

引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20230408



**Citation:** 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.DOI:10.13203/j.whugis20230408

# 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

朱 庆<sup>1</sup> 陈俊桦<sup>1</sup> 郭永欣<sup>1</sup> 丁雨淋<sup>1</sup> 潘 岩<sup>1</sup> 赵元祯<sup>1</sup>  
刘铭崴<sup>1</sup> 王 强<sup>2</sup> 张利国<sup>1</sup>

1 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

2 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州,730070

**摘要:**长大铁路隧道工程采用多工点并行同向或反向掘进等复杂施工组织策略,导致数字孪生三维模型时空分布稀疏、时空重叠度大,已有的时空索引针对连续均匀时空分布特征,难以满足时间、里程、语义多维度高效检索需要,制约了数字孪生应用的实时虚实互馈效率。为此,提出一种适用于铁路隧道数字孪生模型的多维度高效时空索引方法,设计了时间、里程、语义多维度关联的铁路隧道三维瓦片数据结构,建立了全局最优解约束的有向包围空间纠偏机制,实现了铁路隧道线路-瓦片-构件多粒度时空索引。利用典型长大铁路隧道孪生模型数据验证了所提方法的有效性,结果表明,所提方法在时间、里程、语义多维度混合检索时间平均值为135.44 ms,与现有典型时空索引对比,提升了三维空间单一维度与时间-里程混合维度的检索效率,可有效支撑铁路隧道数字孪生三维模型高效时空检索及高性能可视化分析等应用。

**关键词:**数字孪生铁路;铁路隧道;三维瓦片;时空索引;多粒度

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2023-10-14

DOI:10.13203/j.whugis20230408

文章编号:1671-8860(2023)11-1844-10

## Efficient Line–Tile–Component Multi–Granularity Spatiotemporal Indexing Method for Digital Twin Railroad Tunnel Data

ZHU Qing<sup>1</sup> CHEN Junhua<sup>1</sup> GUO Yongxin<sup>1</sup> DING Yulin<sup>1</sup> PAN Yan<sup>1</sup> ZHAO Yuanzhen<sup>1</sup>  
LIU Mingwei<sup>1</sup> WANG Qiang<sup>2</sup> ZHANG Liguo<sup>1</sup>

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

2 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Objectives: Complex construction organization strategies such as parallel same direction and reverse boring for long railroad tunnel projects lead to sparse spatiotemporal distribution and large spatiotemporal overlap in the digital twin three-dimensional model. The existing spatiotemporal indexes for the continuous uniform spatiotemporal distribution characteristics can not satisfy the needs of efficient retrieval of time, mileage, and semantics in multi-dimensions, and they also restrict the efficiency of the digital twin application in real-time virtual and real mutual feeds. Methods: This paper proposes a multi-dimensional efficient spatiotemporal indexing method applicable to the digital twin model of railroad tunnels. First, a 3D tile data structure of railroad tunnels associated with time, mileage, and semantic multi-dimensions is designed. Second, an oriented bounding box corrective mechanism constrained by the global optimal solution is established, and then a multi-granular spatiotemporal index of railroad tunnel lines–tiles–components is

**基金项目:**国家重点研发计划(2022YFB3904103);国家重点研发支撑计划(2022YF0800001GX);国家自然科学基金(42361072)。

**第一作者:**朱庆,博士,教授,研究方向为三维GIS与虚拟地理环境。zhuqing@swjtu.edu.cn

**通讯作者:**丁雨淋,博士,教授。rainforests@126.com

realized. Finally, the effectiveness of the method is verified using typical long railroad tunnel twin model data. **Results:** The results show that the average value of the proposed method in the mixed retrieval time of time, mileage and semantic multi-dimensions is 135.44 ms, which improves the retrieval efficiency of the 3D spatial single dimension and the time-mileage mixed dimension comparing with the existing typical spatial and temporal index. **Conclusions:** The proposed method can effectively support the efficient spatial and temporal retrieval of the digital twin 3D model of railroad tunnels, and the application of high-performance visualization and analysis.

**Key words:** digital twin railroad; railroad tunnel; 3D tile; spatiotemporal indexing; multi-granularity

针对铁路隧道数字孪生模型时间、里程、语义多维度检索需求,构建规范化多维度三维瓦片数据高效时空索引是保证检索效率的关键<sup>[1-2]</sup>。铁路隧道孪生模型在铁路沿线长带状空间呈不规则分布<sup>[3]</sup>,同一隧道工程多工点并行同向或反向掘进等复杂施工组织管理策略导致其时空分布稀疏<sup>[4-5]</sup>、时空关联复杂<sup>[6]</sup>,时间局部连续的孪生模型在空间呈稀疏分布的特点(如图1所示)。现有时空索引方法针对连续均匀分布的时空数据进行设计,难以直接适用于长带状不规则分布的铁路隧道孪生模型数据,存在节点分布不均匀、时空重叠度大等问题<sup>[7]</sup>,制约了数字孪生应用实时虚实互馈效率。如何适应铁路隧道长带状不规则分布特征,实现构件级孪生模型时间、里程、语义多维度高效检索面临巨大挑战。

现有时空索引方法主要分为多层次时空索引与多维度时空索引<sup>[8]</sup>。多层次时空索引旨在将时间与空间维度置于不同层级建立索引并关联,该类方法采用时间优先或空间优先的划分策略,其多维度检索模式较为固定,以时间维度优先划分的索引为例,需按先时间后空间的检索策略才能保证检索高效性<sup>[9]</sup>。多维度时空索引旨在将时间-空间多维空间作为整体进行索引,相比于多层次时空索引,更适合铁路隧道面向时间/空间单一维度或时间-空间多维度等多样化检索任务。该类方法多在R树<sup>[10]</sup>等空间索引扩展时间维,而面向铁路隧道长带状不规则分布特征,虽面向时间对节点分布进行了一定的调整,但额外的时间重叠制约了检索性能<sup>[11]</sup>。现有聚焦长带状不规则分布特征的索引设计主要包含单一索引与混合索引。单一索引主要基于四叉树、R树<sup>[12-13]</sup>及其改进等。改进四叉树减少了不均匀分布节点访问,但树结构不平衡性严重;R树优化了节点分布,但存在广域范围的空间重叠;混合索引主要以格网与树及树与树的混合呈现,旨在利用一级索引收敛性构建二级索引,改善逐个插入时的费时过程<sup>[14]</sup>,并对节点不均匀分布与重叠进行综合

的调节。在格网与树混合索引中,二级树索引多采用四叉树、八叉树、R树等<sup>[14-16]</sup>。学者针对格网检索效率偏低的问题,对格网基于STR树<sup>[14]</sup>进行了再组织,或利用GeoHash编码<sup>[17]</sup>实现一次性定位,但如何权衡格网划分尺度与二级树索引深度依旧是制约该类方法检索效率的瓶颈;树索引之间以四叉树、KD树、R树的混合<sup>[18-19]</sup>为主,但上层KD树、四叉树等不均匀节点分布将加剧索引的不平衡或重叠。

针对现有三维瓦片索引方法难以适应数字孪生铁路隧道长带状不规则分布特征的难题,本文以调整节点不均匀分布、降低时空重叠度、简化检索路径为导向,设计一种线路-瓦片-构件多粒度时空索引方法。面向时间-里程、三维空间、语义维度分别构建铁路隧道线路、瓦片、构件粒度的时空数据索引,以三维瓦片为核心,实现3个粒度索引关联,支撑铁路隧道孪生模型时间、里程、语义多维度检索。本文描述了铁路隧道三维瓦片数据结构,提出了线路-瓦片-构件多粒度时空索引及其生成与更新算法,并利用典型长大铁路隧道构件级孪生模型验证了多维度检索时间性能。

## 1 铁路隧道多维度三维瓦片数据结构设计

现有三维瓦片数据结构主要针对三维空间维度,难以支撑时间、里程、语义多维度精准高效检索。本节描述了一种适用于铁路隧道时间、里程、语义多维度三维瓦片逻辑/物理结构。

### 1.1 铁路隧道多维度三维瓦片逻辑结构

铁路隧道时间、里程维度信息以时间、里程区段表达,语义维度信息则参考CRBIM1003-2017《铁路工程信息模型表达标准》<sup>[20]</sup>,划分铁路隧道多层次语义,映射到线路、瓦片、构件粒度。

铁路隧道多维度三维瓦片数据逻辑结构如图2所示,包含两大部分:一是瓦片内部组织架

构,二是瓦片之间组织架构。瓦片内部存储构件索引包含属性信息(含构件级时间、里程、语义多维度属性信息)与几何信息(顶点、法线、纹理、面片索引等);瓦片之间组织架构采用树

形索引,对应线路-瓦片索引。每个节点包含其所在空间位置、数据链接、时间、里程、语义信息,并面向渲染指定节点加载条件及加载方式。

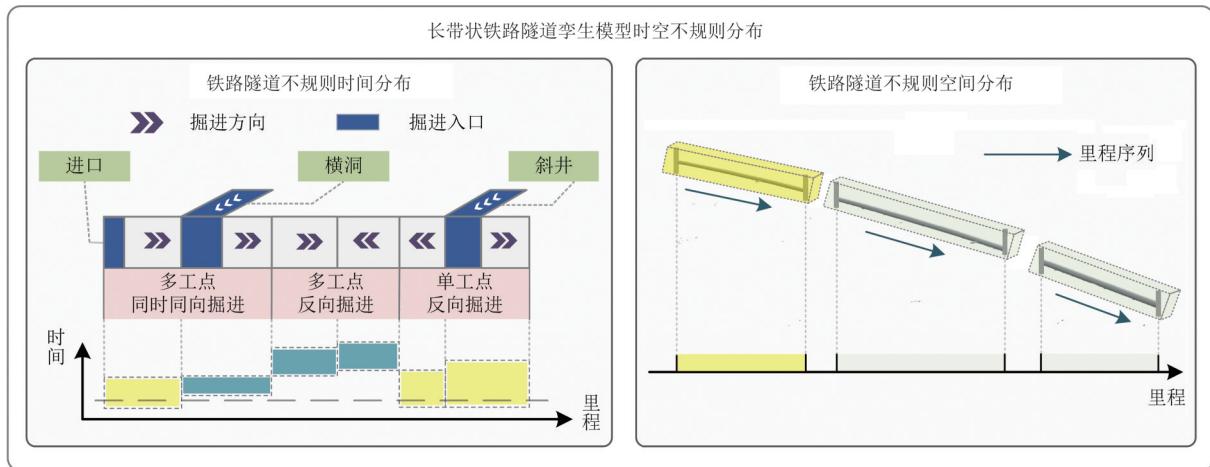


图1 长带状铁路隧道孪生模型时空不规则分布特点

Fig. 1 Character of Spatial and Temporal Irregular Distribution for the Twin Model of the Railroad Tunnel

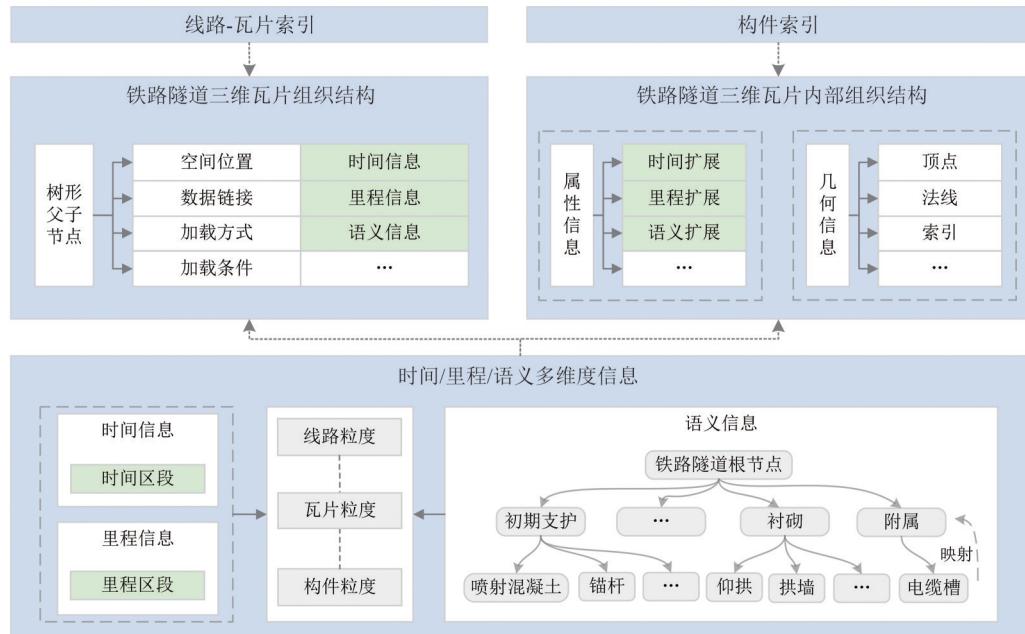


图2 铁路隧道多维度三维瓦片逻辑结构

Fig. 2 Logic Structure of Railroad Tunnels Multi-Dimensional Tile

## 1.2 铁路隧道多维度三维瓦片物理结构

铁路隧道多维度三维瓦片数据物理结构如图3所示。在时间、里程维度,按时间、里程区段的形式存储,包含区段起点与终点;在语义维度,按多层次语义存储,实现隧道工程与隧道构件之间的多层次语义映射。三维瓦片组织结构采用Json格式的树形索引文件,存储有唯一的根节点字段及其他树形子节点字段。每个节点均含指示当前节点空间位置

的包围盒字段、节点加载条件的几何误差字段、节点加载的细化方式字段以及叶节点中链接到下层索引或数据文件路径的数据链接字段。另外,还包含存储时间、里程、语义多维属性信息的扩展字段。

二进制三维瓦片文件存储构件索引包含属性表以及二进制几何模型。属性表以Json形式存储时间、里程、语义多维度信息,二进制几何模型对应存储顶点、法线、纹理等几何信息。

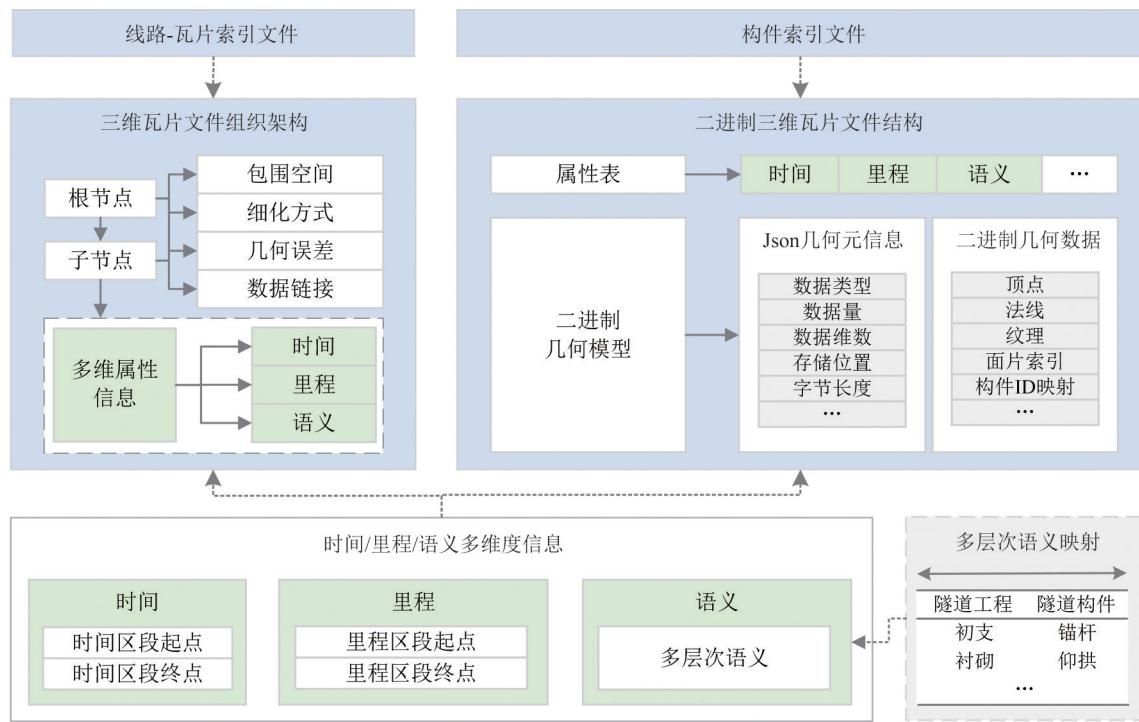


图 3 铁路隧道多维度三维瓦片物理结构

Fig. 3 Physical Structure of Railroad Tunnels Multi-Dimensional Tile

不同类别的二进制几何信息分块存储,需存储块对应的Json形式元信息,包含数据量、数据类型、数据维数、存储位置、字节长度等。若单个瓦片中存在多个构件,在每类几何信息对应三角面片索引位置存储所属构件唯一映射。另外,通过语义映射表支撑多层次语义的双向映射。

## 2 铁路隧道线路-瓦片-构件多粒度时空索引方法

围绕铁路隧道线路-瓦片-构件多粒度时

空索引方法,描述了全局最优约束的有向包围空间纠偏机制以及线路-瓦片-构件多粒度时空索引结构设计,提出其构建与动态更新算法。

### 2.1 全局最优解约束的包围空间纠偏

轴平行包围空间(axis-aligned bounding box, AABB)难以贴合铁路隧道长带状空间,导致节点分布不均匀的问题。为了解决该问题并保证线路、瓦片、构件各粒度内部及多粒度之间的空间一致性<sup>[21]</sup>,本文建立全局最优解约束的有向包围空间(oriented bounding box, OBB)纠偏机制,基本思路如图4所示。

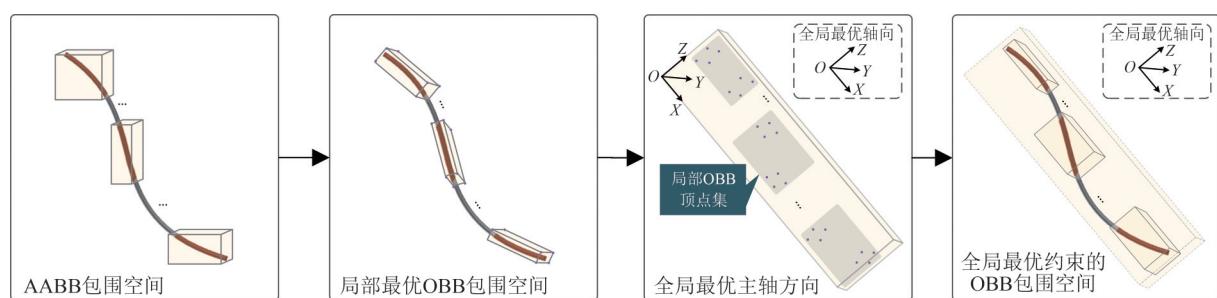


图 4 全局最优约束的有向包围空间纠偏流程

Fig. 4 Process of Oriented Bounding Box Correction with Global Optimality Constraints

由图4可以看出,构件、瓦片、线路索引均为基于该全局最优有向包围空间的层次树,具体步骤如下:

1)面向各构件级模型几何顶点集 $P_m$ ,提取局

部最优主成分轴向 $T_{local}$ ,计算在 $T_{local}$ 方向下的局部最优包围空间 $OBB_{local}$ ,计算式为:

$$T_{local} = f(P_m) = \text{Eig}(\text{Cov}(P_{mx}, P_{my}, P_{mz})) \quad (1)$$

式中, $P_{mx}, P_{my}, P_{mz}$ 为各构件顶点集的 $x, y, z$ 方向

分量;Cov表示计算3个分量的协方差阵;Eig表示计算该协方差阵的特征向量矩阵,即为局部最优主成分轴向。

$$OBB_{local}=g(P_m, T_{local})=[C; V_x; V_y; V_z] \quad (2)$$

式中, $OBB_{local}$ 为 $12 \times 1$ 向量; $C$ 、 $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ 分别对应OBB包围空间的中心点和主成分三轴向,均为 $3 \times 1$ 向量。

$$C=g_1(P_m)=(\max(P_m)+\min(P_m))/2 \quad (3)$$

$$V_x=g_2(P_m, T_{local})=$$

$$T_{local}^{-1}[(T_{local}(\max(P_m)-C))_x, 0, 0]^T \quad (4)$$

$$V_y=g_3(P_m, T_{local})=$$

$$T_{local}^{-1}[0, (T_{local}(\max(P_m)-C))_y, 0]^T \quad (5)$$

$$V_z=g_4(P_m, T_{local})=$$

$$T_{local}^{-1}[0, 0, (T_{local}(\max(P_m)-C))_z]^T \quad (6)$$

2)面向所有构件级模型局部最优包围空间几何顶点集 $P_{OBB}$ ,提取全局最优主成分轴向 $T_{global}$ ,计算式为:

$$T_{global}=f(P_{OBB}) \quad (7)$$

3)逐构件纠正其OBB到 $T_{global}$ 方向下,得到全局最优主成分轴向 $OBB_{global}$ ,计算式为:

$$OBB_{global}=g(P_m, T_{global}) \quad (8)$$

## 2.2 线路-瓦片-构件多粒度时空索引设计

面向时间-里程、三维空间、语义维度,分别构建铁路隧道线路、瓦片、构件多粒度时空数据索引,以全局最优约束的有向包围空间调节不均匀节点分布,以时间、里程空间无重叠度的划分减少节点访问,简化检索路径。整体索引结构如图5所示。

1)线路索引采用面向时间-里程时空包围<sup>[22]</sup>的二维R树索引,并利用无时空重叠的线性时间、里程索引与线路索引若干节点关联,简化检索路径长度,减少时空不均匀分布节点的访问。

2)瓦片索引采用面向无里程空间重叠的批量三维R树空间索引结构(类似STR树<sup>[23]</sup>)。随着树索引层级的增高,中间节点间的重叠显著减小,缓解在长带状空间广域范围空间重叠对检索性能的影响。

3)构件索引采用先空间后语义的划分策略,首先设计顾及长带状里程空间稀疏分布的线性里程与三维R<sup>\*</sup>树混合的索引结构,然后面向叶节点所含构件划分局部多层次语义索引,其中无重叠的里程空间一定程度降低瓦片之间的重叠,二级R<sup>\*</sup>树索引降低了瓦片内部构件之间的重叠。

4)基于线路与瓦片里程空间一致性、瓦片与构件三维空间一致性,实现线路-瓦片-构件索引的关联。

## 2.3 线路-瓦片-构件多粒度时空索引生成算法

线路-瓦片-构件多粒度时空索引采用自下而上的构建方式,在面向全局最优解约束的构件OBB的基础上,依次构建构件、瓦片、线路粒度索引,并实现瓦片-构件、线路-瓦片索引的关联,其总体流程如图6所示。

1)全局最优约束的包围空间纠偏。首先,基于逐构件几何信息计算局部最优OBB;然后,合并各局部最优包围空间的顶点集,计算全局最优主轴方向;最后,逐构件计算在全局最优主轴方向约束下的OBB。

2)生成构件索引。首先,划分无重叠的线性里程空间索引,上层瓦片、线路索引均基于此处划分的里程空间构建;然后,面向各里程空间的局部构件数据集构建三维R<sup>\*</sup>树索引,并关联线性里程索引;最后,从构件索引叶节点向其父节点聚合生成瓦片数据集,并在瓦片内部生成局部多层次语义索引。考虑构件检索效率及网络传输效率,宜控制瓦片中构件数量及瓦片文件大小。一方面,构件索引节点扇出值不宜过大;另一方面,生成瓦片文件时,需根据瓦片文件大小决定是否拆分为单构件的瓦片。

3)生成瓦片索引。首先,基于上一步中所划分的里程空间,提取各里程空间的局部瓦片数据集;其次,面向局部瓦片数据集整体构建三维R树索引,此处需在叶节点关联局部瓦片数据集所含的瓦片;然后,瓦片作为构件索引存储介质,直接在瓦片索引存储瓦片对象的叶节点实现瓦片-构件索引关联;最后,提取瓦片索引第n-1层生成线路数据集。

4)生成线路索引。一方面,计算各线路区段时间-里程时空包围,构建基于线路时间-里程规范化时空包围<sup>[22]</sup>的二维R树索引,关联瓦片索引第n-1层。本文将各线路区段时间、里程范围转化为至整个线路数据集时间、里程起点的距离表达。另一方面,设定一个线路数量阈值,筛选一系列所含线路未上溢的节点,提取对应时间、里程区段,将时空重叠合并后分别构建一层线性时间、里程索引,并关联将其筛选出的源线路索引节点。

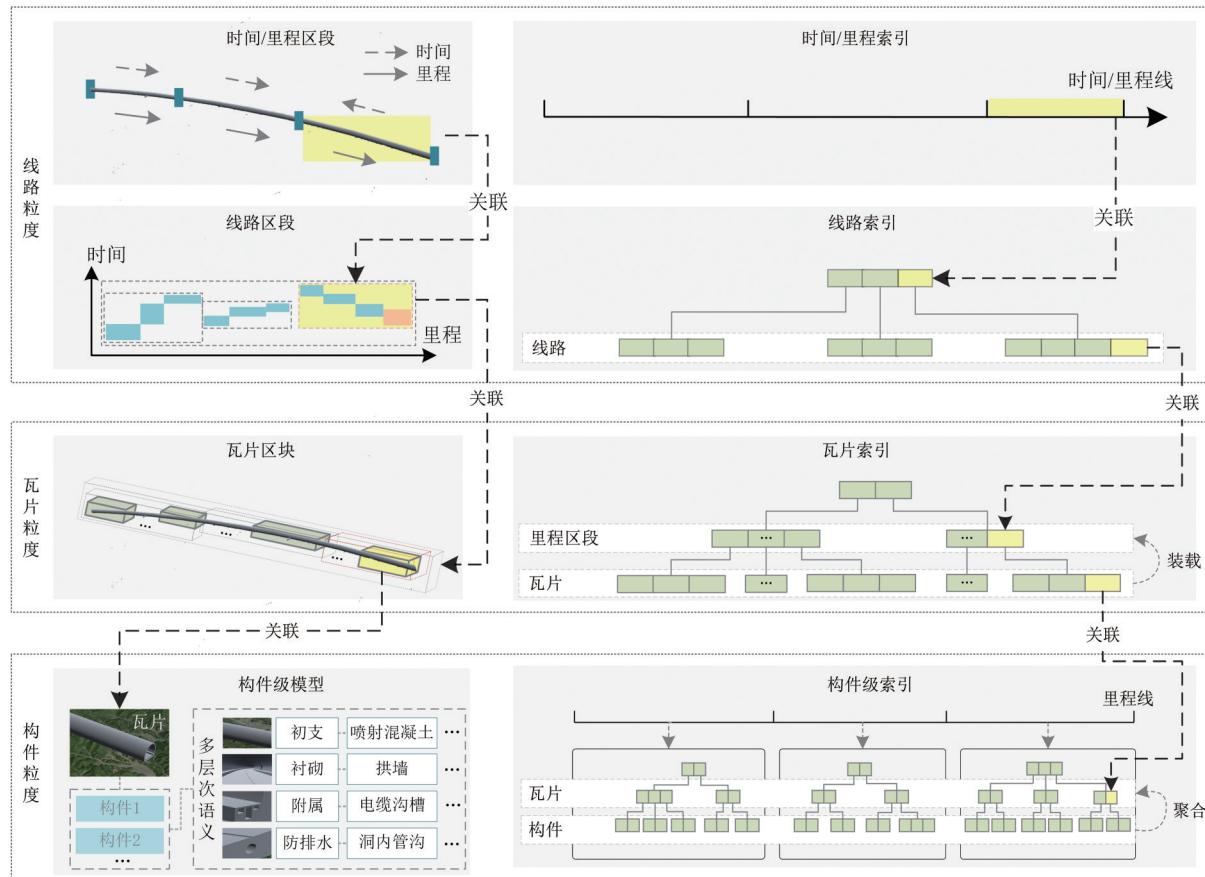


图 5 线路-瓦片-构件多粒度时空索引原理

Fig. 5 Principle of Line-Tile-Component Multi-Granularity Spatiotemporal Indexing

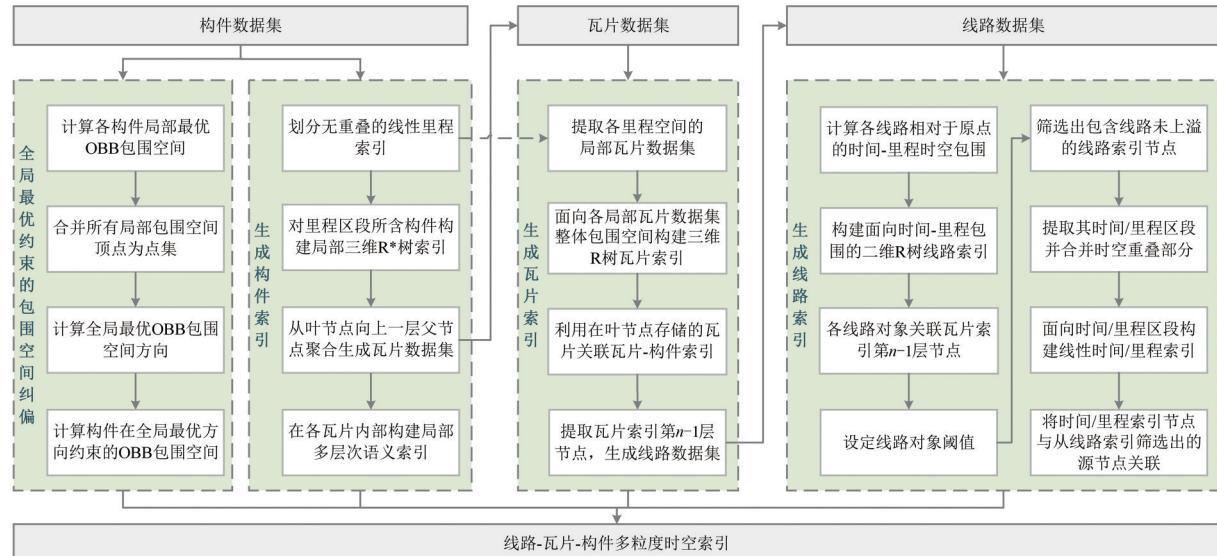


图 6 线路-瓦片-构件多粒度时空索引流程

Fig. 6 Process of Line-Tile-Component Multi-Granularity Spatiotemporal Indexing

## 2.4 线路-瓦片-构件多粒度时空索引动态更新算法

面向铁路隧道构件级孪生模型实时感知、迭代优化需求<sup>[24]</sup>,保证了各粒度内部及不同粒度之间三维空间、里程空间、时间、语义一致性,线路-瓦片-构件多粒度时空索引支持构件级模型动态更新,其基本思路如图 7 所示。首先,自上而下地

分别在线路、瓦片、构件粒度执行多维度关联检索,找到待更新的构件位置并执行更新操作;然后,自下而上地对完整构件、瓦片、线路索引回溯更新,即在沿多维度检索路径自下而上更新之外,还需在各粒度索引内部将更新路径延伸至当前粒度索引的根节点。

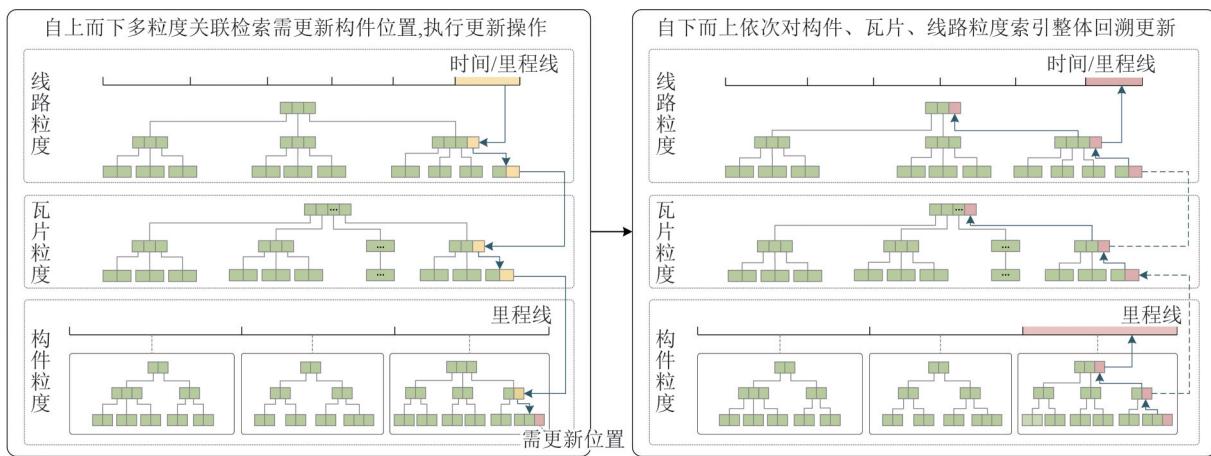


图7 线路-瓦片-构件多粒度时空索引更新流程

Fig. 7 Update of Line-Tile-Component Multi-Granularity Spatiotemporal Indexing

### 3 试验结果与分析

本文面向线路、瓦片、构件粒度分别设置时间-里程维度、三维空间维度、语义维度的检索任务,测试线路-瓦片-构件多粒度时空索引多维度检索时间。选取现有面向线路时间-里程空间的多维度/多层次时空索引、面向瓦片三维空间的R<sup>\*</sup>树索引、面向构件语义的多层次语义树索引作为对照。为保证结果可靠性,各维度选择5组随机查询窗口,采用100次重复试验平均值为试验结果。

#### 3.1 试验数据与试验环境

本文参考CRBIM1003—2017《铁路工程信息模型表达标准》<sup>[20]</sup>,以复杂山区长大铁路隧道正洞部分LOD300精度、时空不规则分布的孪生模型为试验数据集,测试铁路隧道构件级孪生模型时间、里程、语义多维度检索时间性能,并保证检索目标数据量一致,以时空规则分布的试验数据集作为对照组,验证本文索引在不同时空分布场景的适用性。试验数据集为3D-Tiles格式,扩展适用于铁路隧道时间、里程、语义多维信息。数据集基本描述见表1。

表1 试验数据集描述

Tab. 1 Description of Experimental Datasets

数据集	时间跨度	里程跨度	语义类型	模型数	离散空间数	时空关联数
规则分布数据集	2021-06-16—	DK296+350—	初支、衬砌、附属设施等	16 032	0	1
不规则分布数据集	2023-07-20	DK342+935		15 468	3	≥3

本文铁路隧道孪生模型时空不规则分布场景如下:一方面,孪生模型分布在3段离散的里程空间中;另一方面,隧道正洞进口、横洞、斜井三处工点并行向隧道出口掘进,同时,斜井处工点向隧道出口、进口两端并行反向掘进,因此,同一连续时间区段会关联至少3段空间稀疏分布的孪生模型。而时空规则分布场景仅存在从隧道进口向出口单向掘进的单一施工组织管理方式,决定了其不含离散的里程空间,也仅存在唯一的时空关联。

设定线路索引与瓦片索引扇出参数均为20和40,构件索引扇出参数为5和10,限定瓦片文件大小不得超过1 MB。采用C++实现多维度索引算法,输出多维度索引组织的试验数据集,研制构件级孪生模型多维度检索原型系统。

系统包含面向线路、瓦片、构件检索三大功能模块,支持时间、里程、语义等混合的多维度检索,可将构件级模型检索结果高亮显示,系统界面如图8所示。试验硬件环境如下:Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU @3.70 GHz中央处理器,32 GB内存。

#### 3.2 多维度检索性能分析

图9为本文索引面向时空不规则分布的数据集,在时间-里程、三维空间、语义维度检索对比试验结果。结果表明,铁路隧道构件级孪生模型时间、里程、语义多维度检索时间平均值为135.44 ms,三维空间单一维度与时间-里程混合维度检索效率优于现有典型时空索引4.3%~8.0%,语义维度劣于现有典型索引7.6%。

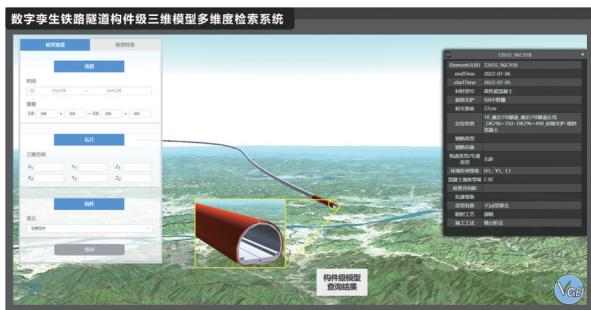


图 8 多维度检索原型系统界面

Fig. 8 Prototype System Interface for Multi-Dimensional Retrieval

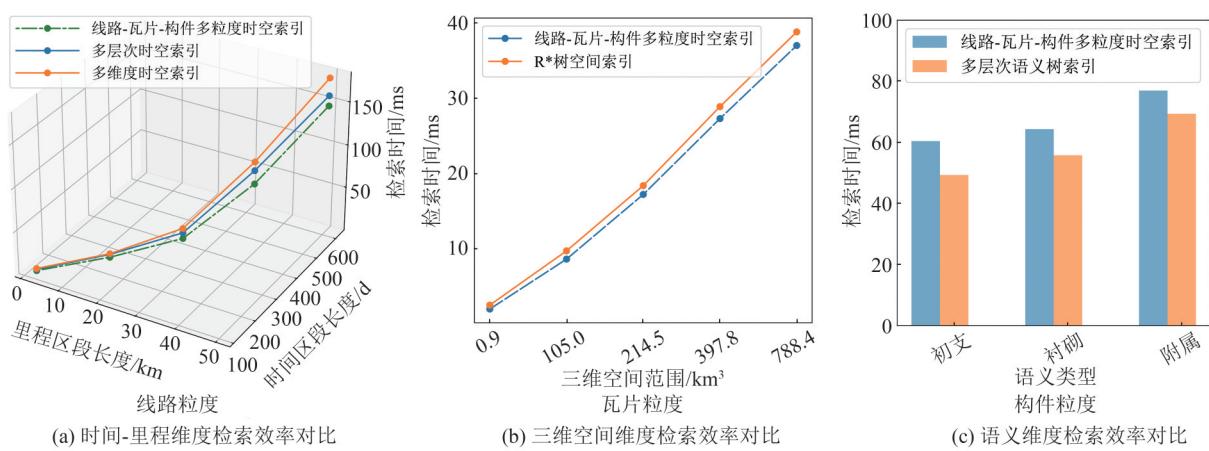


图 9 多维度检索效率测试

Fig. 9 Efficiency Test for Multi-Dimensional Retrieval

在语义维度检索任务中,本文索引采用先空间后语义的构建策略,导致了含同类语义的模型在索引中节点分布较为离散,造成检索路径数目偏多。但本文索引实现了时空与语义的关联,权衡了与时空维度混合的检索性能。

### 3.3 不同时空分布特征的适用性分析

针对时空维度检索任务,利用时空规则与不规则分布的 2 个数据集,保证检索目标数据量一致,验证本文索引在不同时空分布场景的适用性,试验结果如图 10 所示。结果表明,本文索引在不同时空分布场景均能满足构件级孪生模型多维度高效检索需求,但时空不规则分布场景检索时间被制约了 2.1%。原因是划分里程空间时考虑了其稀疏分布特征,而面向时间虽调节了节点分布,但空间维度在建树过程中的贡献依旧是主导,相同时间区段难免会分散在多个节点中,产生多条检索路径,制约检索效率。

## 4 结语

本文针对长带状不规则分布的数字孪生铁路隧道构件级三维模型多维度高效检索需求,构

在时间-里程维度检索任务中,本文面向时间调整线路节点分布,且一层线性时间、里程索引能一定程度过滤时空重叠产生的无效路径。但由于访问时间、里程索引存在一定时间成本,随着查询窗口扩大,本文索引优势有逐步减小的趋势,因此更适用于中小时空窗口查询。

在三维空间维度检索任务中,本文将瓦片先行面向无重叠里程空间的组织,降低了中间节点的空间重叠,削弱了广域范围空间重叠产生的无效路径。当检索窗口逐渐增大时,能一定程度减少节点的访问,加快检索效率。

在语义维度检索任务中,本文将瓦片先行面向无重叠里程空间的组织,降低了中间节点的空间重叠,削弱了广域范围空间重叠产生的无效路径。当检索窗口逐渐增大时,能一定程度减少节点的访问,加快检索效率。

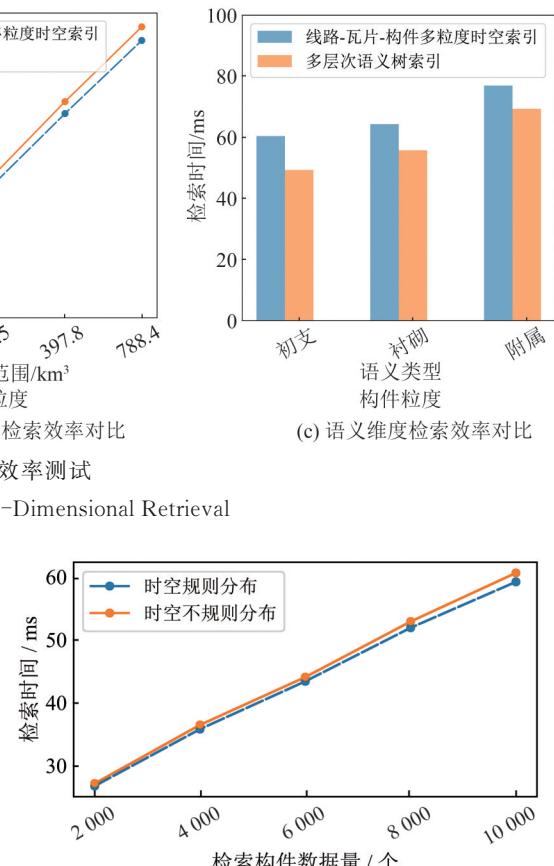


图 10 不同时空分布场景适用性测试

Fig. 10 Applicability Test for Different Spatial and Temporal Distribution Scenarios

建了一种线路-瓦片-构件多粒度时空索引,并设计了一种时间、里程、语义多维度三维瓦片数据结构。本文提出的线路-瓦片-构件多粒度时空索引调整了长带状空间不均匀节点分布,降低了时空重叠,简化了检索路径,支撑了面向时间、里程、语义的多维度高效检索。在后续工作中,将更细致全面地探究铁路多样化施工组织管理策略对时空稀疏分布的影响,对索引进行优化,并添加 LOD 机制,进一步增强高性能可视化与分析计算能力。

## 参考文献

[1] Jing Q, Miao H, Yang X, et al. Research on Key Technologies of 3D Real Scene Visualization Based on Multi-Source Observation Data Fusion[C]//The 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing, Sydney, Australia, 2022.

[2] Wang Tongjun. Research and Applications of China Intelligent High-Speed Railway Architecture [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(11): 1-9. (王同军. 中国智能高速铁路体系架构研究及应用[J]. 铁道学报, 2019, 41(11): 1-9. )

[3] Wu H, Zhu Q, Guo Y, et al. Multi-level Voxel Representations for Digital Twin Models of Tunnel Geological Environment [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 112: 102887.

[4] Cheng Shifen, Peng Peng, Zhang Hengcai, et al. Review of Interpolation, Reconstruction and Prediction Methods for Heterogeneous and Sparsely Distributed Geospatial Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1919-1929. (程诗奋, 彭澎, 张恒才, 等. 异质稀疏分布时空数据插值、重构与预测方法探讨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(12): 1919-1929. )

[5] Cheng Z, Wu Y, Liu Z. Research on Significance-Based Multiscale Representation Method for Railway Spatial Data[C]//The 7th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), Wuhan, China, 2022.

[6] Zhu Qing, Li Hankan, Zeng Haowei, et al. Classification and Coding of Entity Features for Digital Twin Sichuan-Tibet Railway [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1319-1327. (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. )

[7] Borrman A, Kolbe T H, Donaubauer A, et al. Multi-scale Geometric-Semantic Modeling of Shield Tunnels for GIS and BIM Applications [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, 30(4): 263-281.

[8] Tian R, Zhai H, Zhang W, et al. A Survey of Spatio-Temporal Big Data Indexing Methods in Distributed Environment[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 4132-4155.

[9] Zhu Qing, Feng Bin, Li Maosu, et al. An Efficient Sparse Graph Index Method for Dynamic and Associated Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(6): 681-691. (朱庆, 冯斌, 李茂粟, 等. 面向动态关联数据的高效稀疏图索引方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(6): 681-691. )

[10] Doulkeridis C, Vlachou A, Pelekis N, et al. A Survey on Big Data Processing Frameworks for Mobility Analytics[J]. *ACM SIGMOD Record*, 2021, 50(2): 18-29.

[11] Jitkajornwanich K, Pant N, Fouladgar M, et al. A Survey on Spatial, Temporal, and Spatio-Temporal Database Research and an Original Example of Relevant Applications Using SQL Ecosystem and Deep Learning[J]. *Journal of Information and Telecommunication*, 2020, 4(4): 524-559.

[12] Yang Xukun, Liu Yiqin. Research on Big Data Rendering Technology in Railway BIM Design System [J]. *Journal of Railway Engineering*, 2015, 32(2): 22-26. (杨绪坤, 刘义勤. 铁路BIM设计系统中的大数据渲染技术研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(2): 22-26. )

[13] Zhang Xinghua. Design and Implementation of BIM Program for Railway Bridges [J]. *Railway Computer Application*, 2019, 28(6): 25-29. (张兴华. 铁路桥梁BIM程序的设计与实现[J]. 铁路计算机应用, 2019, 28(6): 25-29. )

[14] Yu Anbin, Mei Wensheng. An Efficient Management Method for Massive Point Cloud Data of Metro Tunnel Based on R-tree and Grid [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1553-1559. (于安斌, 梅文胜. 一种R树与格网结合的海量地铁隧道点云管理方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1553-1559. )

[15] Yu Anbin. Management of Massive Point Cloud Data of Metro Tunnel and Design of the System [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (于安斌. 地铁隧道海量点云管理与系统设计研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017. )

[16] Mei Wensheng, Li Tianjiao, Yu Anbin. Massive Subway Tunnel Point Cloud Data Management and Web Fast Visualization Method [J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(2): 1-6. (梅文胜, 李天骄, 于安斌. 海量地铁隧道点云数据管理与Web快速可视化方法[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(2): 1-6. )

[17] Hou Zhitong. Research on Key Technologies of Dimension Reduction Storage and Hybrid Management for Striping Spatial Big Data in Highway Operation Management [D]. Hangzhou: Zhejiang University,

2015. (侯志通. 条带状公路运营管理空间大数据降维组织及混合存储关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.)

[18] Feng Jing, Jiang Shengping, Zheng Kun. A Point Cloud Model and Its Data Organization of Mine Tunnel [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(5): 134-138. (冯晶, 蒋胜平, 郑坤. 矿山巷道点云模型及其数据组织[J]. 测绘科学, 2014, 39(5): 134-138.)

[19] Zhang Y, Zhang A, Gao M, et al. Research on Three-Dimensional Electronic Navigation Chart Hybrid Spatial Index Structure Based on Quadtree and R-Tree[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(5): 319.

[20] CRBIM1003—2017. Railway Engineering Information Model Expression Standard[J]. *Railway Technology Innovation*, 2017 (6) : 13-105. (CRBIM1003—2017. 铁路工程信息模型表达标准[J]. 铁路技术创新, 2017(6): 13-105. )

[21] Gan B, Dong Q. An Improved Optimal Algorithm for Collision Detection of Hybrid Hierarchical Bounding Box[J]. *Evolutionary Intelligence*, 2022, 15(4): 2515-2527.

[22] Yao Z, Zhang J, Li T, et al. A Trajectory Big Data Storage Model Incorporating Partitioning and Spatio-temporal Multi-dimensional Hierarchical Organization[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(12): 621.

[23] Leutenegger S T, Lopez M A, Edgington J. STR: A Simple and Efficient Algorithm for R-Tree Packing [C]//The 13th International Conference on Data Engineering, Birmingham, UK, 1997.

[24] Wang Tongjun. Research on Life-Cycle Management Framework of Intelligent High-Speed Railway Infrastructure[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(11): 1-7. (王同军. 智能高速铁路基础设施全生命周期管理框架研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(11): 1-7. )