引文格式：胡波,卢薇锋,程文,等. 基于BIM、GIS及灰色关联分析法在基坑安全监测中的研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):113-117. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2026.02.024

# 基于BIM、GIS及灰色关联分析法在基坑安全监测中的研究

胡　波[1]，卢薇锋[1*]，程　文[2]，杨　力[2]
（1. 广东工业大学 土木与交通工程学院，广东 广州 510006；2. 中冶武勘工程技术有限公司，湖北 武汉 430000）

**摘　要：**针对基坑施工环境复杂多变、存在不确定性等问题，容易引起基坑坍塌、滑落等危险，给人民的生命财产安全造成威胁。以广州南沙220千伏口岸开关站工程为研究区域，利用倾斜摄影测量建立真实场景的GIS模型，利用标准设计建立BIM模型，通过数据格式转化方法实现BIM和GIS的集成，实现工程量偏差可视化预警、安全风险可视化评估。提出一种基于灰色关联分析的最不可靠点判定方法，实现监测点的筛选。通过对8个形变监测点的灰色关联分析，由实验可得：最可靠点是WY04，关联度是0.852；最不可靠点是WY07，关联度是0.621，实现了监测点的筛选和可靠性的判断。研究表明，BIM和GIS的集成及灰色关联分析法为基坑安全监测提供新的参考。

**关键词：**BIM+GIS；基坑安全监测；灰色关联分析；数据融合；工程管理
**中图分类号：**P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0113-05

# Application of BIM, GIS, and Grey Relational Analysis Method in the Deep Foundation Pit Safety Monitoring

HU Bo[1], LU Weifeng[1], CHENG Wen[2], YANG Li[2]
(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. MCC Wukan Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** In response to the complex and uncertain construction environment of foundation pits, it is easy to cause hazards such as collapse and sliding, posing a threat to people's lives and property safety. Taking Guangzhou Nansha 220 kV port switching station project as the research area, we used oblique photogrammetry to establish a GIS model of real scene, used standard design to establish a BIM model, and integrated BIM and GIS through data format conversion methods to achieve visual warning of engineering quantity deviation and visual assessment of safety risks. We proposed a determining method for the least reliable point based on gray correlation analysis to realize the monitoring points screening. The grey correlation analysis results of 8 deformation monitoring points show that the most reliable point is WY04, with a correlation degree of 0.852. The least reliable point is WY07, with a correlation degree of 0.621, which enables the screening of monitoring points and the determination of reliability. The integration of BIM and GIS, as well as the grey correlation analysis method, can provide new references for foundation pit safety monitoring.

**Keywords:** BIM+GIS, foundation pit safety monitoring, gray correlation analysis, data fusion, project management

基坑安全监测是一个复杂的系统工程，仅依靠某项技术难以满足监测需求，如何运用交叉技术为基坑监测赋能，是一个新的研究热点，BIM+GIS是其中的研究方向之一[1-3]。

目前国内外众多学者对BIM（buiding information modeling）和GIS的融合进行了大量研究[4-7]，并取得良好的成果，核心是聚焦于数据格式转换、数据标准扩展和本体论的融合，旨在解决几何信息、语义信息和属性信息等问题[8]。然而，利用BIM+GIS在基坑安全监测的研究却很少，在基坑工程的后期，基坑状态较为稳定，并不需要进行全域监测，如何布控监测点能够做到有效监测，相应的研究较少。本文拟通过BIM和GIS的集成，以广州市南沙区220千伏口岸开关站基坑作为研究对象，研究BIM+GIS在基坑安全监测的应用，并提出一种基于灰色关联分析的最不可靠点判断方法，旨在为基坑安全监测提供

项目来源：广东省基础与应用基础研究基金资助项目（2022A1515010396）；多维度空天地一体化自动监测及数据融合技术研究资助项目（2024920015）。
第一作者简介：胡波（1983—），博士，教授，研究方向为雷达遥感形变监测理论与应用研究、遥感大数据及人工智能，E-mail：hubo@gdut.edu.cn。
通信作者：卢薇锋（1999—），硕士，研究方向为InSAR地表形变监测，E-mail：2112309047@mail2.gdut.edu.cn。

借鉴。

## 1 研究区域概况

### 1.1 研究区域勘查与准备

对研究区域进行踏勘，了解研究区域的地形特征和周边情况，包括居民地、道路、水系、植被和地势高低等情况，为后期无人机作业做准备。研究区域占地面积5 320.7 m²，根据区域平面图，规划航线并布设像控点，测量其坐标，航飞时间为下午3点左右，该时间段地面阴影小，光照强度较弱且太阳高度偏大，能够获得质量更高的影像，设置航线速度5 m/s，相机镜头角度是45°，飞行高度60 m。

### 1.2 数据采集

220千伏口岸开关站工程位于广州市南沙区南沙街道环市大道南。南沙区属于亚热带季风性海洋气候，多雨、夏长冬短、最热月平均气温28.9℃、最冷月平均气温14.3℃、年平均降雨在1 673.1 ml，4—9月降雨量达到1 354.9 ml，雨量相对集中在汛期。受副热带高压的影响，在每年7—9月是南沙区台风的高发阶段，雨季、台风和汛期集中在同一时期。基坑靠近黄山鲁森林公园，植被茂密，地下水含量丰富。口岸开关站建筑面积11 916.5 m²，地上4层，地下1层，于2023年2月开始桩基础施工，4月开始基坑开挖，10月基坑施工完成。在此期间，南沙区正值雨季和台风高发期，地下水丰富，工程施工危险系数增高，基坑安全更需持续关注。

## 2 实验原理

### 2.1 GIS+BIM联合原理

#### 2.1.1 GIS建模处理

由于数据采集得到的各测站的点云数据为粗数据，需要对数据进行配准、滤波、数据精简筛选、数据分割、构建TIN模型等处理。本文采用迭代最近点算法配准数据，引导滤波法剔除噪声，在处理中取得较为理想的效果。

1）数据配准。处理多个测站的点云数据时，为了确保它们能够正确地拼接在一起，需要对每个测站的数据进行坐标变换。本文采用迭代最近点算法（iterative closest point，ICP）进行数据配准。通过寻找2个点云中对应点之间的最佳匹配来实现最优变换。通过ICP算法，可以实现不同测站点云数据之间的精确配准，为后续的数据处理和分析提供了基础，其变换可以表示为一个刚性变换矩阵：

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{RT}\\ \boldsymbol{VS}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11}a_{12}a_{13}t_x\\ a_{21}a_{22}a_{23}t_y\\ a_{31}a_{32}a_{33}t_z\\ v_xv_yv_zs\end{bmatrix} \tag{1}$$

其中旋转矩阵表示为 $\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}a_{11}a_{12}a_{13}\\ a_{21}a_{22}a_{23}\\ a_{31}a_{32}a_{33}\end{bmatrix}$，平移向量表示为 $\boldsymbol{T}=[t_xt_yt_z]^{\mathrm{T}}$，衡量形变的向量表示为 $\boldsymbol{Z}=[Z_xZ_yZ_z]$，描述缩放程度的参数表示为 $S$。

$\boldsymbol{V}$ 设为零向量，$S$ 设为1。首先将测点1的基准点集标记为 $P=\{X_i^{'}\mid X_i^{'}=(x_i^{'},y_i^{'},z_i^{'}),i=1,2,\ldots,m\}$，测点2的目标点集标记为 $Q=\{X_i\mid X_i=(x_i,y_i,z_i),i=1,2,\ldots,n\}$。假设点集 $Q$ 的点坐标为点集 $P$ 的变换公式如下：

$$X_i^{'}=\boldsymbol{R}X_i+\boldsymbol{T} \tag{2}$$

假设函数 $f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})$ 是衡量2个点集之间的距离误差，当 $f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})$ 取得最小值时，最优解 $(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})$ 便是待求解的变换矩阵。采用均方根误差（root mean square error，RMSE）作为误差的度量标准，误差函数公式表述如下：

$$f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})=\sum_{i=1}^{n}\left\|\boldsymbol{R}p_i+\boldsymbol{T}-q_i\right\|^2 \tag{3}$$

利用迭代最近点（ICP）算法可以对大量的测点执行更合理的配准。

2）噪声去除。本文采用引导滤波法进行点云处理，引导滤波不仅能去除小尺度噪声，而且能够保持点云边缘特征[9]。

KD-tree结构被用于在三维点云中建立每个点的几何关系。基于这个结构，通过 $K$ 最近邻（KNN）算法可以找到点云模型中每个点 $p_i$ 的邻域点集合 $N(p_i)=\{p_{ij}\in P\}$，这个集合包括点 $p_i$ 本身以及其他点。在这里，$p_{ij}$ 为点 $p_i$ 的第 $j$ 个邻域点，$P$ 为整个点云数据集中的所有点。通过邻域点集合，可以计算出该集合的中心点位置，估计该领域集和的中心点位置的公式如下：

$$\overline{p}=\frac{1}{\left|N(p_i)\right|}\Sigma_{p_{ij}\in N(p_i)}p_{ij} \tag{4}$$

式中，$\left|N(p_i)\right|$ 为 $N(p_i)$ 的基数。

假设在点 $p_i$ 的邻域集合 $N(p_i)$ 中，滤波操作输出的三维点云模型与对应的输入引导点云模型之间存在一个局部的线性关系，其局部线性模型是：

$$p_{ij}^{'}=a_ip_{ij}+b_i \tag{5}$$

式中，$p_{ij}^{'}$ 为引导滤波处理后的输出结果点；$a_i$ 和 $b_i$

为被限制在邻域集合 $N(p_i)$ 范围内的线性模型的系数。

#### 2.1.2　BIM建模处理

BIM技术具有以下3个特性：①面向对象广；②支持开放式标准[10]，这为BIM和GIS的融合提供了可能[10]；③实时更新与反馈。

综合对比BIM领域建模软件，根据研究的特点，利用Revit建立基坑的标准模型。将基坑设计图（dwg格式数据）在Revit中直接打开，利用分层建立的方法逐层搭建基坑模型，根据基坑建造要求，在每个图元层记录其相应的三维尺寸、土层岩性以及放坡系数等，扩大BIM基坑模型的信息化程度，方便后期施工以及运维阶段，能够清楚地查询到每个图元的相关信息，提升效率。

#### 2.1.3　GIS+BIM的集成处理

GIS与BIM的融合是一个复杂的过程，因其分属不同领域，在属性信息、几何信息、语义信息都存在不同的表达，在融合或转换过程中存在数据丢失等问题。CityGML作为GIS方面的标准之一，用于GIS的数据存储和交换，定义了LOD0–LOD4共5个细节层次的信息模型，可以实现各种专题在不同尺度上的几何和语言的表达[11]。IFC作为BIM领域的标准，IFC采用面向对象的、标准化的数据描述语言（EXPRESS）对所有用到的数据进行定义，其对建筑构件定义的详细程度要高于CityGML。IFC和CityGML为BIM和GIS的融合创造了可能，在BIM和GIS的融合方面，主要围绕数据格式和标准扩展2个方面开展研究。无论采取数据格式还是标准扩展都会造成一定程度上的数据丢失，无法做到完全的融合[12]。BIM和GIS的融合是为解决实际工程问题而产生的研究。完全的数据融合并不是工程的最迫切的需求，解决实际问题才是工程的本质要求。因此，应从工程实际出发，合理的规避数据转换的信息丢失问题，为解决工程问题发力。

本文利用倾斜摄影测量进行GIS建模，涵盖研究区及延伸区域的地理信息，利用设计图对基坑及地上部分的建筑物进行BIM建模，基于CityGML的数据格式向IFC格式转换，实现GIS与BIM的融合。BIM和GIS融合全景如图1所示。

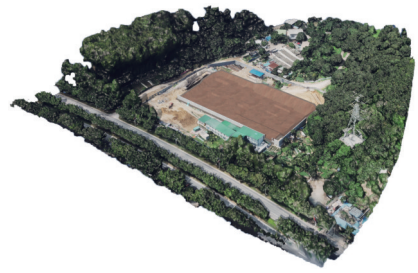


图1　BIM和GIS融合全景

### 2.2　基于灰色关联分析的基坑最不可靠点判断方法

本文提出基于灰色关联分析的基坑最不可靠点的判断方法[13-14]。灰色关联分析法是对灰色系统从现在到未来的发展趋势的一种定量描述和比较，基于关联度参数对整个系统运行变化的各个因素之间的密切程度进行定量处理，确定关联程度的大小，并对关联度的大小由大到小进行排序处理，从而找出其中影响系统运行的最大因素[15]。其中原理如下：确定分析指标体系。收集分析数据，设 $n$ 个数据序列形成如下矩阵：

$$\left(X_1^{'},X_2^{'},\cdots,X_n^{'}\right)=\begin{pmatrix} x_2^{'}(1) & \cdots & x_n^{'}(1) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_1^{'}(m) & \cdots & x_n^{'}(m) \end{pmatrix} \tag{6}$$

式中，$m$ 为指标的个数；$X_i^{'}=(x_i^{'}(1),x_i^{'}(2),\cdots,x_i^{'}(m))^{\mathrm{T}}$，$i=1,2,\cdots,n$。

确定参考数据列。参考数据列应该是一个标准的比较对象，可以选择利用各指标最优值或最劣值作为参考，其记作：

$$X_0^{'}=\left(x_0^{'}(1),x_0^{'}(2),\cdots,x_0^{'}(m)\right) \tag{7}$$

指标数据无量纲化。由于系统中各因素的物理意义不一致，导致数据的量纲不一样，不便于比较，因此在进行灰色关联度分析时，需对数据进行无量纲化的处理。常用的无量纲化方式如初值化法，如下式：

$$\begin{cases} x_i(k)=\dfrac{x_i^{'}(k)}{x_i^{'}(1)} \\ i=0,1,\cdots,n;k=1,2,\cdots,m \end{cases} \tag{8}$$

计算比较序列与参考序列对应元素的绝对差值，即

$$\Delta_i(k)=\left|x_0(k)-x_i(k)\right| \tag{9}$$

式中，$k=1\cdots\cdots m$，$i=1\cdots\cdots n$，$n$ 为被评价对象的个数。

计算关联数。分别计算每个比较序列与参考序列元素的关联系数，如下式：

$$\zeta_i(k)=\frac{\min_i\min_k\Delta_i(k)+\rho\min_i\min_k\Delta_i(k)}{\Delta_i(k)+\rho\min_i\min_k\Delta_i(k)} \tag{10}$$

式中，$k=1,\cdots,m$；$\rho$ 为分辨系数，$0<\rho<1$。若 $\rho$ 越大，则关联差异越大，区分能力越弱，通常 $\rho$ 取0.5。

计算关联序，得出结论。对比较序列分别计算其指标与参考序列对应元素的关联系数的均值，以反映各比较序列与参考序列的关联性，其为关联序，记为：

$$r_{0i}=\frac{1}{m}-\sum_{k=1}^{m}\zeta_i(k) \tag{11}$$

## 3 工程应用

### 3.1 工程量可视化偏差

BIM和GIS的融合能够实现工程的动态预测和风险管控。通过摄影测量技术对研究区进行无人机拍摄，建立与研究区一致的GIS模型，符合工程的实际情况。其次，基于设计图对研究区进行BIM建模，作为工程量和预算的参考标准。通过数据格式的转换，实现BIM基坑模型与GIS基坑模型融合创建。基坑开挖数据对比如图2所示。

通过数字化管控平台可以看出，在基坑开挖中，GIS模型和BIM模型计算的开挖工程量偏差是109.88 $m^3$，二者偏差较小，符合要求。其偏差的原因：一是GIS和BIM在数据转换的融合过程中出现了一定的数据丢失，其二在于GIS模型和BIM模型二者之间存在融合偏差及实际工程间的偏差[16]。实验表明，利用BIM和GIS的集成模型，能够迅速计算基坑开挖工程量并实现偏差可视化观测。

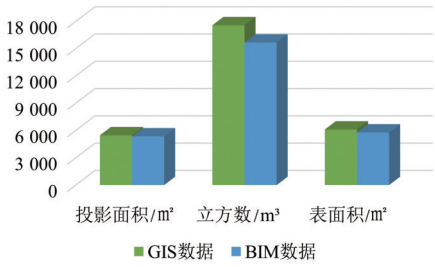



图2 基坑开挖数据对比

### 3.2 安全风险可视化评估

BIM+GIS模型能够呈现工程现场情况并实现工程安全巡查。研究区域的西面、北面以及东面都是被山体或高坡围绕，南面距离广州地铁4号线直线距离仅有35 m，研究区域所处的地理位置较为复杂[17]。山体的稳定性、基坑施工期间引起的震动及地铁经过带来的地质震动等都可能引发基坑安全事故[18]，容易引起基坑安全隐患，需进行持续监测。除了持续监测基坑外，还需通过巡查发现基坑潜在的安全隐患，本文通过BIM+GIS模型进行基坑安全巡查，从模型中发现一例疑似安全隐患（图3），从模型的面状信息看，与同类型的其他区域不同，根据现场勘察发现，在基坑的东北侧有一根露出超过1 m的抗滑桩，根据住房和城乡建设部颁布的《建筑桩基技术规范》JBJ94–2008的规定下节桩段的桩头宜高出地面0.5 m，所以该桩施工超过规范，容易引起安全隐患，应当加以改正。由此可见，BIM+GIS模型提供了一种远程、快速、无接触的工程安全巡查方法。




图3 抗滑桩超露

### 3.3 基于灰色关联分析的最不可靠点判断法

本文对研究区域布设WY01、WY02、WY03、WY04、WY05、WY06、WY07、WY08共计8个沉降监测点。采用SDL1X进行监测，监测内容为基坑顶沉降，从2023年8月15日开始，到2023年10月3日结束监测，为期50 d，按照7 d为一组，可分为8组数据，监测数据如表1所示，并将每次监测数据导入BIM基坑平台的相应点内存储，利用灰色关联分析算法对8组数据进行关联性分析，得出最不可靠点是WY07，其关联值为0.621；最可靠点是WY04，其关联值为0.852。

表1 监测数据/mm

| 观测点 | 2023/8/15 | 2023/8/22 | 2023/8/29 | 2023/9/5 | 2023/9/12 | 2023/9/19 | 2023/9/26 | 2023/10/3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WY01 | 1. 18 | 0. 63 | −0.68 | 0.3 | 0.5 | 0.78 | 0 | 0.71 |
| WY02 | 1.18 | 0.34 | −0.22 | −1. 19 | 0.42 | 0.18 | 0.55 | 1.46 |
| WY03 | −0.02 | 0. 37 | 0.42 | 0.71 | −0.6 | −0.16 | 0.6 | −0.06 |
| WY04 | 0.04 | 0.22 | 0.41 | 0.91 | −0.38 | −0.19 | 0.49 | −0.07 |
| WY05 | 0.07 | 0. 37 | 0.61 | 0.33 | −0.08 | −0.57 | 1. 15 | −0.05 |
| WY06 | −0.87 | 0.09 | 0.62 | 0.81 | 0.29 | −0.15 | 0.94 | −0.53 |
| WY07 | 1.07 | 1. 54 | 1. 12 | −1.48 | −1.05 | −0.64 | 0.82 | 0.81 |
| WY08 | 0. 96 | 0.79 | 0.83 | −1.64 | −0.54 | −0.81 | 0.71 | 0.61 |

从表1的监测数据可看出，单次最大抬升发生在WY07，形变量是1.54 mm；单次最大沉降发生在WY08，形变量是−1.64 mm。在50 d监测中，WY01–WY08的累计形变量分别是1.61、3.91、0.89、1.43、0.31、1.20、−0.47、−0.05 mm。观测期间，累计最大形变量是WY02，原因在于WY02布置在混凝土泵送区域，长期受搅拌车以及混凝土泵送带来的震动，导致监测数据存在较大粗差。其时序形变如图4所示。

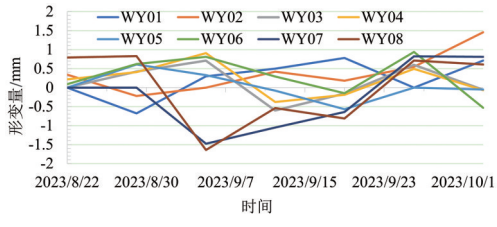



图4 基坑时序形变

本文基于灰色关联分析法，通过无量纲化能够去除量纲不同的影响，通过参考数列与比较数列的灰色关联系数计算，能够判断曲线间的几何形状的差别程度，从而计算最终的关联度值能够判断出最不可靠点，WY01–WY08的关联值分别为0.743、0.740、0.840、0.852、0.834、0.779、0.621、0.673。关联值在[0,1]之间，接近于0，表示监测点的稳定性较差，由此可以看出，8个评价对象从最可靠到最不可靠的排序是：WY04>WY03>WY05>WY06>WY01>WY02>WY08>WY07，由此可见最不可靠点是WY07，经过现场走访以及查阅监测数据，发现WY07靠近山体，受雨季影响，WY07附近有一个山体汇水区，土壤含水丰富，地质较软，稳定性差。因此，在后期监测中，WY07将作为下一阶段的监测点。灰色关联度分析为后期基坑监测挑选监测点提供了重要的参考价值。

## 4　结　语

本文基于倾斜摄影测量与BIM技术，构建GIS+BIM融合模型，开展基坑形变监测研究。研究表明：该模型可实现工程量偏差的可视化预警，提升项目管控效率并节约成本；在安全排查中，识别出东北部一根抗滑桩超出规范0.5 m，及时提示处理以防范风险；通过灰色关联度分析50 d监测数据，确定WY07点为最不可靠监测点，其受雨季影响稳定性较差，建议作为下一阶段重点监测对象。该方法能有效筛选具有持续监测价值的关键点位。

## 参考文献


[1] 陶燕丽,陈康,朱剑锋,等. 密集建筑区超深基坑施工全过程环境变形实测分析[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(3):969-977

[2] 郝龙,杨莎莎,宋成年,等. 基坑开挖控制的BIM+3D GIS融合检测方法及应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(增刊):129-134

[3] 张晨,王建东,罗宵,等. 工程管理数字化关键技术研究进展[J]. 计算机应用,2023,43(增刊):187-195

[4] 廖志刚,蔡德钩,潘永杰,等. 基于BIM技术的基坑监测管理系统研究[J]. 铁道建筑,2018,58(2):100-103

[5] 赵峰. 基于BIM的基坑工程自动化监测平台研发[J]. 煤田地质与勘探,2018,46(2):151-158

[6] 张凤瑞,张磊. GIS技术下天津市深基坑监测信息管理系统的设计与实现[J]. 测绘通报,2016(7):118-121

[7] 何高峰,罗先启,张辉,等. 基于BIM与GIS结合应用的地铁隧道安全预警预报技术[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(7):161-164

[8] 武鹏飞,刘玉身,谭毅,等. GIS与BIM融合的研究进展与发展趋势[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(1):1-6

[9] 张晨,王建东,罗宵,等. 工程管理数字化关键技术研究进展[J]. 计算机应用,2023,43(增刊):187-195

[10] 李福星,郑玉平,高升. 深基坑自动化监测系统优化研究[J]. 地理空间信息,2024,22(2):71-75

[11] 吴弦骏,闻平,吴小东,等. 实景三维模型与BIM技术的集成应用[J]. 地理空间信息,2022,20(9):106-109

[12] Sun J, Mi S, Olsson P, et al. Utilizing BIM and GIS for Representation and Visualization of 3D Cadastre[J].ISPRS International Journal of Geo-information, 2019, 8(11):503-512

[13] 冯江宇. 基于BIM+GIS+IoT的深基坑与高铁协同预警系统研究[J]. 铁道建筑技术,2022(10):55-59

[14] 王玮. 基于三维GIS的铁路BIM空间信息系统构建及其工程应用[J]. 测绘通报,2020(7):138-142

[15] 晏晓红,宋丽,荣延祥. PSO-SVR优化模型在基坑变形监测预测中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(12):53-57

[16] Demir S, Yomralioglu T. Bridging Geo-data and Natural Gas Pipeline Design Standards: A Systematic Review of BIM-GIS Integration for Natural Gas Pipeline Asset Management[J]. Energies,2024,17(10):186-197

[17] Fa'aizah N W B A W, Uznir U, Zulkepli M. Adaptation 4D and 5D BIM for BIM/GIS Data Integration in Construction Project Management[J].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2023(1):165-177

[18] 闫昶,宋伟凯. 面向多源数据的开源三维GIS关键技术研究[J]. 地理空间信息,2024,22(6):39-42


（上接第108页）


[11] 张勇,陈凯,范云松,等. 基于自动综合规则库的城市大比例尺地形图缩编研究[J]. 城市勘测,2021(5):98-101

[12] 刘洋,兰泽英. 基于同源数据的序列比例尺地图综合缩编平台建设[J]. 测绘工程,2015,24(12):36-42

[13] 李伟. 城市级地理信息缩编平台设计与实践[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2017

[14] 孙群,温伯威,陈欣,等. 多源地理空间数据一致性处理研究进展[J]. 测绘学报,2022,51(7):1561-1574

[15] 赵珍珍,燕琴,刘正军,等. 高分遥感影像与矢量数据结合的变化检测方法[J]. 测绘科学,2015,40(6):120-124

[16] 王健. 基于深度学习的遥感影像变化检测方法研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2023