引文格式：付兵杰,夏金梧,丁凡桠,等. 基于SpringBoot和Cesium的边坡声发射监测系统研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 111-115. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.11.027

基于 SpringBoot 和 Cesium 的边坡声发射监测系统研究

付兵杰[1,2]，夏金梧[1,2]，丁凡桠[1,2]，李　书[1,2]，范　萌[1,2]，李亚虎[1,2]
（1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010；2. 水利部长江勘测技术研究所，湖北 武汉 430011）

摘　要：传统边坡声发射监测系统多采用C/S架构，数据展示和分析以客户端软件为主，缺少浏览器端三维场景构建，在系统兼容、升级拓展、数据共享和用户体验等方面有待提升，且声发射相关业务的动态效果仿真也存在一定的探索空间。鉴于此，以湖北省秭归县郭家坝镇边坡、江西省新余市某矿山边坡为例，基于SpringBoot前后端分离的服务架构和Cesium三维可视化平台，设计并构建了B/S架构下的边坡声发射监测系统，解决了多源多维异构数据的融合、发布与可视化以及探头扫描和声源扩散的动态效果仿真等技术问题，实现了三维场景可视化、监测数据管理、在线统计分析、监测预警预报、系统设置等功能，为边坡地质灾害在线智能监测提供了全方位、立体化、动态化的示范性应用。

关键词：SpringBoot；Cesium；声发射；边坡
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）11-0111-05

Research on Slope Acoustic Emission Monitoring System Based on SpringBoot and Cesium

FU Bingjie[1,2], XIA Jinwu[1,2], DING Fanya[1,2], LI Shu[1,2], FAN Meng[1,2], LI Yahu[1,2]
(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
2. Changjiang Survey Institute of MWR, Wuhan 430011, China)

Abstract: The traditional slope acoustic emission monitoring system mostly adopts C/S architecture, and the data display and analysis is mainly based on client-side software, lacking intuitive 3D scene construction on browser-side, which needs to be improved in system compatibility, upgrade and expansion, data sharing and user experience, and there is also a certain exploration space for dynamic effect simulation of acoustic emission related business. In view of the above problems, taking the slope of Guojiaba Town in Zigui County, Hubei Province and a mine slope in Xinyu City, Jiangxi Province for example, we designed and constructed a slope acoustic emission monitoring system in B/S architecture based on the SpringBoot(a service architecture that separated the front and back sides) and Cesium(a 3D visualization platform), which could solve the technical problems of multi-source multi-dimensional heterogeneous data fusion, release and visualization, probe scanning and dynamic effect simulation of acoustic emission source diffusion, realize the functions of 3D scene visualization, monitoring data management, online statistical analysis, monitoring early warning and forecast, system setting and so on, and provide an all-round, 3D and dynamic demonstration application for online intelligent monitoring of slope geological disasters.

Key words: SpringBoot, Cesium, acoustic emission, slope

岩体声发射是指岩体内部的成分结构和存在的缺陷等自然因素在外加荷载作用下，应变能积蓄到特定阈值，以弹性波的形式释放，由声发射源向四周扩散所产生的现象[1-2]。声发射技术在水利水电枢纽区开挖形成的人工边坡以及自然高危边坡，尤其是水库建设中形成的库区崩塌型岸坡、硬质岩边坡等临滑时期稳定性监测预报方面具有较强的优势。声发射的水平、声源的空间分布直接反映边坡的变形动态。通过合理的声发射接收信号布设方案，监测滑坡或崩塌体临滑时产生的声发射信号；再利用声发射声源定位功能，定位临滑点，对滑坡变形过程进行实时动态监控和预警预报，追踪滑坡破裂面的发展，从而准确评价滑坡的稳定性。传统边坡声发射监测系统多采用C/S架构，数据库存储在本地，数据展示和分析以客户端软件为主，缺少浏览器端直观的三维场景构建，适合在局域网中运行，在系统兼容、升级拓展、数据共享和用户体验等方面有待提升。随着Web技术的发展，前后端分离的B/S架构逐渐成为软件设计和开发的主流

收稿日期：2022-04-12。
项目来源：长江勘测规划设计研究有限责任公司2020年度自主创新资助项目（CX2020Z35）。
第一作者简介：付兵杰（1990—），硕士，研究方向为水利信息化和GIS应用，E-mail：1294796444@qq.com。

模式，SpringBoot、Cesium等相关技术被广泛应用于水质监测[3]、动态洪涝管理[4-5]、矿山管理[6]、水文预报[7]、流域虚拟场景搭建[8]、地下三维管网[9]等领域，可有效弥补C/S架构的不足。

本文以湖北省秭归县郭家坝镇边坡、江西省新余市某矿山边坡为例，基于SpringBoot[10-11]和Cesium[12-13]设计并构建了B/S架构下的边坡声发射监测系统。系统将数据的获取、存储和发布设计为独立的后端数据模块，前端通过API接口获取后端数据，实现了前、后端分离；设计了三维场景可视化、监测数据管理、在线统计分析、监测预警预报、系统设置等功能，为边坡地质灾害在线智能监测提供了全方位、立体化、动态化的示范性应用。

1 系统设计

1.1 总体架构设计

根据边坡声发射监测的业务需求和应用场景，系统采用5层架构，即支撑层、数据层、服务层、应用层和用户层。支撑层主要为系统提供软硬件底层支持，包括数据获取终端和基础设施，是保障系统稳定高效运行的必要前提。声发射监测仪用于声发射信号的采集、降噪、优化和定位计算等操作。无人机可搭载航测相机、激光雷达等设备，用于获取边坡影像、地形等相关地理空间数据。数据处理软件包括CesiumLab、ArcGIS、ERDAS等，用于影像和地形数据的输入、输出、增强、纠正、融合、拼接、裁剪和切片等基础操作。数据层主要负责各类数据的统一组织、存储和管理。地理空间数据属于非结构化数据，用于提供统一的空间框架支撑。业务数据和支撑数据为结构化数据，存储在关系型数据库中，业务数据主要包括监测场地、探头传感器、声发射源、信号波形、参数设置、操作命令等；支撑数据主要包括用户信息、权限控制、日志数据等。服务层以服务的形式对数据进行处理、整合和发布。Web服务器是服务发布和前后端数据交互通信的基础载体。地理空间数据引擎基于Cesium API发布地理信息服务，包括影像瓦片服务、地形瓦片服务、在线基础地理数据公共服务、声源和探头对象动态标注服务等。关系型数据引擎以RESTful风格API的形式对外发布服务，包括声源属性查询服务、探头属性查询服务、信号波形查询服务、声源关联探头分析服务、声源关联信号波形查询服务、报表统计分析服务、用户管理服务、系统设置服务等。应用层基于服务层的接口，通过浏览器端可视化界面实现数据的在线浏览、查询、管理和分析，包括三维场景可视化、监测数据管理、在线统计分析、监测预警预报、系统设置等功能。用户层主要根据不同权限对用户角色进行划分，普通用户负责三维可视化场景、在线统计分析图表、预警预报结果的浏览查看；后台管理人员负责监测数据的编辑与管理；超级管理员负责系统设置和用户管理，以及普通用户和后台管理员的全部权限。

1.2 声发射监测仪的结构设计

声发射监测仪通常包括探头、信号采集器、通信传输模块、上位机、蓄电池等部分。探头按照一定的规则布设在边坡上，声发射信号由探头传感器获取和转换后，经信号采集器处理、采集、收发，由通信传输单元发送至上位机，经降噪、优化和定位计算等处理，得到声源发生位置、预警等级等信息，再上传至Web服务器的关系型数据库中。

1.3 功能模块设计

系统功能模块包括5个一级模块和18个二级模块，如图1所示。

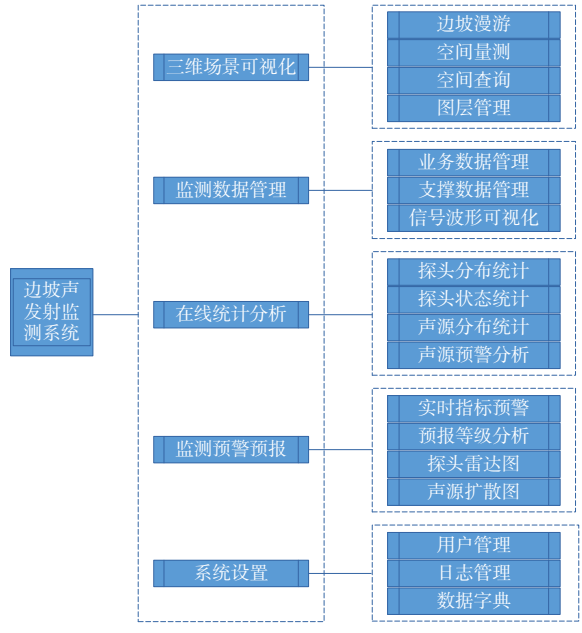


图1 系统功能模块

2 关键技术

2.1 声发射源定位计算

假设某一声发射源信号被探头 i、j 响应，则信号传播方程式为：

$$s_i(x,y,z)=(t_i-t)v=\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2+(z_i-z)^2} \quad (1)$$

$$s_j(x,y,z)=(t_j-t)v=\sqrt{(x_j-x)^2+(y_j-y)^2+(z_j-z)^2} \quad (2)$$

式中，x、y、z为声发射源的空间坐标；t为信号发射时间；v为信号传播速度；$s_i(x, y, z)$、$s_j(x, y, z)$分别为探头i、j到声发射源的响应距离；t_i、t_j分别为探头i、j的信号接收时间；(x_i, y_i, z_i)、(x_j, y_j, z_j)分别为探头i、j的空间坐标。

在实际应用中，边坡的内部构成总体差异不大，视为各向同性均匀材料，即假定声发射信号在边坡内部的传播速度是相等的，一般可通过实验方法测定。

两个探头响应距离的差值为：

$$s_{ij}=\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2+(z_i-z)^2}-\sqrt{(x_j-x)^2+(y_j-y)^2+(z_j-z)^2} \tag{3}$$

将s_{ij}、x_i、y_i、z_i、x_j、y_j、z_j视为已知观测值，x、y、z视为未知量，则线性化误差方程为：

$$v_{ij}=\frac{\partial s_{ij}}{\partial x}\mathrm{d}x+\frac{\partial s_{ij}}{\partial y}\mathrm{d}y+\frac{\partial s_{ij}}{\partial z}\mathrm{d}z-l_{ij} \tag{4}$$

式中，$l_{ij}=(s_{ij})-s_{ij}$；(s_{ij})为将未知量近似值代入公式计算所得。

当声发射源信号被多个探头响应时，可联立公式构成方程组，矩阵形式为：

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{L} \tag{5}$$

根据最小二乘法，其法方程为：

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PAX}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PL} \tag{6}$$

可求出未知数的解为：

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PA})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PL} \tag{7}$$

迭代过程中，当未知量改正数小于规定阈值时，迭代过程终止。理论上建立4个方程组即可求解声发射源的空间坐标；实际应用中为了提高解算精度，常有多余观测方程，即至少需要4个探头响应到该声发射源的信号。

2.2　多源多维异构数据的融合、发布与可视化

根据系统总体架构，数据层包括地理空间数据、业务数据、支撑数据3类，具有文本、信号、影像、地形、矢量等多种形式，表现出数据量大、来源各异、维度多样、结构不统一、时空兼顾等特点。为保证数据的完整性和一致性，需对其进行分类、提取、处理、关联和融合，规化到统一的空间基准和时间基准上，构建多源多维异构数据的一体化存储和发布体系，实现浏览器端统一高效的数据可视化框架。

声发射监测业务数据和支撑数据包括监测场地、探头、声发射源等空间对象的位置和属性信息，以及系统实施过程中产生的大量非空间数据，如监测仪器布设时的参数设置数据、运行时的操作命令数据和日志数据、事件响应时的信号波形数据等。将这些数据统一设计为结构化数据，存储在关系型数据库中，可在数据输入时保证时空尺度、格式、编码、分类的一致性。各数据表格通过唯一的标识ID进行关联，如声发射源表通过ID关联监测场地、探头和波形信号等。系统布设时将监测场地和探头的位置、属性信息以及参数设置信息录入数据库；系统运行时将操作命令、日志和信号波形数据以固定格式实时上传至数据库，声发射源的位置、属性信息经监测仪处理和计算后上传。业务数据和支撑数据具有数据量大、时空性强、变化频率高等特点，系统采用基于服务的方式对其进行统一发布，可快速实现信息共享和版本更新。用户通过服务定义的API接口调用数据，保证了数据的安全性和一致性，实现了空间对象与非空间数据在接口层面的融合。

地理空间数据包括三维场景数据、矢量图层数据和在线基础地理数据。三维场景数据主要利用无人机平台搭载航测相机或激光雷达，多角度获取边坡及其周边的真实影像数据和地形数据，再利用三维建模软件，经导入、对齐、密集点云生成、纹理生成等步骤获取。由于三维场景数据特别是高清影像往往数据量较大，直接以文件的形式提供服务，会影响浏览速度和用户体验。系统采用预生成瓦片服务的形式，即预先在服务器中对影像和地形数据进行分级切片，浏览器端调用时根据显示范围和比例尺对切片数据进行拼接后返回客户端，经Cesium相关API实现模型渲染、融合和场景构建。影像和地形在切片时要保证空间参考、切片层级、算法的一致性，避免融合时出现裂缝和鬼影。为了构建矢量图层数据，基于Ajax调用API接口获取探头、声发射源的信息，基于三维场景底图数据进行几何要素的绘制和标注，实现了监测对象结构化数据向矢量图层数据的转化。利用天地图API加载在线基础地理数据，与矢量图层数据、三维场景数据实现在Cesium引擎环境统一时空基准下的融合。此外，在三维场景中对监测对象矢量进行点击查询操作时，可基于Ajax调用相关联的非空间数据在浏览器端进行浏览和分析，实现空间数据与非空间数据在用户界面的融合。

结构化、更新频率高的业务数据和支撑数据，通过服务接口的形式动态提供；数据量大、更新频率低的三维场景数据采用预生成瓦片服务的形式提供，这种发布方式实现了监测对象、非空间数据与三维场景数据在浏览器端的有效融合，提升了浏览效率，保证

了数据的快速更新，且兼容性较好，不受操作系统和浏览器的限制，为未来应用拓展至智能手机平台提供了基础。

2.3 探头雷达扫描和声源波形扩散的动态效果仿真

基于探头和声源对象的二维属性信息，对探头扫描和声源扩散进行动态效果仿真，可增加监测数据的直观性、形象性和生动性，提升用户体验。PostProcessStage是Cesium中的场景后期处理类，用于对场景或对象进行纹理、颜色渲染。系统首先基于Ajax请求从RESTful风格API接口获取探头、声源对象的个数和属性信息，并利用PostProcessStageLibrary创建探头、声源的“效果对象”，得到多个PostProcessStageComposite；然后将其加入PostProcessStageCollection集合中，并设置fragmentShader、uniforms等参数信息；最后根据对象加入的顺序，进行屏幕后期处理，将仿真效果实时绘制到屏幕上。考虑到动态效果与地形起伏的一致性，避免多视角浏览时动态效果的“漂浮”现象，系统设置“效果对象”贴地显示。

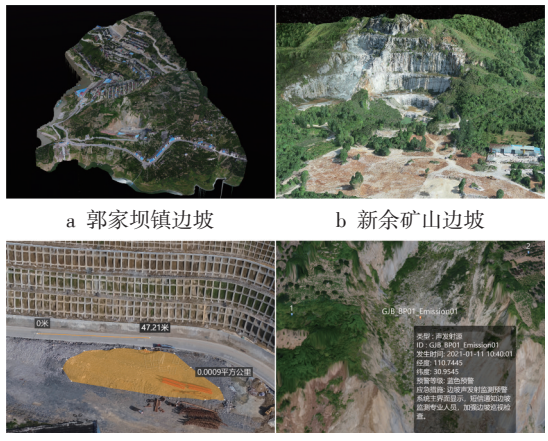
根据探头的扫描特性和声源的发射扩散特性，分别采用雷达扫描、波形扩散的形式对探头、声源进行动态模拟。设置PostProcessStage类的fragmentShader、uniforms参数，可实现对特效位置、颜色、纹理和动画的设计。将探头和声源的属性信息融入这些参数中，可实现二维属性与三维特效的动态绑定和有机统一。对于探头，其位置属性为雷达扫描中心，探测距离为雷达扫描半径，探测周期为雷达扫描持续时间；对于声源，其位置属性为波形扩散中心，发射最大距离为波形扩散半径，发射周期为波形扩散持续时间。

3 系统实现

系统以湖北省秭归县郭家坝镇边坡、江西省新余市某矿山边坡为例构建。声发射监测仪按照一定的规则布设在边坡上，利用大疆无人机M300获取影像、地形数据，基于Cesium Lab软件进行切片，影像切片采用PNG格式，地形切片采用Terrain格式。业务数据和支撑数据存储在MySQL数据库中。系统采用B/S架构，Web应用服务器采用Tomcat，后端采用Spring-Boot、MyBatis[11]技术实现RESTful[7]风格的API接口体系，以JAR包的形式发布服务；前端采用HTML、Javascript、CSS语言实现系统界面，基于Ajax技术提交请求到后端，服务器收到请求后调用JAR包响应，获取数据后在前端进行渲染和展示，利用Cesium作为影像、地形数据和监测对象的三维可视化引擎。

3.1 三维场景可视化

三维场景可视化主要包括监测场地的边坡漫游、空间量测、空间查询、图层管理等功能。边坡漫游主要包括平移、放大缩小、视角调整、地图复位、三维漫游等地图操作，当前位置（经纬度、视角高）、视角（航向角、俯仰角）、比例尺的实时显示以及指北针等功能。空间量测主要包括距离、面积的不间断量测以及量测结果的清除。空间查询主要包括监测边坡、探头、声源的属性查询。图层管理主要包括天地图影像、天地图地名、探头、声源等图层的管理。湖北省秭归县郭家坝镇边坡、江西省新余市某矿山边坡的三维场景构建以及空间量测、空间查询功能见图2。



a 郭家坝镇边坡　b 新余矿山边坡

c 空间量测　d 空间查询

图2 三维场景可视化结果

3.2 监测数据管理

监测数据管理主要包括业务数据和支撑数据表格的查询、编辑、排序、筛选、导出和打印等功能以及信号波形数据的可视化，可分为声发射源、探头、波形数据、参数设置、状态/环境5类。声发射信号波形数据可视化见图3，支持数据视图、图片保存、柱状图/折线图切换。

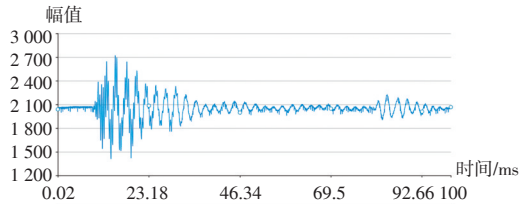


图3 声发射信号波形数据可视化

3.3 在线统计分析

在线统计分析主要对探头、声发射源等监测对象的分布和状态信息进行统计汇总、关联分析，以柱状图和饼图的形式展现，便于用户了解相关情况。统计图表基于Ajax请求的统计数据和ECharts[10]插件实现（图4）。探头和声源的分布主要统计各监测场地的数

量；探头状态主要统计各监测场地正常运行、待维修、维修中、未启用的探头数目；声源预警主要统计各监测场地红色预警、橙色预警、黄色预警、蓝色预警的声源数目。边坡预警等级划分根据GB50330–2013《建筑边坡工程技术规范》和《三峡库区高切坡监测预警系统实施方案》等相关规程规范确定。



图4　在线统计分析

3.4　监测预警预报

监测预警预报主要是对探头扫描监测、声发射源扩散进行模拟仿真，以及对一些关注的汇总参数和预警指标进行统计和时空分析，便于用户及时获取预警险情，包括实时指标预警、预报等级分析、探头雷达图和声源扩散图。实时指标预警主要负责实时监测探头、声源、信号波形、用户等总数以及红色、橙色、黄色、蓝色预警声源数目。预报等级分析主要统计不同等级声源的分布情况和随时间的变化趋势。探头雷达图主要根据传感器的监测范围，在三维场景中进行贴地模拟、扫描仿真。声源扩散图主要根据声源的扩散范围和预警等级，在三维场景中进行贴地模拟、扩散仿真。图5中探头雷达采用蓝色扫描线，声源扩散图采用红色波纹。

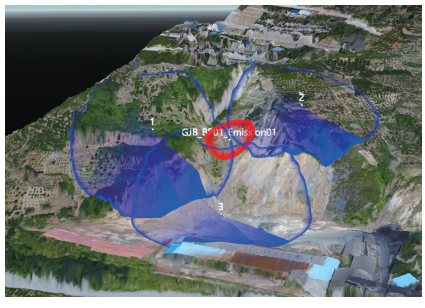


图5　探头雷达图和声源扩散图

3.5　系统设置

系统设置主要包括用户数据、日志数据、数据字典的查询、编辑、添加、删除、导出和打印等功能。

4　结　语

针对边坡声发射监测问题，采用B/S开发架构，设计并实现了一套边坡声发射监测系统。后端基于SpringBoot+MyBatis统一封装业务并发布RESTful风格的API接口，代码易维护，数据共享便捷，扩展性强，兼容性好；前端基于Cesium+LayUI+ECharts进行了界面设计和三维可视化仿真，数据表现形式丰富，用户体验直观明了。该系统在多源多维异构数据的融合、发布与可视化，探头雷达扫描和声源波形扩散的动态效果仿真等方面进行了改进和完善，具有一定的实际应用价值和推广前景，在功能的丰富程度和应用平台（如智能手机）拓展方面有进一步完善的空间。

参考文献

[1] 李刚，肖繁，刘浩，等. 边坡声发射监测研究综述[J]. 长江科学院院报，2018，35(11):57-62

[2] 王岩，路桂娟，王瑶，等. 声发射技术在土木工程中的应用研究综述[J]. 水利水电科技进展，2012，32(4):89-94

[3] 马聪，华亮，羌予践. 一种基于SpringBoot架构下的水质监测系统设计[J]. 电子器件，2021，44(5):1 109-1 114

[4] 寇嘉玮，董增川，罗赟，等. 基于WebGIS的洪泽湖地区动态洪涝管理信息系统[J]. 长江科学院院报，2019，36(1):145-150

[5] 寇嘉玮，董增川，朱振业. 洪泽湖周边滞洪区暴雨内涝预报预警系统研究[J]. 人民长江，2018，49(10):6-10

[6] 王东明，杨天鸿，薛鹏展，等. 基于B/S架构的抚顺西露天矿WebGIS系统构建[J]. 金属矿山，2021(5):56-64

[7] 邵健伟，梁忠民，王军，等. 基于SpringBoot框架的中长期水文预报系统设计与开发[J]. 水电能源科学，2020，38(4):6-9

[8] 乐世华，张煦，张尚弘，等. 基于Cesium的WebGIS流域虚拟场景搭建[J]. 水利水电技术，2018，49(5):90-96

[9] 窦世卿，梁富翔，徐勇，等. 基于Cesium的地下三维管网3D Tiles模型构建与可视化[J]. 科学技术与工程，2021，21(18):7 439-7 446

[10] 章锐，陈树勇，刘道伟，等. 基于ECharts的电网Web可视化研究及应用[J]. 电测与仪表，2017，54(19):59-66

[11] 牛志伟，晁阳，齐慧君. 基于SSM框架的大坝监测数据管理系统设计[J]. 水电能源科学，2020，38(2):91-94

[12] 王金娜，焦学军，宋会传，等. 基于CESIUM的露天矿山实景三维智能监管技术研究[J]. 地理空间信息，2021，19(8):93-96

[13] 吴泳，黄天勇，闻平. 基于Cesium的虚拟旅游系统研究[J]. 地理空间信息，2021，19(11):155-157