

The Application of Big Data Technology in the Processing and Early Warning of Monitoring Data for Railway Bridges and Tunnels

Haitao Liu

Guoneng Shao Huang Railway Company, Cangzhou, Hebei, 062350, China

Abstract

Railway bridges and tunnels, as the core hubs of the railway transportation network, their structural safety directly determines the stability and safety of railway operations. With the large-scale expansion of the railway transportation network, the service life of bridges and tunnels is constantly increasing. Moreover, the continuous influence of complex geological environments, frequent traffic loads, and extreme weather conditions leads to frequent structural damage and performance degradation, which places higher demands on the efficiency, accuracy of data processing, and the timeliness of early warnings. The traditional data processing mode for monitoring data has drawbacks such as low data utilization rate, insufficient processing efficiency, and delayed warnings. It is difficult to meet the processing requirements of massive and multi-source monitoring data. Big data technology, with its core advantages of massive storage, high-speed processing, multi-source integration, and intelligent analysis, provides a new solution for the monitoring data processing and early warning of railway bridges and tunnels.

Keywords

Big data technology; Railway bridges; Tunnel monitoring; Data processing; Safety warning

大数据技术在铁道桥梁隧道监测数据处理与预警中的应用

刘海涛

国能朔黄铁路公司, 中国·河北 沧州 062350

摘要

铁道桥梁隧道作为轨道交通网络的核心枢纽,其结构安全直接决定轨道交通运营的稳定性与安全性。随着轨道交通网络的规模化扩张,桥梁隧道服役年限不断延长,加之复杂地质环境、频繁交通荷载及极端天气的持续影响,结构损伤、性能退化等安全隐患频发,对监测数据处理的效率、精度及预警的及时性提出了更高要求。传统监测数据处理模式存在数据利用率低、处理效率不足、预警滞后等弊端,难以适配海量多源监测数据的处理需求。大数据技术凭借其海量存储、高速处理、多源融合及智能分析的核心优势,为铁道桥梁隧道监测数据处理与预警提供了全新解决方案。

关键词

大数据技术; 铁道桥梁; 隧道监测; 数据处理; 安全预警

1 引言

铁道桥梁隧道是轨道交通跨越复杂地形、穿越地质障碍的关键基础设施,其结构稳定性直接关系到列车运行安全、乘客生命财产安全及区域交通网络的正常运转。随着轨道交通建设的快速推进,全球范围内铁道桥梁隧道的数量持续增长,服役年限不断延长,部分早期建设的设施已进入老化期,结构损伤、性能退化等问题日益突出。同时,铁道桥梁隧道长期处于复杂的服役环境中,面临着地质沉降、地震、暴雨、冰雪等自然因素的侵蚀,以及列车荷载反复作用、人

为破坏等人为因素的影响,极易引发裂缝、沉降、变形、渗漏等安全隐患,严重时可能导致桥梁坍塌、隧道涌水突泥等重大安全事故,造成巨大的经济损失与社会影响。

2 大数据技术核心特性与体系架构

大数据技术是指用于处理海量、多源、异构、实时数据的一系列技术的集合,其核心特征可概括为“5V”: Volume(海量性)、Velocity(高速性)、Variety(多源异构性)、Value(低价值密度)、Veracity(真实性)。这五大特征与铁道桥梁隧道监测数据的特征高度契合,能够有效解决传统数据处理模式的局限性。

大数据技术体系主要由数据采集层、数据存储层、数据处理层、数据分析层及应用层五大板块构成,各层协同工

【作者简介】刘海涛(1971—),男,中国河北衡水人,本科,工程师,从事铁路通信研究。

作,实现对监测数据的全流程处理与深度挖掘。

数据采集层是大数据处理的基础,核心功能是实现多源监测数据的实时采集与统一接入。该层通过部署数据采集终端、接口适配器等设备,整合传感器、无人机、巡检机器人、高清摄像头等各类监测设备的数据,采用无线传输(5G、WiFi、LoRa)与有线传输相结合的方式,将监测数据实时传输至数据中心,同时完成数据的初步校验与格式转换,确保数据的完整性与实时性。部分工程实践中,通过API接口与ETL工具实现自动化采集,有效提升了数据采集效率,降低了人工干预成本。

3 大数据技术在铁道桥梁隧道监测数据处理中的应用

3.1 数据采集环节的应用

数据采集是监测数据处理的基础,数据采集的完整性、实时性与准确性直接影响后续数据处理与预警的效果。传统的监测数据采集模式存在采集设备分散、数据来源单一、传输效率低、数据缺失严重等问题,难以满足海量监测数据的采集需求。

大数据技术在数据采集环节的核心应用的是构建“多源协同采集体系”,整合各类监测设备,实现数据的全方位、实时化、自动化采集。具体而言,通过部署大数据采集终端,实现对传感器、无人机、巡检机器人、高清摄像头等各类监测设备的统一接入,采用“无线+有线”混合传输模式,结合5G、LoRa等高速传输技术,实现监测数据的实时传输,传输延迟控制在秒级,确保数据的实时性。例如,在桥梁监测中,通过在梁体、桥墩部署应变片、位移计等传感器,实时采集结构应力、位移数据;通过无人机对桥梁外观进行航拍,采集裂缝、破损等影像数据;通过巡检机器人对桥梁支座、基础等隐蔽部位进行巡检,采集隐蔽部位的监测数据;通过高清摄像头实时监控桥梁周边环境与列车运行状态,采集环境与荷载数据^[1]。

3.2 大数据在监测数据存储环节的应用

针对铁道桥梁隧道监测数据海量、多源、异构的特点,大数据分布式存储技术可实现对各类监测数据的安全存储、高效管理与灵活调用,解决传统存储方式的局限性。

构建基于Hadoop生态的分布式存储架构,结合不同类型数据的特点,采用“边缘本地存储+云端分布式存储”的混合存储模式,实现分类存储与统一管理。对于结构化数据(如传感器数值、设备参数、监测时间、监测位置等),采用HBase、MySQL等分布式数据库进行存储,便于数据的快速查询与统计分析;对于半结构化数据(如监测日志、设备运行记录等),采用MongoDB等文档数据库进行存储,适配数据格式的多样性;对于非结构化数据(如桥梁隧道外观图像、视频、激光扫描点云、地质图像等),采用HDFS分布式文件系统进行存储,可实现海量非结构化数据的高效

存储与批量处理;对于时序性强的监测数据(如结构振动数据、围岩位移时序数据等),采用InfluxDB、TimescaleDB等时序数据库进行存储,适配时序数据的高频读写特性,便于分析数据的时间演化规律。

3.3 大数据在监测数据处理环节的应用

监测数据处理是提升数据质量、挖掘数据价值的关键环节,大数据技术通过并行计算、数据清洗、数据融合等技术,实现对海量监测数据的高效处理,解决传统数据处理效率低、质量差等问题。大数据技术通过构建数据清洗模型,采用统计分析、机器学习等算法,对监测数据进行自动清洗——通过 3σ 原则、箱线图统计方法,识别并剔除异常值;通过线性插值、多项式插值、机器学习预测等方法,补充缺失值;通过滤波算法(如卡尔曼滤波、小波滤波),消除数据噪声,提升数据质量。例如,针对隧道围岩位移监测数据中的噪声,采用小波滤波算法进行去噪处理,可有效保留位移数据的真实特征,去除环境干扰带来的噪声。

4 大数据技术在铁道桥梁隧道监测预警中的应用

4.1 大数据预警体系构建

基于大数据技术的铁道桥梁隧道监测预警体系,以海量监测数据为核心,以大数据技术为支撑,涵盖数据采集、数据处理、数据分析、预警发布、应急处置等多个环节,形成“数据-分析-预警-处置”的闭环体系,实现对结构安全隐患的早期识别、精准预警与快速处置^[2],通过大数据处理技术,快速完成海量多源异构数据的处理,确保数据的准确性与可靠性。例如,通过数据清洗剔除异常值,通过数据融合整合多源数据,为预警分析提供全面、高质量的数据^[3]。

4.2 预警指标体系构建

预警指标体系是预警分析的基础,科学、合理的预警指标体系能够全面反映铁道桥梁隧道的结构状态,确保预警的准确性与全面性。基于大数据技术的预警指标体系,需结合铁道桥梁隧道的结构特点、服役环境、监测需求,构建多维度、多层次的预警指标体系,涵盖结构状态指标、环境指标、荷载指标三大类,确保指标的全面性、针对性与可操作性。

桥梁结构状态指标主要包括:位移指标(梁体竖向位移、水平位移,桥墩竖向位移、水平位移,支座沉降)、应力应变指标(梁体应力、桥墩应力、支座应力)、振动指标(桥梁自振频率、振动加速度)、裂缝指标(裂缝宽度、裂缝长度、裂缝发展速率)、基础指标(基础不均匀沉降、基础承载力)等。例如,梁体竖向位移超标可能导致桥梁结构变形,裂缝宽度超标可能导致结构损伤加剧,这些指标均是反映桥梁结构安全的核心预警指标。

5 大数据技术应用优化策略

针对当前大数据技术在铁道桥梁隧道监测数据处理与

预警中存在的问题,结合工程实践需求,提出以下优化策略,推动大数据技术的深度应用,提升桥梁隧道安全监测水平。

5.1 完善数据标准与规范

由行业主管部门牵头,联合科研机构、企业等单位,制定统一的铁道桥梁隧道监测数据标准与规范,明确数据采集格式、单位、精度、接口等要求,实现多源数据的标准化与兼容性,降低数据融合难度。同时,建立数据质量评价体系,制定数据清洗、去噪、校验的标准流程,提升监测数据质量,为数据分析与预警提供可靠支撑。此外,制定统一的桥梁隧道状态评估标准,结合多源数据融合与物理模型,构建完善的评估体系,全面反映结构健康状况。

5.2 加强多技术融合应用

推动大数据技术与铁道桥梁隧道监测技术、岩土工程技术、结构工程技术等专业技术的深度融合,结合桥梁隧道的结构特性、地质条件等专业知识,优化数据分析模型与预警模型,提升分析结果的针对性与实用性。同时,加强大数据技术与物联网、人工智能、BIM、GIS等技术的融合,构建“大数据+物联网+人工智能”的智能监测预警体系,实现监测数据的全方位采集、智能化分析、可视化展示与精准化预警。例如,将BIM技术与大数据技术融合,构建桥梁隧道三维数字孪生模型,将监测数据与三维模型精准绑定,实现“数据+场景”的可视化呈现,提升运维决策的直观性与科学性^[4]。

5.3 优化模型精度与泛化能力

扩大模型训练数据范围,收集不同地质条件、不同运营工况、不同结构类型的桥梁隧道监测数据,增加训练数据量,提升模型的泛化能力;同时,采用更先进的机器学习、深度学习算法(如Transformer、联邦学习),优化模型结构,提升模型精度,减少误预警、漏预警等问题。建立模型迭代优化机制,根据新的监测数据与工程实践经验,定期优化模型参数,确保模型能够适应结构运行状态的变化与复杂工况的需求。此外,将轻量型AI模型(如异常值检测、短期预测)部署在边缘计算盒子,实现现场实时分析、本地预警;将深度分析模型部署在云端,利用云端算力进行大数据训练、模型迭代,提升模型性能。

5.4 加强复合型人才培养

建立健全复合型人才培养体系,加强高校、科研机构与企业的合作,开设大数据与铁道桥梁隧道监测相关专业课程,培养既掌握大数据技术,又熟悉桥梁隧道专业知识的复

合型人才。同时,加强对现有运维人员与技术人员的培训,开展大数据技术、智能监测设备操作等相关培训,提升其专业技能与综合素质。此外,引进国内外优秀的复合型人才,加强技术交流与合作,提升行业整体技术水平。建立人才激励机制,鼓励技术人员开展大数据技术应用研究,推动技术创新。

5.5 优化成本投入,推动技术普及

加大政策支持力度,出台相关扶持政策,对偏远地区、运营年限较长的铁路线路桥梁隧道监测系统升级改造给予资金补贴,降低资金投入压力。同时,加强技术研发,优化大数据平台与监测设备的设计,降低设备采购、平台建设与运营维护成本,推动大数据技术在更多铁路线路桥梁隧道监测中的应用。此外,推广成熟的大数据监测预警技术与方案,实现技术共享,提升行业整体应用水平。针对隧道恶劣环境,研发低成本、高可靠性的监测设备,降低设备采购与维护成本。

6 结语

本文研究表明,大数据技术凭借海量存储、高速处理及智能分析的核心优势,有效解决了铁道桥梁隧道监测数据处理中存在的效率低、利用率不足等痛点,在数据采集、存储、处理、分析及预警各环节发挥了重要作用,显著提升了结构安全监测的精准度与预警的及时性,降低了安全事故发生率与运维成本。当前大数据技术在该领域的应用仍存在数据共享不足、模型适配性欠佳等问题,但通过建立健全数据共享机制、优化预警模型、加强人才培养等策略,可推动技术应用不断完善。未来,随着大数据与人工智能、5G等技术的深度融合,将进一步实现铁道桥梁隧道安全运维的智能化升级,为轨道交通基础设施安全提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1] 廖晓东.地铁盾构隧道下穿运营高铁桥梁变形控制分析[J].工程技术研究,2025,10(16):168-170.
- [2] 周鑫.砂层内盾构隧道小角度侧穿高铁桥梁群桩控制技术[J].都市快轨交通,2024,37(05):87-92.
- [3] 吴琼.大直径盾构隧道近接桥梁监测方案及全自动监测技术浅析[J].四川建筑,2021,41(03):193-196+199.
- [4] 李静文.高速铁路工务工程健康监测系统设计研究[D].石家庄铁道大学,2018.
- [5] 雷领.地铁矿山法隧道下穿既有桥梁施工响应研究[D].石家庄铁道大学,2018.