

耦合数值仿真与时空插值融合的山区桥梁温度场三维建模方法

李维炼^{1,2}, 朱 军¹, 朱 庆¹, 李佳洛¹

1. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 611756;
2. 测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室, 北京 100036

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2025-03-04 中图分类号: P234.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2025)04-0749-11

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC3015404); 地理信息工程国家重点实验室、测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室联合资助基金(2024-02-09); 国家自然科学基金(42271424; 42201446; 42171397); 中国博士后科学基金特别资助项目(2024T170742); 国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232185); 城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程研究中心开放课题基金(2024 实验研委 015 号)

第一作者简介: 李维炼(1993—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为虚拟地理环境与三维可视化。 E-mail: vgewilliam@163.com

通信作者: 朱军 E-mail: zhujun@swjtu.edu.cn

摘 要: 温度场建模对复杂山区桥梁建造和精细化管理具有重要意义, 但山区温差变化大, 现有基于有限元分析的温度场仿真方法存在结果稀疏、时空分布不均匀的问题, 难以准确描述桥梁温度变化情况。因此, 本文提出一种耦合数值仿真与时空插值融合的山区桥梁温度场三维建模方法。首先, 建立山区桥梁日照辐射温度场数值仿真模型; 其次, 将温度仿真结果与桥梁体素模型进行一致性配准, 并采用时空插值融合对山区桥梁温度场建模; 然后, 基于光线投射实现山区桥梁温度场体绘制高效可视化; 最后, 选择了四川省甘孜州内一座大型钢桁梁悬索桥作为试验对象开展案例分析。试验结果表明, 本文方法能够有效补全温度场仿真结果, 精准刻画其时空分布及变化规律, 时空插值融合精度与时间插值和空间插值相比, 分别提升了21.11%和7.38%, 可视化帧率较体绘制优化前提升了36.4%, 能够为后续数字孪生驱动的山区桥梁智能建造与精细化管理提供关键数据支撑, 同时对部件级实景三维环境参量的真实化表达具有重要借鉴意义。

关键词: 山区桥梁; 温度场仿真; 三维建模; 时空插值融合; 体绘制优化

桥梁是跨越江河湖海、连接峡谷深沟、实现交通设施互联互通的关键节点与枢纽工程^[1-4]。随着我国基础设施建设不断进步, 尤其是新的铁路中长期规划、“一带一路”倡议及川藏铁路建设的实施, 在艰险山区将会有更多更复杂的桥梁工程投入建设和运营, 面临更加险峻和多变的施工环境^[5-8]。温度作为桥梁建造过程中一种重要的荷载形式, 显著影响着桥梁结构性能^[9-10]。尤其山区环境有着昼夜温差大和温度变化快等特点, 桥梁往往表现出外表温度变化快, 内部温度变化较小甚至不变化, 这种

显著的内外温差和不均匀分布会使桥梁结构发生位移或变形^[11-12]。因此, 如何对山区桥梁温度场进行建模和可视化展示, 直观反映温度场的时空分布与变化规律, 对于提升桥梁建造精细化管理水平具有重要意义。

现有关于桥梁温度场的研究主要有两种方式。一种方式是在桥梁特定位置安装传感器对温度变化进行持续监测^[13-15], 但这种方式传感器设备和数据采集成本较高, 并且只能获得桥梁表面有限位置的温度数据, 难以探测桥梁内部和全桥的温度分

引文格式: 李维炼, 朱军, 朱庆, 等. 耦合数值仿真与时空插值融合的山区桥梁温度场三维建模方法[J]. 测绘学报, 2025, 54(4): 749-759. DOI: 10.11947/j.AGCS.2025.20240123.
LI Weilian, ZHU Jun, ZHU Qing, et al. A 3D modelling method for temperature field of mountain bridges coupled with numerical simulation and spatio-temporal interpolation fusion[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2025, 54(4): 749-759. DOI: 10.11947/j.AGCS.2025.20240123.

布。另一种方式则是通过有限元分析对桥梁温度场进行数值仿真^[16-20],但由于桥梁各部件结构具有几何不规则性,通常采用非结构化网络对桥梁结构进行划分,这种方式导致温度场仿真结果稀疏,在时空上分布不均匀,并且缺乏与地理场景的融合。

此外,自然资源部办公厅于2022年2月印发的《关于全面推进实景三维中国建设的通知》明确指出,实景三维按照表达内容和层级分为地形级、城市级和部件级^[21]。其中,部件级实景三维侧重对城市级实景三维的真实化描述和精细化表达,主要包括高精度几何建模、纹理定向映射、感知信息融合及属性行为仿真,服务于个性化应用的按需定制^[22-25]。就山区桥梁温度场建模而言,一方面精细化部件级桥梁实景三维模型能够有效提升温度场数值仿真精度,另一方面温度场时空建模结果能够进一步丰富桥梁实景三维模型语义信息,并且对部件级实景三维环境参量的真实化表达具有重要借鉴意义,从而在多专业协同的数字化桥梁建造中发挥更大的效益。

在此背景下,本文以山区桥梁为例,提出一种耦合数值仿真与时空插值融合的温度场三维建模方法。首先,分析山区桥梁温度场热传递、热交换和热辐射规律,建立山区桥梁日照辐射温度场数值仿真模型;然后,将温度仿真结果与桥梁体素模型进行空间位置、空间姿态和空间尺度配准与校正,并顾及桥梁内外温差物理特性,提出一种时空插值融合的山区桥梁温度场三维建模方法;最后,基于光线投射实现了山区桥梁温度场绘制高效率可视化。

1 山区桥梁温度场数值仿真

本文针对山区钢桁梁悬索桥进行温度场数值仿真,其基本假设如下:①桥梁部件材料密度、比热容均一,不随外界条件变化而改变;②桥梁部件外部只受太阳辐射换热、空气对流换热影响,内部温度受热传递影响。

山区桥梁温度场数字仿真计算流程如图1所示。首先,根据质量守恒、动量守恒和能量守恒定律等计算流体动力学的基本规律,建立山区桥梁温度场仿真基本控制方程;其次,设定仿真的初始参数和边界条件,如热力学系数、出入口风速和温度等;然后,将桥梁几何模型进行网格划分,生成体网格模型作为仿真计算的输入数据;最后,采用数值法对离散方程进行迭代求解,输出山区桥梁温度场

数值仿真结果。

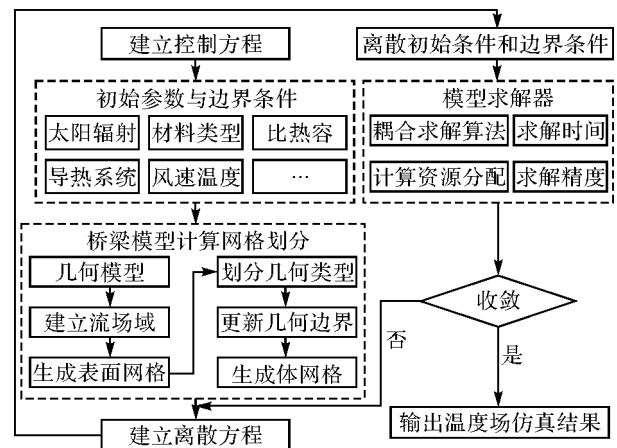


图1 山区桥梁温度场数字仿真计算流程

Fig.1 Numerical simulation calculation process of temperature field of mountain bridges

2 时空插值融合的温度场建模

2.1 仿真结果空间一致性配准

尽管山区桥梁温度仿真结果大都以散点形式存在,但由于其几何划分和数据组织上的差异,导致仿真结果在空间位置、空间姿态及空间尺度上与桥梁模型存在不一致的情况,难以直接用于山区桥梁温度场时空插值融合建模。为了解决这一问题,本文将桥梁模型体素化并作为基准,然后通过点云配准将温度仿真值映射到桥梁体素模型上,作为温度场时空插值融合建模的基础。

2.1.1 桥梁模型体素化

桥梁模型体素化主要包括轴对齐包围盒获取、种子扫描线扫描和体素判断,具体流程如图2所示。

(1) 轴对齐包围盒获取。本文采用最大-最小值表示法对桥梁模型的轴对齐包围盒进行表示,通过遍历桥梁模型三角网格的顶点坐标,获取模型在X、Y、Z坐标轴上的最小值和最大值。

(2) 种子扫描线扫描。以单位正方体为种子组成一条直线,与坐标轴平行,通过扫描判断路径上体素与实体模型的内外位置关系。当单位正方体种子与模型是相交或包含关系时,记录单位正方体种子的位置信息。

(3) 体素判断。当正方体种子扫描线扫过模型时,与模型有3种位置关系:刚进入模型、完全进入模型和刚出模型。利用位置关系判断,进模型和出模型时的种子坐标可表示边界体素,完全进入模型时的种子坐标则表示模型内部体素。

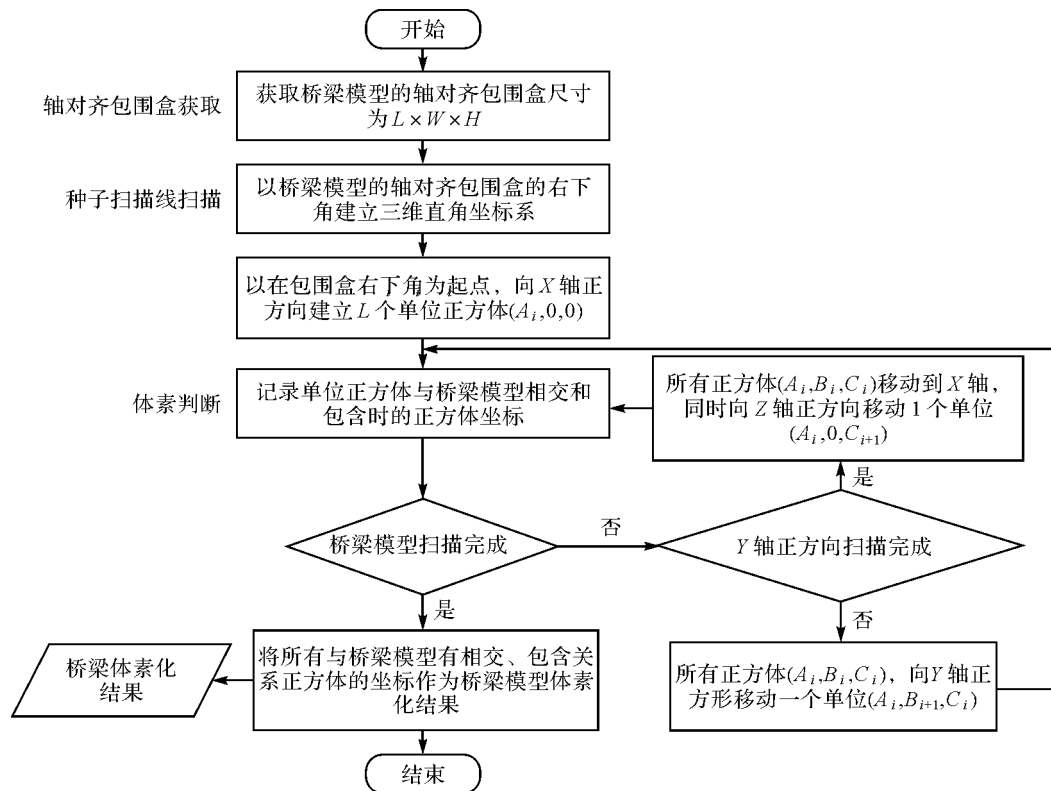


图2 桥梁模型体素化流程

Fig.2 Bridge model voxelization process

2.1.2 仿真模型与体素模型配准

本文采用四点一致集算法对温度仿真数据与桥梁体素数据进行粗配准,然后采用稳健的迭代最近点算法对点云进行精配准。令温度仿真数据为源点云,记作 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, m 为点云数量,桥梁体素数据为目标点云,记作 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, n 为点云数量,迭代次数为 k ,迭代的均方误差阈值为 ϵ ,精配准过程如下。

(1) 确定对应点对集合,对于源点云 P 中所有点 p_i^k ,在目标点云 Q 中搜寻距离最近的对应点 q_i^k ,从而组成点对集 $C_k = \{(p_i^k, q_i^k) | i \leq n\}$, n 为点对数。

(2) 按照式(1)建立目标误差函数,计算旋转矩阵 R^k 和平移矩阵 T^k

$$f(R^k, T^k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i^k - (R^k p_i^k - T^k)\|^2 \quad (1)$$

(3) 更新源点云坐标。使用步骤(2)计算得到的旋转矩阵 R^k 和平移矩阵 T^k 对源点云 p_i^k 的坐标进行更新,得到更新后的点云 p_i^{k+1}

$$p_i^{k+1} = R^k p_i^k + T^k \quad (2)$$

(4) 判断是否继续迭代。计算迭代变换的均方差 σ_k

$$\sigma_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i^k - (R^k p_i^k - T^k)\|^2 \quad (3)$$

若迭代次数达到 k_{\max} 或者 $|\sigma_{k+1} - \sigma_k| < \epsilon$,则停止迭代计算,否则继续迭代,设 $k = k + 1$,返回步骤(1)重复迭代过程。

(5) 配准点云。以最后一次计算得到的最佳旋转矩阵 R^k 和平移矩阵 T^k 为最终变换参数,并进行点云坐标变化,完成点云配准,并进一步将温度仿真值映射到桥梁体素点云上。

2.2 山区桥梁温度场时空插值融合建模

本文采用约减法思想对山区桥梁温度场进行时空插值融合建模,其基本思路是:首先分别将同一区域内时序一致性和空间关系一致性较好的数据作为时间维度插值和空间维度插值的元数据;然后采用先时间后空间和先空间后时间两种方式对温度数据进行处理;最后将两种插值结果进行融合,形成山区桥梁温度场模型并进行精度评价,如图3所示。

2.2.1 温度场时间维度插值

在时间维度上,考虑到内插平滑的精度,本文采用三次样条函数进行时间插值^[26],其具有准确性高、数值计算稳定、端点条件自由可调、计算量小的

特点。假设有一组 $[0, 24]$ h 上间隔为 15 min 温度场时序数据 $(x_i, y_i), i \in [1, n]$, x_i 为时间戳, y_i 为温度值, 则区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 的插值多项式为

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (4)$$

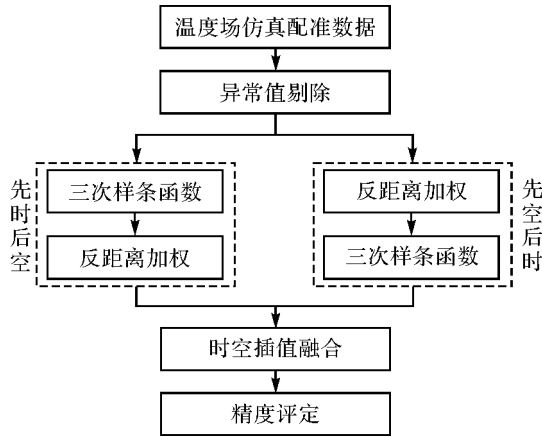


图3 山区桥梁温度场时空插值融合建模方法

Fig.3 Spatio-temporal interpolation fusion modelling method for temperature field of mountain bridges

$S_i(x)$ 满足以下 3 个条件。

(1) $S_i(x_i) = y_i, i \in [1, n]$ 。

(2) $S_i(x_i)$ 在每个区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 是一个三次多项式。

(3) $S_i(x_i)$ 整个区间 $[x_i, x_n]$ 有连续的一阶及二阶导数, 且 $S'(x_i) = S'(x_{i+1}), S''(x_i) = S''(x_{i+1})$ 。

本文选择“自由边界”约束, $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$, 即可求解未知参数 a_i, b_i, c_i 和 d_i , 代入多项式 $S_i(x)$ 中可得到整个温度场时间插值曲线。

2.2.2 温度场空间维度插值

在空间维度上, 本文采用反距离加权法来对山区桥梁温度场模型进行空间维度上的数据补全, 如式(5)所示

$$\lambda_j = \frac{\left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^\mu}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^\mu} \quad (5)$$

式中, λ_j 表示温度场中 j 点对 i 点的权重值; d_{ij} 表示 j 点到 i 点的距离; 幂值 μ 通常取 2。

为了提升空间插值计算效率, 本文通过限定数据影响范围来减少单个插值点所用的数据量。根据文献[17]可知, 山区日照温度影响桥塔的温度分布深度大致为 0.9 m, 但深度 $[0, 0.6]$ m 内温度变化幅度远大于 $(0.6, 0.9]$ m 区间, 钢结构影响深度为 1.

0 m。因此, 将左右岸桥塔、钢桁梁单元的温度数据影响范围分别设为 0.6 m 和 1.0 m。

2.2.3 时空插值融合建模

将先时间后空间插值得到的温度场模型 T_1 与先空间后时间插值得到的温度场模型 T_2 进行融合, 得到综合温度场模型 T

$$T = \lambda_1 T_1 + \lambda_2 T_2 \quad (6)$$

式中, λ_1, λ_2 分别表示 T_1, T_2 的权重系数。在本文中, λ_1, λ_2 取值均为 0.5。

3 基于光线投射的温度场体绘制

为了提升山区桥梁温度场可视化效率, 本文采用光线投射算法对温度场进行体绘制, 其流程如图4所示。首先, 基于上述温度场时空体素模型 $v = (d, t, c)$ 构建体纹理和体包围盒, 其中 d 表示空间域, t 表示时间域, c 表示温度值, 该过程在中央处理单元 (central processing unit, CPU) 中完成; 然后, 将构建好的体纹理和体包围盒的数据传输到图形处理单元 (graphics processing unit, GPU) 中, 利用 GPU 进行光线投射, 并运用并行加速、光线提前中止、空白体素跳跃等优化绘制方法, 实现山区桥梁温度场时空数据实时高效绘制。

4 试验结果与分析

4.1 试验案例

本文选取四川省甘孜州内一座在建钢桁梁悬索桥作为案例, 其场景设置为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ 的山区区域, 山体呈南北走向。甘孜地处青藏高原东南缘的横断山脉, 是典型高山峡谷区, 具有地形高差显著、昼夜温差明显等特点, 这种差异使得桥梁不同部位的温度场分布异常复杂, 选择该桥作为试验对象具有代表性。

4.2 软硬件环境

本次试验运行在处理器为 AMD Ryzen 5 5600H with Radeon Graphics。主机内存为 16 GB、显卡为 AMD Radeon(TM) Graphics、显存为 1 GB 的联想 ThinkBook 14p 笔记本上, 操作系统为 Windows 10 64 位家庭中文版。桥梁温度场采用 Ansys Fluent 进行数值仿真, 温度场建模算法采用 C++、C#、CG 语言作为开发语言实现, 体绘制可视化展示平台为 Unity 2018。

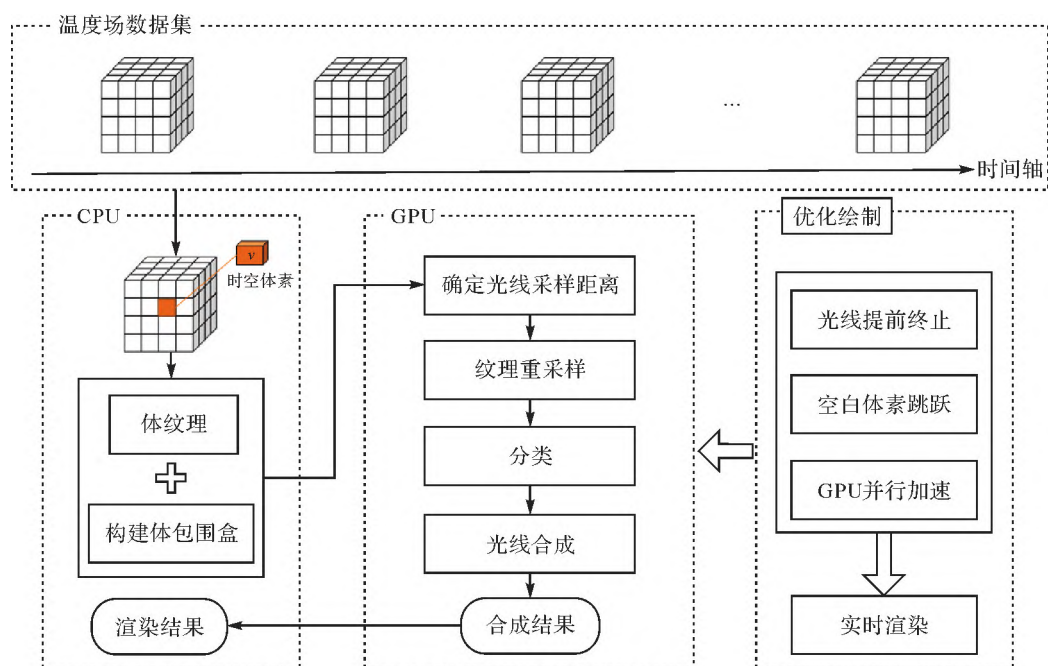


图4 基于光线投射的温度场体绘制

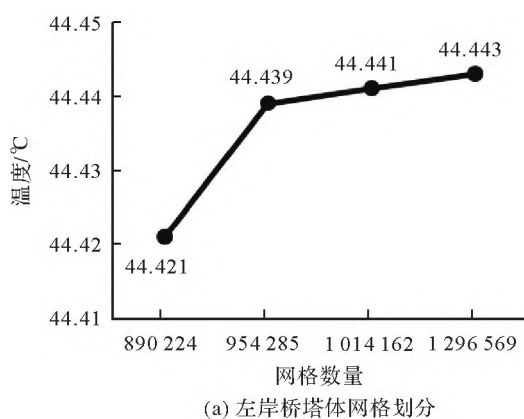
Fig.4 Temperature field volume rendering based on ray casting

4.3 温度场数值仿真分析

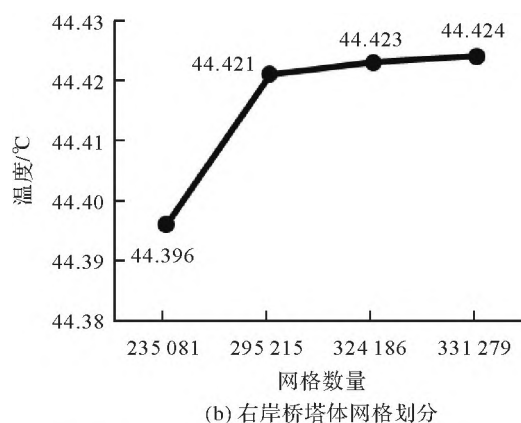
4.3.1 网格划分和时间步长分析

计算网格数量与温度仿真速度和精度息息相关,网格数量过少会影响仿真精度,网格数量过多会增加仿真运算时间。为了进一步在保证温度仿真精度的基础上,缩减仿真计算时间,本次试验对网格划分数、时间步长与温度仿真结果进行了相关性分析。

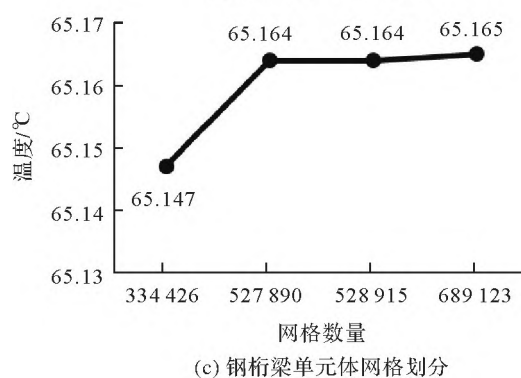
(1) 网格划分。本次试验对左岸、右岸桥塔和钢桁梁单元分别进行4种不同数量的体网格划分,同时选取14时的最高温度作为参照。由图5可以看出,左岸桥塔体网格数量大于954 285之后,最高温度变化幅度在变小,变化幅度在 0.002°C 内;右岸桥塔体网格数量大于295 215之后,最高温度逐渐趋于平顺。同样,钢桁梁单元体网格数量大于527 890之后,最高温度也逐渐趋于平稳。



(a) 左岸桥塔体网格划分



(b) 右岸桥塔体网格划分



(c) 钢桁梁单元体网格划分

图5 桥梁模型体网格划分与温度变化相关性

Fig.5 The correlation between mesh division of bridge models and temperature variation

(2) 时间步长。本次选用20、30、60、120 s 4种时间步长,同样是以14时模型的最高温度为参照,

选用右岸桥塔模型来验证时间步长与温度仿真的相关性,计算结果如图6所示。由图6可以看出,4种时间步长对仿真的结果影响不大,而且在60s以内,时间步长对计算结果影响几乎可以忽略。因此,为了平衡计算时间和计算精度的关系,综合考虑,采用60s的时间步长进行温度场仿真计算。

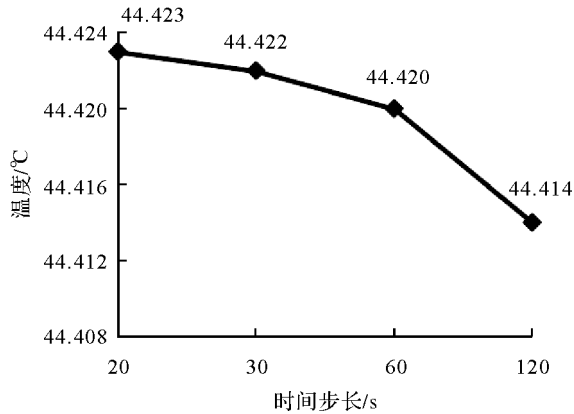


图6 时间步长与温度变化相关性

Fig.6 The correlation between time step and temperature variation

4.3.2 温度场仿真结果分析

桥梁温度场仿真结果如表1和图7所示。左岸桥塔最高温度47.75℃在14时出现在桥塔顶端位置,随后温度开始慢慢下降;右岸桥塔同样在14时出现最高温度44.42℃;钢桁梁单元的最高温度为65.16℃,高温区域主要集中在钢桁梁的顶板处。

表1 山区桥梁温度场仿真结果

Tab.1 The temperature field simulation results of mountainous bridges

模型	最高温度/°C	平均最高温度/°C	温差/°C
左岸桥塔	47.75	27.00	20.75
右岸桥塔	44.42	29.03	15.39
钢桁梁单元	65.16	37.41	27.75

4.4 温度场时空插值融合建模

4.4.1 模型配准结果分析

图8为配准前温度仿真数据与桥梁体素数据的空间位置、空间姿态和空间尺度,其中绿色为桥梁体素数据,红色为温度点云数据,可见两者在空间位置、空间姿态和空间尺度等方面都存在差异。

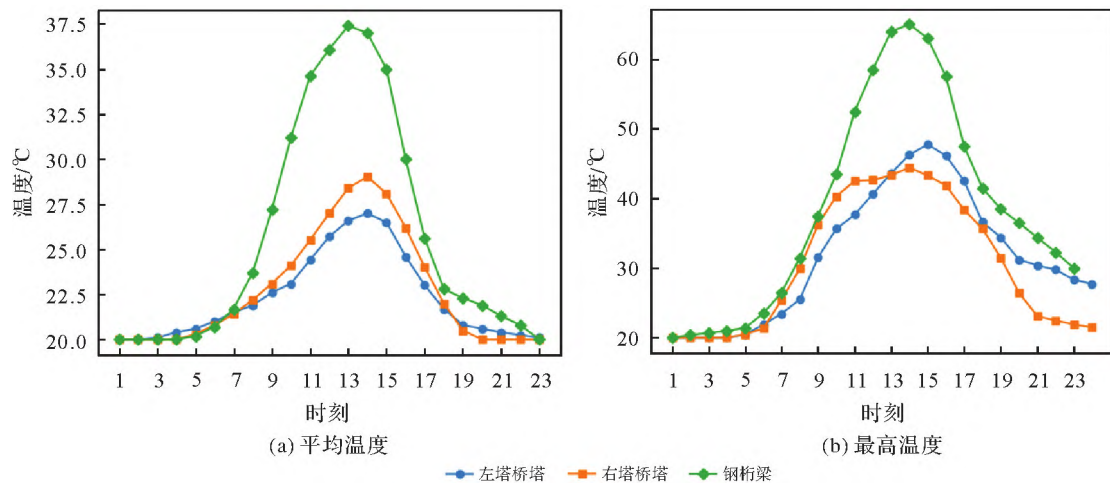


图7 桥梁温度场仿真结果

Fig.7 Simulation results of bridge temperature field

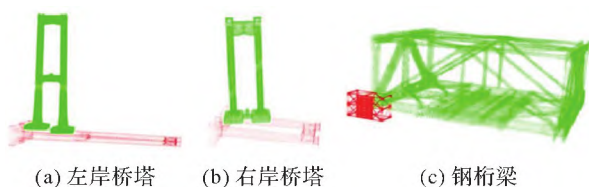


图8 温度场仿真数据配准前位置、姿态和尺度

Fig.8 Position, orientation and scale of temperature field simulation data before registration

图9展示了桥塔和钢桁梁温度仿真配准结果。其中,绿色部分为粗配准温度点云,红色部分为精

配准点云。在经过点云粗配准后,温度点云和桥梁体素在大部分区域开始重合,在精确配准后两类数据高度重合,经过20次迭代后左岸桥塔、右岸桥塔和钢桁梁单元的FitnessScore趋于稳定,分别为0.073、0.137、0.349,可用于后续的时空插值融合分析。

4.4.2 时空插值融合建模结果分析

经过时空插值融合后,左岸桥塔温度点数据量从17811个增加到167551,增长了约8.4倍;右岸桥塔从27883增加到521915,增长了约17.7倍;钢

桁梁则增长了 2.6 倍。这表明时空插值融合方法对山区桥梁温度场数据补全效果明显。

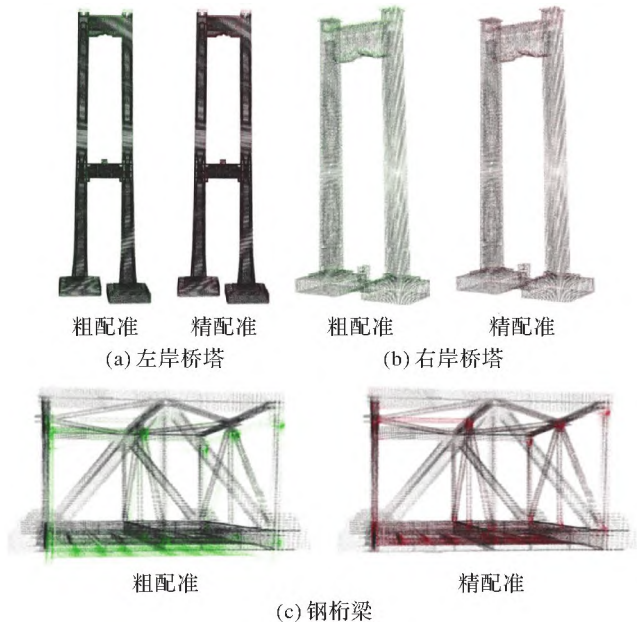


图 9 桥塔和钢桁梁温度仿真配准结果
Fig.9 Registration results of bridge tower and steel truss girder temperature simulation

本次试验选择 14 时的桥梁温度场差值结果进行精度评定,结果见表 2。时空插值融合方法在左岸桥塔、右岸桥台和钢桁梁单元 3 个数据集上精度都高于单独的时间插值或空间插值法,平均精度分别提升了 22.11%和 7.38%。

表 2 插值结果均方根误差

Tab.2 Root mean square error of interpolation results			
方法	左岸桥塔	右岸桥塔	钢桁梁单元
时空插值融合	0.004 97	0.005 24	0.004 98
时间插值	0.007 51	0.006 13	0.005 86
空间插值	0.005 41	0.005 68	0.005 31

图 10 直观展示了桥梁各部件温度在时空插值融合前后的变化情况,可以看出时空插值融合后的结果可以更加精细化地反映桥梁温度场的空间分布和变化趋势。

4.5 温度场体绘制分析

为了提升山区桥梁温度场在地理场景中的可视化效率,本文进一步在 Unity3D 中采用基于 GPU 的光线投射法实现了桥梁温度场体绘制,可视化效果如图 11 所示。

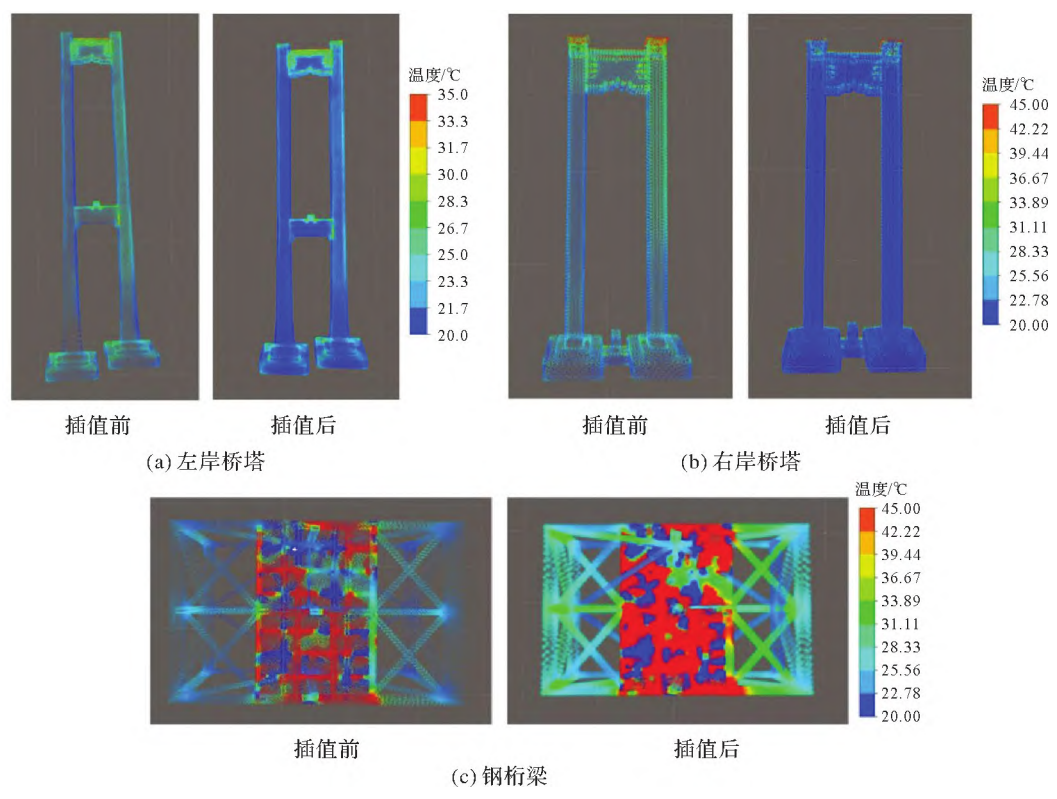


图 10 桥梁各部件温度值在时空插值融合前后的变化情况
Fig.10 Temperature values of bridge components before and after spatio-temporal interpolation fusion

此外,试验还将本文所设计的光线提前终止和距离辅助光线步进的温度场体绘制优化方法与传统的

光线投射方法进行了对比,如图 12 所示。结果表明,本文方法在场景绘制帧率方面比传统方法平均高 36.4%,适用于更大规模温度场数据的高效可视化。

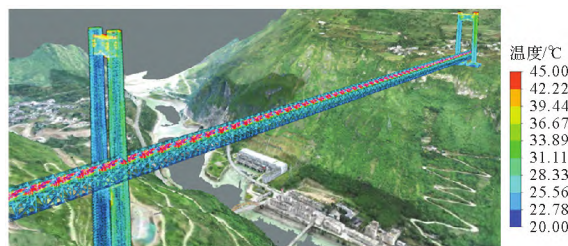


图 11 桥梁温度场体绘制可视化

Fig.11 Volume rendering of bridge temperature field

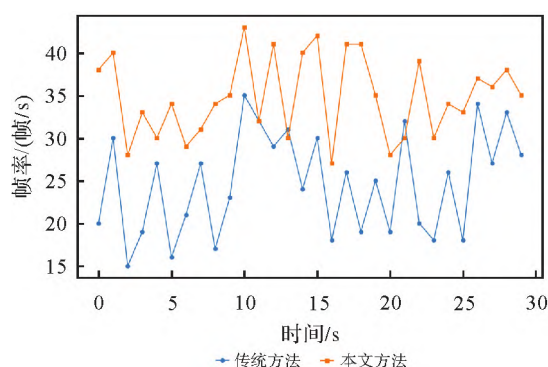


图 12 桥梁温度场绘制帧率

Fig.12 Rendering frame rate of bridge temperature field

5 结论与展望

随着我国基础设施建设不断进步,尤其是高铁逐渐向复杂艰险山区延伸,越来越多的桥梁工程投入建设^[27-28]。然而,山区环境温差变化大,显著影响着桥梁结构性能,现有以有限元分析为主的温度仿真方法存在结果稀疏、时空分布不均匀的问题,难以准确描述桥梁温度变化情况。本文提出了一种耦合数值仿真与时空插值融合的山区桥梁温度场三维建模方法,通过温度仿真结果与桥梁体素模型配准、温度场时空插值融合建模、基于光线投射的温度场体绘制,实现了山区桥梁温度场时空分布的精准刻画及高效可视化绘制。以一座大型钢桁梁悬索桥作为研究案例,结果表明桥梁温度场时空插值融合精度与时间插值和空间插值相比,分别提

升了 22.11% 和 7.38%,可视化帧率较体绘制优化前提升了 36.4%。

本文的主要创新在于以山区桥梁温度场数值仿真模型为基础,顾及桥梁内外温差的物理特性,提出了一种时空插值融合的山区桥梁温度场三维建模方法,解决了桥梁部件结构由于几何不规则性导致的温度仿真结果时空分布不均匀的难题。此外,在地理场景中利用光线投射算法对桥梁温度场建模结果进行了高效体绘制,相关结果一方面能够为数字孪生驱动的山区桥梁多场耦合建模提供关键数据支撑,并服务于桥梁智能建造与精细化管理,有效地提升复杂艰险山区桥梁建造品质;另一方面能够进一步丰富桥梁实景三维模型语义信息,并且对部件级实景三维环境参量的真实化表达具有重要借鉴意见,从而在多专业协同的数字化桥梁建造中发挥出更大的效益。

本文当前的重点在于山区桥梁温度场三维建模,其本质是通过时空插值融合方法来拟合得到桥梁温度差异的精细分布。在精度评价方面,当前采用了均方根误差来衡量温度场插值结果与仿真结果之间的偏差,其基本假设是温度场仿真结果为真值。然而在实际应用中,山区桥梁部件温度除了受材料、太阳辐射等因素影响外,还受云层遮蔽及地形等环境因素影响,所以数值仿真结果和实际监测数据往往存在差异。因此,未来工作重点将动态接入桥梁建造现场温度传感器数据,一方面进一步验证本文通过时空插值融合获得的桥梁温度场精细化分布的有效性,另一方面将温度监测数据作为真值,反向优化温度场建模结果,提升建模精度。

此外,本文在进行山区桥梁温度场数值仿真分析时,对桥梁模型网格划分数、时间步长与温度仿真结果做了相关性分析。试验结果表明,桥梁模型网格数量及时间步长在一个特定阈值范围内呈现出与温度仿真结果无关性趋势,有效避免了由于空间尺度和时间尺度变化给桥梁温度场仿真精度带来的不确定性。然而,在温度场时空插值融合过程中,本文目前采用了 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 单一网格尺度,尚未涉及多种网格尺度下桥梁温度场时空插值精度评估分析,因此多尺度效应分析也将是下一步研究工作重点之一。

参考文献

- [1] 勾红叶, 杨彪, 华辉, 等. 桥梁信息化及智能桥梁 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 14-27.
GOU Hongye, YANG Biao, HUA Hui, et al. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2019[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 14-27.

- [2] 王同军. 铁路桥梁智能建造关键技术研究[J]. 中国铁路, 2021(9): 1-10.
WANG Tongjun. Research on key technologies for intelligent construction of railway bridge[J]. China Railway, 2021(9): 1-10.
- [3] ZHOU Xuhong, ZHANG Xigang. Thoughts on the development of bridge technology in China[J]. Engineering, 2019, 5(6): 1120-1130.
- [4] LI Weilian, ZHU Jun, DANG Pei, et al. Immersive virtual reality as a tool to improve bridge teaching communication[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 217: 119502.
- [5] 卢春房, 蔡超勋. 川藏铁路工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 建设机械技术与管理, 2020, 33(2): 28-34.
LU Chunfang, CAI Chaoxun. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Xizang railway project[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2020, 33(2): 28-34.
- [6] 朱军, 朱庆, 祝兵, 等. 数字孪生驱动的桥梁智能建造方法[J]. 遥感学报, 2024, 28(5): 1340-1349.
ZHU Jun, ZHU Qing, ZHU Bing, et al. Intelligent bridge construction method driven by digital twin[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(5): 1340-1349.
- [7] 刘纪平, 刘猛猛, 徐胜华, 等. 大数据时代下的一体化综合减灾技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1107-1116.
LIU Jiping, LIU Mengmeng, XU Shenghua, et al. A survey on integrated and comprehensive disaster reduction technology in the era of big data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1107-1116.
- [8] 朱庆, 张利国, 丁雨淋, 等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 1040-1049. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2022.20210640.
ZHU Qing, ZHANG Liguang, DING Yulin, et al. From real 3D modeling to digital twin modeling[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 1040-1049. DOI: 10.11947/j. AGCS.2022.20210640.
- [9] 刘伟涛, 房志明, 郑梓怡, 等. 基于多元线性回归桥梁温度响应预测研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6000-6008.
LIU Weitao, FANG Zhiming, ZHENG Ziyi, et al. Prediction study of bridge temperature response based on multiple linear regression[J]. Modeling and Simulation, 2024, 13(6): 6000-6008.
- [10] 董旭, 邓振全, 李树忱, 等. 大跨波形钢腹板箱梁桥日照温度场及温差效应研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 230-238.
DONG Xu, DENG Zhenquan, LI Shuchen, et al. Research on sun light temperature field and thermal difference effect of long span box girder bridge with corrugated steel webs[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 230-238.
- [11] 魏欣宇. 高海拔山区中小跨度铁路钢-砼结合梁温度效应和结构优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
WEI Xinyu. Study on temperature effect and structural optimization of steel concrete composite beam for medium and small span railway in high altitude mountainous area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [12] 张宸瑜. 钢板组合梁桥日照非均匀温度场及温度效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
ZHANG Chenyu. Non-uniform temperature field and thermal effect of steel-concrete composite I-Girder bridges under solar radiation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [13] 李全林. 日照下混凝土箱梁温度场和温度应力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
LI Quanlin. Research of temperature field & temperature stress of concrete box girder caused by the solar radiation[D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [14] MIAO Changqing, SHI Changhua. Temperature gradient and its effect on flat steel box girder of long-span suspension bridge[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1929-1939.
- [15] ABID S R, TAYŞI N, ÖZAKÇA M. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 523-532.
- [16] ZHOU Guangdong, YI Tinghua. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 9(12): 217983.
- [17] ZHOU Linren, XIA Yong, BROWNJOHN J M W, et al. Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(1): 04015027.
- [18] 王虎, 陈翔, 王雅. 桥面铺装层温度场的有限元模拟及剪应力分布分析[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2020, 35(1): 32-36.
WANG Hu, CHEN Xiang, WANG Ya. Finite element simulation of temperature field and shear stress distribution analysis of bridge deck pavement[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2020, 35(1): 32-36.
- [19] 薛仪. 基于气象共享数据的混凝土箱型梁桥温度场分析方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
XUE Yi. Analysis method of temperature field of concrete boxgirder bridge based on shared weather data[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [20] POUGET S, SAUZÉAT C, DI BENEDETTO H, et al. Modeling of viscous bituminous wearing course materials on orthotropic steel deck[J]. Materials and Structures, 2012, 45(7): 1115-1125.
- [21] 自然资源部办公厅. 全面推进实景三维中国建设的通知[EB/OL]. [2024-02-20]. http://gi.mnr.gov.cn/202202/t20220225_2729401.htm

ml.

General Office of the Ministry of Natural Resources. Notice on comprehensively promoting the construction of China's 3D realistic geospatial scene[EB/OL]. [2024-02-20]. http://gi.mnr.gov.cn/202202/t20220225_2729401.html.

- [22] 姚巍, 王谱佐. 实景三维技术发展态势——XXIV ISPRS Congress 报告[J]. 时空信息学报, 2023, 30(2):167-176.

YAO Wei, WANG Puzuo. Development trend analysis of real-scene 3D technology: XXIV ISPRS congress report[J]. Journal of Spatio-temporal Information, 2023, 30(2):167-176.

- [23] 陈军, 刘建军, 田海波. 实景三维中国建设的基本定位与技术路径[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1568-1575.

CHEN Jun, LIU Jianjun, TIAN Haibo. Basic directions and technological path for building 3D realistic geospatial scene in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1568-1575.

- [24] 陈军, 王艳慧, 武昊, 等. 时空信息赋能高质量发展的基本问题与发展方向[J]. 时空信息学报, 2023, 30(1): 1-11.

CHEN Jun, WANG Yanhui, WU Hao, et al. Basic issues and development directions of high-quality development empowered by spatio-temporal information[J]. Journal of Spatio-temporal Information, 2023, 30(1): 1-11.

- [25] 朱庆, 李函侃, 曾浩炜, 等. 面向数字孪生川藏铁路的实体要素分类与编码研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1319-1327.

ZHU Qing, LI Hankan, ZENG Haowei, et al. Classification and coding of entity features for digital twin Sichuan-Xizang railway[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1319-1327.

- [26] 杨高朝, 王庆, 蔚保国, 等. 基于抗差 LM 的视觉惯性里程计与伪卫星混合高精度室内定位[J]. 测绘学报, 2022, 51(1): 18-30. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20200251.

YANG Gaochao, WANG Qing, YU Baoguo, et al. High-precision indoor positioning based on robust LM visual inertial odometer and pseudosatellite[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(1): 18-30. DOI:10.11947/j.AGCS.2022.20200251.

- [27] ZHANG Heng, ZHAO Wen, HAN Zujie, et al. Knowledge-guided digital twin modeling method of generating hierarchical scenes for a high-speed railway[J]. Transactions in GIS, 2023, 27(7): 2017-2041.

- [28] 朱军, 赖建波, 谢亚坤, 等. 知识引导的桥梁建造过程时空叙事三维可视化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1650-1660.

ZHU Jun, LAI Jianbo, XIE Yakun, et al. Knowledge-guided spatiotemporal narrative 3D visualization method for the bridge construction process[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(9):1650-1660.

(责任编辑:张琳,侯琳)

A 3D modelling method for temperature field of mountain bridges coupled with numerical simulation and spatio-temporal interpolation fusion

LI Weilian^{1,2}, ZHU Jun¹, ZHU Qing¹, LI Jialuo¹

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

2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology of MNR, Beijing 100036, China

Abstract: Temperature field modelling is crucial for bridge construction and refined management. However, the temperature difference in mountainous areas varies greatly, and the existing temperature field simulation methods based on finite element analysis face challenges due to sparse results and inhomogeneous spatio-temporal distributions, making it difficult to describe bridges' temperature changes accurately. This article proposes a 3D modelling method for temperature field of mountain bridges coupled with numerical simulation and spatio-temporal interpolation fusion. First, a numerical simulation model of the solar radiation temperature field for mountainous bridges is established; Second, the temperature simulation results are registered with the bridge voxel model, and spatio-temporal interpolation fusion is adopted to model the temperature field of mountainous bridges. Next, efficient visualization of the temperature field of mountainous bridges is achieved based on ray casting. Finally, a large-scale steel truss cable-stayed bridge in Ganzi, Sichuan province, China, is selected as a case study for experimental analysis. The experimental results show that the proposed method can effectively complement the temperature field simulation results to accurately depict the spatio-temporal distribution and variation patterns of the temperature field of mountainous bridges. The interpolation fusion accuracy was improved by 22.11% and 7.38% compared to spatial and temporal interpolation, respectively. The visualization frame rate has increased by 36.4% through volume rendering, which can provide key data support for subsequent intelligent construction and refined management of mountainous bridges driven by digital twins. Also, it offers crucial reference value for the realistic representation of environmental parameters of the component-level 3D real scene model.

Key words: mountain bridges; temperature field simulation; 3D modelling; spatio-temporal interpolation fusion; volume rendering optimization

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFC3015404); The Foundation of State Key Laboratory of Geo-Information Engineering and Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology of MNR, CASM (No. 2024-02-09); The National Natural Science Foundation of China (Nos. 42271424;42201446;42171397); The Chinese Postdoctoral Science Foundation (No. 2024T170742); Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (No. GZC20232185); Open Project Fund of National Engineering Research Center of Digital Construction and Evaluation Technology of Urban Rail Transit (No. 2024sys015)

First author: LI Weilian (1993—), male, PhD, associate researcher, majors in virtual geographical environment and 3D visualization.

E-mail: vgewilliam@163.com

Corresponding author: ZHU Jun

E-mail: zhujun@swjtu.edu.cn