



文章编号:1001-9081(2019)05-1490-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018102121

面向交通安全的隧道群云监测系统

马庆禄, 邹政*

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

(*通信作者电子邮箱 zou_zh@qq.com)

摘要:传统的公路隧道管理系统存在管理独立分散、隧道各部位监测不够灵活、病害细节可视化程度较低等问题。针对以上问题,提出了一种面向交通安全的隧道群区域性联测联控理念。首先通过云数据库将众多隧道零散的监测数据整合到一起,实现隧道集群管理;其次设计了一种“分/合”式的分段方法以对隧道任意位置的病害进行监测;然后依托地理信息系统(GIS)地图并联合Java服务器页面(JSP)、CANVAS技术建立服务于路网交通安全的隧道群病害可视化监测平台;最后实时分析处理监测数据并对隧道安全状况进行分级预警,由此对路网交通安全作出评判。实验基于某一区域内的隧道病害数据集,结果表明所提系统实现了隧道集群管理、病害细节可视化和隧道安全分级等功能,同时,系统对路网交通安全也具备一定的预警能力。

关键词:公路隧道;病害监测;隧道安全;交通安全;云监测;CANVAS技术;分段监测

中图分类号:TP277; U459.2 文献标志码:A

Cloud monitoring system of tunnel groups for traffic safety

MA Qinglu, ZOU Zheng*

(College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Some defects exist in traditional management systems of highway tunnels, such as decentralized and independent management, lack of flexibility in each-part monitoring and low degree of visualization of disease details. Aiming at these problems above, a regional joint control and measurement concept of tunnel groups for traffic safety was proposed. Firstly, the scattered monitoring data of tunnels were integrated into a cloud database to realize the management of tunnel group. Secondly, a “division/combination” segmental monitoring method was designed to monitor the diseases at any position of tunnels. Thirdly, on the basis of GIS (Geographic Information System) map, JSP (Java Server Pages) technology and CANVAS technology, a visualized monitoring platform of disease monitoring of tunnel group for traffic safety of road network was established. Finally, the monitoring data were analyzed and processed real-timely and classified pre-warning of tunnel safety status was realized, so that traffic safety of road network could be judged. Experiments were carried out on the data set of tunnel diseases in a certain area. The results show that the proposed system realizes the functions such as tunnel group management, disease details visualization and tunnel safety classification; meanwhile, the system also has certain pre-warning ability for traffic safety of road network.

Key words: highway tunnel; disease monitoring; tunnel safety; traffic safety; cloud monitoring; CANVAS technology; segmental monitoring

0 引言

隧道作为公路交通的重要基础设施,其安全监测技术是保障公路通行安全、提高公路服务质量及经济效益的关键^[1]。在当前公路隧道运营管理中,有的地方仍然以人员巡查结合视频监控技术为主,存在信息化程度不高、管理技术相对落后等问题^[2]。

对于公路隧道信息化监测管理方面的研究,Alvear等^[3]设计了公路隧道的应急管理决策支持系统,为管理者提供了实时处理紧急事件的决策建议;Koch等^[4]建立了一种隧道信息模型框架,支持隧道工程的模拟和可视化;Makarov^[5]建立了一个独立的隧道运输系统并增加了地下停车场,以便能通过增强

城市生态和生活力的方式解决运输问题;黄廷等^[6]将建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术引入公路隧道的运维管理,并结合Autodesk平台进行二次开发,实现了公路隧道运维管理的可视化;王继骥^[7]通过车辆全球定位系统(Global Positioning System, GPS)帮助监控员及时通过视频发现滞留车辆,快速救助疏导,提高隧道行车安全;蒲雯等^[8]认为隧道交通安全系统分析与决策过程呈现出明显的大数据特征;蒲浩等^[9]基于Microsoft Visual Studio 2010环境开发了隧道监控的三维实时交互可视化信息平台;邓周全等^[10]建立了一种面向车辆驾驶员和隧道管理单位的交通流信息管理与提示系统,提醒驾驶员及时规避危险,以缩短驾驶员的反应时间,降低交通事故发生概率;此外,还有一些学者^[11~12]基于其他编程语

收稿日期:2018-10-20;修回日期:2018-12-14;录用日期:2018-12-25。 基金项目:重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校市级重点实验室开放基金资助项目(kfxm2018-12);中国博士后科学基金面上项目(2016M592645);重庆市社会科学规划重大项目(2018ZD18);重庆市人力资源和社会保障局博士后科研基金资助项目(XM2015057)。

作者简介:马庆禄(1980—),男,陕西渭南人,副教授,博士,主要研究方向:智能交通、大数据、区块链;邹政(1993—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向:智能交通、机器学习。



言(如 Delphi、Java 等)并结合 Excel(或者数据库)工具开发了隧道监测管理系统;姜晨光等^[13]借助物联网技术实现了对隧道的远程、实时、动态管理与控制。

综上所述,公路隧道监测管理信息化的建设正在不断发展,也取得了一些应用成果,但总体来说,公路隧道管理和建设还是比较零散,即大多公路隧道监测管理系统仍是“按需、逐个、独立”进行设计开发的,这也导致了隧道监测数据不能较好地在各个隧道管理部门交换共享。为了从整体上实现隧道群的区域性控制,本文提出了面向隧道群的区域性隧道监测联控理念并结合云计算的部署方法,基于 Java 服务器页面(Java Server Pages, JSP)技术和 CANVAS 技术搭建隧道结构监测评估信息化平台的策略,实现对多种养护资源信息的便捷获取和全面共享,提高隧道养护的服务水平和质量,同时也对路网交通安全作出预警。

1 系统设计目标

本文系统依托重庆市某区域内的高速公路隧道监测项目,以隧道结构为研究对象,建立以每条病害和健康为单元模块的数据库,对隧道健康状况进行安全评估,最后对隧道群组成的路网进行交通安全的评估。系统设计目标如下:

- 1) 系统化、规范化存储隧道结构观测数据并实时更新,为隧道养护部门提供实时、准确、全面的监测数据,实现数据共享;
- 2) 根据技术状况值给病害分类,每种类别定义不同的字母进行区分,并以小圆闪烁的方式进行预警展示;
- 3) 生成每个隧道的 3D 模型图以及隧道各个分段的 2D 断面模型图,在 2D 断面图中展示各个部位的病害监测结果,实现对公路隧道结构健康状况的整体评估、分段评估和断面评估;
- 4) 通过地理信息系统(Geographic Information System, GIS)地图定位各个隧道,比如输入某个隧道的名称则可以加载出该隧道附近的所有隧道,并将各个隧道的坐标位置统一放到一个界面上管理,点击某一隧道坐标则可以对该隧道结构及车辆行驶状况进行实时视频监控。

2 隧道群组成的路网交通安全评判

隧道群组成的路网交通安全评判是建立在隧道群健康状况评估的基础之上的。公路隧道结构的健康安全评估内容主要包括 3 个部分:隧道整体结构的健康评估、隧道段落结构的健康评估和隧道断面结构的健康评估。最后,在已知各条隧道健康等级的情况下评判路网交通安全情况。

2.1 隧道整体结构的健康评估分级方法

根据《公路隧道养护技术规范》(JTGH-12—2015)(以下简称《规范》),公路隧道结构技术状况评定内容分为洞口、洞门、衬砌、路面、检修道、排水设施、吊顶及预埋件、内装饰、交通标志标线 9 项指标,隧道整体结构的健康评估分数 E_{tunnel} 按式(1)^[14] 计算如下:

$$E_{\text{tunnel}} = 100 \times \left[1 - \frac{1}{4} \sum_{j=1}^n \left(s_j \times \left(w_j / \sum_{r=1}^n w_r \right) \right) \right] \quad (1)$$

其中: r, j 均表示指标编号, n 表示指标数目; w_j 表示第 j 项指标的权重; s_j 表示第 j 项指标的综合技术状况值,0 表示无病害,值越大则表示病害越严重。

整个隧道的指标状况矩阵 X 可用式(2)表示:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

s_j 的定义如式(3)所示:

$$s_j = \max \{x_{ij}: 1 \leq i \leq m\} \quad (3)$$

若用 x_{ij} 表示第 i 个检查桩号所对应断面中第 j 项指标的技术状况值(取值 0、1、2、3、4), m 表示检查桩号的数目。《规范》根据 E_{tunnel} 的值将隧道健康状况分为 5 级:0 ≤ $E_{\text{tunnel}} < 40$ 为等级 5,40 ≤ $E_{\text{tunnel}} < 55$ 为等级 4,55 ≤ $E_{\text{tunnel}} < 70$ 为等级 3,70 ≤ $E_{\text{tunnel}} < 85$ 为等级 2,85 ≤ E_{tunnel} 为等级 1,等级值越大则隧道病害越严重。

2.2 隧道段落结构的健康评估分类方法

隧道段落结构的技术状况值应为该段落中病害最严重指标的技术状况值。 Y_k 表示存储第 k 个段落中所有检查桩号对应断面中的各个指标的技术状况矩阵,如式(4)所示:

$$Y_k = \begin{pmatrix} y_{i,1}^{(k)} & y_{i,2}^{(k)} & \cdots & y_{i,n}^{(k)} \\ y_{i+1,1}^{(k)} & y_{i+1,2}^{(k)} & \cdots & y_{i+1,n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{i+q,1}^{(k)} & y_{i+q,2}^{(k)} & \cdots & y_{i+q,n}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

第 k 个段落结构的技术状况值 $S_{\text{segment}}^{(k)}$ 的定义如式(5)所示:

$$S_{\text{segment}}^{(k)} = \max \{Y_k\} \quad (5)$$

其中: k 取 1、2、…、 λ , λ 为段落数目; i 为检查桩号的编号且 $i+q \leq m$; $y_{i,j}^{(k)}$ 表示第 k 个段落中第 i 个检查桩号对应断面中第 j 项指标的技术状况值;特别地,当 Y_k 中不含任何检测桩号时, $Y_k = 0$ 。本文设定 $S_{\text{segment}}^{(k)}$ 的值 0、1、2、3、4 所对应的类别依次表示为 A 类、B 类、C 类、D 类和 E 类。

2.3 隧道段落关键断面

《规范》中只给出了隧道整体分级和隧道段落分类的方法,没有给出隧道段落关键断面的定义,但病害细节需要通过断面才能更好地展示,所以,参考《规范》,本文提出了隧道段落关键断面的定义:选取段落中最大技术状况值的病害所在断面,即为该段落的关键断面,且关键断面上各项指标的技术状况值即为该段落各项指标的技术状况值。第 k 个段落关键断面的各指标技术状况值 z_k 如式(6)所示:

$$z_k = (y_{c1}^{(k)}, y_{c2}^{(k)}, \dots, y_{cn}^{(k)}) \quad (6)$$

其中: c 为式(5)中取 $S_{\text{segment}}^{(k)}$ 值时所对应 Y_k 的行编号,特别地,当第 k 个段落中不含任何检测桩号时, $z_k = 0$ 。同样地,本文设定技术状况值 0、1、2、3、4 所对应的类别依次表示为 A 类、B 类、C 类、D 类和 E 类。

2.4 路网交通安全评判

隧道集群管理可以评判隧道群所构成路网的交通安全状况。隧道的集群管理,即先对每条隧道结构健康状况作单独评价,然后将每条隧道的评价信息存放在云数据库中以备作路网交通安全评判时调用。隧道群所构成的路网示意图如图 1 所示。

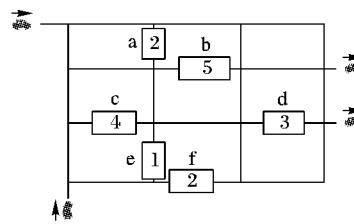


图 1 隧道群组成的路网

Fig. 1 Network composed of tunnel groups

由图 1 可知,隧道 a 的健康等级为 2 级,隧道 b 的健康等



级为5级,隧道c的健康等级为4级,隧道d的健康等级为3级,隧道e的健康等级为1级,隧道f的健康等级为2级。所以,隧道b所在路段上的交通最不安全,隧道e所在路段上的交通最安全。当车辆在驶入某个路口之前,系统会根据当前各个隧道的健康等级提前通知驾驶员,从而使驾驶员作出最优路径的选择。譬如在图1的情况下,驾驶员就不会选择包含隧道b的路径,而会优先选择包含隧道e的路径,其次会考虑选择包含隧道a或者隧道f的路径。

3 系统程序设计

系统主要采用Java Web技术开发,Java具有强大的平台独立性与可移植性,HTML5只依赖于浏览器而不依赖于操作系统。运用JSP技术和HTML5中的CANVAS技术,结合MySQL数据库,绘制隧道3D模型和2D断面模型。同时,以GIS为容器,对指定区域内的公路隧道群进行集中管理。

3.1 隧道监测数据的结构设计

系统采用MySQL数据库对隧道结构监测数据进行存储与管理,其中,隧道监测数据结构如表1所示。由表1可以看出,在隧道监测中,隧道的位置信息以及病害的定位是隧道监测的基本内容。

表1 隧道监测数据的数据结构

Tab. 1 Data structure of tunnel monitoring data

字段名称	数据类型	数据值举例
隧道ID	varchar	AG9215507629395584
隧道名称	text	测试隧道左洞
经度	double	106.570227
纬度	double	29.559546
隧道全长/m	double	2789
起始桩号	text	K09+111
结束桩号	text	K67+999
车道数目	int	3
病害ID	long	96196012726554624
病害类型	text	衬砌裂缝
监测指标名称	text	衬砌
监测桩号	text	K11+2.452
距洞口距离/m	double	2341.0
距拱顶距离/m	double	3.0
状况值	short	4
病害位置	text	左边墙
备注	text	衬砌出现严重裂缝

而隧道病害的位置信息以及病害类型是隧道监测的关键,两者之间的关联关系如图2所示。

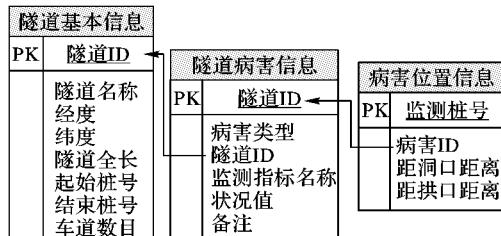


图2 数据表关系图

Fig. 2 Relationship diagram of data tables

之后,需要把监测数据细化归类到每一个分段段落中,整理归类后的数据结构如表2所示。其中,病害描述的字段值

包含了表2的所有字段值。若该段落没有病害信息,则病害描述字段值为“无明显病害”。

表2 隧道段落数据的数据结构

Tab. 2 Data structure of tunnel segmentation data

字段名称	数据类型	数据值举例
段落前编号 SStart	int	4
段落后编号 SEnd	int	5
段落长度/m	double	139
隧道分段数目	int	20
病害描述	text	无明显病害
病害数目	int	3
渲染颜色	varchar	gray
隧道名称	varchar	测试隧道左洞
车道数目	int	3
隧道全长/m	double	2789

3.2 隧道可视化设计

利用HTML5中的CANVAS技术绘制隧道3D模型和2D断面模型,并绘制带有不同字母的动态闪烁小圆以区分展示不同的病害类型。3D模型的绘制分为行车道、洞口、隧道表面3个部分,2D断面模型的绘制分为拱顶、拱腰、仰拱、检修道、排水沟、电缆沟和路面7个部分,通过调用CANVAS的相关应用程序编程接口(Application Programming Interface, API)^[15]实现绘制,隧道模型如图3所示。

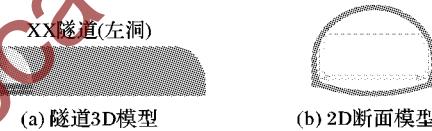


图3 隧道模型

Fig. 3 Tunnel model

3.3 隧道分段方法设计

很多情况下,需要以不同的分段方式展示隧道各个分段段落的结构评估结果,比如,需要把无病害的几个连续段落合并成一个段落,需要把长度较大的段落分解为几个小的段落等。为了对隧道任意部位的病害进行监测定位,本文设计了“分/合”的分段方法。“分/合”分段方式实质上即两种分段方式的组合:方式1是将整个隧道均分为指定数目的段落;方式2则是在方式1的基础上继续进行分解或者合并操作。两种分段方式结合便可完成隧道任意部位的病害监测,每种分段方式均可循环进行。隧道的“分/合”分段方法流程如图4所示。

监测数据会在分段过程中被系统化和规范化处理,最终以每一个分段段落为单元模块被存储在数据库中。在每个分段段落中分析比较该段落中所有的病害状况值,最终把最大状况值对应的病害作为该段落的病害,把对应病害的位置作为该段落断面的位置。

4 系统应用

以重庆市某区域内的几个高速公路隧道的监测数据为例对面向隧道群的云监测管理系统进行仿真测试,系统通过云端不断地实时采集从各个隧道传上来的监测数据,之后根据表1和表2的格式规范化、标准化隧道监测数据并存储在MySQL云数据库中。如图5,在GIS上进行二次开发,实现对公路隧道结构监测的集群管理。

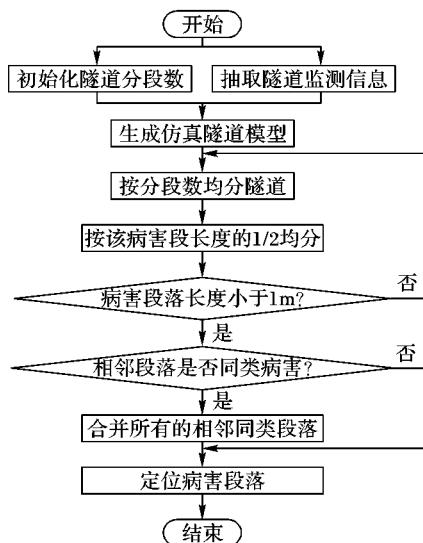


图4 “分/合”分段方式流程

Fig. 4 Flow of “Division/Combination” segmentation

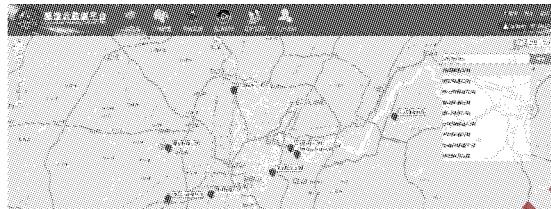


图5 GIS隧道集群管理界面

Fig. 5 Interface of GIS tunnel groups management

在搜索框中输入隧道名称(此处以“测试隧道左洞”为例),若隧道存在于监测数据中,则系统会将该隧道及其周边隧道的位置展示到地图上,根据需要可以进入查看相应隧道结构健康评估结果。若要通过地图界面进入隧道结构健康评估结果界面,则必须先进行隧道的分段设置,只有设置好隧道分段之后,该隧道结构的病害信息、位置信息和分段方式等才会被保存到数据库中,根据式(4)和式(5)计算,并区分不同的病害结果,按照图6的分段方式对隧道进行分段设置,该隧道被设置成了12个段落,各个段落的技术状况值和病害分类如表3所示,可视化界面如图7所示。

表3 隧道各段落的技术状况值和病害分类结果

Tab. 3 Technical status value and

disease classification results of tunnel segments

k	$S_{\text{segment}}^{(k)}$	类别	k	$S_{\text{segment}}^{(k)}$	类别	k	$S_{\text{segment}}^{(k)}$	类别
1	3	D	5	1	B	9	1	B
2	0	A	6	2	C	10	0	A
3	1	B	7	1	B	11	4	E
4	0	A	8	0	A	12	1	B



图6 隧道3D模型的分段方式设置界面

Fig. 6 Settings interface of tunnel segmentation of tunnel 3D model

可以结合隧道分段的两种方式,在均分的基础之上进行合并或者再均分操作。例如,可以把无病害的连续段落合并成一个段落或者分解成任意多个段落。

按图6设置好隧道段落的分段方式之后,每个段落结构的病害信息以及隧道分段方式便被保存到数据库中,由这些数据便可以评估展示隧道段落结构的健康状况。图7表示隧道段落结构的评估结果,右上角的5个小圆(从左往右依次对应A、B、C、D、E五种病害类别)具有取消/选中功能,可以屏蔽/显示相应的类别,即可以选择性地展示隧道某些段落的病害等级。需要从图5展示的GIS界面进入图7界面。通过图7的功能则可以动态实时地监测隧道段落结构的不同病害类别信息。

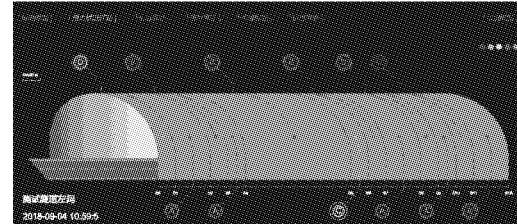


图7 隧道段落结构的健康评估结果界面

Fig. 7 Interface for health assessment of tunnel segmental structure

通过式(6)计算 z_k ,并对隧道断面结构的健康状况进行评估分类。鼠标点击隧道的某一段落,便可以进入相应的隧道断面结构评估结果界面。断面中各个部位的病害信息均展示在断面图的两旁,如图8所示。以图8为例对各个功能进行解释:“S10-S11(共1个桩号有病害)”表示的是,在段落S10-S11中,有病害的桩号只有一个,即K11+7832这个桩号所对应的断面存在病害;2D断面模型的左右两侧负责对断面各个部位的健康状况进行描述,主要包括了监测项目名称、病害类型和状况值等信息;根据断面各个部位的信息展示可知该断面的健康状况类别为E;“截图”功能表示可以对当前的界面进行截图保存。



图8 隧道断面结构的健康评估结果界面

Fig. 8 Interface for health assessment of tunnel sectional structure

根据表1和式(1)~(3)计算,并对隧道整体结构的健康状况进行评估分级。经计算,隧道整体结构的健康状况评估分为38分,即隧道结构的健康等级为5级,即此时隧道结构处于高危险状态,必须采取相应的补救措施。

通过云端收集车辆相关信息(流量、速度和车型等),可以对隧道内的行车状况进行模拟,如图9所示。

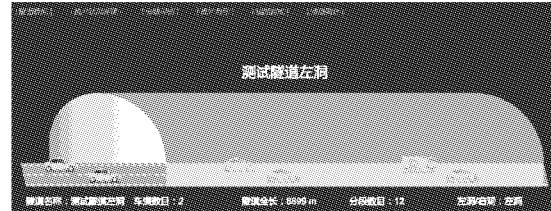


图9 隧道内行车状况的模拟视频

Fig. 9 Simulated video of traffic condition in tunnel

为了能实时观测隧道内车辆的运行状况和对路面、检修道以及交通标志标线等进行监测,还需要对公路隧道洞内的



行车状态进行视频监控。可以通过GIS地图选中某个隧道位置,此时可观看到该隧道内的实时监控视频,如图10所示,右侧视频上的示意图来源于网络^[16]。在左侧的GIS地图中展示了某一区域内的所有隧道位置标记,鼠标点击隧道标记,便可以播放相应的隧道实时监控视频。

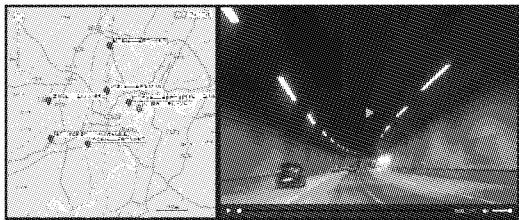


图10 隧道视频监控示意界面

Fig. 10 Indicative interface of video surveillance of tunnel

5 结语

传统的隧道结构病害诊断方法无法妥善地将系统的模糊性和随机性关联在一起,基于此,研究针对公路隧道结构病害检测数据的集群性病害模糊化特点,提出了基于云理论的公路隧道群结构综合监测平台,具体研究成果包括:

1) 探索性地提出了基于云监控的隧道集群联控监测理念,将以往独立、零散的隧道管理模式转变为了隧道集群管理模式,使隧道的管理模式更加方便、高效。在隧道病害大数据分析技术的基础上,对路网中关联隧道的交通安全进行评估,由此指导驾驶员作出最优路径的选择。

2) 设计了一种用于隧道分段的“分/合”分段方法,可以对隧道任意部位的病害进行监测定位。利用JSP和CANVAS技术建立了3D隧道和2D断面模型,解决了传统隧道信息化管理中存在的病害细节可视化程度不高的问题。

3) 将隧道视频检测器接入GIS地图,基于GIS地图的二次开发实现了对隧道结构健康状态以及行车状况的动态监测。

虽然系统针对隧道结构病害状况进行了全面的监测和评估,但对隧道机电设施等部分的监控尚没有涉及,所以,该系统仍然有较大的扩展空间,即在接下来的研究工作中还可以根据需要在该系统之上继续完善机电设施和其他工程设施监测评估等功能的研究。

参考文献 (References)

- [1] 丁恩泽. 高速公路隧道监控管理系统分析[J]. 四川建材, 2017, 43(9): 172–173. (DING E Z. Highway tunnel monitoring management system analysis [J]. Sichuan Building Materials, 2017, 43 (9): 172 – 173.)
- [2] 戴学臻. 公路隧道运营安全评价及管理系统开发研究[D]. 西安: 长安大学, 2010: 23–24. (DAI X Z. Research on highway tunnel operation safety evaluation and management system development [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010: 23 – 24.)
- [3] ALVEAR D, ABREU O. Decision support system for emergency management: road tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 34: 13–21.
- [4] KOCH C, VONTHRON A. A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects [J]. Automation in Construction, 2017, 83: 78–90.
- [5] MAKAROV V V. Island megalopolises: tunnel systems as a critical alternative in solving transport problems [J]. Engineering, 2018, 4: 138–142.
- [6] 黄廷, 陈丽娟, 史培新, 等. 基于BIM的公路隧道运维管理系统设计与开发[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 48–55. (HUANG T, CHEN L J, SHI P X, et al. Design and development of highway tunnel operation and maintenance management system based on BIM [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(1): 48 – 55.)
- [7] 王继骥. 基于高清卡口的高速公路隧道行车安全管理系统[J]. 中国交通信息化, 2016(6): 88–89. (WANG J J. Highway tunnel traffic safety management system based on high definition bayonet [J]. China ITS Journal, 2016(6): 88 – 89.)
- [8] 蒲斐, 姚庆华. 基于数据驱动的高速公路隧道交通安全系统分析与决策方法[J]. 科技资讯, 2017, 15(22): 61–65. (PU W, YAO Q H. Analysis and decision method of highway tunnel traffic safety system based on data driven [J]. Science and Technology Information, 2017, 15(22): 61 – 65.)
- [9] 蒲浩, 彭永, 徐源, 等. 隧道工程监控三维实时交互可视化信息平台研究[J]. 铁道工程学报, 2014(3): 91–96. (PU H, PENG Y, XU Y, et al. Research on three dimensional real time interactive visualization information platform for tunnel engineering monitoring [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(3): 91 – 96.)
- [10] 邓周全, 蔡直言, 张文静, 等. 隧道路况实时监测系统[J]. 河南科技, 2017(1): 121–122. (DENG Z Q, CAI Z Y, ZHANG W J, et al. Real-time monitoring system of tunnel traffic condition [J]. Henan Science and Technology, 2017(1): 121 – 122.)
- [11] 王海英, 程瑶, 金晓臻, 等. 基于Delphi的隧道监测信息管理系统研究[J]. 公路隧道, 2010(2): 5–8. (WANG H Y, CHENG Y, JIN X Z, et al. Research on tunnel monitoring information management system based on Delphi [J]. Highway Tunnel, 2010 (2): 5 – 8.)
- [12] 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): 40–45. (FANG E Q. Research on metro tunnel structure survey management system based on Web Technology [J]. Modern Tunnel Technology, 2017, 54 (2): 40 – 45.)
- [13] 姜晨光, 刘冠林, 王纪明, 等. 基于物联网的隧道智能监测系统设计[J]. 上海国土资源, 2013, 34(1): 85–89. (JIANG C G, LIU G L, WANG J M, et al. Design of tunnel intelligent monitoring system based on Internet of things [J]. Shanghai Land and Resources, 2013, 34(1): 85 – 89.)
- [14] 乔墩, 蒋树屏, 林志, 等. 公路隧道养护技术规范(JTGH-12-2015)[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015: 13–17. (QIAO D, JIANG S P, LIN Z, et al. Technical Specification of Maintenance for Highway Tunnel (JTGH-12-2015) [M]. Beijing: People's Communications Publishing House Co., Ltd, 2015: 13 – 17.)
- [15] GEARY D. Core HTML5 Canvas Graphics, Animation, and Game Development[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2013: 63 – 64.
- [16] 双城风机(上海)有限公司. 隧道通风[EB/OL]. [2018-09-04]. <http://www.tcf-china.com/Applicationinfo2.asp?id=1204>. (Twin City Fan (Shanghai) Co., Ltd. Tunnel ventilation [EB/OL]. [2018-09-04]. <http://www.tcf-china.com/Applicationinfo2.asp?id=1204>.)

This work is partially supported by the Municipal Key Laboratory Open Fund of Chongqing Jiaotong University for Disaster Reduction of Mountain Area, Highway, Waterway and Traffic Geology (kfxm2018-12), the Postdoctoral Science Foundation Project of China (2016M592645), the Major Project of Social Science Planning in Chongqing (2018ZD18), the Postdoctoral Research Fund of Chongqing Municipal Bureau of Human Resources and Social Security (XM2015057).

MA Qinglu, born in 1980, Ph. D., associate professor. His research interests include intelligent transportation, big data, blockchain.

ZOU Zheng, born in 1993, M. S. candidate. His research interests include intelligent transportation, machine learning.