

引用格式: 王华, 路耀邦, 冯国峰, 等. 隧道结构健康管理大数据平台研发及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(8): 1425.
WANG Hua, LU Yaobang, FENG Guofeng, et al. Development and application of big data platform for tunnel structure health management [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(8): 1425.

隧道结构健康管理大数据平台研发及应用

王 华^{1, 2, 3}, 路耀邦⁴, 冯国峰^{1, 2, 3}, 王百泉^{1, 2, 3}, 林春刚^{1, 2, 3}, 闫 贺^{1, 2, 3}

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458; 2. 广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室, 广东 广州 511458; 3. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 广东 广州 511458; 4. 中铁云网信息科技有限公司, 北京 100160)

摘要: 为有效提高隧道管养效率,在总结提炼隧道内部与表观病害类型的基础上,采用 Spring Boot+MyBatis Plus 架构,应用分布式的 Redis 和 MySQL 部署开发技术研发隧道结构健康管理大数据平台,并从设备管理、病害管理、大数据智能分析处理等方面进行现场应用。结果表明: 1) 研发出的隧道结构健康管理大数据平台能够满足对常见病害数据进行管理展示的功能要求,且界面简洁友好、使用简单方便,实现了隧道病害由传统的依据经验判断到依托数据进行科学决策的转变; 2) 该平台基于神经网络模型,实现了隧道表观病害的智能识别,减小了病害识别方面对人工的依赖; 3) 该平台支持通过 PC 端或移动端对病害信息进行多维度查询,解决了以前隧道病害信息获取滞后且查阅不便的问题。

关键词: 铁路隧道; 病害检测; 大数据平台; 病害预测

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2023.08.017

文章编号: 2096-4498(2023)08-1425-13

中图分类号: U 45

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



扫描二维码听语音
与作者在线交流

Development and Application of Big Data Platform for Tunnel Structure Health Management

WANG Hua^{1, 2, 3}, LU Yaobang⁴, FENG Guofeng^{1, 2, 3}, WANG Baiquan^{1, 2, 3},
LIN Chungang^{1, 2, 3}, YAN He^{1, 2, 3}

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, Guangdong, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Monitoring and Maintenance of Tunnel Structure, Guangzhou 511458, Guangdong, China; 3. China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511458, Guangdong, China; 4. CREC CloudNet Information Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: To effectively improve tunnel management and maintenance efficiency, the internal and apparent tunnel diseases are summarized and a tunnel structure health management big data platform is established using Spring Boot with MyBatis-Plus architecture and Redis and MySQL distributed deployment. Additionally, the field application is conducted through equipment management, disease management, and big data analysis. Consequently, the results reveal that (1) the big data platform for tunnel structural health management can meet the functional requirements of common disease data management and display, and the interface is simple and friendly, realizing the scientific decision-making of tunnel diseases; (2) based on the neural network model, the platform achieves the intelligent recognition of apparent tunnel disease and reduces the dependence on manual disease recognition; and (3) the platform supports multidimensional queries of disease information via personal computers and mobile terminals, thereby solving the problem of delayed and inconvenient access to tunnel disease information.

Keywords: railway tunnel; disease detection; big data platform; disease forecast

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2023-07-03

第一作者简介: 王华(1977—),男,江西萍乡人,2010年毕业于西南交通大学,地质工程专业,博士,教授级高级工程师,现从事地质勘察、隧道超前地质预报及隧道设计管理工作。E-mail: whua97@126.com。

0 引言

我国从1888年开始修建第1条隧道至今,已有130余年的隧道修建史。据不完全统计,截至2022年底,中国铁路营业里程达到15.5万km,其中,投入运营的铁路隧道17873座,总长21978km,我国已成为世界上修建隧道数量最多、建设规模最大、发展速度最快的隧道大国^[1-3]。由于隧道修建的特殊性,受地质、地形、气候,以及设计、施工、运营等不利因素的影响,在隧道建设及运营期会出现裂缝、渗漏水、剥落掉块等病害,加上我国隧道建设目前“重建设、轻管理”的现状^[4-5],在给隧道运维带来极大挑战的同时,严重威胁到隧道内车辆和行人的安全。当前,隧道病害检测仍以人工为主、设备为辅,各运营单位积累了大量的病害数据,并呈指数式增长^[6-7]。隧道病害数据具有与时间相关、信息量大、利用率低等特点,如何高效利用这些病害信息显得尤为重要。

1986年,日本国有铁道研发的专家系统(TIMES-1)可依据隧道的病害特征、运营环境、设计资料等推断出病害成因。2001年,美国Gannett Fleming公司开发的隧道管理系统可判断隧道病害的发展情况,定性评价隧道安全等级。2004年,长崎大学开发了公路隧道病害管养系统,可随时查询病害信息和安全状况,预测病害发展情况,并给出处治建议,但该系统仅适用于公路隧道,且其设计依据和规范不适用于中国。1990年,关宝树研发的TDD系统可按照现有资料推测病害成因、提醒详检项目、制定处治措施。1994年,陕西交通厅首次引入GIS技术,开发了地市级公路数据库管理系统,实现病害查询、输出图表。2003年,福建省交通科学技术研究所联合开发出隧道管理系统,实现查询隧道信息、输出检查报告。罗鑫^[8]在总结前人研究的基础上,对公路、铁路等隧道健康诊断及评价进行研究,满足了隧道病害检测要求,并预测隧道未来运营状况。胡建华等^[9]开发了基于GIS的隧道病害管理系统,可以地图形式直观查看病害空间位置,实现病害数据的采集、查询等功能,但该平台不具备时空数据分析功能,不能自动提出病害处治建议。方恩权^[10]基于Web Service搭建了地铁隧道结构调查管理系统,实现了病害信息获取和信息化同步,其时效性与准确性得到提高。乐弋舟等^[11]基于PHP开发了隧道衬砌裂缝信息查询系统,实现病害信息添加、更新、删除和查询功能。张云龙等^[12]、朱德庆等^[13]分别针对公路和铁路隧道开发了隧道病害可视化管理软件,直观展示了隧道病害信息。孙中秋等^[14]基于BIM对山岭隧道施工进行了信息化管理系统研发与应用设计研究。孙振川等^[15]针对隧道掘进机工程研发了大数据管理平台。

潘良波等^[16]针对空间信息三维可视化研发了一套城市地下空间信息集成管理与服务平台。此外,各省市也逐步开始搭建隧道管养平台,实现隧道病害的信息化管理。

综上所述,随着我国隧道从大规模建设向运营管理的过渡和转变,隧道病害问题逐渐突出,各隧道运营单位虽积累了一定的病害数据,但仍然存在以下问题:

1)在隧道结构病害检测领域,现有的平台针对的隧道病害数据种类单一,只是对某一特定的病害进行简单的查询、展示、统计等工作,囊括的病害种类较少。

2)现有的隧道病害存储管理平台只是将数据进行简单的存储管理,并未对数据价值进行深入挖掘。

3)数据展示手段单一,现有的数据管理平台对隧道的病害展示可视性差,失真较为严重,不能真实地反映病害在隧道中的分布情况,不利于隧道安全状况的评定;且大部分平台只考虑了电脑端平台,对移动端平台的考虑不足,大多数数据平台未考虑移动平台的展示模块。

4)国外一些系统的设计依据和规范与国内的隧道病害实际情况有不少差距,使这些系统只具有一定的参考意义,而不能满足国内隧道病害管理需要。

为解决上述问题,本文在调研现有大数据平台的基础上,基于当前自行研制的系列智能化隧道病害采集设备,如:隧道智能综合检测车、轨行式三维激光扫描系统、表观检测系统等进行健康数据采集,基于人工智能、大数据等技术研发了具备设备管理、病害管理、大数据智能分析与病害预警等功能的隧道结构健康管理大数据平台,通过建立隧道病害健康“档案馆”,辅助专业人员掌握隧道病害发育规律,预测隧道病害发展趋势,为科学制定隧道病害维修养护计划提供参考,提高隧道运营管理效率,降低隧道运营维护成本,确保隧道运营安全。

1 系统平台总体方案设计

该大数据平台使用由隧道智能综合检测车搭载的病害采集设备,对隧道的内部病害和表观病害进行全面的采集;在采集到数据后,部分数据可通过检测车部署的移动处理工作站进行处理,其余原始病害数据在提交至隧道病害存储系统,对病害数据进行清洗,去掉原始数据中的重复数据、错误数据、无关数据后,采用训练好的神经网络模型进行识别分析,按照平台提供的数据导入模板将病害数据入库。系统方案设计如图1所示。基于本平台开展隧道病害数据的管理和应用,可帮助相关技术人员全面掌握隧道结构安全状态,为后期隧道运维提供数据支撑。

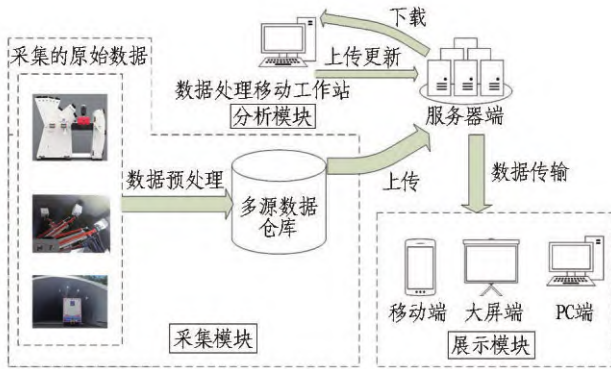


图1 系统方案设计

Fig. 1 System scheme design

下文从数据采集、数据分析、数据展示、服务器4大模块对该平台进行介绍。

1.1 数据采集模块

在本系统中,原始数据的采集依托于现有的智能采集设备,如隧道智能综合检测车、轨行式三维激光扫描系统、表观检测系统等。数据源包括静态数据、检测数据与车载系统数据,具体数据类型可分为如下几种:

1)静态数据。隧道基础数据(名称、长度、分类、里程桩号、维护单位等)、隧道管养知识、隧道病害数据、隧道空间分布数据、用户权限数据以及元数据(描述流程、信息和对象的数据)等。

2)检测数据。激光扫描检测系统获取的原始点云数据,处理成果(检测报表、灰度影像等);探地雷达检测系统获取的原始雷达数据,处理成果(图像、检测报表等)。

3)车载系统数据。里程数据、惯导数据、GPS数据等。数据类型包括流式数据、空间数据、图像数据、文档数据与结构化的业务数据等。

根据数据的结构类型和使用方式,平台将不同类型、不同数据结构、不同分辨率以及不同粒度的多源异构数据进行汇聚,通过建立标准并高效方便的病害数据库,解决隧道病害建库问题。

1.2 数据分析模块

基于构建的病害库,利用机器学习中的随机森林算法,对病害数据进行挖掘,实现隧道病害大数据智能化分析,实现由传统经验的评价诊断向数据化决策方向转变;基于深度学习的YOLOV4架构,开发了隧道病害智能识别模型,并整合至数据处理软件,可将部分隧道病害数据进行智能识别后上传到大数据平台进行统一管理。

1.3 数据展示模块

该大数据平台的信息展示终端包括大屏端、移动端、电脑端。其中:大屏端用于在显示看板的屏幕上

展示所述目标数据、移动端用于在移动终端的应用程序上展示所述目标数据;电脑端用于在计算机的网页浏览器上展示所述目标数据。移动端可方便使用人员随时随地查看到检测设备工作状态、健康状态、地理位置等各项信息,方便检测设备的管理维护,为维护和调度检测设备提供数据支撑。

1.4 服务器模块

服务器端包括数据存储模块、分析处理模块。其中:数据存储模块包括Redis存储单元、MySQL存储单元、Kafka存储单元和Minio存储单元。Redis存储单元用于存储缓存数据,所述分析处理模块通过Redis Client接口调用所述缓存数据;MySQL存储单元用于存储业务数据,分析处理模块通过JDBC接口调用所述业务数据;Kafka存储单元用于存储通知、事件数据,分析处理模块通过Kafka Client接口调用所述通知、事件数据;Minio存储单元用于存储图像、视频数据,分析处理模块通过Minio接口调用所述图像、视频数据。

服务器端可在网页上对各项隧道病害信息进行图表化展示,包括在网页上展示隧道各个区段的病害数量柱状图、病害类型饼状图、各等级病害的数量表、病害集中区段TopN($N \geq 1$)统计数据 and 病害档案列表。其中:病害档案列表包括每处病害的病害类型、病害等级、首次检出时间、最近检测时间、检测次数、所在区段和位置、所述病害的发育变化折线图等。

2 系统平台总体技术架构

2.1 总体技术架构设计

架构设计是隧道结构健康管理大数据平台能否成功实施的关键环节,本平台采用Spring Boot+MyBatis Plus架构,应用分布式的Redis和MySQL部署开发技术研发了隧道结构健康管理大数据平台。本平台前端采用B/S架构,后端采用分层架构设计。总体技术架构如图2所示,可分为硬件层、架构层、功能层、应用层4个层次。

1)硬件层。提供平台运行的硬件资源,包括服务器、显示器、大屏端以及部署在服务器上的数据库等。

2)架构层。提供主机管理、网络管理、数据管理、接口管理等功能,是功能层和硬件层的纽带和桥梁。

3)功能层。根据实际业务需求开发平台需要的功能模块,并建立功能模块之间的逻辑关系、数据关系和接口。

4)应用层。用户通过PC端或移动端输入需求,应用层则将功能层单一的功能模块组装成满足实际业务需求的完整功能,呈现给用户,供用户使用。

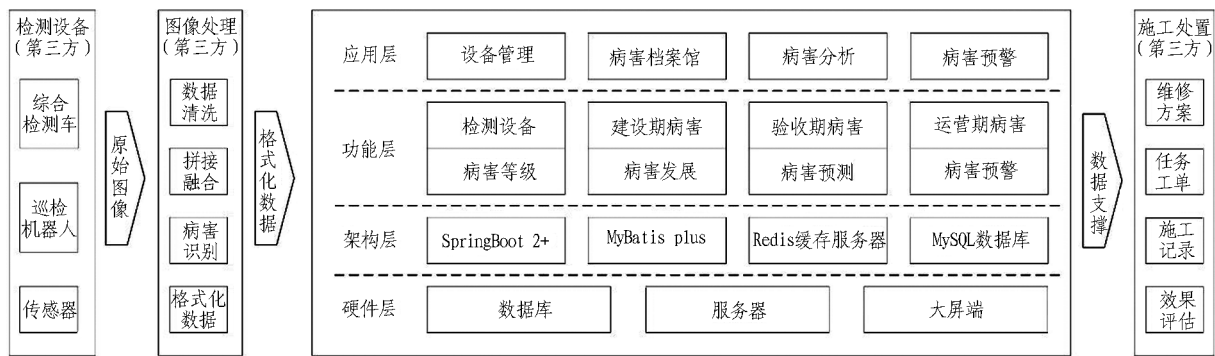


图 2 平台技术架构图

Fig. 2 Platform technical architecture

2.2 数据库设计

数据库设计是隧道结构健康管理大数据平台的核心,也是平台开发中最重要的部分,它既有隧道病害信息查询、统计、分析、存储的功能,又有数据传递的作用。因此,在需求分析的基础上,本平台采用 MySQL 数据库管理病害档案,Redis 处理平台中的非关系型数据,确保了提取信息的准确性、及时性和完整性。建立隧道病害信息所涉及的数据库信息表,通过病害检测、处治之间的逻辑关系,对数据库表进行归类整理,并建立信息之间的关联,形成数据信息表之间的关系图。内部病害数据信息表如表 1 所示,大数据平台的各病害数据库关系如图 3 所示。

表 1 内部病害数据信息表

Table 1 Tunnel internal disease data information

字段	数据类	可否为空	说明
id	int	NOTNULL	ID
disease_id	varchar	NOTNULL	病害 ID
disease_type	char		病害类型
disease_grade	char		病害等级
disease_length	double		病害长度
disease_depth	double		病害深度
subway_lines	varchar		线路
sections	varchar		区段
location	varchar		位置
angle	varchar		角度
measured_value	varchar		病害实测值
design_value	varchar		病害设计值
collection_time	datetime	NOTNULL	采集时间

3 系统平台业务功能研发及应用

3.1 总体业务功能架构

基于隧道结构健康管理大数据平台的需求分析和开发目的,对系统的业务功能进行了梳理,最终得到如图 4 所示的平台业务功能设计框架。本平台支持移动

端、大屏端、PC web 端数据展示,本文以 PC 端为例,对各功能模块进行简单介绍。

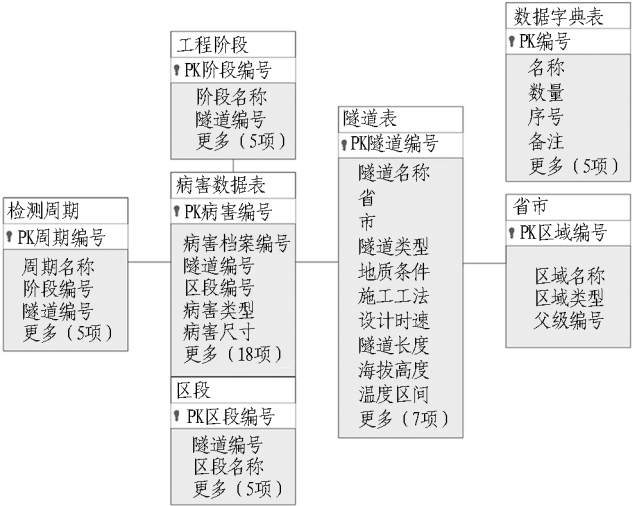


图 3 病害数据库表关系

Fig. 3 Relation of tunnel disease database tables

- 1) 检测设备管理。基于电脑端和移动端实时查看隧道病害检测设备的位置信息、健康状况、工作状态、数据采集情况等,实现对现场检测设备的实时管理和调度。
- 2) 隧道病害管理。实时统计、查询、展示隧道表观病害和内部病害信息,以图表形式在平台界面滚动显示,并根据实际需要,批量生成隧道病害信息统计报告。
- 3) 隧道病害大数据分析。通过历次病害检测数据的对比分析,建立隧道病害数字档案,根据病害发展现状预测其发展趋势,对于达到病害预警值时,触发预警提示。
- 4) 病害报告管理。基于系统设置中各种病害的分级标准,自动评判病害等级,参考类似病害处治措施,自动生成隧道病害处治报告。
- 5) 系统设置。设置用户权限、不同类型(公路、铁路、城市地铁)隧道病害分级标准、预警标准、设备使用单位、检测阶段(建设期、运营期)等信息。

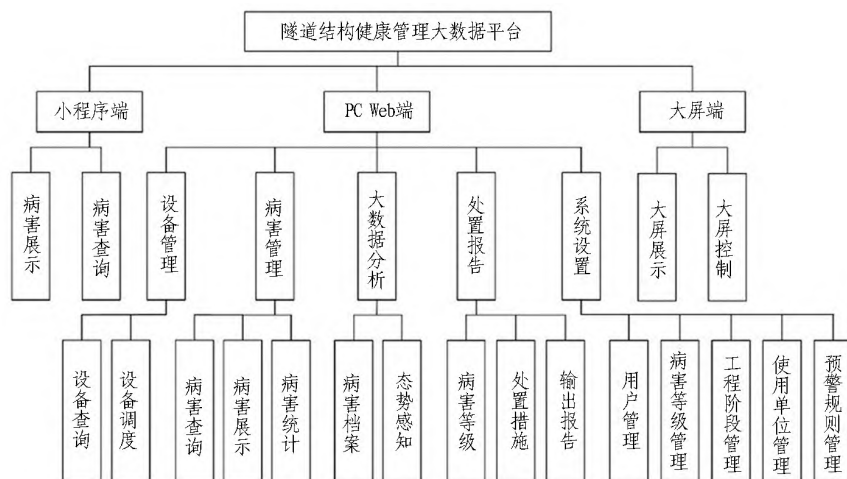


图 4 平台业务功能设计框架

Fig. 4 Design of platform events architecture

3.2 特色功能模块介绍

3.2.1 检测设备管理

3.2.1.1 检测设备状态查看

设备管理人员可基于 PC 端或移动端实时查看隧道病害检测设备的位置、数量、设备参数、健康状态、工

作状态、运行参数、检测能力、搭载设备等信息,并以图表方式形象直观地展示,便于管理人员快速掌握检测设备的当前状态,为其动态管理和调度奠定基础。检测设备查询界面如图 5 所示,设备参数如图 6 所示,平台检测能力如图 7 所示。



图 5 病害检测设备查询界面

Fig. 5 Disease detection equipment query interface

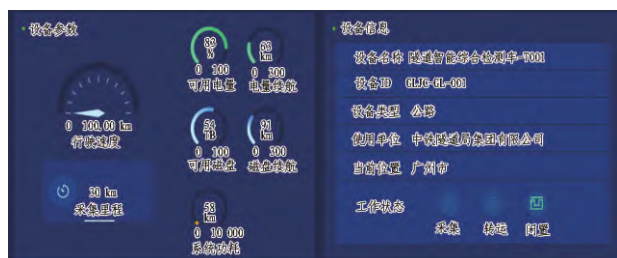


图 6 设备参数

Fig. 6 Device parameters

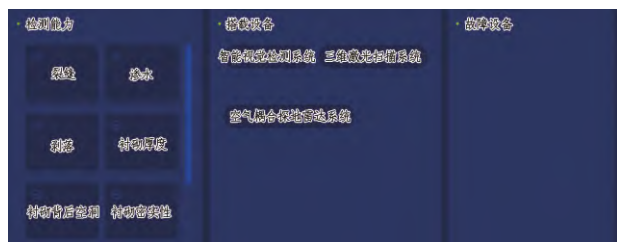


图 7 平台检测能力

Fig. 7 Detection functions

3.2.1.2 检测设备调度管理

在实时掌握隧道病害检测设备状态及分布情况的基础上,基于隧道结构健康管理大数据平台可通过电子地图筛选或设备 ID 搜索等方式,快速查找所需设备的列表及详细信息。设备管理人员可及时掌握检测设备的位置及状态,实现对病害检测设备的动态跟踪和科学调度,使其能够更加高效运转,降低设备闲置时间,并为合理制定隧道病害检测计划提供参考。设备筛选条件设置如图 8 所示,筛选出的设备详情如图 9 所示。

3.2.2 隧道病害信息管理

3.2.2.1 病害数据查看

以病害统计图(柱状图、折线图、饼状图等)和列表方式,形象展示隧道不同阶段(建设期、验收期、运营期)表观病害和内部病害的统计结果。以隧道名称为查询维度,任意选择一条隧道或隧道中的某一个或几个区间,直观查看该隧道或区间内的病害类型、等级和数量情况。在表观及内部病害图表统计中,可直观展示各类病害数量及占比、病害等级数量及占比、Top5 病害数量及

占比等信息。表观病害统计如图 10 所示。

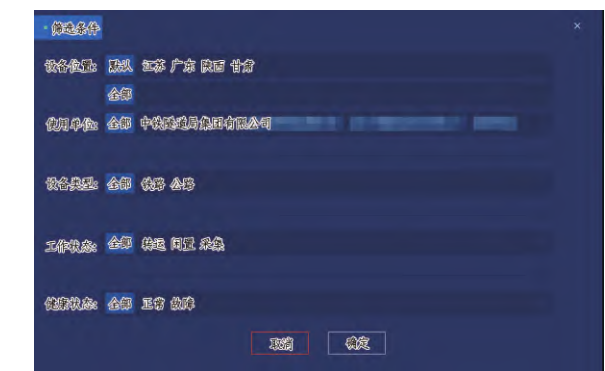


图 8 设备筛选条件设置

Fig. 8 Device filter settings

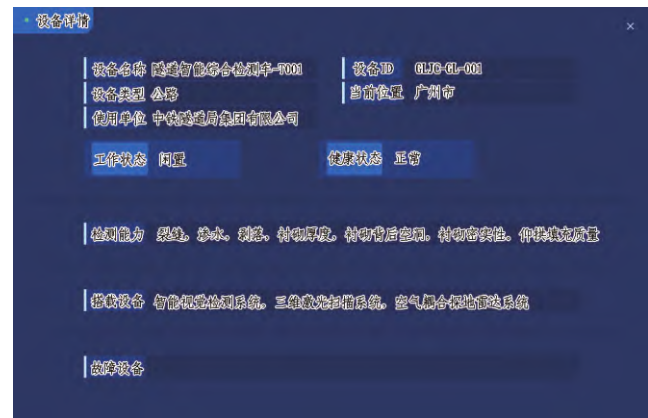


图 9 筛选出的设备详情

Fig. 9 Filtered device details



图 10 表观病害统计图

Fig. 10 Statistical chart of tunnel apparent diseases

在表观及内部病害列表统计中,可通过打标签形式为隧道病害添加备注信息,如水文地质条件、气象活动、人为活动等,同时,可上传隧道病害的处治报告。

点击列表中的病害小图,可在弹窗中通过放大、缩小、旋转等操作查看该病害的局部细节。表观病害列表及查看病害小图如图 11 和图 12 所示。

序号	病害ID	类型	等级	位置	区域	位置	病害小图	病害备注	是否上传	操作
1	1200	裂缝	一级(适用)	1#导线上行	AA-12区段	22°47' 01			是	详情
2	1201	剥落	二级(适用)	1#导线上行	AA-12区段	22°47' 35			是	详情
3	1202	裂缝	一级(适用)	1#导线上行	AA-12区段	22°47' 50			是	详情
4	1203	裂缝	一级(适用)	1#导线上行	AA-12区段	22°47' 17			是	详情
5	1204	渗水	二级(适用)	1#导线上行	AA-12区段	22°47' 12			是	详情
6	1205	剥落	一级(适用)	1#导线上行	AA-12区段	22°47' 10			是	详情

图 11 表观病害列表

Fig. 11 List of tunnel apparent diseases

3.2.2.2 病害报告管理

在隧道病害报告管理界面,点击生成报告按钮后,在弹窗中完成报告需要包含的关键信息,平台则会根

据设置的筛选条件,从数据库中提取相关信息,自动生成隧道病害信息统计报告。基于平台生成的病害统计报告如图 13 所示。

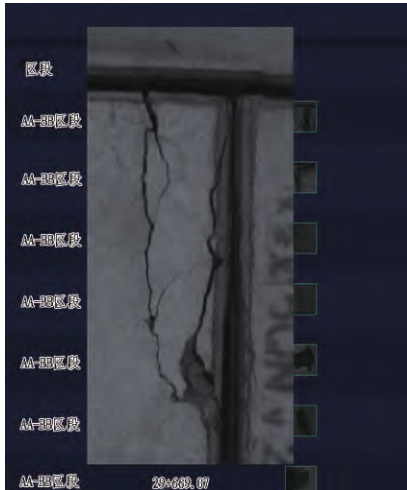


图 12 表观病害小图

Fig. 12 Thumbnail of tunnel apparent diseases

病害所属地	广东广州市某隧道				
病害检测时间	运营期201703				
表观病害统计					
裂纹总数	6	最大裂纹宽度/m	0.001 2	占比/%	30.00
剥落总数	6	最大剥落面积/m²	0.450 0	占比/%	30.00
渗水总数	8	最大渗水面积/m²	4.000 0	占比/%	40.00
雷达病害统计					
脱空总数	2	最大长度/m	0.500 0	占比/%	100.00
不密实总数	0	最大长度/m	0	占比/%	0
空洞总数	0	最大长度/m	0	占比/%	0
衬砌厚度不足总数	0	最大长度/m	0	占比/%	0
雷达病害各等级病害数量统计					
行别	AA级	AI级	BI级	C级	病害总数/个
上行	0	1	1	0	2
下行	0	1	0	2	3
总计/个	0	2	1	2	5

图 13 病害统计报告

Fig. 13 Report of tunnel diseases statistics

3.2.3 隧道病害大数据分析及档案报告管理

3.2.3.1 病害空间分布分析

以病害名称为查询维度,任意选择某一类型的病害,基于平台直接查看该病害在某一省、市、隧道、区间中的区域分布情况,通过该病害在空间维度的统计分析,研究其在不同区域中的分布规律,可为后续隧道优化设计、病害成因分析和维修养护措施提供数据支撑。某一省份隧道病害空间分布如图 14 所示。

平台可通过病害类型和病害等级进行组合约束,完成筛选条件设置。点击地图中的某个省,则界面右侧将显示受该病害(已设定的病害类型和等级)影响隧道的玫瑰图,以及受该病害影响最严重的 10 个区间列表。受某种病害影响最严重的区段 Top10 如图 15 所示。

3.2.3.2 病害态势分析

1)病害档案管理。基于平台中的病害档案模块,为每一处病害建立一份健康档案,将隧道建设期、运营期的历次检测数据归类整理,以列表的形式展示病害档案信息,并在列表中以弹窗方式查看隧道病害的详细信息,实时查看某一时间段内某种隧道病害数据的变化情况。隧道病害档案列表如图 16 所示。

2)病害发育变化及趋势。根据某一病害历次检测出的数据,自动绘制该病害的发育曲线图,用户可直观了解该病害尺寸的发育情况。同时,根据历次病害检测数据,通过对比同一位置病害的形态和尺寸变化,得出该病害在历次检测时间段内的发育发展变化。

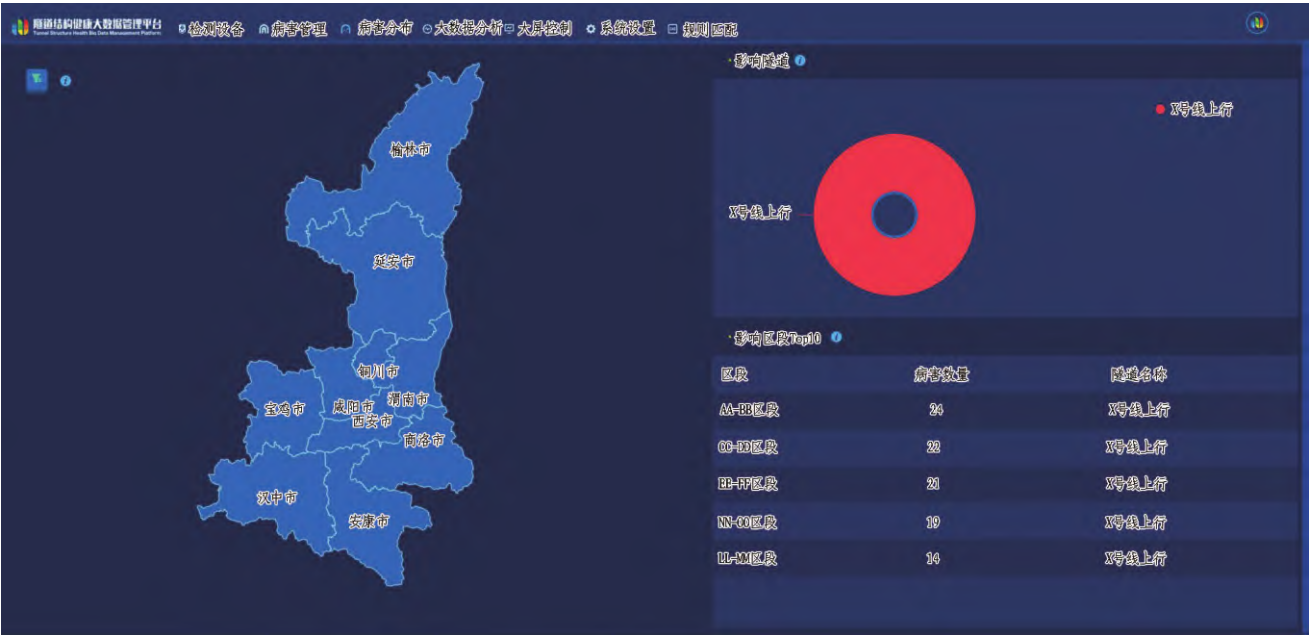


图 14 病害空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of tunnel diseases

由于病害发育变化可被视为一个回归任务,本文基于存储于大数据平台的病害数据制作了病害发育的数据集,将该病害数据进行数据清洗处理获得了可靠的病害发育数据。本平台使用机器学习中的随机森林算法完成基本建模,该模型输入的特征参数为渗漏水(有无及大小)、结构背后空洞(有无)、围岩质量、环境因素(温度、湿度)、工程特征(隧道直径、埋深)、前 2 次裂缝的几何特征(长度、宽度);该模型的输出为裂缝的预期发育变化(宽度)。为了解决输入特征参数尺度不一的问题,对输入的参数特征进行了归一化处理,而后对模型参数与训练数据的时间序列进行调整,自动调整影响裂缝发育的特征权重。在随

机森林算法的预测效果上,在训练中采用了 MAPE 指标进行评估。

影响区段 Top10		
区段	病害数量	隧道名称
AA-BB区段	24	I号线上行
CC-DD区段	22	I号线上行
EE-FF区段	21	I号线上行
GG-HH区段	19	I号线上行
II-JJ区段	14	I号线上行

图 15 影响区段 Top10

Fig. 15 Top10 of influencing segment

病害档案列表															
序号	病害ID	病害等级	病害类型	隧道	位置信息	里程	病害长度/m	病害宽度/m	病害发展区段	检测值/mm	设计值/mm	病害等级	处理尺寸	处理时间	操作
1	5201	B	衬砌背后空洞	II 山隧道	上行点	22+532.75	0.3	0.50	全段				无	2015-01	标注
2	5207	A1	膨胀	II 山隧道	下行点	22+532.31	0.5	0.22	全段				无	2015-01	标注
3	5203	C	膨胀	II 山隧道	下行点	22+532.15	0.5	0.40	全段				无	2015-01	标注
4	5209	C	衬砌背后空洞	II 山隧道	下行点	22+532.05	1.0	0.20	全段				无	2015-01	标注
5	5240	A1	衬砌背后空洞	II 山隧道	上行点	22+532.31	0.22	0.40	全段				无	2015-01	标注
6	5241	B	衬砌背后空洞	II 山隧道	上行点	22+532.31	1.0	0.40	全段				无	2015-01	标注

图 16 病害档案列表

Fig. 16 Tunnel disease data list

基于病害数据构建数据集训练了随机森林模型,用于挖掘该病害的发展规律。某病害的发育变化趋势如图 17 所示。

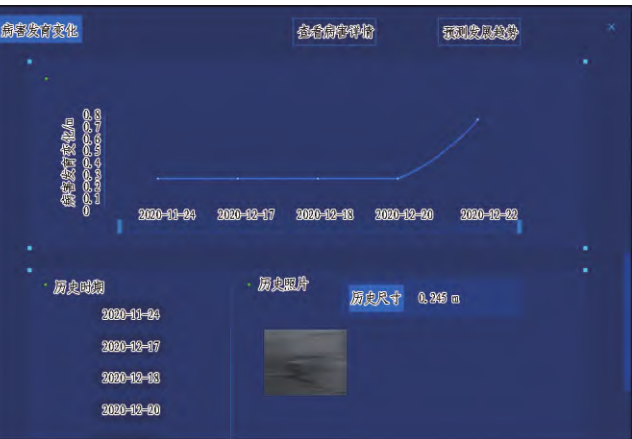


图 17 病害发育变化

Fig. 17 Developmental changes of tunnel disease

3.2.3.3 病害预警

平台系统设置中有设置病害预警规则的功能模块,当病害数据导入至平台后,可通过以下 3 种方式判

定是否触发预警,并设置相应的预警阈值。

1)按病害等级预警。通过下拉选择当病害等级达到某一级别时预警。

2)按病害尺寸预警。填写病害预警尺寸的上下限,当病害尺寸位于该区间时触发预警。

3)发育变化率。填写病害发育变化率预警的上下限,根据连续 2 次检测数据,计算病害的发育变化率,当达到设定区间时触发预警。当前训练的随机森林模型尚未达到可实际应用的水平,发育变化率采用如下公式进行计算:

$$P_{grow} = (S - S_{pre}) / S_{pre} \times 100\%。$$

式中: P_{grow} 为发育变化率; S 为本地病害尺寸; S_{pre} 为上次病害尺寸。

达到预警值后,平台将需要预警的病害标记为“预警”状态,并向登录平台的相关管理人员推送弹窗信息。

3.2.3.4 高危病害分析

平台系统设置中有设置病害等级划分规则的功

能模块,可根据国标、行标或企标,为病害的尺寸和等级建立对应关系,并在平台中录入对应的病害等级划分规则。针对导入至平台中最新一期的隧道病害检测数据,平台自动判定并显示每种隧道病害的

最高病害等级及病害数量,方便管理人员从海量的病害数据中,快速关注到本次检测的高危病害信息,以便及时采取处治措施。某隧道高危病害信息如图 18 所示。

序号	病害ID	类型	等级	首次检测时间	最新检测时间	检测次数	隧道	区段	状态	操作
1	1358	裂缝	一级(通用)	2016-05	2018-01	3	山岭隧道	全段	危险	≡ ⏮ ⏭ ⏯ ⏴ ⏵
2	1357	剥落	三级(通用)	2016-05	2018-01	3	山岭隧道	全段	危险	≡ ⏮ ⏭ ⏯ ⏴ ⏵
3	1356	剥落	三级(通用)	2016-05	2018-01	3	山岭隧道	全段	危险	≡ ⏮ ⏭ ⏯ ⏴ ⏵
4	1355	渗水	五级(通用)	2016-05	2018-01	3	山岭隧道	全段	危险	≡ ⏮ ⏭ ⏯ ⏴ ⏵
5	1354	剥落	三级(通用)	2016-05	2018-01	3	山岭隧道	全段	危险	≡ ⏮ ⏭ ⏯ ⏴ ⏵

图 18 高危病害信息

Fig. 18 Tunnel high-risk disease information

3.2.4 隧道裂缝智能识别算法

利用图像识别模型进行隧道裂缝病害的智能识别检测,是将隧道表面病害存储于该大数据平台进行展示的一个前置处理步骤。平台目前实现了隧道裂缝、渗水、破损 3 种病害的智能识别。这 3 种病害的智能处理流程与采用的神经网络架构基本一致,通过数据处理软件将采集到的原始隧道表面病害数据中的裂缝病害进行智能识别提取而后存储于大数据平台。

以隧道裂缝智能识别算法为例,该模型算法基于 YOLOV4 架构,其中,特征提取骨干网络模型采用了卷积神经网络模型中的 VGG16 架构,通过在构建好的隧道裂缝数据集进行训练,最终实现对隧道表面裂缝的智能识别。

VGG16 的具体架构如图 19 所示。该模型包含 13 个卷积层,3 个全连接层,采用卷积组提取病害图像特征思想,最后经全连接层实现目标分类。隧道裂缝图像通常只占几个像素,为提取裂缝图像深层特征,采用 VGG16 的 13 个卷积层和 5 个池化层组合提取特征,提取特征效果明显优于 VGG11,即效果优于 8 个卷积和 5 个池化层组合。由于隧道裂缝图像呈细长不同走势特征,加速网络深度有利于特征提取,防止或减轻网络模型过拟合,每个全连接层后连接 dropout。

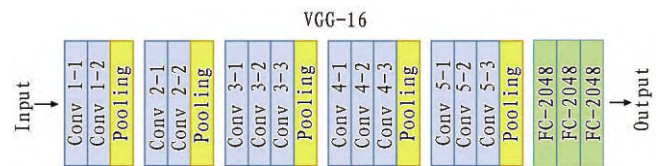


图 19 VGG16 模型架构

Fig. 19 Architecture of VGG16

本模块所采用的隧道表面裂缝数据集如图 20 所示,该数据集中样本数量为 1 000,样本大小为 224×224 (像素)。隧道裂缝识别成果如图 21 所示。

3.3 大数据平台应用——以某工程隧道裂缝病害为例

为直观展示本大数据平台的数据处理流程,本节以某隧道的裂缝病害为例,从数据采集、数据分析、数据展示等全流程进行示例。

3.3.1 数据采集

数据采集是从真实隧道工程获取原始数据的过程。以隧道裂缝病害数据的采集为例,本平台使用自行研发的隧道智能综合检测车上搭载的表观病害检测系统进行采集。该表观病害检测系统设备如图 22 所示。该系统包括 10 个 2 500 万高分辨面阵相机阵列、5 个高速万兆网卡、工控机、LED 光源阵列、数据存储单元、供电系统,通过控制 10 个高分辨面阵相机同步触发采集图像。该设备采集到的图像数据量大,分辨率高,可采集到最小 0.2 mm 的裂缝。为提高数据存储效率,本平台采用分布式存储方案,将扫描到的大量隧道健康数据暂存于隧道智能检测车搭载的多个工控主机。

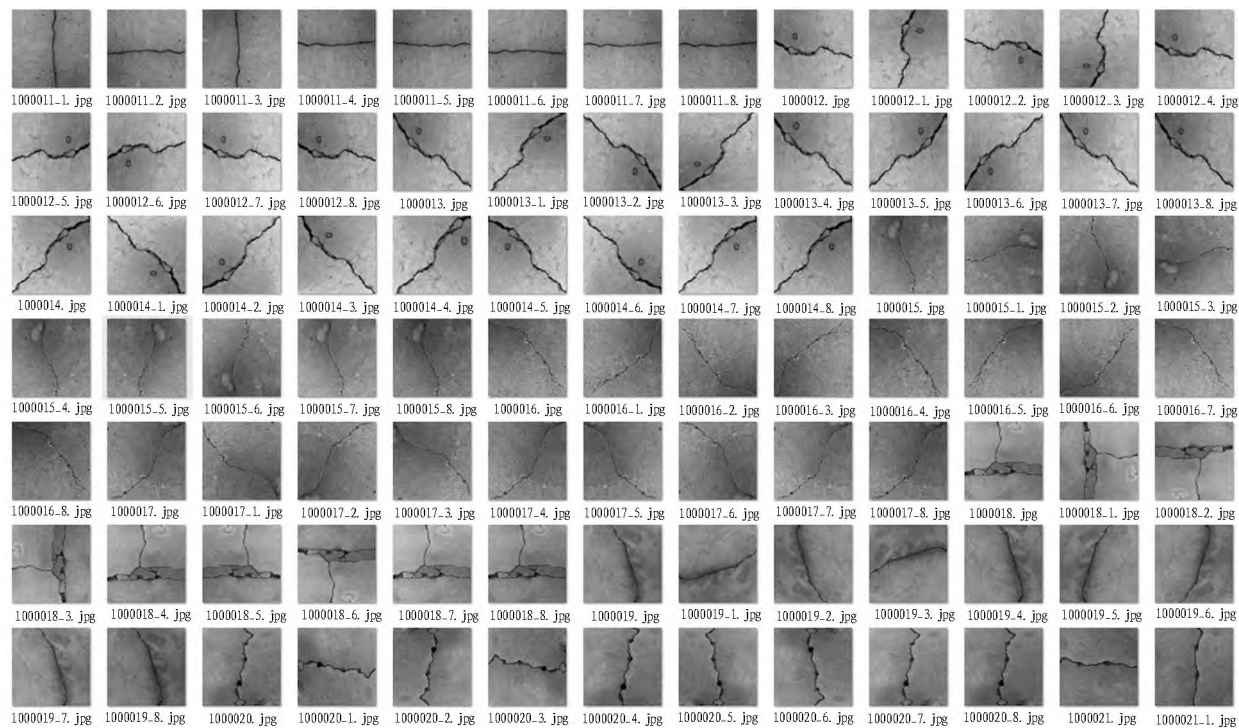


图 20 隧道裂缝数据集

Fig. 20 Tunnel crack dataset

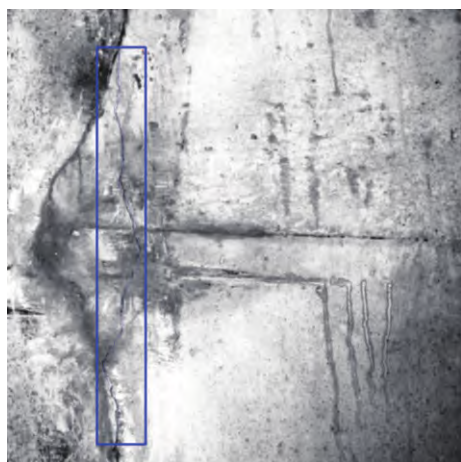


图 21 隧道裂缝识别成果

Fig. 21 Recognition results for tunnel crack

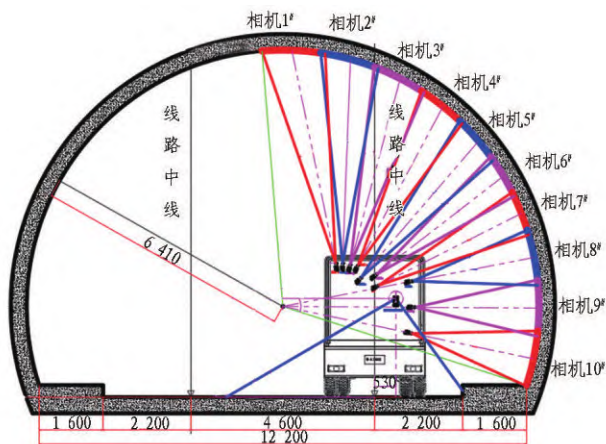


图 22 表观病害检测系统(单位: mm)

Fig. 22 Tunnel apparent disease detection system (unit: mm)

3.3.2 数据分析

在采集到隧道表观健康数据后,将暂存于检测车工控主机内的数据转存入大数据平台的存储主机,而后对原始的健康数据进行预处理以满足图像识别算法对图片格式及大小的要求,最后输入神经网络识别模型进行处理。隧道裂缝数据分析处理的流程如下:

- 1) 将采集图像经 Mask 匀光算法消除光照不均带来的影响。
- 2) 将采集到的原始图像切割成 224×224 (像素) 的分块图像。
- 3) 将所有分块图像输入隧道裂缝识别模型,进行隧道裂缝的智能识别标注,定位隧道裂缝。
- 4) 对标注过的分块图像进行拼接,计算病害尺寸大小,得到经过标注的病害图。
- 5) 对图像尺寸进行压缩,以满足大数据平台数据的展示要求。

隧道裂缝识别处理软件界面如图 23 所示。

3.3.3 数据多元展示

经过处理软件对病害进行处理后,将该裂缝病害图像及相关信息上传于大数据平台,供相关人员参考查阅。用户可从 PC 端与小程序端对上传至大数据平台的详细病害信息进行查看。

除了展示基本的病害信息,本平台可通过点击工具栏上的“生成报告”图标生成报告,使用此功能需要

4 结论与探讨

4.1 结论

针对当前隧道病害数据量大、利用率低,不能有效指导后续隧道运维的现状,本文采用 Spring Boot + MyBatis Plus 架构,应用分布式的 Redis 和 MySQL 部署开发技术研发了隧道结构健康管理大数据平台。本文具体从检测设备管理、病害信息管理、病害大数据分析、图像识别算法等方面进行了介绍,验证了平台的可靠性。本文开发的隧道结构健康管理大数据平台与传统数据管理平台相比具有以下特点:

1)该隧道结构健康管理大数据平台能够满足对常见病害数据进行管理展示的功能要求,囊括的病害数据种类齐全,便于工作人员全面掌握隧道健康状态。

2)通过人工智能图像识别算法对病害图像进行智能识别。通过采集的表观病害图片,训练了对应病害的神经网络模型,解决了病害图片识别大量依赖人工且效率过低的问题。

3)该平台支持隧道信息多元化查询展示。相关人员可从实验室健康管理大数据中心大屏幕、可联网的 PC 端以及个人手机等多个维度实时获取隧道病害信息,真正实现了随时随地对有关隧道病害信息的了解掌握,有助于及时掌握关注的病害情况,辅助科学决策。

4.2 探讨

隧道病害大数据分析平台的应用极大提高了隧道养护的精准性和及时性,将传统隧道养护由主观经验型向客观数据型转变,发展潜力巨大,但由于隧道病害数据积累不足等因素的影响,也存在以下一些不足之处:

1)当前大数据平台存储的数据只能进行二维数据展示,尚不能对隧道病害进行三维立体展示,病害结果呈现方式还有优化空间。

2)隧道病害的智能识别处理当前使用 PC 端软件进行处理,大数据平台尚不具备病害的在线智能识别功能。且受限于病害样本数据量不足,多数病害未能构建足够样本数量的数据集,因此尚不支持对所有隧道结构病害的智能识别。当前已支持的图像裂缝、渗水、破损识别模型,由于数据集样本数量不足等因素,其识别精度有待进一步提升。

为持续完善优化该大数据平台,计划后期将从引入病害模型的三维展示、不断扩充并构建隧道病害数据集、基于大量隧道病害数据训练可靠的神经网络模

型、轻量化人工智能模型、隧道评价与处置意见智能推荐方面进行研究。

参考文献(References):

- [1] 巩江峰, 王伟, 黎旭, 等. 截至 2022 年底中国铁路隧道情况统计及 2022 年新开通项目重点隧道概况[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(4): 721.
GONG Jiangfeng, WANG Wei, LI Xu, et al. Statistics of railway tunnels in China by the end of 2022 and overview of key tunnels of projects newly put into operation in 2022[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(4): 721.
- [2] 2022 年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2023(7): 29. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.07.009.
2020 statistical bulletin on the development of the transportation industry[J]. China Water Transport, 2023(7): 29. DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.07.009.
- [3] 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2023(4): 13. DOI: 10.14052/j.cnki.China.metros.2023.04.002.
Urban rail transit 2022 annual statistical and analysis report [J]. China Metro, 2023(4): 13. DOI:10.14052/j.cnki.China.metros.2023.04.002.
- [4] 王志杰, 徐海岩, 周平, 等. 高速公路隧道衬砌结构病害整治技术研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 125.
WANG Zhijie, XU Haiyan, ZHOU Ping, et al. Study on the treatment of lining defects of highway tunnel [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 125.
- [5] 吴贤国, 邓婷婷, 陈彬, 等. 面向运营隧道结构健康监测系统大数据压缩感知研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(4): 674.
WU Xianguo, DENG Tingting, CHEN Bin, et al. Research on compressed sensing of big data for structural health monitoring system of operating tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(4): 674.
- [6] 黄震. 隧道检测设备的发展及未来展望[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 98.
HUANG Zhen. Development and future prospect of tunnel machine detection equipment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Denelopment, 2021, 38(2): 98.
- [7] 张俊儒, 燕波, 龚彦峰, 等. 隧道工程智能监测及信息管理系统的研究现状与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 567.
ZHANG Junru, YAN Bo, GONG Yanfeng, et al. Research

- status and prospects of intelligent monitoring technology and information management system for tunnel engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 567.
- [8] 罗鑫. 公路隧道健康状态诊断方法及系统的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- LUO Xin. Study of diagnosis method and system for health condition of highway tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [9] 胡建华, 徐玉桂. 基于 GIS 的隧道病害管理系统设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(5): 2090.
- HU Jianhua, XU Yugui. Design and realization of tunnel disease management system based on GIS [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(5): 2090.
- [10] 方恩权. 基于 Web 技术的地铁隧道结构调查管理系统研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 40.
- FANG Enquan. On Web-based investigation & management system for subway tunnel structure [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 40.
- [11] 乐弋舟, 漆泰岳, 陈桂龙, 等. 基于 PHP 的隧道衬砌裂缝信息查询管理系统开发[J]. 路基工程, 2018(6): 68.
- YUE Yizhou, QI Taiyue, CHEN Guilong, et al. Development of PHP-based information query management system for tunnel lining cracks[J]. Subgrade Engineering, 2018(6): 68.
- [12] 张云龙, 夏才初, 张国柱, 等. 基于虚拟现实的公路隧道病害可视化管理系统[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊1): 1740.
- ZHANG Yunlong, XIA Caichu, ZHANG Guozhu, et al. Visual road tunnel damage management system based on virtual reality [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S1): 1740.
- [13] 朱德庆, 李涛, 姚剑, 等. 基于 BIM 的山岭隧道施工信息化管理系统研发与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊2): 216.
- ZHU Deqing, LI Tao, YAO Jian, et al. Development and application of a bim-based informationized management system for mountain tunnel construction [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S2): 216.
- [14] 孙中秋, 袁松, 肖春红. 基于工程经验法的山岭公路隧道信息化设计体系研究及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(5): 849.
- SUN Zhongqiu, YUAN Song, XIAO Chunhong. Research and application of an informatized design system for mountain highway tunnels based on engineering empirical methods[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 849.
- [15] 孙振川, 钱彤途, 任颖莹, 等. 隧道掘进机工程大数据管理平台关键技术及应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(6): 783.
- SUN Zhenchuan, QIAN Tongtu, REN Yingying, et al. Study on key technologies and application of engineering big data management platform of tunnel boring machine [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6): 783.
- [16] 潘良波, 周文, 丁志庆, 等. 城市地下空间信息集成管理与服务平台关键技术及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(4): 588.
- PAN Liangbo, ZHOU Wen, DING Zhiqing, et al. Key technologies and application of information management and service platform for urban underground space [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(4): 588.