

# 基于监测关键数据的综合智能处理技术研究及应用

王亚飞<sup>1</sup>, 周根郑<sup>1</sup>, 曾长贤<sup>1</sup>, 李富年<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063; 2. 武汉科技大学信息科学与工程学院, 武汉 433081)

**摘要:**【目的】为解决滑坡监测数据处理与分析中的准确性和效率问题,提出一种综合智能处理技术以监测关键勘察数据,并开发相应的云平台系统。【方法】该系统通过联合多个数据库,实现了各类监测数据的高效存储与管理。具体而言,采用改进的切线角算法来识别滑坡滑面深度,并基于此构建滑坡三维模型。与传统切线角识别算法的识别正确率 5/12 相比,改进后的算法达到 12/12,识别准确性显著提高。在滑坡模型构建方面,相较于点云模型数小时的构建时间,使用 Three.js 与 Delaunay 生成的方法仅需几秒即可准确构建三维滑坡模型。此外,系统利用 Web-GIS 技术实现了监测数据的可视化管理和预警功能,使用户能够直观地观察滑坡的动态变化和潜在风险。【结果】研究表明:该系统能够高效处理和分析多类型监测数据,成功实现滑坡滑带位置、滑体空间尺寸和形态的智能分析与动态监测;实现了滑坡变形数据的连续监测和记录,可全面、持续地追踪滑坡变形的演化过程,从而提高预警的及时性和准确性;提出的综合智能处理技术和云平台为边坡滑坡防治提供了一种通用化、智能化的工具,对滑坡的预防和治理具有重要意义。【结论】所提方法不仅实现了滑坡变形数据的连续监测与记录,还能帮助相关部门及时采取防范措施,保障人民生命和财产安全。

**关键词:**滑坡监测; 综合智能处理技术; 云平台; Web-GIS, 切线角算法

**中图分类号:**U213.1; P642.22 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202408140002

## Research and Application of Integrated Intelligent Processing Technology Based on Key Monitoring Data

WANG Yafei<sup>1</sup>, ZHOU Gentan<sup>1</sup>, ZENG Changxian<sup>1</sup>, LI Funian<sup>2</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 2. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 433081, China)

**Abstract:** [Objective] To address the accuracy and efficiency problems in landslide monitoring data processing and analysis, an integrated intelligent processing technology for monitoring key survey data is proposed, and a corresponding cloud platform system is developed. [Methods] By integrating multiple databases, the system realized efficient storage and management of various types of monitoring data. Specifically, an improved tangent-angle algorithm was adopted to identify the depth of the landslide slip surface, and a three-dimensional landslide model was constructed on this basis. Compared with the recognition accuracy of 5/12 of the traditional tangent-angle algorithm, the improved algorithm achieved 12/12, significantly improving the recognition accuracy. In terms of landslide model construction, compared with the several hours required for point cloud model construction, the method using Three.js and Delaunay generation could accurately construct a three-dimensional landslide model within only a few seconds. In addition, the system used Web-GIS technology to realize visualized management and early warning of monitoring data, enabling users to intuitively observe dynamic changes and potential landslide risks. [Results] The results showed that the system efficiently processed and analyzed multiple types of

monitoring data and successfully realized intelligent analysis and dynamic monitoring of landslide slip-zone position, landslide spatial dimensions, and morphology. It also enabled

收稿日期:2024-08-14; 修回日期:2024-10-25; 网络首发日期:2025-04-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600400)

作者简介:王亚飞(1981—),男,正高级工程师,2002年毕业于中国地质大学(武汉)水文与水资源工程专业,工学学士,主要从事铁路地质与路基研究工作,E-mail:5951229@qq.com。

continuous monitoring and recording of landslide deformation data and could comprehensively and continuously track the evolution of landslide deformation, thereby improving the timeliness and accuracy of early warning. The proposed integrated intelligent processing technology and cloud platform provided a generalized and intelligent tool for slope landslide prevention and control, which was of great significance for landslide prevention and treatment. [ **Conclusion** ] The proposed method not only realizes continuous monitoring and recording of landslide deformation data, but also helps relevant departments take timely preventive measures to safeguard people's lives and property.

**Key words:** landslide monitoring; integrated intelligent processing technology; cloud platform; Web-GIS; tangent-angle algorithm

## 引言

随着道路、桥梁、隧道等基础设施建设的加速推进,边坡工程问题逐渐成为研究重点。边坡是指由自然作用或人类活动形成的具有一定斜度的坡面<sup>[1]</sup>。欠稳定状态的边坡在自身重力、降雨、地震以及人类工程扰动等因素的影响下,可能会发生失稳破坏<sup>[2]</sup>。其中,最常见的边坡破坏类型主要有崩塌和滑坡<sup>[3]</sup>。当边坡高度和坡角达到一定程度时,其部分岩土体在重力作用下沿坡体内的软弱面或破坏带向下滑动,这种现象称为滑坡<sup>[4]</sup>。在各类边坡工程中,滑坡灾害发生频率最高、影响最大,对人民的生命财产造成巨大威胁。

随着科技水平的不断提高和监测技术的快速发展,自动化测量领域也发生了重大变革。地质灾害监测设备和手段已经从传统的人工测量发展到如今的各种自动化、智能化监测仪器<sup>[5]</sup>,如三维激光扫描技术<sup>[6]</sup>、全球导航卫星系统<sup>[7]</sup>(GNSS)、全球定位系统<sup>[8]</sup>(GPS)、测量机器人<sup>[9]</sup>、干涉合成孔径雷达<sup>[10]</sup>(InSAR)等。这些技术以其高精度、全天候、自动化等优势,越来越多地应用于矿山、边坡、隧道和建筑物的监测,并取得了良好效果。

国内外已有不少学者对关键勘察数据的采集及处理方法、技术进行研究,BENOIT等<sup>[11]</sup>在法国阿尔卑斯山南部的 Super-Sauze 滑坡利用低成本全球定位系统无线网络进行实地考察,通过将 InSAR 数据及降雨量等数据相关联,判断滑坡体是否安全;VILLALPANDO等<sup>[12]</sup>提出一个面向多源和多时态数据融合的新框架,用于描述滑坡事件特征,从而构建详细的三维滑坡模型;尚敏等<sup>[13]</sup>研究表明降雨是滑坡形变的重要因素,通过结合位移序列和降雨数据建立预测模型,可以提高预测结果的可靠性和可解释性。虽然上述研究在一定程度上实现了信息的统一管理和实时监测<sup>[14]</sup>,但在多源数据融合与应用方面<sup>[15]</sup>,只能对特定类型滑坡进行分析,通用性仍存在不足。

在监测关键勘察数据的综合智能处理技术平台构建方面,李丹<sup>[16]</sup>研究表明采用倾斜实景模型能够有效提高铁路勘察设计的精度与效率;李坤等<sup>[17]</sup>运用 GIS 平台对丽江—宁蒗公路两侧地质各评价指标进行空间分析,得出有效的滇西北地区地质灾害成因并规划了防治重点区域;PONZIANI等<sup>[18]</sup>为实现实时滑坡数据展示及风险预警,通过结合降雨量阈值、土壤湿度评估、定量降水预报及滑坡内部传感器监测数据,利用 Web-GIS 技术对意大利 Umbria 地区的滑坡进行建模,开发了一套滑坡风险评估和预警系统;OLYAZADEH等<sup>[19]</sup>采用空间数据库与关系型数据库相结合的方式,将滑坡监测数据和滑坡地理信息记录在 GeoJSON 文件中,并通过 Web-GIS 技术构建一个快速分析滑坡危险的平台;曹庆发等<sup>[20]</sup>基于地理信息系统(GIS)技术和 Web 应用,构建高速公路边坡滑坡实时监测预警系统,为边坡滑坡防治发挥了重要作用。以上监测关键勘察数据的数据处理系统和平台侧重于对边坡监测三维场景的可视化展示以及对边坡异常数据的预警,对边坡数据的自动化录入及处理分析、边坡变形的演化过程以及数据处理技术的通用化等方面研究较少。

利用数据监测云平台、大数据计算平台、Web-GIS 以及改进切线角识别<sup>[21]</sup>等先进技术,深入研究监测获得的变形时间序列数据,建立精准的分析模型。智能处理监测数据<sup>[22]</sup>使得边坡变形数据的连续监测和记录成为可能,能够全面、持续地追踪边坡变形的演化过程。这种方法实现了关键勘察数据的通用化综合智能处理技术,云平台能够实时传输和处理各种类型数据,使监测结果能够及时全面反映边坡变形情况,提升了预警的及时性。

## 1 数据库设计及数据导入流程

为实现通用化监测关键勘察数据的综合智能处理技术,需要对多种类型的数据进行分析,因此需要针对不同类型的数据存储进行分析。

### 1.1 数据库设计

对不同类型的数据进行数据库设计之前需要将数据进行分类,针对不同类型的数据,可以按照数据所需的存储要求将数据分为三类。

- (1) 传感器监测数据,对时间精准度要求高。
- (2) InSAR 数据,字段不固定且占用空间大。
- (3) 系统内部数据,关系性较强。

#### 1.1.1 传感器监测数据数据库

对于 GNSS、深层位移等传感器,由于是时序数据,对时间精确度要求较高,因此采用时序数据库进行存储。

InfluxDB 是一款专注于存储时序数据的数据库系统,其数据模型以测量(Measurement)、标签(Tags)和字段(Fields)的形式组织,使得对时间序列数据的存储和查询十分高效。存储引擎采用一些优化策略,如分段存储、压缩和缓存,以提供快速的数据存储和检索。InfluxDB 使用专门为时间序列数据设计的 Flux 语言作为查询语言,能够以直观的方式执行各种查询操作,包括范围查询、聚合操作、过滤和分组。

监测数据数据库中的 Measurement 按照传感器类型分开创建,并将传感器名称作为 Tags,传感器的监测数据测量值作为 Fields 进行存储。图 1 为裂缝传感器 PF1 的数据可视化界面。

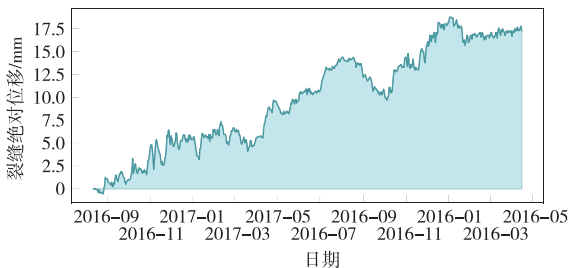


图 1 裂缝传感器 PF1 的数据可视化界面

Fig. 1 Data visualization interface of crack sensor PF1

#### 1.1.2 InSAR 监测数据数据库

InSAR 监测数据占用空间较大,字段较多且不固定,同时监测数据与经纬度相关,因此需要数据库对地理空间位置查询进行优化。对主流的非关系型数据库如 Couchbase、DynamoDB、Redis 以及 MongoDB 进行对比,最终选用 MongoDB 数据库进行存储。

MongoDB 本身是一个面向文档的 NoSQL 数据库。MongoDB 在其地理空间查询功能中使用 GeoJSON 格式,该格式可以表示点、线、面等地理空间要素。此外, MongoDB 具有良好的扩展性,能够处理大规模的数据存储需求。这些特性使得 MongoDB 特别适合用于存

储和管理大量地理数据。

InSAR 监测数据的存储方式为:以 InSAR 监测项目名作为表名,监测点的经纬度及时间作为字段对每个监测点的数据进行存储,如图 2 所示。

```
1 {
2   "D08210616": -6.045, "D082106124": 1.482, "D08210615": -3.369, "D08210617": -3.351, "D0821061206": 2.675, "D08210616": -2.969,
3   "latitude": 35.3819289, "longitude": 115.5959123, "height": 49.493, "D082106107": 0.59, "D0821061107": -4.42, "D082106151": -3.993,
4   "D082106158": -3.383, "D0821061913": 0.291, "D0821061312": -2.405, "D082106126": -2.265, "D082106111": -0.219, "D0821061201": -6.479,
5   "D082106102": -4.898, "ID": NumberInt("1"), "D0821061031": 3.865, "D082106112": 3.147, "D082106127": -1.717, "D0821061429": -2.688,
6   "D082106103": -2.398, "D082106128": -5.98, "D082106105": -2.041, "D082106104": -4.044, "D082106120": 1.771, "D08210619": 3.271,
7   "D082106122": -7.449, "D082106120": -6.425, "D0821061119": -4.478, "D082106120": 2.509, "D082106124": -1.448, "velocity": -4.745,
8 }
```

图 2 InSAR 监测数据存储格式

Fig. 2 Storage format of InSAR monitoring data

#### 1.1.3 系统数据库

系统内部数据例如传感器信息、滑坡信息等数据,关系性较强,需要选用关系型数据库进行存储。MySQL 以其开源免费、高性能和稳定性、简单灵活易用的特性被选为系统基础数据库。

系统基础数据库包括 user\_info(用户表)、slope\_info(滑坡项目表)、sensor\_info(传感器信息表)、sensor\_threshold(传感器阈值表)等数据表,如图 3 所示。

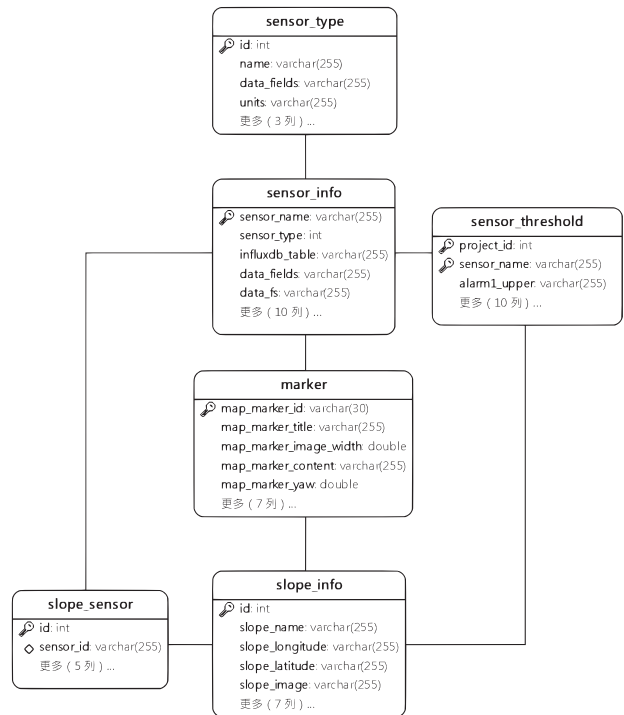


图 3 系统数据库设计

Fig. 3 System database design

### 1.2 数据导入流程

对于不同的监测数据,分为两种模式进行导入,人工录入的数据可以上传 Excel 文件,经过系统转化为可识别的数据存入数据库;而自动化监测数据可以自动调用接口存入数据库,不同数据类型监测数据能够自动分配数据库。数据导入流程如图 4 所示。

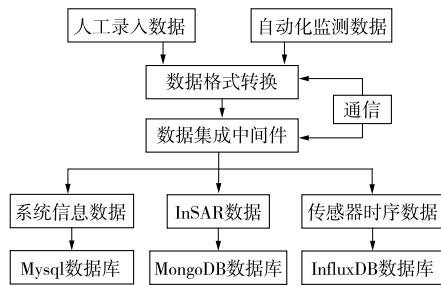


图 4 数据导入流程

Fig. 4 Data import process

## 2 云平台设计开发

云平台通过 Web-GIS 技术构建滑坡场景,多元展示各个监测数据对滑坡进程的影响。以平台构建的滑坡三维场景为基础,围绕多源监测数据录入及展示、滑坡深度自动识别、三维滑坡模型构建、InSAR 数据分析等功能进行开发,准确判断并反映边坡变形情况。

### 2.1 平台架构设计

通过对监测关键勘察数据的综合智能处理技术的需求进行分析,云平台以数据流为导向,其系统架构可分为前端交互层、网关控制层、前台应用层、中台服务层、数据存储层、支撑服务层六大部分,如图 5 所示。

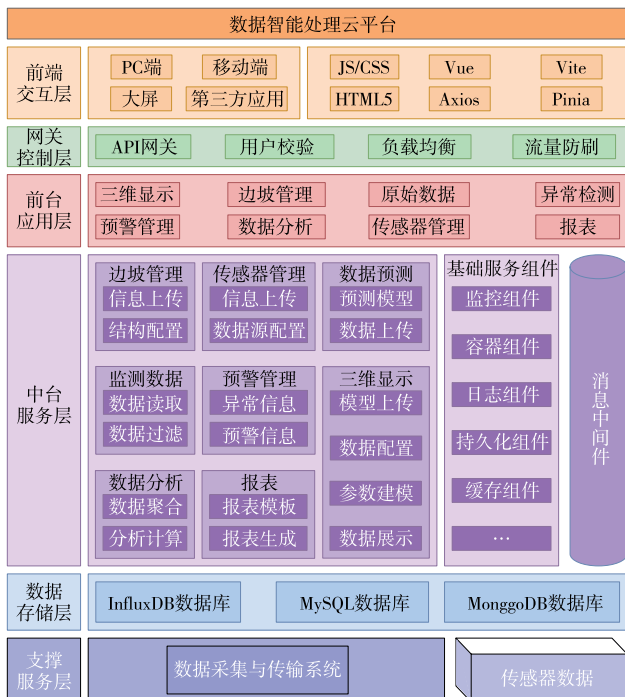


图 5 云平台系统整体架构

Fig. 5 Overall architecture of cloud platform system

系统采用 B/S 架构,其中前端交互层通过发送请求到网关控制层来获取需要展示的数据或提交用户输入的数据,网关控制层接收到前端交互层的请求后,进

行相应的路由、认证和授权,并将请求转发给合适的后台服务。通过调用中台服务层提供的接口来使用这些服务,以完成特定的业务逻辑。当接收到请求时,网关控制层可能会查询数据存储层中的数据库或数据仓库,并将结果返回给前端交互层或前台应用层。支撑服务层负责处理传感器采集的数据,并将其存入数据存储层中。通过各层之间的联动和交互,使得整个系统能够运行起来。

### 2.2 平台功能设计

结合业务需求,对平台功能进行设计,包括监测数据集成与管理、三维滑带识别、三维滑坡模型构建、三维可视化及监测数据一体化模块。如图 6 所示。实现的主要功能如下。

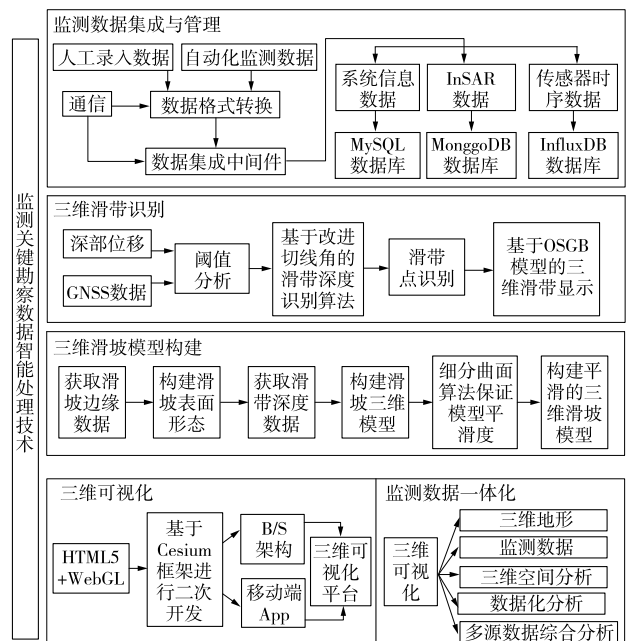


图 6 云平台功能设计

Fig. 6 Functional design of cloud platform

(1) 分析各类原始监测数据的结构特点,研究不同类型监测数据的存储、分析和计算方法,实现各类监测数据的自动化处理、分析和成果输出。

(2) 针对 GNSS 监测和滑坡深部位移监测孔位移特点,使用改进切线角识别算法识别滑坡滑面深度,使用户能够直观看到滑坡深度,并得出三维滑坡模型构建所需的滑带深度数据。

(3) 基于 WebGIS 技术对滑坡地图进行展示,并通过 WebGL 构建三维滑坡模型,使用户能够直观观察滑坡形态,并在此基础上开发各类控制面板,显示指定位置的监测数据折线图、数据分析图表、预警范围、形变区域判断等功能。

(4) 基于 InSAR 数据构建形变密集区数据集,生

成等值线、剖切生成沉降值变化曲线、结合 WebGIS 技术三维展示 InSAR 数据及分析结果。

(5) 搭建监测关键勘察数据智能处理云平台,包括智能监测系统、分布式大数据智能分析平台。

### 3 云平台应用

根据实际工程情况与项目需求,云平台能够实现数据的自动化导入、数据处理与成果输出。云平台在实际工程中的应用流程包括数据自动化录入、数据的智能分析处理、报表成果的输出等方面,如图 7 所示。

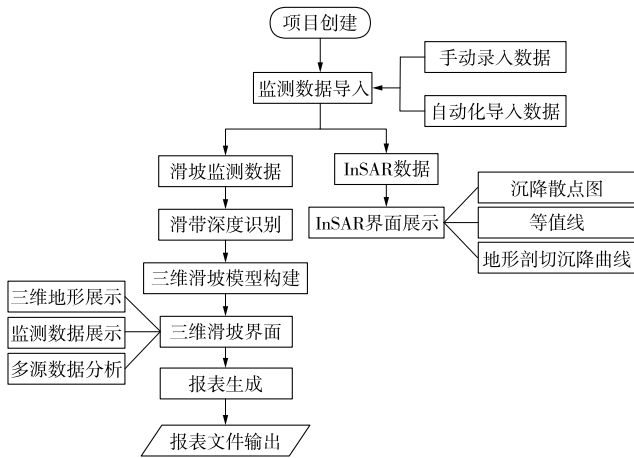


图 7 云平台应用流程

Fig. 7 Application process of cloud platform

#### 3.1 监测数据集成与管理

对于手动录入的数据,可以通过 Excel 进行录入,选择相应传感器即可在系统中下载模板,只需按照模板格式编辑好数据上传至系统即可录入数据,自动导入的数据则直接调用接口存入相应数据库中。

#### 3.2 三维滑带识别

通过改进切线角识别的方式识别 GNSS 以及深层位移监测数据,从而确定滑带位置和滑带深度<sup>[23]</sup>。传统的切线角识别滑带深度时,对于不同传感器,难以确定滑带深度角度值。因为根据平均斜率确定横坐标时并不能保证滑带深度的切线角具有区分度,因此需要对传统的切线角识别滑带深度方法进行改进。

对传统的切线角识别滑带深度方法进行改进,首先对算法进行改进,使其能够自动计算放缩比,预防切线角全都偏大或偏小的问题。

$$k = \frac{|d_{i+1} - d_i|}{|D_{i+1} - D_i|} \quad (1)$$

$$r = \frac{\tan \theta_{\max}}{\tan \gamma} \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan(kr) \quad (3)$$

式中, $d$  为累计绝对位移; $D$  为当前深度; $r$  为自适

应的横轴放缩比; $\theta_{\max}$  为累计绝对位移差值最大时的切线角; $\gamma$  为根据经验取得的标准值; $k$  为切线斜率。相较于传统算法,切线角  $\alpha = \arctan(kr)$  加入了  $r$  作为修正因子,使得滑坡处的切线角  $\alpha$  能够与未滑坡处的角度有明显区分,从而更为准确地识别滑带深度。

其次,为了减少异常点对滑带深度的判断,对判断为滑带深度的点引入第 3 点判断,取下一个点再次进行切线角判断,从而将异常点的影响降低,更为准确地获取滑带深度。如图 8 所示,蓝色线段代表该点为疑似滑带面,但是通过对下一点的切线角判断出该点可能为异常点而不是滑带面。而对于深度为 95 m 的点,即使取下一个点进行验证,仍然可以判断出该点为滑带深度。

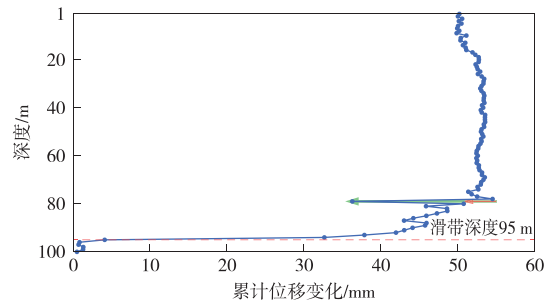


图 8 采用改进切线角算法识别滑带深度

Fig. 8 Identification of sliding zone depth using improved tangent-angle algorithm

将共 12 个深层位移传感器的数据通过改进切线角算法和传统切线角算法分别进行识别,传统算法识别正确比为 5/12,改进算法识别正确比为 12/12,证明了改进算法在滑坡监测中的有效性。

#### 3.3 三维滑坡模型构建

三维滑坡模型使用 Three.js 进行构建,并显示在三维可视化界面上。Three.js 是一个易于使用、轻量级、跨浏览器的通用 3D 渲染框架,核心数据是 3D 对象和三维模型,在视觉呈现、场景组织、3D 对象管理、动画、可扩展性等方面有独特优势,且可以与物理引擎很好地结合使用,因此适合用于三维滑坡模型构建。由于三维可视化界面使用的 Cesium 框架和 Three.js 坐标系并不相同,需要进行坐标转换。给定在两个坐标系中的 3 个对应点,可以求出这个变换矩阵。对于两个坐标系的 6 个点进行仿射变换,如图 9 所示。

仿射变换的形式为

$$\begin{bmatrix} x^B \\ y^B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^A \\ y^A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将两个坐标系的 3 个对应点代入该公式,可以找到矩阵元素  $a, b, c, d, e, f$  的值。一旦知道了变换矩阵

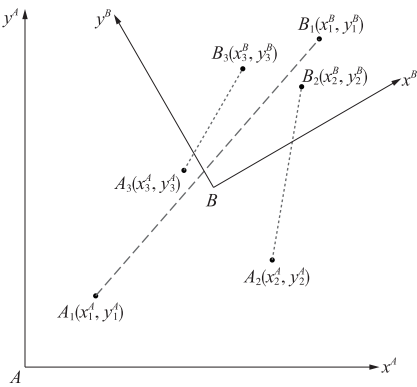


图 9 平面坐标系转换  
Fig. 9 Plane coordinate transformation

的元素值,就可以将坐标系  $A$  中的任何点  $(X_A, Y_A)$  转换为坐标系  $B$  中的点  $(X_B, Y_B)$ ,从而将 Cesium 和 Three.js 中的各点坐标对应。经过坐标变换后,后续构建的三维滑坡模型便能准确显示在三维可视化界面上。

三维模型的构建使用 Delaunay 三角剖分算法<sup>[24]</sup>,可以对顶点数组散点集进行三角剖分,并获取顶点索引。该算法的优势在于通过最近邻的 3 个点形成三角形,并且各线段(三角形的边)不相交。若任意两个相邻三角形形成的凸四边形的对角线可以互换,那么两个三角形 6 个内角中最小的角度不会变大。通过将每个三角形的最小角按升序排列,可以得到 Delaunay 三角网的排列使得数值最大化。当新增、删除或移动某一个顶点时,只会影响邻近的三角形,并且三角网最外层的边界形成一个凸多边形的外壳即初始三维模型,如图 10 所示。

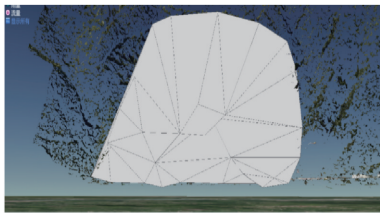


图 10 初始三维滑坡模型  
Fig. 10 Initial three-dimensional landslide model

在处理 Delaunay 三角剖分时,如果遇到 3 个点共线且无法形成有效的三角形,可以采取以下措施:忽略共线点,仅使用其他点进行剖分,以避免因个别共线点导致的剖分失败;对共线点进行微小随机移动,使其不再共线;在共线点两侧添加虚拟点,以帮助形成有效的三角形。

由于初始生成的三维滑坡模型三角网格较大,过渡生硬,与真实滑坡形态有较大差异,所以采用

Loop-Subdivision 进行网格细分和平滑处理<sup>[25]</sup>,过程如图 11 所示。

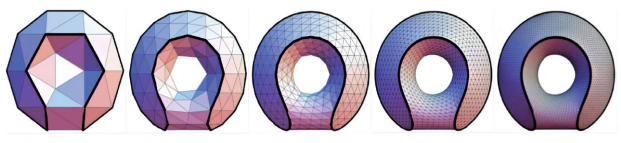


图 11 Loop-Subdivision 算法网格细分过程  
Fig. 11 Mesh subdivision process of Loop-Subdivision algorithm

经过网格细分后的三维滑坡模型更为圆滑,过渡更为自然,如图 12 所示。

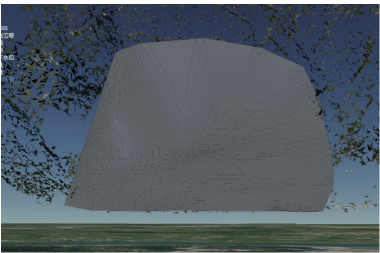


图 12 最终三维滑坡模型  
Fig. 12 Final three-dimensional landslide model

通过上述方法构建的三维模型具有模型构建速度快、直观性强等特点。和传统的点云模型长达几小时的生成时间相比,该方法仅需几秒即可准确构建三维滑坡模型,满足滑坡监测的及时性要求。

3.4 三维可视化

根据业务需求,需要在三维地球上显示三维边坡瓦片地图,Cesium 框架可以轻易实现在地图上加载显示瓦片地图,同时还能导入 Three.js 构建的三维滑坡模型,因此选择使用 Cesium 框架开发三维可视化界面。

使用 Nginx 进行反向代理配置,对特定的 URL 请求转发到指定的瓦片地图目录,并在 Cesium 中读取这个特定 URL,从而在三维地球加载出边坡的三维瓦片地图,如图 13 所示。



图 13 边坡三维瓦片地图  
Fig. 13 Three-dimensional tile map of slope

### 3.5 三维监测数据一体化

青田县祯埠乡锦水村下个寮山体滑坡体位于丽水市腊口镇和祯埠乡交界处,瓯江干流大溪河右岸。滑坡体左岸为 G330 国道,属于国家二级公路,下游 4.5 km 建有五里亭水利枢纽工程,总库容为 4 575 万  $\text{m}^3$ ,滑坡形态如图 14 所示。



图 14 青田县祯埠乡锦水村下个寮山体滑坡

Fig. 14 Xieliao landslide in Jinshui Village, Zhenbu Township, Qingtian County

由于青田县祯埠乡锦水村下个寮山体滑坡失稳的危害性大,因此需要对滑坡进行多类型的动态监测,从而及时反映滑坡变形情况。由于滑坡监测存在多类型的监测数据,若无关联分析会形成信息孤岛,无法最大程度利用信息有效价值。传统的极点等密度图和倾向玫瑰花图等滑坡形体分析方法并不能直观反映滑坡形态变化,只能大致确定滑坡的范围和滑动方向角。

Web-GIS 技术能够集成和可视化多类型监测数据,并与改进的切线角识别技术结合,分析边坡深层位移数据。这种集成不仅可以精确确定滑坡形变深度,还能直观展示边坡滑坡形态的变化,进而实现对边坡滑坡的预警功能。因此,将 Web-GIS 技术引入数据监测云平台,并结合改进切线角识别技术,对边坡深层位移数据进行分析,能够有效展示边坡滑坡形态的变化,并对滑坡进行及时预警。通过三维监测数据一体化,Web-GIS 技术将监测数据、三维地形、三维模型和多源数据综合分析等模块集成,使得用户能够在一个页面对滑坡状态进行多维度观察与分析。点击瓦片地图上的传感器后,用户可以直接查看监测数据及对应的分析图表。系统支持不同类型传感器的多源分析,并能够显示 InSAR 数据的沉降值散点图及等值线,从而实现了对多种关键勘察数据的综合智能处理。三维监测数据一体化界面如图 15 所示。

基于 InSAR 数据生成的沉降值散点图和沉降值等值线如图 16 所示。

## 4 结论

本文通过改进切线角识别算法、开发多源数据一体化管理云平台以及构建三维滑带模型的方法,主要



图 15 三维监测数据一体化界面

Fig. 15 Integrated interface of three-dimensional monitoring data

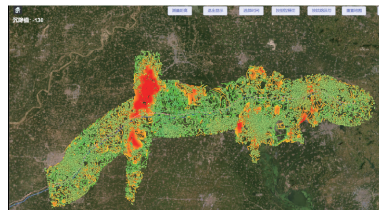


图 16 沉降值散点图和沉降值等值线

Fig. 16 Scatter plot and contours of settlement values

研究滑坡监测中的关键技术和数据处理问题,显著提升了滑坡监测精度与效率。主要结论如下。

(1)改进切线角识别滑带深度的方法。该算法通过自动计算放缩比,并结合平衡因子修正切线角,从而更加准确地反映滑坡的变形斜率。此外,针对异常点影响,提出异常点消除与验证机制,有效降低异常数据对滑带深度识别的干扰,显著提升算法的精度和适用性。

(2)开发多终端、跨平台的多源数据一体化管理云平台。传统监测平台在多源数据的集成管理和处理效率方面存在不足,难以有效整合和分析不同来源的监测数据。研究成果支持 GNSS、InSAR、深层位移等多种监测数据的自动化导入和处理,能够集成人工 Excel 数据、其他平台的监测输出数据及现场传感器数据。通过应用云计算与大数据技术,提升大规模监测数据处理的速度与准确性。

(3)构建三维滑带模型。通过将改进的切线角识别算法与 GNSS 监测数据、深层位移监测数据相结合,实现了滑带表面信息及深度的三维建模。采用 Three.js 技术,构建精确反映滑带空间结构与运动特征的三维模型,该模型具备跨平台展示的能力,能够在不同终端设备上实时显示滑坡的形态变化及运动过程。

综上所述,本研究在滑带深度识别、多源数据管理和三维模型构建等方面的创新成果,极大提升了滑坡监测的精度与效率,为滑坡预警与防灾减灾提供技术支持。

### 利益冲突声明/Conflict of Interests:

所有作者声明不存在利益冲突。

### 作者贡献/Authors' Contributions:

王亚飞、曾长贤等参与了研究设计,周根郑、李富年参与了论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

### 参考文献:

- [1] 冯治国,余颂,张伟,等.高山峡谷区某顺层边坡地质特征及稳定性研究[J].铁道标准设计,2023,67(5):13-19.  
FENG Zhiguo, YU Song, ZHANG Wei, et al. Study on Geological Characteristics and Stability of A Bedding Slope in Alpine Canyon Area[J]. Railway Standard Design, 2023,67(5):13-19.
- [2] GARIANO S L, GUZZETTI F. Landslides in a Changing Climate [J]. Earth-Science Reviews, 2016,162:227-252.
- [3] 韩志霞,邓帅,崔俊杰,等.吉图珥高铁延吉膨胀岩土工程特性与边坡治理研究[J].铁道标准设计,2024,68(3):37-42,64.  
HAN Zhixia, DENG Shuai, CUI Junjie, et al. Research on the Engineering Characteristics and Slope Treatment of Swelling Rocks in Yanji Area on Jilin-Tumen-Hunchun High-speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2024,68(3):37-42,64.
- [4] VENNARI C, GARIANO S L, ANTRONICO L, et al. Rainfall Thresholds for Shallow Landslide Occurrence in Calabria, Southern Italy[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014,14(2):317-330.
- [5] 孙凯强,刘惊灏,苏谦,等.基于地质 BIM 模型与有限元分析的铁路高边坡多源融合健康监测[J].铁道标准设计,2023,67(11):31-37,60.  
SUN Kaiqiang, LIU Jinghao, SU Qian, et al. Multi-source Fusion Health Monitoring of High Slope Based on Geological BIM Model and Finite Element Analysis [J]. Railway Standard Design, 2023,67(11):31-37,60.
- [6] ZHANG C, WANG M, ZHOU L M. Recognition Method of Basketball Players' Throwing Action Based on Image Segmentation[J]. International Journal of Biometrics, 2023,15(2):121-133.
- [7] GHORBANZADEH O, DIDEHBAN K, RASOULI H, et al. An Application of Sentinel-1, Sentinel-2, and GNSS Data for Landslide Susceptibility Mapping[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020,9(10):561.
- [8] LI L H, KUHLMANN H. Deformation Detection in the GPS Real-time Series by the Multiple Kalman Filters Model[J]. Journal of Surveying Engineering, 2010,136(4):157-164.
- [9] SCHETELIG B, PARR S, POTTHAST S, et al. Development of a Low Cost Robot System for Autonomous Measuring of Spatial Field Distributions[J]. Advances in Radio Science, 2012,10:1-5.
- [10] COLESANTI C, WASOWSKI J. Investigating Landslides with Space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry [J]. Engineering Geology, 2006,88(3):173-199.
- [11] BENOIT L, BRIOLE P, MARTIN O, et al. Monitoring Landslide Displacements with the Geocube Wireless Network of Low-cost GPS [J]. Engineering Geology, 2015,195:111-121.
- [12] VILLALPANDO F, TUXPAN J, RAMOS-LEAL J A, et al. New Framework Based on Fusion Information from Multiple Landslide Data Sources and 3D Visualization [J]. Journal of Earth Science, 2020,31(1):159-168.
- [13] 尚敏,张惠强,廖芬,等.考虑降雨滞后效应的八字门滑坡位移预测研究[J].自然灾害学报,2022,31(3):242-250.  
SHANG Min, ZHANG Huiqiang, LIAO Fen, et al. Displacement Prediction of Bazimen Landslide Considering Rainfall Lag Effect [J]. Journal of Natural Disasters, 2022,31(3):242-250.
- [14] LIU Y, XU C, HUANG B, et al. Landslide Displacement Prediction Based on Multi-source Data Fusion and Sensitivity States [J]. Engineering Geology, 2020,271:105608.
- [15] CALÒ F, ARDIZZONE F, CASTALDO R, et al. Enhanced Landslide Investigations through Advanced DInSAR Techniques: The Ivancich Case Study, Assisi, Italy [J]. Remote Sensing of Environment, 2014,142:69-82.
- [16] 李丹.倾斜摄影测量技术在铁路工程中的精度分析及应用[J].铁道标准设计,2021,65(2):19-25.  
LI Dan. Precision Analysis and Application of Oblique Photogrammetry in Railway Engineering [J]. Railway Standard Design, 2021,65(2):19-25.
- [17] 李坤,吕鹏.基于 GIS 和多因素作用关系矩阵变权的滇西北地质灾害评价[J].水利规划与设计,2024(9):92-98.  
LI Kun, LV Peng. Assessment of Geological Hazards in Northwestern Yunnan Based on GIS and Variable Weighting of Multi-factor Role Relationship Matrices [J]. Water Resources Planning and Design, 2024(9):92-98.
- [18] PONZIANI F, STELLUTI M, BERNI N. Development of a WEB-GIS Real-time Dynamic Landslide Risk Scenarios Procedure-Umbria Region Civil Protection Early Warning System, a Case Study [J]. PeerJ PrePrints, 2016,4:e2288.
- [19] OLYAZADEH R, SUDMEIER-RIEUX K, JABOYEDOFF M, et al. An Offline-Online Web-GIS Android Application for Fast Data Acquisition of Landslide Hazard and Risk [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017,17(4):549-561.
- [20] 曹庆发,倪昌双.基于 GIS 的高速公路边坡监测预警系统[J].中国交通信息化,2024(S1):414-417.  
CAO Qingfa, NI Changshuang. Monitoring and Early Warning System of Expressway Slope Based on GIS [J]. China ITS Journal, 2024(S1):414-417.
- [21] MCKEAN J, ROERING J. Objective Landslide Detection and Surface Morphology Mapping Using High-resolution Airborne Laser Altimetry [J]. Geomorphology, 2004,57(3/4):331-351.
- [22] MELO A, CÂMARA M M, PINTO J C. Data-driven Process Monitoring and Fault Diagnosis: a Comprehensive Survey [J]. Processes, 2024,12(2):251.
- [23] AMHAZ R, CHAMBON S, IDIER J, et al. Automatic Crack Detection on Two-dimensional Pavement Images: an Algorithm Based on Minimal Path Selection [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016,17(10):2718-2729.
- [24] WU T Y, ZHANG J F, DAI Y J, et al. Implementation of IDEAL Algorithm Based on Delaunay Triangular Mesh for 2D - compressible Flows [J]. Engineering Computations, 2024,41(3):630-654.
- [25] MIN L, CHEN Y, WANG H C, et al. Loop Adaptive Subdivision Surface [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019,1168:022016.

(编辑:邓帅)