

文章编号: 1674—8247(2021)05—0023—08
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.005

400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测系统研究

袁 焦 王 珣 李高丰 刘 勇 伏 坤

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:高速铁路沿线地质灾害及基础设施健康状态作为影响行车安全的关键因素之一,已成为铁路行业的研究热点。本文针对性地开展了 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测的需求分析,结合国内外自然灾害监测系统的研究现状和我国智能高速铁路的发展规划,充分依托物联网、5G、云计算、大数据等技术手段,提出了适用于 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测的系统架构、系统组成及部署方案,研究了监测数据传输、数据加密、数据融合等关键技术的解决方案,为监测系统设计、研发与应用提供了新思路、新手段。

关键词:400 km/h 高速铁路; 地质灾害; 基础设施; 监测; 系统

中图分类号:U298

文献标志码:A

Study on Geological Hazards and Infrastructure Monitoring System for 400 km/h High-speed Railway

YUAN Jiao WANG Xun LI Gaofeng LIU Yong FU Kun

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: As one of the key factors affecting the safety of train operation, geological disasters along the high-speed railway and the health status of infrastructure have become the research focus of the railway industry. In this paper, the demand analysis of geological disaster and infrastructure monitoring for 400 km/h high-speed railway is carried out. The system architecture, system composition, and deployment scheme applicable to geological disaster and infrastructure monitoring for 400 km/h high-speed railway are put forward combining the research status of the natural disaster monitoring systems at home and abroad and the development plan of intelligent high-speed railway in China, and fully relying on the technical means of Internet of Things, 5G, cloud computing and big data. And the solutions of key technologies such as monitoring data transmission, data encryption, and data fusion are studied.

Key words: 400 km/h high-speed railway; geological disasters; infrastructure; monitoring; system

近年来,在人工智能、大数据、云计算、物联网、BIM 等新技术的驱动下,数字化、信息化、智能化发展对铁路的建造、运营及维护带来了革命性的变化。中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)2020 年发布的《智能高速铁路体系架构 1.0》提出,智

能高铁由智能建造、智能装备、智能运营三大板块组成,智能检测监测方向作为智能装备板块的重要组成部分,是提升高速铁路运输安全的关键环节,它包括了基础设施检测监测、自然灾害监测等创新内容^[1]。随着我国铁路逐步进入 400 km/h 时代,影响行车安全的

收稿日期:2021-03-01

作者简介:袁焦(1988-),男,高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KSNQ202054)

引文格式:袁焦,王珣,李高丰,等. 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测系统研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):23-30.

YUAN Jiao, WANG Xun, LI Gaofeng, et al. Study on Geological Hazards and Infrastructure Monitoring System for 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):23-30.

地质灾害及基础设施监测成为了铁路行业研究的热点。

日本对铁路灾害的防范工作十分重视,防灾安全监控系统是日本新干线 Cosmos 系统(列车运行综合管理系统)的一个重要子系统,对地震、强风、暴雨、大雪等自然灾害加强检测监测,确保铁路的安全运营。法国地中海线高速铁路最高运行速度达 350 km/h,其灾害监测系统均按线建设并独立运行,主要包括风、雨、雪、地震及立交桥下落物监测。德国高速铁路采用新型防灾报警系统 MAS90,除监督线路装备的运用状况外,还可识别并及时报告环境对行车安全的影响及移动设备发生破损的情况。美国和英国自八十年代中后期就在多座桥梁上建立了结构健康监测系统,监测大桥在车辆与风荷载作用下的挠度、振动、应变等响应。

我国高速铁路目前均设置了自然灾害及异物侵限监测系统,为运营期铁路行车提供安全保障,但尚未针对地质灾害及基础设施监测开展全面、统一的系统设计研究。本文借鉴高速铁路自然灾害及异物侵限监测系统设计与推广应用的经验,立足于 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测的实际需求,旨在构建适应于 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测的新体系,形成 400 km/h 高速铁路地质灾害和基础设施监测系统的成套解决方案。

1 400 km/h 高速铁路监测需求

1.1 地质灾害监测需求

我国地质灾害复杂多样,灾害频繁,其中铁路常见的地质灾害类型主要有滑坡、泥石流、崩塌落石三类。

滑坡是指斜坡上的土体或岩体,受河流冲刷、地下水活动、地震及人工切坡等因素的影响,致使部分或全部土体(或岩体)在重力作用下,沿着地面软弱面(或软弱带)整体地或分散地顺坡向下滑动的地质现象。滑坡会破坏线路,中断行车,危害站场,砸坏站房,毁坏铁路桥梁及其他设施,错断隧道,摧毁明洞,造成车翻人亡的行车事故。

泥石流是指在山区或其他沟谷深壑、地形险峻的地区,因暴雨、暴雪或其他自然灾害引发的山体滑坡并携带大量泥沙以及石块的特殊洪流。泥石流具有突发性、流速快、流量大、物质容量大、破坏力强等特点,对高速铁路桥梁、路基等基础设施带来巨大威胁。

崩塌落石是山区常见的一种地质灾害。在山体自然风化、降雨侵蚀及人为破坏植被等因素的作用下,山体易发生大小规模不一的落石,若发生在高速铁路区域范围内,将会严重威胁高速铁路的行车安全^[2]。

在外界因素(如降水、地震、人类工程活动等)的影响下,每年都有大量崩滑流灾害单体或链式灾害发生,给高速铁路建造与运营安全带来极大的威胁。因此,建立地质灾害监测系统是预防地质灾害破坏的必然措施和有效手段。

1.2 基础设施监测需求

高速铁路路基、桥梁、隧道、轨道等线下基础设施是列车高速、安全、平稳、可靠运行的保障。开展 400 km/h 高速铁路线下基础设施监测是实现线下基础设施状态全面感知、安全风险预警、故障诊断预测、趋势变化分析,推进实施精准维修和预防性状态修,提高维修效率,降低维修成本的重要手段,是确保铁路持续安全运营的重要技防保障^[3]。

1.2.1 路基

400 km/h 高速铁路对路基整体强度及动态服役能力的要求高,由于列车车速高、行车密度大,路基承受的荷载强度大、效应大,影响路基的结构形态与稳定性。为及时掌握运营期路基及边坡的稳定性和变形情况,需选择典型过渡段、不良地质区段(采空区、软土地带、岩溶地带、风化岩、滑坡等)路基、高大边坡等进行监测,及时掌握路基及边坡变形的发展趋势和稳定状态,提高维修养护效能,为线路的安全运营提供保障。

1.2.2 隧道

隧道穿越地质条件复杂地层(如新黄土、粉细砂层、软岩、长大断层破碎带、岩溶、煤层、高地温、高地应力、采空区等)时,存在发生隧道拱顶坍塌、围岩大变形及底部结构鼓裂的风险。运营期,在 400 km/h 高速列车频繁动荷载的作用下,特殊地段隧道拱墙结构、隧底结构受力加剧,加速了隧道的衬砌变形和基底结构劣化,威胁行车安全。隧道“检养修”面临着纵深长、空间狭小、有效天窗时间短的挑战,为保障列车行驶安全,有必要对严重影响隧道结构稳定性的重点区段的围岩深部位移和水压力、衬砌混凝土应力应变、基底结构位移、隧内环境变量等进行长期监测。

1.2.3 桥梁

400 km/h 高速铁路桥梁的运营监测不仅要关注结构承载能力,还要关注列车走行的安全性和乘客乘坐的舒适性。对大跨度桥梁、高墩桥梁、复杂桥梁、特殊结构桥梁、地质条件较差的桥梁设置健康监测系统,实时监测墩顶位移,桥梁结构关键部位应力、振动、变形,外部环境等数据,通过参数监测达到对桥梁结构安全状态、列车走行安全性、乘客舒适性及结构承载安全性的监控与评判。

1.2.4 轨道

400 km/h 高速运行列车对轨道结构的平顺性、稳定性和可靠性提出了近乎严苛的要求。轨道结构引导列车的运行,一旦出现病害将直接影响列车运行的安全性和舒适性。无砟轨道常见的病害包括上拱、梁端凸台或底座开裂、扣件失效、砂浆层离缝、轨道结构开裂、线下基础沉降等,因此,轨道监测内容主要包括结构变形、位移、受力等方面。

1.3 数据中心建设需求

针对 400 km/h 高速铁路地质灾害及线下基础设施监测,建立路局级统一的数据中心系统,实现多源监测信息汇聚、存储、综合展示及大数据分析等,实现与路局既有自然灾害与异物侵限监测系统之间的互联互通,接收国家(地方)部门地质灾害监测或气象部门相关系统信息,发挥信息系统互联优势,实现对高速铁路

沿线地质灾害及基础设施的报警和处置。同时,实现系统设备集中管理,提高系统可靠性,减少误报漏报,推进系统应用,满足系统运用维护管理的规范化和标准化要求。

2 监测系统体系框架

2.1 架构设计

智能传感、雷达测量、卫星遥感、无人机航测、智能视频识别、无线组网、5G 等新技术的不断成熟为构建 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测系统提供了新的解决方案^[4]。本文采用一种功能全面、扩展性强的系统总体架构,满足“全方位、全天候、全要素、全尺度”的地质灾害及基础设施智能化监测需求。系统总体架构按功能定位可分为感知层、传输层、平台层、应用层,如图 1 所示。

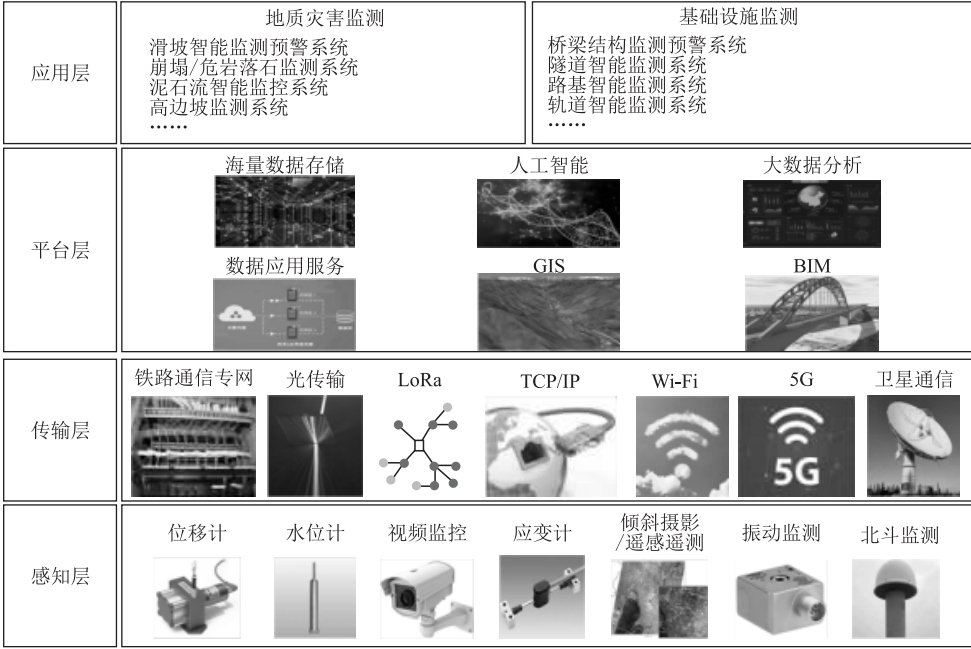


图 1 系统总体架构图

- (1)感知层
- 由布设于地质灾害子系统、线下基础设施监测子系统的各种传感器和采集设备组成,主要实现对数据的感知、采集和预处理。
- (2)传输层
- 主要包括现场设备间传输网络和数据上传网络,可采用光传输、LoRa、WiFi、5G、卫星通信等多种通信传输网络。
- (3)平台层
- 主要功能是提供面向全数据类型的数据接入、数据存储及计算能力,对监测领域数据资源进行集成整

- 合,实现传感数据/文档资料/影像的数据管理、大数据存储与分析、GIS 与 BIM 数据融合、智能文本分析及图像视频分析,支撑地质灾害及基础设施智能化监测的业务应用。
- (4)应用层
- 结合具体监测对象,开展不同功能的模块设计,通过可视化模块将数据分析结论转化为专业生产知识,并快速准确地提供分析报表、趋势图、GIS + BIM 等可视化方式进行全局展示,实现对高速铁路地质灾害及基础设施监测物理量的实时监控、精确管理和综合应用,及时发出灾害预警或报警信息,为基础设施管理养

护科学决策提供支撑。

2.2 系统组成

400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测系统分为铁路局中心系统与现场监测子系统两级结构^[5],系统组成结构如图 2 所示。中心系统包括服务

器、存储设备、网络设备、监测终端和配套软件。现场监测子系统由沿线区间的滑坡/岩堆/高陡边坡监测子系统、落石/崩塌监测子系统、泥石流监测子系统、桥梁监测子系统、隧道监测子系统、路基监测子系统、轨道监测子系统等组成。

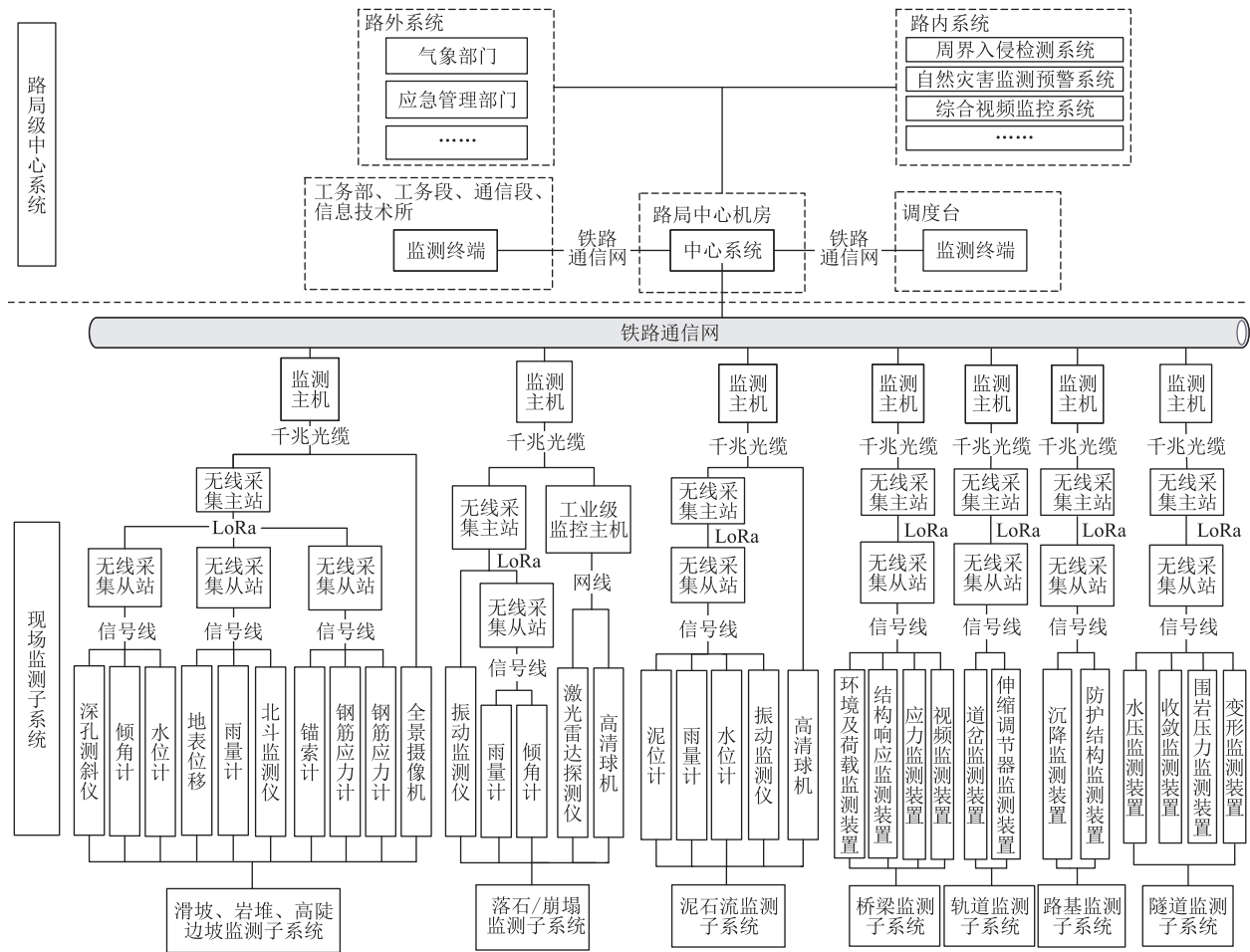


图 2 系统组成结构图

现场监测数据通过无线或有线通信方式传输至铁路沿线监测主机,再通过铁路通信网络传输至中心系统^[6]。中心系统通过铁路通信网络实现与路内自然灾害及异物侵限监测、综合视频监控、周界入侵监测等系统间的数据交互;通过专用通信通道实现与路外气象、应急管理等部门的数据交互。

2.3 部署方案研究

2.3.1 数据中心部署方案

铁路局中心系统由软件平台(操作系统、中间件、数据库、接口软件、杀毒软件、应用软件、虚拟化软件)和硬件平台(服务器、存储设备、网络设备、报警设备、监测终端)组成^[7]。中心系统采用虚拟化技术、分布式存储技术、云资源管理技术、信息安全技术等,搭建适应于 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测

的云平台基础设施层,实现计算、存储、网络资源按需分配、统一管理和集中监测,提高资源利用率,便于业务快速部署和扩展。在此基础上,构建集多源异构海量监测数据的高效存储访问、数据共享、数据分析服务、数据安全等功能于一体的云平台存储与分析层。结合具体的监测业务要求,提供实时数据监测、GIS + BIM 模型远程快速加载、视频图像在线浏览、报警信息发布与管理等功能,实现 GIS + BIM 与多源监测信息的融合展示。

中心系统设备设置在铁路局中心机房,在调度台、工务部、工务段、通信段、信息技术所等部门设置监测终端。

2.3.2 地质灾害监测子系统部署方案

(1) 滑坡/岩堆/边坡监测子系统

采用 InSAR、倾斜摄影、GNSS 定位、土体深部位移计、渗压计、雨量计等多元空间网络化监测技术和设备对滑坡/岩堆/边坡的深层土体位移、地表变形、外部环境及防治工程结构受力等参数进行监测^[8],对灾害监测点进行自动数据采集、处理、监测及预警。滑坡/岩堆/边坡监测方法及仪器如表 1 所示,典型滑坡监测工点设备布设如图 3 所示。

表 1 滑坡/岩堆/边坡监测方法及仪器表

监测内容	主要监测方法	主要监测仪器
地表变形	相对位移监测	裂缝计、地表位移计、全站仪
	绝对位移监测	北斗变形监测仪
内部变形	深部倾斜监测	深部位移计、滑动式钻孔测斜仪、固定式钻孔测斜仪
	相对位移监测	多点位移计
	沉降监测	静力水准仪、分层沉降计
外部环境	地下水监测	孔隙水压仪、渗压计
	气象监测	雨量计、温度计
防护结构	锚索锚固力监测	锚索计
	压力监测	土压力计
	钢筋应力、应变监测	钢筋应力计、应变计
	锚杆应力、应变监测	锚杆应力计、应变计
	支护结构变形监测	倾角仪、深部位移监测法

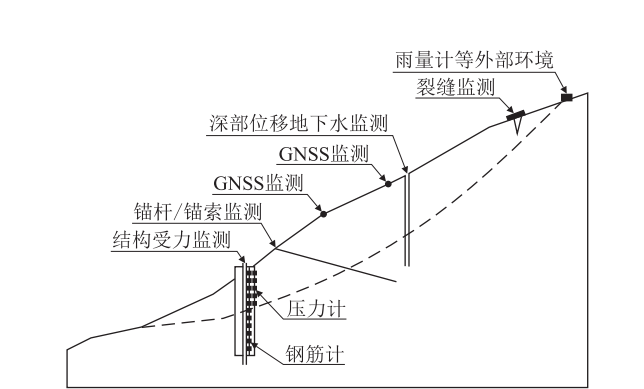


图 3 典型滑坡监测工点设备布设示意图

(2) 泥石流监测系统

通过雨量计、泥位计、振动倾角监测仪、视频监控相结合的监测技术实现对泥石流流沟的泥(水)位变化、泥石流振动信息、泥石流发生地影像变化信息等参数进行监测。典型泥石流监测工点设备布设如图 4 所示。

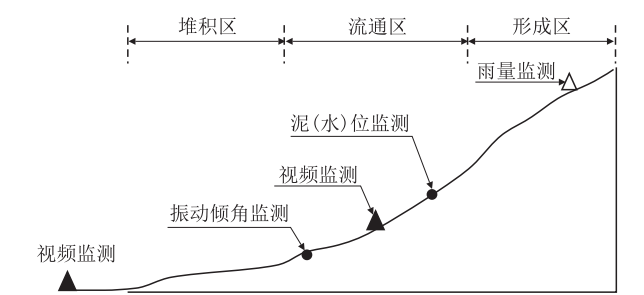


图 4 典型泥石流监测工点设备布设示意图

(3) 崩塌落石监测系统

系统对灾害形成演化过程中的变形、降雨量等物理参量开展实时监测,全面掌握不稳定坡体的发展趋势。布设具有移动侦测、异物识别报警功能的激光雷达探测仪和高清球机,在各种天气和气候条件下,对铁路隧道进口/出口线路界限上可能威胁到列车正常行驶的落石、边坡溜塌等异物进行快速、准确判别,并对告警目标进行定位、跟踪、放大,同时快速传递告警信息,辅助工务人员观察、判断,及时采取应急措施。子系统由雨量计、GNSS、振动倾角一体机、高清球机、激光雷达探测仪、地面处理主机等设备组成,如表 2 所示。典型泥石流监测工点设备布设如图 5 所示。

表 2 主要设备表

序号	监测内容	主要监测设备
1	结构振动倾角	振动传感器
2	崩塌体、落石等异物上道检测	激光雷达探测仪
3	异物图像	高清球机
4	外部环境	雨量计
5	坡体位移	GNSS

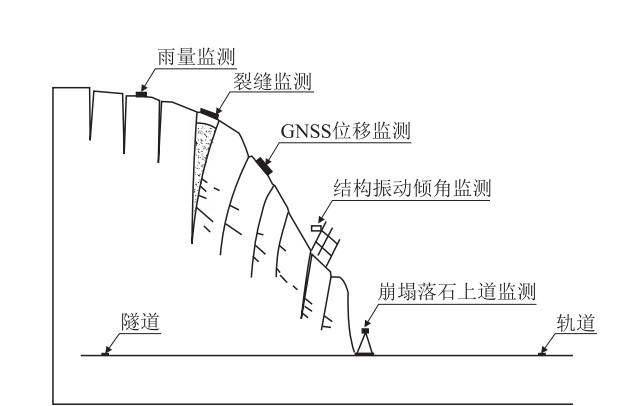


图 5 典型崩塌落石监测工点设备布设示意图

2.3.3 基础设施监测子系统部署方案

(1) 桥梁监测子系统

现场设备以多类型传感器组合的方式进行构建,以数据采集和传输子系统为基础,以满足桥梁安全评价需求为出发点,根据数据采集控制策略、数据处理理论和安全评价理论,实现传感器数据的自动采集、存储、处理和桥梁的安全评价。桥梁监测内容与设备如表 3 所示。

(2) 隧道监测子系统

由快速智能感知系统、多源采集系统、高速传输系统和终端展示模块组成,主要监测隧道的状态量化指标,如隧道上部地表位移、衬砌混凝土应变、基底结构位移、隧道内环境变量、衬砌表观和结构变化等,通过相应的传感器获取数据信息。隧道监测内容与设备如表 4 所示。

表 3 桥梁主要监测内容及设备表		
监测内容	主要监测设备	布设原则
视频监控	高清摄像头	桥梁端部
振动响应	加速度传感器	在桥梁 L/8、L/4、L/2、3L/4、7L/8 断面布设
梁体挠度	高精度静力水准仪、LVDT 位移计	在桥梁 L/8、L/4、L/2、3L/4、7L/8 断面布设
结构倾斜/偏位	精密倾角仪	在桥梁 L/4、L/2、3L/4 断面布设
空间变位	北斗 GNSS	在桥梁 L/2 断面布设
缆索索力	索力计	在桥梁 L/8、L/4、L/2、3L/4、7L/8 断面布设
结构位移	磁致伸缩位移计	在桥梁 L/4、L/2、3L/4 断面布设
结构温度	温度传感器	在桥梁 L/4、L/2、3L/4 断面布设
结构应力	应变传感器	在主跨 L/8、L/4、L/2、3L/4、7L/8 断面布设
结构裂缝	裂缝计	在主跨 L/8、L/4、L/2、3L/4、7L/8 断面布设

表 4 隧道主要监测内容及设备表		
主要监测内容	主要监测仪器	布设原则
隧道内收敛变形监测	收敛计	围岩等级确定监测断面,3~5 处/断面
裂缝监测	裂缝计	已发现裂缝处
深部倾斜监测	多点位移计、滑动式钻孔测斜仪	根据隧道地质情况确定监测孔个数
沉降监测	静力水准仪分层沉降计	隧底大变形地段,纵向左断面布设,间隔 5~10 m/断面
地下水监测	孔隙水压力、渗压计	根据隧道地下水情况确定监测孔个数
气象监测	温度计	隧道壁适当位置
有害气体	有害气体监测仪	瓦斯隧道内适当位置
结构应力应变	锚索计	横断面布设,固定于锚索、钢筋、衬砌混凝土等结构体上,单类设备 5~8 处/断面
	土压力计	
	钢筋应力计、应变计	
	锚杆应力计、应变计	

(3)路基监测子系统

采用静力水准仪、分层沉降计、水平位移计、水位计等设备全方位获取高速铁路路基沉降监测数据^[8]。通过预警分析模块做进一步分析,判断数据是否超过设定阈值,发现异常及时报警。通过可视化组件,将监测结果以图表的形式直观地反馈给用户。路基监测内容与设备如表 5 所示。

表 5 路基主要监测内容及设备表		
监测内容	主要监测设备	布设原则
竖向相对变形	静力水准仪	横纵断面布设,8~10 台/处
分层沉降	分层沉降计	左右两侧间隔布置,3~5 台/处
水平相对位移	水位位移	左右两侧布置,3 台/处
地下水位	水位计	3 个断面,前中后布置,1 台/处
绝对位移	北斗变形监测仪	3 个断面,前中后布置,1 台/处

3 关键技术研究

3.1 无线传输数据压缩技术

由于现场布线困难,地质灾害监测常采用无线组网的通信方式。无线组网通信带宽小,每次可发送字节有限,需对数据进行压缩以提高可靠性和传输效率。根据地质灾害及基础设施监测数据的传输需求,采用边缘端 GZIP 无损压缩、数据中心接收端解压缩的方式提高数据传输能力。

GZIP 压缩文件有固定的存放格式,即在连续压缩块外边加上一层 GZIP 文件相关的信息。GZIP 压缩文件可分为文件头、数据块和文件尾三个部分。

对于要压缩的灾害监测数据,先使用 LZ77 算法进行压缩,再使用 Huffman 编码的方法进行压缩,数据压缩流程如图 6 所示。

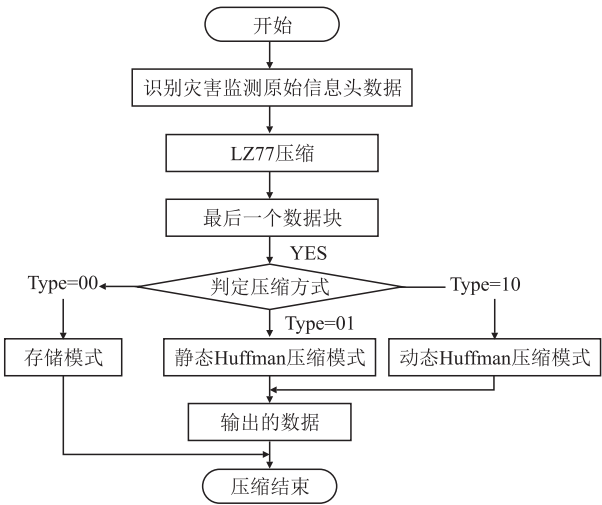


图 6 数据压缩流程图

3.2 数据访问加密技术

本系统使用层面具备广大用户群体,业务层面应采取权限访问控制,数据层面又涉及高速铁路 GPS 坐标等敏感信息,因此,需要一种加密验证方法将各层面的安全需求抽象出来,作为访问验证公共库统一应对,从而在用户与后端通信过程中起到保护用户隐私、保全敏感信息的作用。

首先,采用非对称加密算法对网络传输进行封装。但因非对称加密会带来性能开销,影响用户的使用体验,故在公共库的设计上还应考虑部分非敏感信息的传输需要,提供多种低密级、无密级的访问方法。访问封装流程如图 7 所示。另外,由于系统需部署在云平台上,该库还实现了 JWT 验证方式,通过数字签名保证令牌的合法性。

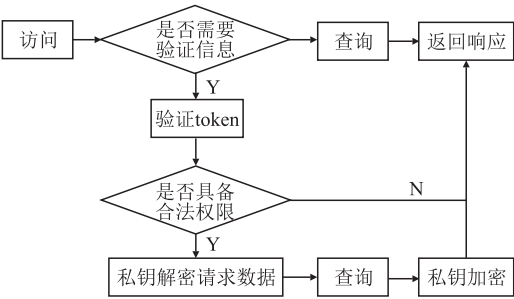


图 7 访问的封装流程图

其次,从事前控制的角度出发,设计实现了 1 套注册机制,流程如图 8 所示。通过用户提供用户信息、机器码,系统验证通过后才允许登录及后续操作的方法,将用户、操作终端、权限绑定在一起,大大提高了系统的安全性。此外,系统将记录用户、机器码、操作时间、操作行为等信息,作为安全审计的跟踪记录。

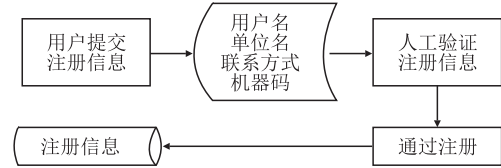


图 8 事前控制用户注册流程图

最后,为降低整个访问验证流程的复杂程度,系统接口应隐藏算法、查询的具体调用方式,仅通过提供 API 的方式响应调用,并对该库进行混淆加密,进一步提供安全等级。

3.3 监测大数据融合技术

如何对地质灾害与基础设施监测中产生的多尺度、多元化、多类型监测数据(含传感数据、GIS/BIM 模型、无人机倾斜摄影、遥感/航拍影像、地勘资料、视频图像等)^[9],开展集中数据存储与融合处理是系统研究的重点^[10]。

本文在关系型数据库和分布式文件系统集群之外,研究并设计了基于 Hadoop 分布式架构的大数据存储和分析平台,结合 Spark 分布式计算引擎,为海量数据的存储分析提供了一种稳定、高效的解决方案。Hadoop + Spark 平台架构设计如图 9 所示。

在 Hadoop + Spark 平台的数据源层中,由各业务监测系统提供结构化数据、非结构化数据和半结构化数据类型的数据源。非结构化数据包括遥感卫星影像、文档数据和视频图像数据等,半结构化数据如 JSON 数据等,结构化数据包括地质灾害及基础设施监测传感器数据等。

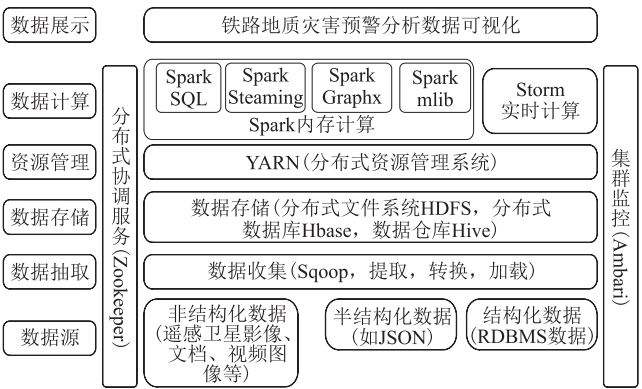


图 9 Hadoop + Spark 平台总体架构图

通过平台提供的 Sqoop 数据传输软件将需要进行大数据存储与分析的数据抽取到数据存储层。数据存储采用分布式文件系统 HDFS、分布式数据库 Hbase 及数据仓库 Hive 相结合的方式。在 Hadoop + Spark 平台的资源管理层中,通过 Yarn 进行资源管理,为集群资源利用率、资源统一管理和数据共享等带来方便。在 Hadoop + Spark 平台的数据计算层中,使用内存计算框架 Spark 实现快速分布式计算处理,为海量监测数据挖掘提供支撑。

4 结束语

本文结合 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施的特点和监测业务需求,集合物联网、云计算、分布式存储、大数据等技术的深入研究与应,设计了监测系统总体架构,分析了系统组成,并结合不同地质灾害和基础设施监测类型开展了部署方案的研究,此外还重点研究了监测数据的高效压缩传输、加密访问、监测大数据融合等关键技术,为 400 km/h 高速铁路地质灾害及基础设施监测系统的设计、研发与应用提供了借鉴与指导。今后,围绕该系统持续深入研究与应,不仅可有效提升高速铁路地质灾害及基础设施监测的信息管理、隐患分析等技术能力,还对强化基础设施维护精细化管理、提升巡检巡查效率、保障高速铁路运营安全等具有重要意义。

参考文献:

[1] TJ/QT 008 - 2020 智能高速铁路体系架构 1.0 [S].
TJ/QT 008 - 2020 Intelligent High-speed Railway Architecture 1.0 [S].
[2] 毛若羽. 铁路自然灾害及异物侵限监测系统的设计[J]. 铁道建筑技术, 2017(1): 57 - 61.
MAO Ruoyu. Design of Railway Natural Disasters and Foreign Object Invasion Monitoring System [J]. Railway Construction Technology,

2017(1): 57-61.

[3] 虞凯,刘孜学,韦道准. 川藏铁路基础设施实时监测预警系统架构及功能研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(2): 41-44.
YU Kai, LIU Zixue, WEI Daozhun. The Architecture and Function Research on the Real-Time Monitoring and Early Warning System of the Infrastructure along the Sichuan-Tibet Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(2): 41-44.

[4] 王艳杰,王卷乐,卜坤. 灾害数据管理技术与平台进展及其面临的需求研究[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 205-210.
WANG Yanjie, WANG Juanle, BU Kun. Research on Disaster Data Management Technology and Platform Progress and the Demand it Faces[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 205-210.

[5] Q/CR 9152-2018铁路自然灾害及异物侵限监测系统工程技术规范[S].
Q/CR 9152-2018 Technical Code for Railway Natural Disaster and Foreign Object Intrusion Monitoring System[S].

[6] 王珣,潘兆马,袁焦,等. 无线智能化铁路基础设施数据采集系统的研究与应用[J]. 传感技术学报, 2018, 31(10): 1604-1612.
WANG Xun, PAN Zhaoma, YUAN Jiao, et al. Research and Application of Wireless Intelligent Railway Infrastructure Data Acquisition System[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(10): 1604-1612.

[7] 铁总运[2014]146号,高速铁路自然灾害及异物侵限监测系统铁

路局中心系统总体方案(暂行)[S].
TIE Zong Yun [2014] No. 146, The General Plan of the Central System of Railway Administration of Natural Disaster and Foreign Object Intrusion Monitoring System in High-speed Railway (Provisional)[S].

[8] 王珣,刘勇,袁焦,等. 沉降智能监测与评估系统的开发及应用[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 20-25.
WANG Xun, LIU Yong, YUAN Jiao, et al. Development and Application of Settlement Intelligent Monitoring and Evaluation System of High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 20-25.

[9] 黄健. 基于3D WebGIS技术的地质灾害监测预警研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
HUANG Jian. Study on Early Warning of Geohazards Based on 3D WebGIS Technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

[10] 刘刚,吴冲龙,何珍文,等. 面向地质时空大数据表达与存储管理的数据模型研究[J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 164-174.
LIU Gang, WU Chonglong, HE Zhenwen, et al. Data Model for Geological Spatiotemporal Big Data Expression and Storage Management[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 164-174.

(上接第 11 页)

参考文献:

[1] 尹元钊,何桥. 我国高速铁路列车运行图现状分析[J]. 交通科技与经济, 2013, 15(5): 5-8.
YIN Yuanzhao, HE Qiao. Analysis of High Speed Railway Train Diagram of China [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2013, 15(5): 5-8.

[2] 曲思源,荣剑,徐瑞华. 京沪通道型高速铁路列车运行图结构分析[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 55-61.
QU Siyuan, RONG Jian, XU Ruihua. Analysis of Train Operation Diagram Structure of Beijing-Shanghai Corridor-Type High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 55-61.

[3] 于汝滨,任冲,闫海峰. 繁忙高速铁路列车运行图结构优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(12): 1-8.
YU Rubin, REN Chong, YAN Haifeng. Optimization of Train Working Diagram Structure for Busy High-speed Railway Lines[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(12): 1-8.

[4] 王宝杰. 京沪高速铁路通过能力影响因素分析[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(6): 16-21.
WANG Baojie. Analysis on the Factors Influencing Carrying Capacity of Beijing-Shanghai High-speed Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(6): 16-21.

[5] 张雷,熊剑春,汤铁雄,等. 新型动卧列车开行与4小时综合维修天窗设置研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 43-49.
ZHANG Lei, XIONG Jianchun, TANG Yixiong, et al. Operation of New High-speed Sleeper EMU Train and Setting of 4-Hour Comprehensive Maintenance Window [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(2): 43-49.

[6] 彭其渊,杨奎,文超,等. 我国高速铁路夜间行车组织方法[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(4): 569-576.
PENG Qiyuan, YANG Kui, WEN Chao, et al. Organization Methods of Overnight Operation for Chinese High-speed Railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(4): 569-576.

[7] 郭卫彪,汤杰,马保仁,等. 高速铁路追踪间隔标准选择及供电设施配置研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 148-152.
GUO Weibiao, TANG Jie, MA Baoren, et al. Study on Standard Selection of Time Interval and Power Supply Facilities for High Speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(6): 148-152.

[8] 曲思源,彭丹. 高速铁路动卧列车夕发朝至运营组织分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(1): 96-100.
QU Siyuan, PENG Dan. Analysis on Operation Organization of High Speed Railway EMU Train Leaving in the Evening and Arriving in the Morning[J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(1): 96-100.

[9] 李辰中,孟凡栋,周凌云. 我国高铁快运业务运营组织模式探讨[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(3): 48-52.
LI Chenzhong, MENG Fandong, ZHOU Lingyun. A Tentative Study on the Operation Organization Mode of China's High-speed Railway Express Business [J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(3): 48-52.