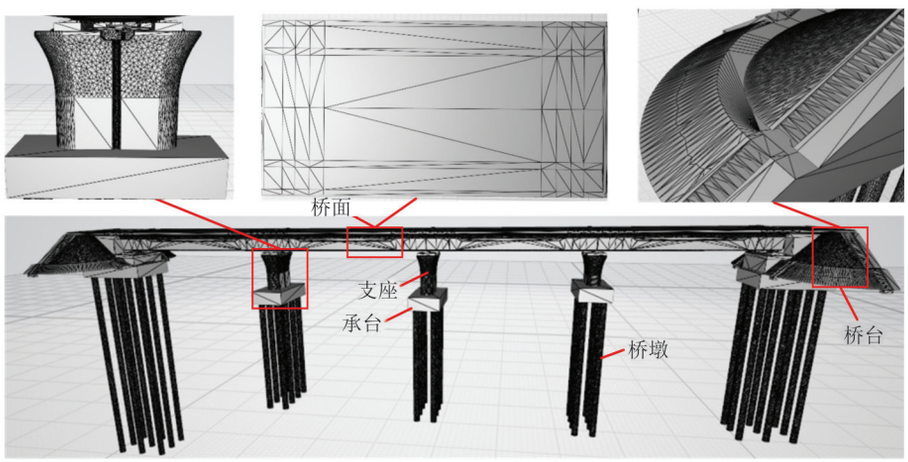


图6 桥梁模型基本结构

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,在模型简化过程中,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简化

面向不同类型基础设施的模型简化需求,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3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D_i的计算式为:

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

式中,(X_i,Y_i,Z_i)为边界边的端点坐标;(X_c,Y_c,Z_c)为收缩后顶点V_c的坐标。

边界边新的折叠代价计算式为:

$$C_0=C+D_a+D_b \tag{8}$$

式中,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;C为原始边的折叠代价;C_0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,$\triangle V_7V_3V_4$、$\triangle V_7V_8V_4$相应地简化成$\triangle V_9V_3V_4$。其中边(V_7,V_8)的邻域三角形$\triangle V_7V_1V_2$、$\triangle V_7V_2V_3$、$\triangle V_7V_3V_4$、$\triangle V_8V_4V_5$、$\triangle V_8V_5V_6$、$\triangle V_8V_6V_1$变为$\triangle V_9V_1V_2$、$\triangle V_9V_2V_3$、

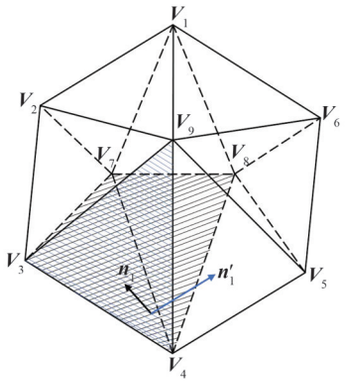


图7　边折叠前后角度变化

Fig. 7　Angle Change Before and After Side Folding

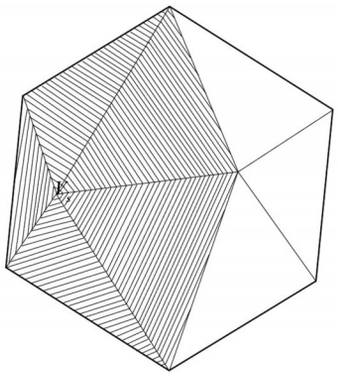


图8　顶点邻域三角面片

Fig. 8　Vertex Neighborhood Triangle Sheet

$\triangle V_9V_3V_4$、$\triangle V_9V_4V_5$、$\triangle V_9V_5V_6$、$\triangle V_9V_6V_1$。各三角形($\triangle V_iV_jV_k$)法向量$\boldsymbol{n}$的计算式为:

$$\boldsymbol{n}=\frac{(\boldsymbol{V}_j-\boldsymbol{V}_i)\times(\boldsymbol{V}_k-\boldsymbol{V}_j)}{\left\|(\boldsymbol{V}_j-\boldsymbol{V}_i)\times(\boldsymbol{V}_k-\boldsymbol{V}_j)\right\|} \tag{9}$$

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而出现模型空洞的问题。折叠前后三角形法向量变化最大的角度$\alpha_{\max}$计算式为:

$$\alpha_{\max}=\max(\arccos(\boldsymbol{n}_i\cdot\boldsymbol{n}_i')) \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{n}_i$、$\boldsymbol{n}_i'$分别为边折叠前后第i个三角形的单位法向量。

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。为了更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: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$\boldsymbol{V}_s$邻域三角形如图8所示,可以保留更多模型特征。求取模型中顶点的邻域三角形平均面积计算式为:

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

式中,k为顶点V_s的邻域三角形数量;$S(V_s)$为顶点$\boldsymbol{V}_s$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。新的边折叠误差代价C_s计算式为:

$$C_s=\frac{C}{S_\partial+S_\theta} \tag{12}$$

式中,S_∂、S_θ分别为顶点$\boldsymbol{V}_\partial$、$\boldsymbol{V}_\theta$的邻域平均面积;C为原始边折叠误差代价。

2　BIM简化实验结果与分析

2.1　实验环境

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,使用三位查看器软件显示模型。

2.2　实验数据与评价标准

本文采用的铁路基础设施模型原始数据来源于中国福建省福州市至厦门市的福厦铁路某特定截取段,数据以.rvt格式存储,为满足后续模型简化需求,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。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 轨道简化分析

表1为轨道模型的简化数据对比,其中原模型面片数量为9 870个,顶点数量为5 962个,文件大小为350 kB。由表1可以看出,在相同的简化率下,3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。

表1 轨道模型简化数据对比

Table 1 Comparison of Simplified Data for Track Models

简化率/%	算法	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/kB	最大误差/m	平均误差/m
20	QEM算法	7 896	4 579	280	0.028 999	0.001 230
	文献[30]算法	7 895	4 567	280	0.013 729	0.000 367
	本文算法	7 896	4 705	284	0.004 834	0.000 427
40	QEM算法	5 922	3 414	208	0.101 167	0.007 923
	文献[30]算法	5 922	3 333	205	0.101 167	0.008 253
	本文算法	5 921	3 712	218	0.005 018	0.000 647
60	QEM算法	3 948	2 256	136	0.104 051	0.013 167
	文献[30]算法	3 947	2 148	132	0.104 095	0.017 030
	本文算法	3 948	2 655	150	0.019 835	0.001 657

图9为轨道模型的简化效果,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l模型的轮廓细节特征。

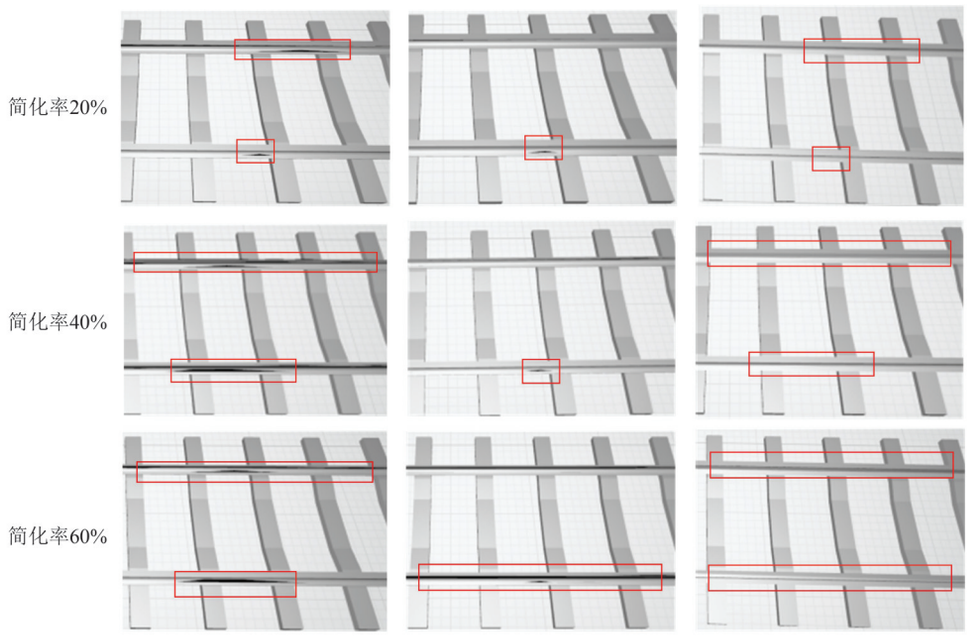
2.3.2 路基简化分析

表2为路基模型的简化数据对比,其中原模型面片数量为849 338个,顶点数量为449 124个,文件大小为34 214 kB。由表2可以看出,相同简化率下路基简化结果与轨道结果类似。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算法的最大误差均为4.231 398 m,这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10为路基模型简化效果,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;在简化率为40%和60%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。

2.3.3 隧道简化分析

表3为隧道模型的简化数据对比,其中原模型面片数量为85 411个,顶点数量为44 373个,文件大小为3 205 kB。由表3可以看出,相同简化率下隧道简化结果与轨道结果类似。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。



(a) QEM算法　(b) 文献[30]算法　(c) 本文算法

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

Table 2　Comparison of Simplified Data for Roadbed Models

简化率/%	算法	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/kB	最大误差/m	平均误差/m
20	QEM 算法	679 469	356 317	27 141	4.231 398	0.016 662
	文献[30]算法	679 470	364 178	27 415	0.016 383	0.000 095
	本文算法	679 470	364 241	27 418	0.016 383	0.000 099
40	QEM 算法	509 602	269 116	20 265	4.231 398	0.017 732
	文献[30]算法	509 602	279 290	20 624	0.021 045	0.000 295
	本文算法	509 601	279 717	20 639	0.021 347	0.000 293
60	QEM 算法	339 734	180 800	13 353	4.231 398	0.017 697
	文献[30]算法	339 735	193 544	13 811	0.034 534	0.000 653
	本文算法	339 735	194 110	13 830	0.034 534	0.000 653

图 11 为隧道模型简化效果,可以看出与 QEM 算法和文献[30]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 算法在简化率为 40% 和 60% 时,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。

2.3.4　桥梁简化分析

表 4 为桥梁模型的简化数据对比,其中原模型面片数量为 317 470 个,顶点数量为 162 819 个,文件大小为 11 994 kB。由表 4 可以看出,相同简化率下桥梁简化结果与轨道结果类似。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。

图 12 和图 13 为桥梁模型的简化效果,可以看出与 QEM 算法和文献[30]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[30]算法

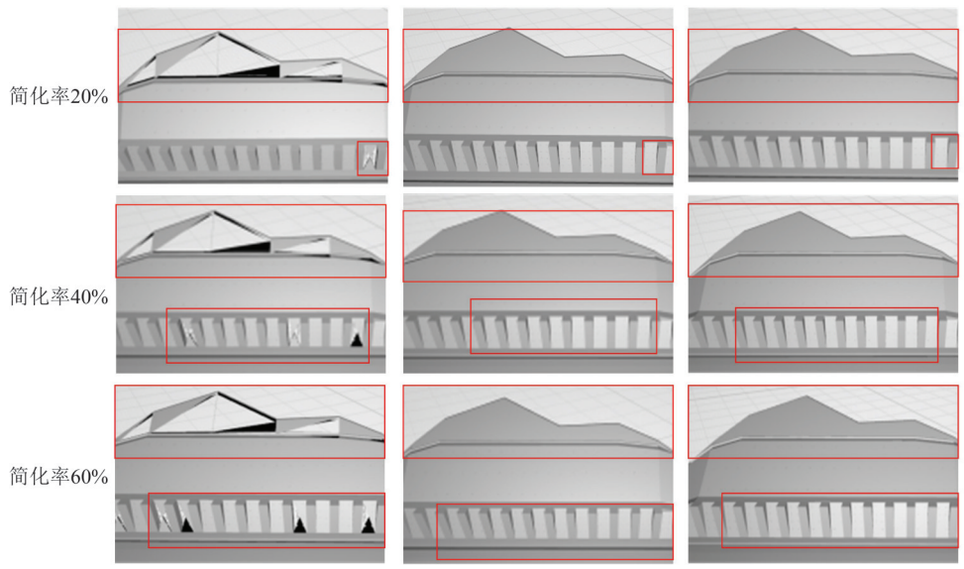


图10 路基模型简化结果

Fig. 10 Roadbed Model Simplification Results

表3 隧道模型简化数据对比

Table 3 Comparison of Simplified Data for Tunnel Models

简化率/%	算法	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/kB	最大误差/m	平均误差/m
20	QEM算法	68 327	35 062	2 535	0.401 136	0.003 794
	文献[30]算法	68 328	354 461	2 514	0.803 918	0.013 591
	本文算法	68 328	35 824	2 563	0.017 561	0.000 071
40	QEM算法	51 245	25 736	1 865	1.192 501	0.040 899
	文献[30]算法	51 246	25 803	1 868	0.803 918	0.021 196
	本文算法	51 243	26 949	1 910	0.111 480	0.001 030
60	QEM算法	34 163	16 768	1 207	1.199 906	0.063 700
	文献[30]算法	34 163	17 144	1 221	0.803 918	0.027 056
	本文算法	34 164	17 758	1 245	0.152 512	0.004 378

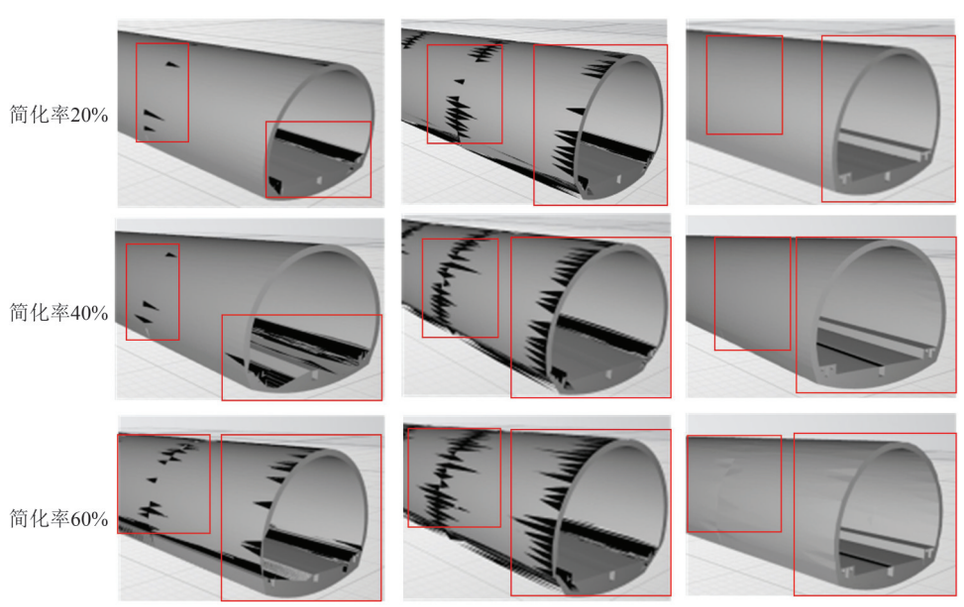


图11 隧道模型简化结果

Fig. 11 Tunnel Model Simplification Results

表 4　桥梁模型简化数据对比

Table 4　Comparison of Simplified Data for Bridge Models

简化率/%	算法	面片数量/个	顶点数量/个	文件大小/kB	最大误差/m	平均误差/m
20	QEM 算法	253 975	128 824	9 418	0.108 180	0.000 170
	文献[30]算法	253 976	126 777	9 340	0.365 877	0.000 221
	本文算法	253 975	131 113	9 495	0.059 803	0.000 120
40	QEM 算法	190 482	95 787	6 892	0.366 086	0.000 755
	文献[30]算法	190 482	94 506	6 852	0.365 877	0.000 528
	本文算法	190 481	99 304	7 004	0.073 160	0.000 530
60	QEM 算法	126 988	63 447	4 561	0.366 086	0.001 868
	文献[30]算法	126 988	62 395	4 528	0.365 877	0.001 752
	本文算法	126 988	67 077	4 678	0.120 342	0.001 843

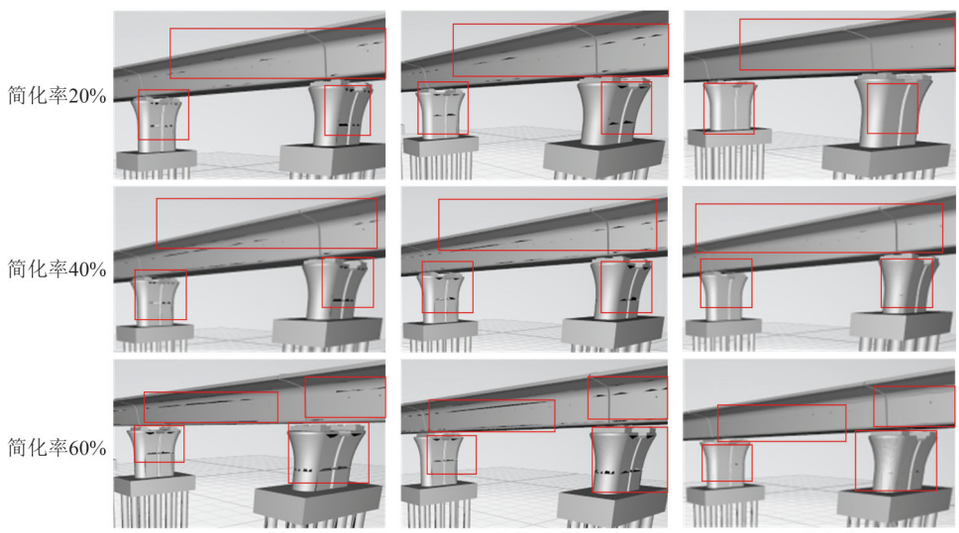


图 12　桥面支座结构简化结果

Fig. 12　Bridge Deck Bearing Structure Simplification Results

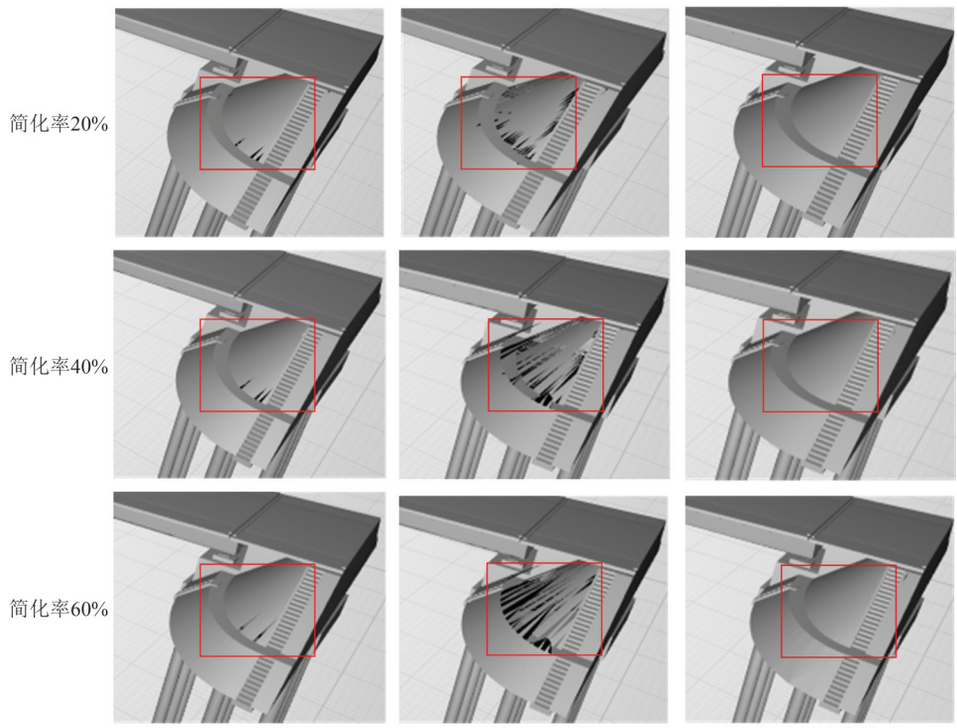
模型简化后,存在三角面片缺失问题,而本文算法保留了支座结构曲面的细节特征,避免了桥面结构空洞。对于桥台结构,QEM 算法模型简化后,也会出现少数狭长三角面片缺失的问题;文献[30]算法添加了顶点曲率和平展度因子,难以保留桥台的曲面特征,且存在大量面片缺失。本文算法有效避免了三角面片空洞现象,最大限度地保留了模型的细节特征,呈现更好的视觉效果。

2.4　简化因子作用检验

为进一步验证所提方法的有效性及各因子的作用,本文进行了对比分析。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。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)左图)。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前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(c)右图),有效保证了模型轮廓特征及结构完整性。

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



(a) QEM算法 (b) 文献[30]算法 (c) 本文算法

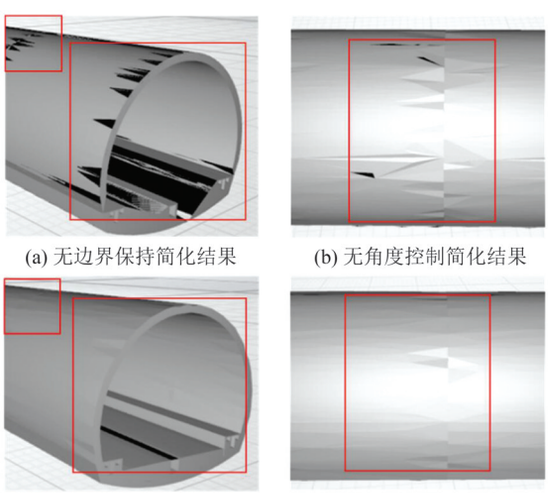
图13 桥台结构简化结果

Fig. 13 Bridge Abutment Structure Simplification Results

表5 隧道模型简化因子作用对比/m

Table 5 Comparison of the Role of Tunnel Model Simplification Factors/m

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	0.401 136	0.031 770	0.017 561	0.003 088	0.000 107	0.000 071
40	1.192 501	0.111 480	0.111 480	0.038 851	0.001 804	0.001 030
60	1.552 692	0.210 179	0.152 512	0.064 988	0.009 036	0.004 378



(a) 无边界保持简化结果 (b) 无角度控制简化结果

(c) 本文算法简化结果

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

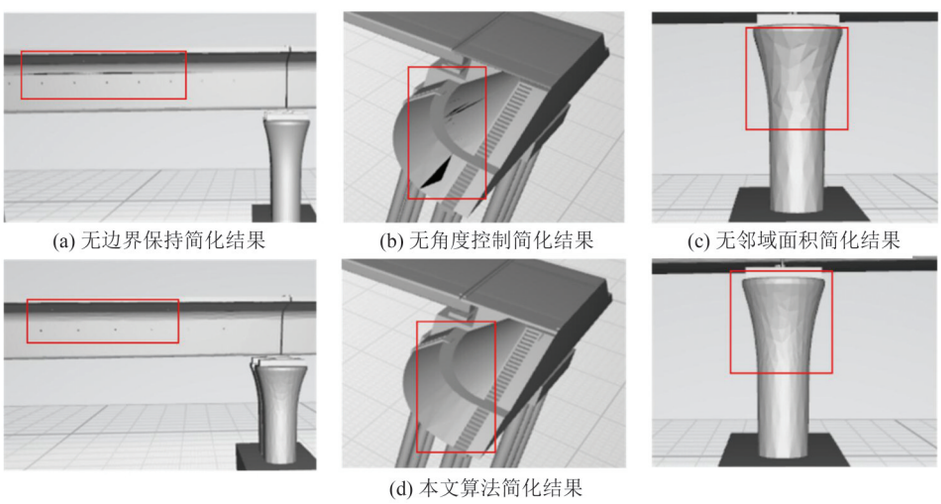
误差控制因子与本文桥梁简化算法的差异,并以60%简化率为例进行了可视化分析,如表6所示。

可以看出,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在大块空洞现象(图15(a));而本文简化算法边界保持因子保留了模型边界区域的细节特征与支座区域的更多细节(图15(d)左图)。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)),而本文简化算法中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(d)右图)。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)),而本文简化算法中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(d)中间图),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/m

Table 6　Comparison of the Role of Bridge Model Simplification Factors/m

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	0.186 424	0.019 482	0.059 803	0.059 803	0.000 700	0.000 069	0.000 190	0.000 120
40	0.186 424	0.073 160	0.073 160	0.073 160	0.001 434	0.000 564	0.000 639	0.000 530
60	0.385 022	0.130 800	0.124 789	0.120 342	0.002 454	0.001 913	0.002 128	0.001 843



(a) 无边界保持简化结果　(b) 无角度控制简化结果　(c) 无邻域面积简化结果

(d) 本文算法简化结果

图 15　桥梁模型简化率 60% 下不同算法效果对比

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 简化算法,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简化算法。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。本文算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 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 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] 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.
LIU Yongzheng, LI Yan. High-Speed Rails and City Economic Growth in China[J]. *Journal of Financial Research*, 2017(11): 18-33.

[2] 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]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(10): 2111-2121.
TU Wei, BAO Zhuoyuan, GAO Wei, et al. Coupling Big Data and Synthetic Spatial Simulation for the Second Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong High-Speed Railway Alignment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(10): 2111-2121.

[3] 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.
LI Yongwei, XU Linrong, CHEN Yunhao, et al. Intergrated Space-Air-Train-Ground Muti-source Techniques for Early Detection of Subgrade Disasters and Service Status of Railway Subgrade[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1392-1406.

[4] 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.

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.

[5] 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.
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.

[6] 宁新稳, 朱庆, 任晓春, 等. 高速铁路施工进度数据图形化处理方法[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 414-419.
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.

[7] 智鹏. 基于BIM的铁路建设管理平台及关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
ZHI Peng. Research on the BIM-Based Railway Construction Management Platform and Its Key Technologies[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018.

[8] 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: 北京交通大学, 2017.
ZHOU Ying. Research on Digital Collaborative Management System of Railway Construction Project Based on BIM[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

[9] 陈科, 张力, 管林杰, 等. 考虑几何特征的BIM简化方法研究[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 209-213.
CHEN Ke, ZHANG Li, GUAN Linjie, et al. BIM Simplification Method Considering Geometric Characteristics[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(2): 209-213.

[10] 曾文驱, 张泽州, 邓卓平. 地铁BIMWeb端简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.
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.

[11] 菅云硕, 范文杰, 许海丰, 等. 铁路工程BIM简化技术研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(5): 99-104.
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.

[12] 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.
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.

[13] 石磊. 面向对象的建筑结构语义映射研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
SHI Lei. Research on Object Oriented Semantic Mapping of Architectural Structures[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2023.

[14] 范登科, 张恒, 张丽. 基于构件复用与边折叠的BIM几何简化方法[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(6): 60-65.
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.

[15] 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.
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.

[16] 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]. 土木建筑工程信息技术, 2024, 16(4): 1-6.
WANG Xuejian, WANG Jiayuan, ZHANG Yuyu, et al. Key Technologies and Applications for Real-Scene 3D Visualization in Subway Engineering Based on GIS and BIM Technologies[J]. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 2024, 16(4): 1-6.

[17] 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.
GUO Lizhen, WU Enhua. Survey of Polygonal Model Simplification Algorithms[J]. *Application Research of Computers*, 2005, 22(8): 20-23.

[18] 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, 29(1): 54-59.
DONG Fangmin, ZHANG Rui, LIU Yong, et al. A Summarization of Mesh Simplification Algorithms[J]. *Journal of China Three Gorges University*

(*Natural Sciences*), 2007, 29(1): 54-59.

[19] SCHROEDER W J, ZARGE J A, LORENSEN W E. Decimation of Triangle Meshes [C]//The 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Chicago, USA, 1992.

[20] TURK G. Re-Tiling Polygonal Surfaces[C]//The 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Chicago, USA, 1992.

[21] ROSSIGNAC J, BORREL P. Multi-resolution 3D Approximations for Rendering Complex Scenes [C]//Modeling in Computer Graphics, Berlin, Germany, 1993.

[22] HOPPE H, HOPPE H, DEROSE T, et al. Mesh Optimization[C]//The 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Anaheim, USA, 1993.

[23] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface Simplification Using Quadric Error Metrics[C]//The 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angeles, USA, 1997.

[24] LIANG Y Q, HE F Z, ZENG X T. 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] 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.
ZHANG Youran. Improved Quadric Error Metrics Algorithm Combining Edge Splitting[J]. *Computer Systems & Applications*, 2022, 31(6): 271-278.

[26] 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.
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.

[27] 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.

[28] 焦越, 王慧青, 吴煜豪, 等. 结合面积度量和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.
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.

[29] 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.
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.

[30] 丁莹莹. 地铁信号设备BIM简化及可视化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
DING Yingying. Research on Lightweight and Visualization of BIM Model of Subway Signal Equipment[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2023.

[31] 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.
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.

[32] 徐凯. 牵引变电所BIM简化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
XU Kai. Research on Lightweight BIM Model of Traction Substation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.

[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.
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.

[34] 刘金泉. 基于WebGL的BIM简化研究与实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
LIU Jinquan. Research and Implementation of BIM Model Lightweighting Basd on WebG[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2023.

[35] 裴冠翔. 基于QEM算法的BIM简化方法研究与应用[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
PEI Guanxiang. Lightweight Quantification of the BIM Model Based on the QEM Algorithm Research and Application of the Methods[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2023.

[36] 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, 27(14): 38-41.
CHEN Yu, ZHANG Jianwei, TAN Shihan. A Simplification Algorithm for Edge Collapse of 3D Airport Model Considering Local Characteristics [J]. *Modern Computer*, 2021, 27(14): 38-41.