

基于微结构光纤分布式传感的铁路隧道门智能防护技术研究

耿明¹, 刘陈², 许志杰^{2*}, 贺韬², 刘大玲¹, 张俊岭¹, 汪永元¹, 刘懿捷², 孙琪真², 刘德明²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;

2. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 铁路隧道防护门是隧道防灾救援专题的重要分支, 对行车安全有着重要的影响。文中研究一种基于微结构光纤分布式传感(MFDS)的新型铁路隧道防护门智能监测技术, 可以实时监测防护门的状态与检测运行故障, 当发现防护门出现异常状况时及时报警, 显示并记录报警部位和报警资料以及实现报警信号远程传送。通过研究, 针对铁路隧道防护门设计得出以下结论: (1) 防护门布置应采取远离隧道中心布置的方案; (2) 防护门隔墙应采用混凝土隔墙; (3) 防护门应朝疏散方向开启; (4) 设计防护门外沿距离相邻线路中心线距离应考虑防护门门框高度和车辆建筑限界。论文提出一种新颖的铁路隧道防护门设计方案, 对于铁路隧道防护门设计与维护相关工作具有重要指导意义。

关键词: 微结构光纤; 分布式传感; 铁路隧道; 防护门; 防灾救援

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0722003

Study on the innovative protective technology for the railway tunnel doors based on the micro-structure fiber distributed sensor

Geng Ming¹, Liu Chen², Xu Zhijie^{2*}, He Tao², Liu Daling¹, Zhang Junling¹, Wang Yongyuan¹,
Liu Yijie², Sun Qizhen², Liu Deming²

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd, Wuhan 430063, China;

2. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Protective doors of railway tunnel is an important branch of the tunnel disaster prevention and rescue project and has an important influence on safety. A novel innovative protective railway tunnel door based on the micro-structure fiber distributed sensor (MFDS) was studied in this paper, which could be used for the alarm system, the display and recording of alarm parts and alarm data, detection of operational failure and alarm signal remote transmission function. The following research results are reached: (1) the arrangement scheme of protective doors should be taken away from the center line of tunnel; (2) the partition wall of the protective door is made of concrete; (3) the door should be opened in the direction of evacuation; (4) when designing the distance between the outside of protective door and

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61290315)

作者简介: 耿明(1972-), 男, 教授级高工, 硕士, 主要从事铁路维护方面的研究。Email: 87894708@qq.com

导师简介: 刘德明(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤通信与传感方面的研究。Email: dmliu@hust.edu.cn

central line of adjacent lines, we should consider the frame height of protective door and vehicle clearance. The research results can provide guidance for the design of protective doors for railway tunnel to a certain extent.

Key words: micro-structure fiber; distributed sensor; railway tunnel; protective doors; disaster prevention and rescue

0 引言

“十一五”期间,我国加快实施《中长期铁路网规划》,铁路运营里程跃居世界第二,高速铁路运营里程世界第一。随着我国铁路尤其是高速铁路的大发展,铁路隧道的长度增加,隧道内部更加复杂,使得在隧道内发生火灾的可能性增加;由于隧道的封闭特性,一旦列车在隧道内发生列车火灾,其疏散救援将非常困难,同时还将造成极其恶劣的社会影响^[1]。

此外,列车在隧道内运行通过时,会在隧道内产生较大侧向风压的“活塞效应”,对隧道内存放的通信、信号、电力等设备产生破坏。作为铁路的关键线路和节点工程,铁路隧道内列车发生灾害事故中,以列车火灾的发生概率为最高。因此铁路隧道的防灾救援主要是针对以列车火灾为主的灾害,并且隧道里需要采取防灾救援避难措施。同时,铁路隧道门一旦脱落,将对列车造成严重事故,对其安全状态进行实时监控至关重要。

传统的隧道防护门主要由隔墙、门体、安装件、安全防护装置构成。隧道防护门门体由门框、门扇、五金件、耐火填充材料组成。

目前,国内尚未制定针对性的隧道防护门制造安装规范及验收标准,只在中华人民共和国行业标准《铁路工程设计防火规范》^[2]中有所提及。学术方面对于隧道防护门的设计及其防护已经开展了一些研究。杨柏林等^[3]介绍了铁路隧道防火防爆门的总体设计方案,阐述了防火防爆门在铁路特长隧道中的作用。张浩等^[4]提到山区铁路长达隧道设置防护门的必要性,并提出了防护门的截面尺寸等相关建议。许勇等^[5]介绍了隧道横通道防护门功能和安装工艺,提出《铁路工程设计防火规范》,实施后修建的铁路隧道安装横通道防护门采用预埋钢板方式及后期安装横通道防护门。Li Yingzhen 等从理论和实

验两方面研究了铁路隧道救援站防火门防护层附近的临界烟层温度^[5]。陈倩等^[6]研究了以列车火灾为主的灾害,提出铁路隧道里需要采取的防灾救援避难措施。

国外对于铁路隧道防护门的研究也有一些报道^[7-8],德国、英国、日本等国家相关防灾救援规范也对隧道内防护门的设计原则及设计要求做了规定。德国颁布的《对铁路隧道建设和运营防火与防灾的要求》中对隧道防火防灾的装备、隧道防火结构等提出了要求。英国颁布的 NR-ISCSC-023 Iss 1 包括对隧道防火的一些要求,GIGN7619 Iss 1 对铁路隧道的安全互操作性技术规范要求提供指导。《日本铁路技术规程》中规定连接另一条线的一个车站的站之间地下通道和火车站地下商场等,应配备各项性能指标满足消防规定的防火门。

国外发达国家对隧道防护门定义为具有抗冲击、抗爆、密闭性能(气密、水密)的防护门,其管控理念与特点为:(1) 设计、施工、检验验收有据可依;(2) 重视放在援救、隧道越长管控越严;(3) 防护门技术性能指标侧重防火、阻烟、抗爆;(4) 强调适用性,以人为本;(5) 对疲劳性能、耐久性能、防腐蚀性能、密封性能等要求较弱;(6) 防护门结构型式及开启方式多样;(7) 门体材料多采用钢质材料,涂层先进,耐久性好。

目前国内外铁路隧道防灾救援设计现状中涉及到铁路隧道防护门的内容很少。尤其是国内基本上都是借鉴国外经验,没有经过理论计算,也没有结合我国铁路隧道自身的特点进行分析,是否满足我国铁路隧道防灾救援要求,还需要在实践中去验证。因此,作为对铁路隧道防灾救援专题的重要分支——铁路隧道防护门进行深入研究,显得尤为必要。

光纤传感相对于传统的传感技术具有灵敏度高、抗电磁干扰和腐蚀、适用于恶劣环境等特点,可用来监测温度和异物入侵等。例如何祖源,刘银萍

提出小芯径多模光纤拉曼分布式温度传感器^[9]。李志辰,刘琨提出的光纤周界安防系统^[10]。在国内外针对铁路光纤传感也有一定的研究报道。Torres B 等介绍了最近在西班牙使用由作者开发的三种光纤传感器建成的高速列车隧道的监测情况^[11],其中涉及了分布式光纤传感系统。Angelo Catalano 等报道了基于光纤光栅的铁路入侵检测系统^[12]。除此之外,乌旭等在引文提出了一种机械门上的光纤传感器布方案^[13]。

针对铁路隧道防护门对于安全监测的迫切需求,文中参考了艾凡等人提出的基于微结构光纤的分布式传感系统^[14],以及对于振动信号^[15]的采集系统,研究了一种基于分布式微结构光纤传感的新型铁路隧道防护门智能监测技术,可以实时监测防护门的状态、检测运行故障,当发现防护门出现异常状况时及时报警,显示并记录报警部位和报警资料以及实现报警信号远程传送。在此基础上,提出了一种新颖的铁路隧道防护门设计方案,研究结果对于铁路隧道防护门设计与维护相关工作具有重要指导意义。

1 铁路隧道智能防护门需求分析与设计

1.1 铁路隧道防护门需求分析

防护门长期在隧道中受到正负活塞风的作用,容易造成门体掉落至轨道侧,将严重影响行车的安全。因此,研究隧道防护门技术条件,具有十分重要的意义。针对防护门的研究,目前主要有如下几种方法:

(1) 分析隧道防护门的运营工况、标准规范、使用需求以及边界条件以及运营工况,提出隧道防护门工艺设计要求。

(2) 采用本质安全理论、全寿命周期安全管理理论对隧道防护门进行安全评估。

(3) 结合隧道防护门布置方案以及门体结构,采用理论力学,建立防护门的数学模型并进行受力计算,对防护门的零部件提出具体要求。

(4) 借鉴人防门、防火门相关标准及要求,结合防护门特殊工艺,深化研究隧道防护门制造工艺、施工安全工艺、验收要求等。

隧道防护门不仅保护着隧道内设备,同时也是

防灾救援疏散中与火灾、爆炸等危险源隔离开的重要隔离设备。防护门一旦变形就可能倾倒侵限,变成重大危险源,严重影响行车安全。因此文中通过研究铁路隧道防护门技术条件,确保防护门设备运行可靠,进一步消除防护门对行车带来的运行隐患。

1.2 铁路隧道防护门基本条件

(1) 使用工况分析。我国特长隧道已建成 10 余座,在建特长隧道则达数十座。目前客运专线动车速度可达 350 km/h,横通道及设备洞室设置的防护门需要长时间受到隧道风压作用。

(2) 国内相关规范分析。国内涉及到铁路隧道防护门的较少,其中主要有:《铁路工程设计防火规范》TB 10063-2007/J774-2008;《铁路隧道防灾救援疏散工程设计规范》TB10020-2012;《高速铁路设计规范》TB 10621-2014/J1942-2014;《低压配电设计规范》GB50054-2011。

(3) 使用分析。隧道通信设备洞室、电力设备洞室和疏散通道(包含横通道、施工时辅助坑道和紧急救援站或避难所)在列车运行中有着重要的地位,因此需要在这些地方设置防护门以保证相关设备设施的安全。

(4) 所受风压分析。火车高速冲进隧道时产生风压导致门承受交变载荷的作用,风压循环作用门体,有可能引起门体受力构件产生疲劳破坏。

(5) 抗疲劳次数分析。防护门每年承受的交变荷载循环次数 N 等于为工况系数 k 、交变荷载频率 f 以及列车全年运营时数 T 的乘积。隧道防护门使用寿命年限为 30 年,在最不利的条件下,防护门全寿命抗疲劳次数高达 900 万次。

(6) 抗爆载荷分析。《铁路工程设计防火规范》中已明确“客货共线铁路隧道防护门的抗爆荷载不应小于 0.10 MPa,客运专线铁路隧道防护门的抗爆荷载不应小于 0.05 MPa”,工程设计过程中按规范执行抗爆载荷条款。

1.3 隧道防护门设计

(1) 防护门布局

设备洞室防护门垂直轨道中心线方向布置方案:设备洞室平行于列车运行方向,防护门侧向布置。

横通道防护门垂直轨道中心线方向布置方案:

横通道侧壁及侧壁之间砌上混凝土隔墙，将防护门安装在混凝土隔墙上，朝疏散方向开启。

防护门前设置隔墙方案：设备洞室垂直于列车运行方向，防护门内开或外开安装在隧道内壁墙上。

在防护门前设置一道大小和位置可调整的挡墙。

防护门远离隧道中心布置方案：横通道防护门平行于隧道正线，防护门的门扇可朝隧道正线开启。

四种不同布置方案的对比如表 1 所示。

表 1 不同布置方案对比表

Tab.1 Comparison of different layout schemes

	Door vertical track	Door parallel to the track	Wall in front of the door	Door away from track
Pros	Safe	Safe	Safe, simple cheap	Safe, simple cheap
Cons	Expensive complicated inconvenient	Expensive complicated	Evacuation inconvenient, wall strength requirements	Evacuation, cave depth requirements
Not applicable	Power equipment door	None	Power equipment door	Cross channel door

四种方案设计原则均为本质安全。从施工难易程度、投资方面考虑，建议采用防护门远离隧道中心布置方案设计防护门。防护门隔墙到线路中心线的距离应大于隔墙断面高度与限界之和，门朝疏散方向开启。

如果单线单洞长隧道内设置了供疏散用的横通道，建议防护门设置的隔墙位置到线路中心线的距离不得小于防护门高度与限界之和，门朝疏散方向开启。

(2) 门体结构设计

门体结构设计主要包括平移式（包含水平平移防护门和竖直升降防护门）和平开式（包含对开式和折叠式）。水平平移防护门通常在通道顶部安装路轨，在路轨之间装上滑块，通过螺杆螺母与门扇铰接住。通过水平手推或者通过滑轮驱动使门扇关闭打开。对于上下密封可以采用联动插锁式插板，在通道两侧安装密封条解决左右密封问题。

竖直升降式防护门为机动驱动，通过螺旋机构上下平移。密封与水平移动防护密闭隔断门一样。采用滑动方式使门扇开关。

对开式防护门的门框、面板依靠机械加工成型得到，再通过合页、锁等零部件连接。使用手动方式打开防护门，而且可在门体上设置防倾倒铰链，铰链与墙体连接。

折叠式防护门的主要形式为四连开的形式，四扇门扇分为两组，左右两侧各两扇，两扇之间以及门扇与门框之间依靠合页来连接，在开启门时，同侧的两扇门能够折叠起来。

(3) 防护门隔墙设计

目前国内防护门的设置情况，防护门隔断墙主要分为抗爆板隔墙和钢筋混凝土隔墙两类。两种隔墙形式的对比如表 2 所示。

表 2 两种隔墙形式对比表

Tab.2 Comparison of two partitions

	Anti-explosion plate	Concrete
Installation method	Anti-explosive plate dings to the keel	Use concrete and steel to build walls
Life	30 years	50 years
Difficulty	Complex installation	Mature technology, simple
Preservative	Weak	Strong
Danger after destruction	Shedding will from a hazard	Shedding does not cause damage

从行车安全角度出发，建议采用混凝土隔墙作为隧道防护门隔墙。

(4) 防护门尺寸设计

考虑到通信设备洞室在隧道中数量少且极其重要，因此必须设置设备洞室防护门。建议通信设备洞室防护门采用单扇平开门，门洞净开度尺寸 1.2 m × 2.0 m（宽×高）。箱式变电站一般不超过 5 m 长，有些变电站侧面也可开启检修，因此为了不影响门体的正常开启，净深尺寸不得小于 6 m。电力设备洞室防护门一般采用双扇平开门结构形式。

国内相关规范中已经明确横通道、紧急出口、避难所处和紧急救援站处的防护门的通行尺寸。若门均朝内开启，考虑到门扇门框与门洞贴合时均匀受

力和施工误差, 需要门洞尺寸均比要求大 50 mm, 门框各边均比门洞大 100 mm。

(5) 开门方向研究

从风险性角度考虑, 门朝隧道洞室内开启完全可以实现本质安全, 即使门体脱落也不会影响行车安全。因此通信设备洞室防护门门体开启方式建议朝设备洞室内开启。

电力设备洞室防护门朝洞室内开启最为安全可靠。研究中发现,《低压配电设计规范》中配电室的门向外开启这条规定是由于专业分工存在歧义和考虑室内发生事故时便于人员逃离出现的。因此只要保证在人员作业时防护门处于开启状态, 即使变电站发生事故, 现场人员也可容易逃离事故地。目前特定门锁机构能保证即使朝内开启也不会影响安全。因此电力设备洞室防护门门体亦朝洞室内开启。

当防护门朝正线方向反方向开启时可实现本质安全。因此疏散通道防护门开启方向可归纳为: 横通道防护门开启方向应均朝横通道内开启; 辅助坑道防护门应朝隧道洞外方向开启; 紧急救援站(避难所)防护门应朝紧急救援站(避难所)方向开启。

(6) 防护门位置设计

防护门距离线路中心线越远越安全, 但隧道内空间有限, 防护门的设置位置直接影响设备洞室的开挖量。当防护门朝正线开启时, 考虑到门框倾倒也应不妨碍列车安全运行, 因此防护门外沿距离相邻线路中心线距离 W 应不小于防护门门框高度和车辆建筑限界之和; 当防护门朝正线反方向开启时, 防护门外沿距离相邻线路中心线距离 W 应不小于车辆建筑限界。

(7) 安全防护研究

隧道防护门作为隧道救援的一道防线, 防护门的安全维护对于整个隧道安全具有重大意义。

为保证防护门的正常工作, 需要对其进行适当的维护和对安全进行实时的监控, 针对防护门的异常情况即使作出报警, 提醒工作人员进行处理。因此需要对防护门的安全开发一套报警及远程控制的系统。报警系统主要用于防护门状态的监视及防护门非法开启的紧急报警, 报警系统要实现以下三个目标:

(1) 实时显示报警部位和有关报警资料并记录,

同时按约定启动相应的联动控制; 系统与闭路电视监控系统联动, 所有的控制集中在中心控制室管理。

(2) 系统具有防拆及防破坏功能, 能够检测运行状态故障。

(3) 触发报警系统, 系统自动将报警信号传送到控制中心, 报警对应的视频监控突出显示在监视屏上, 方便工作人员能够通过报警信息快速定位对应的防护门。

2 基于 MFS 的铁路隧道防护门智能监测

如前所述, 铁路隧道防护门的智能监测对保障高铁安全运行至关重要。但由于传统电学传感方式在隧道中都存在取电和统一控制的缺点, 因此基于微结构光纤的光传感方式由于其无源的特性脱颖而出。

文中提出了一种基于微结构光纤传感 (MFS) 的铁路防护门智能监测系统。如图 1 所示, 系统组成包括: 光电主机和数据处理单元、微结构光纤传感单元、信号传输光纤、光纤耦合器等。

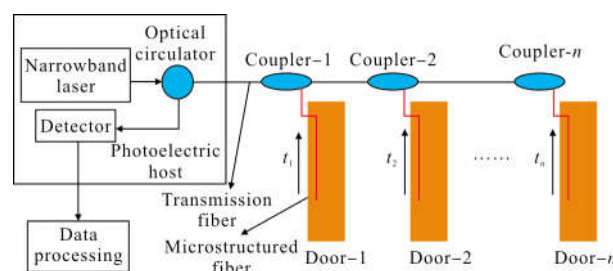


图 1 基于 DMF 的铁路防护门智能监测系统

Fig.1 Intelligent system of railway protection door based on DMF

窄频谱激光光源输出光信号经由光环行器耦合输入主干传输光纤, 在每一个隧道门上由一个光纤耦合器分出监测光信号, 该信号由微结构光纤传感单元产生后向传感光信号, 后向传感光信号再次通过光纤耦合器回传, 经由光环行器送至光电探测器, 最后经由数据处理单元采集和智能识别分析, 当隧道门松动、开启或脱落时, 输出相应告警信号。

光电主机和数据处理单元置于室内机房, 信号传输光纤和波分复用器置于隧道门顶部, 分布式微结构光纤置于隧道门上。DMF 是采用精密光刻技术将多功能微结构传感单元集成在普通商用光纤上构成的特种传感光缆, 可以感知温度、形变、振动、声波

等物理量参数。由 DMF 感知的铁路隧道门参量变化信息,可以实现对防护门的运行状态的实时监测。若振幅、频率或相关信号处理后的振动指标超过设定阈值,则光信号处理模块将报警结果发送至报警模块,报警模块上传报警信息,驱动远程报警终端报警,提醒值班人员注意。

由于不同防护门相对光源的距离并不相同,两扇门之间的间距要远远大于传感光纤长度,因此后向传感光信号到达光电探测端的时间并不相同,从而能以区分传感信息来源,确定异常对应的防护门位置。

极端情形下,如果某一个防护门脱落,则将拉断该防护门与相应光纤耦合器连接光纤,致使该防护门对应的传感信号出现中断,系统将及时判断该脱落防护门位置并向运营列车发出告警信号。该系统的一大优越性在于,当隧道门脱落时,只会拉断微结构传感光纤与光纤耦合器的连接,不会影响其他隧道门的正常监测。因此,单个防护门脱落只影响该防护门对应的传感信号,并不会造成整个系统运行中断。而且事后维护也极为简单,只需修复防护门之后,将该防护门的微结构传感光纤重新与波分复用器耦合即可,维护恢复过程十分简便。

该系统利用一根主干传输光纤可同时接入隧道内的所有防护门,工程安装与维护极为方便。而且,光电端机可以置于隧道外的简单机房内,隧道内只需布设光纤,无需供电,实现无源传感,本质安全,极为适合在长距离铁路隧道中使用。

3 铁路隧道门脱落监测仿真模拟与分析

为了验证基于 MFS 的铁路隧道防护门的实际可行性,在广州南站至深圳北站区间对目前使用的某处隧道门进行了实际测试。

考虑到传感点位置可能对测试结果造成影响,实际测试时在隧道门上布设了五个传感点。本次测试一共测量了两个隧道门,分别为上行隧道门和下行隧道门,分别对应广州至深圳和深圳至广州方向的铁路隧道,两个隧道门处于同一隧道井之中,距离相隔很近;两个隧道门采用一根主干光纤连接,其中传感点的布设示意图和现场图如图 2、3 所示。

在设置好光电主机之后,检测激光脉冲在光纤微结构点上产生的后向瑞利散射,能够检测到若干

个反射峰(即测量点所在位置)。根据反射峰的先后顺序即可判断出对应隧道门上测量点,选取分布在隧道门上的 10 个测量点当做有效传感点数据。

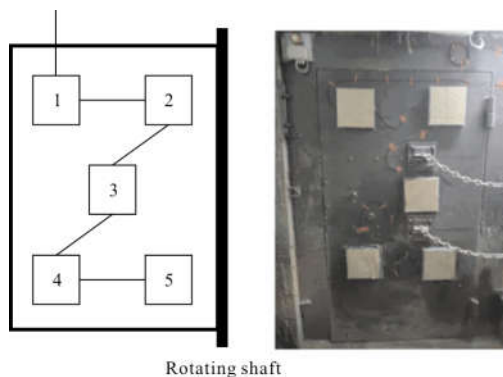


图 2 上行门布线示意图和现场照片

Fig.2 Wired diagram of upstream tunnel door and field experiment

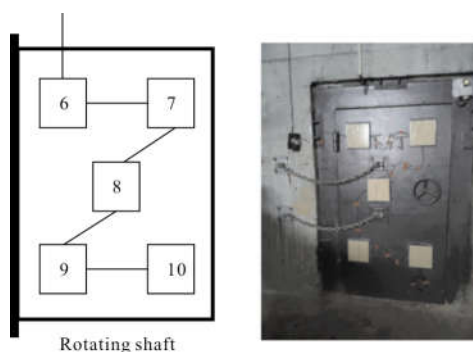


图 3 下行门布线示意图和现场照片

Fig.3 Wired diagram of downstream tunnel door and field experiment

进行了数小时的测量之后,获得了上百组动车经过上行门或下行门的实验数据。在分析了此次测试数据之后,得到了一些显著的结论。

当火车经过隧道时,大多数情况下会产生两次隧道门的整体位移,即火车经过隧道门时由于隧道内空气速度快,压强降低,气压使得隧道门被吸向隧道内方向,隧道门与门框形成一次撞击,然后待火车驶离之后,气压恢复正常,隧道门归位再次造成一次撞击。此现象在上行门和下行门都能明显的观察到。具体体现为所有节点波形图的俯视图能在该隧道门区域见到明显的全节点同时产生较大的相位偏移,见图 4(6 s 和 15 s 附近,1~5 节点产生大幅震动,图中黑线为大幅震动),见图 5(9 s 和 14 s 附近,6~10 节点产生大幅震动,图中黑线为大幅震动)。

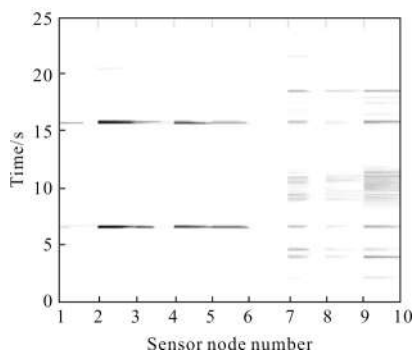


图 4 列车经过上行门产生 2 次撞击

Fig.4 Train passed the upstream tunnel door, produced 2 impacts

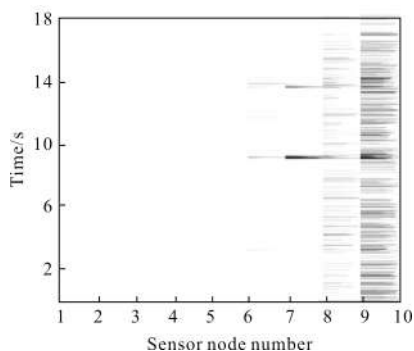


图 5 列车经过下行门产生 2 次撞击

Fig.5 Train passed the downstream tunnel door, produced 2 impacts

如果火车高速通过隧道时，隧道门与门框发生碰撞的次数会更多，一般会多一次，发生在火车刚进隧道口时，因为下行隧道为进隧道口一端，因此当火车高速进入隧道时，火车将挤压隧道内空气，导致隧道内压强过大，从而使得隧道门远离隧道，相较于较慢速度进入隧道的火车多出了这一次碰撞，如图 6

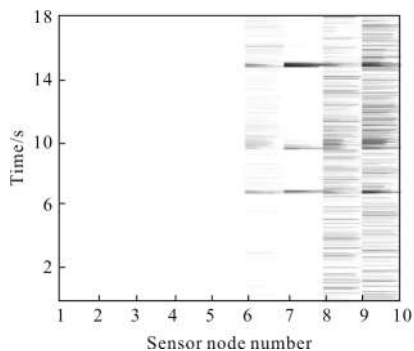


图 6 列车经过下行门产生 3 次撞击

Fig.6 Train passed the downstream tunnel door, produced 3 impacts

(7,10,15 s 附近,6~10 节点产生大幅震动,图中黑线为大幅震动)所示。

除此之外,经过数据分析发现,上行门经过列车时,除发生撞击之外,隧道门并不会产生震动,如图 7 所示。而下行门在经过列车时则会持续发生震动,如图 8 所示,另外在上行门高速通过列车时,下行门也会因为隧道井内为了平衡气压产生的高速气流产生震动,如图 9 所示。该现象在询问了隧道井负责人之

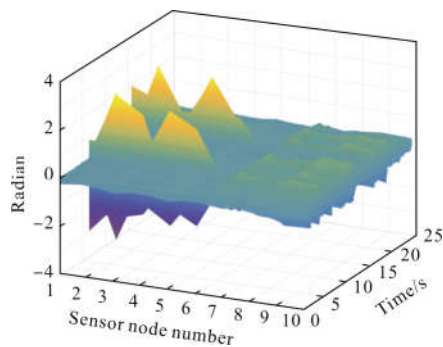


图 7 列车低速度经过上行门不同传感节点的相位图

Fig.7 Phase diagram of different sensor nodes when the train low speed passed through the upstream tunnel door

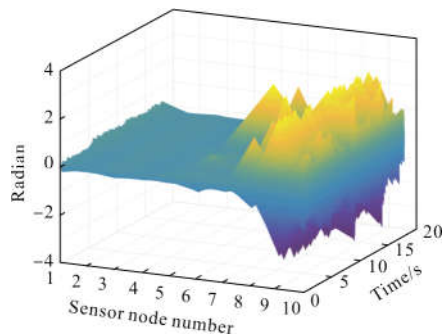


图 8 列车低速度经过下行门时不同传感节点的相位图

Fig.8 Phase diagram of different sensor nodes when the train low speed passed through the downstream tunnel door

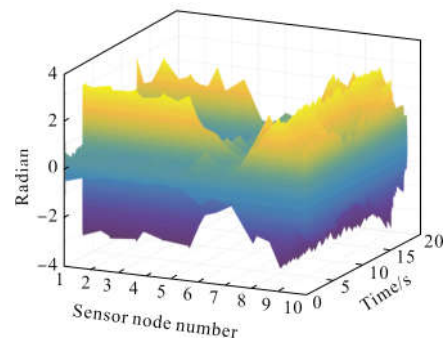


图 9 列车高速度经过上行门不同传感节点的相位图

Fig.9 Phase diagram of different sensor nodes when the train high speed passed through the upstream tunnel door

后找到了答案, 铁路工人多数时间只从下行门出入工作, 因此下行门每天都会开合, 可能产生了松动, 从而导致了火车经过时的持续震动。而上行门很少打开, 因此并未产生松动。

另外, 根据负责人的说法, 上行门由于使用年限过长, 门体形变较大, 火车经过时位移很大。这一点也在数据分析中得到了验证。在分别参考了火车经过上行门和下行门碰撞恢复的时间 (采用阈值判断方法) 之后, 如图 10、11 所示, 上行门碰撞恢复到静止比下行门恢复的速度总是要慢上 100 ms 左右。因此说明上行门在碰撞前获得了更大的速度, 也就是说在碰撞前产生了更大的位移。

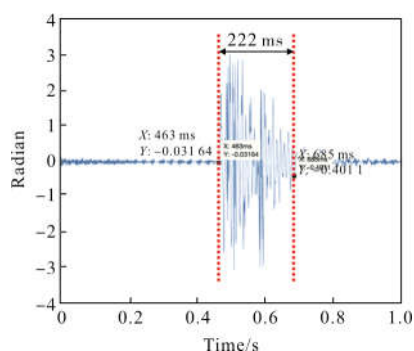


图 10 列车经过上行门从撞击到静止时间的相位图

Fig.10 Phase diagram of the sensor when the train passed the upstream tunnel door from the impact to the rest

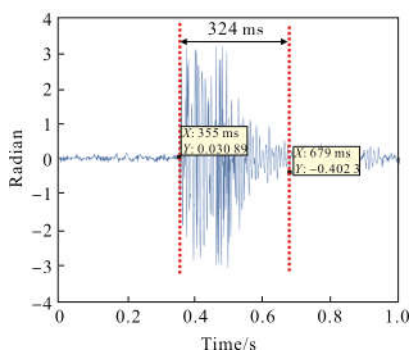


图 11 列车经过下行门从撞击到静止时间的相位图

Fig.11 Phase diagram of the sensor when the train passed the downstream tunnel door from the impact to the rest

通过以上实验数据的分析结果可以看出, 基于 MFS 的铁路隧道防护门能够实时检测多个隧道门的状态, 并且检测数据独立互不影响, 若隧道门产生脱落, 则在光电主机端能实时检测出反射信号消失, 需要进行维修; 即使在隧道尚未脱落的之前, 该系统

还能分析得到例如: 松动, 隧道门形变较大等异常情况。因此该系统可以防患于未然, 在未发生隧道门脱落的情况下就能及时对产生异常的隧道门进行维修和更换。

同时笔者也相信, 如果基于 MFS 的铁路隧道防护门能够投入使用, 随着数据的不断采集和系统的完善, 课题组能够找到更多传感特征与隧道门异常情况对应起来, 实现隧道门的智能化。

4 结 论

铁路隧道防护门作为保证行车安全中关键的一个环节, 有着极其重要的地位。文中针对隧道防护门布置方案、门体结构、尺寸、位置、开门方向、安全防护系统等环节的研究, 研究提出隧道防护门设计方案: (1) 防护门远离隧道中心布置; (2) 隧道防护门隔墙采用混凝土隔墙; (3) 门朝疏散方向开启; (4) 防护门外沿距离相邻线路中心线距离 W 应不小于防护门门框高度和车辆建筑限界之和; (5) 防护门需配备报警系统。在此基础上, 提出了一种基于 DMFS 的铁路隧道智能防护门, 可以感知温度、形变、振动、声波等物理量参数, 具有显示并记录报警部位和报警资料、检测运行故障和报警信号远程传送功能。

参 考 文 献:

- [1] Zhang Hao. Discussion on tunnel safety protection measures [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009(4): 35-38 (in Chinese)
张浩. 隧道安全防护措施探讨 [J]. 铁道工程学报, 2009 (4): 35-38.
- [2] TB10063 -2016. Railway engineering design fire protection specification [S]. Beijing: China Railway Press, 2016. (in Chinese)
TB10063-2016. 铁路工程设计防火规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [3] Yang Bolin. Disaster prevention and refuge of fireproof and explosion-proof doors in railway special long tunnels [J]. *Fire Technique and Products Information*, 2010(4): 18-20. (in Chinese)
杨柏林. 防火防爆门在铁路特长隧道中的防灾和避难作用 [J]. 消防技术与产品信息, 2010(4): 18-20.
- [4] Xu Yong. Analysis on installation method of crossing channel protection door of railway tunnel [J]. *Chinese*

- Railways*, 2011(5): 27–30. (in Chinese)
 许勇. 铁路隧道横通道防护门安装方式分析[J]. 中国铁路, 2011(5): 27–30.
- [5] Li Y Z, Lei B, Ingason H. Scale modeling and numerical simulation of smoke control for rescue stations in long railway tunnels [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2012, 22(2): 101–131.
- [6] Chen Qian, Xiao Peng. Scheme and circuit study of train control for the tunnel disaster prevention and rescue [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(6): 59–63. (in Chinese)
 陈倩, 肖鹏. 隧道防灾救援列车控制方案及电路研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(6): 59–63.
- [7] Beard A N. Tunnel safety, risk assessment and decision-making [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2010, 25(1): 91–94.
- [8] Miclea P C, Chow W K, Shen -Wen C, et al. International tunnel fire -safety design practices [J]. *Ashrae Journal*, 2007, 49(8): 50–60.
- [9] He Zuyuan, Liu Yinping, Ma Lin, et al. Raman distributed temperature sensor using multimode fiber with reduced core size [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0422002. (in Chinese)
 何祖源, 刘银萍, 马麟, 等. 小芯径多模光纤拉曼分布式温度传感器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0422002.
- [10] Li Zhichen, Liu Kun, Jiang Junfeng, et al. A high-accuracy event discrimination method in optical fiber perimeter security system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0922002. (in Chinese)
 李志辰, 刘琨, 江俊峰, 等. 光纤周界安防系统的高准确度事件识别方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0922002.
- [11] Torres B, Paya-Zaforteza I, Barrera D, et al. High-speed railway tunnel monitoring using point, long gauge and distributed strain and temperature fiber optic sensors[J]. *Informes de la Construcción*, 2015, 67(538): e071.1–e071.13.
- [12] Catalano A, Bruno F A, Pisco M, et al. An intrusion detection system for the protection of railway assets using Fiber Bragg Grating sensors[J]. *Sensors*, 2014, 14(10): 18268–18285.
- [13] Wu Xu, Xiong Mudi, Liu Boren, et al. Construction method of herringbone fiber crack sensor: China, CN106197486A [P]. 2016–12–07. (in Chinese)
 乌旭, 熊木地, 柳博仁, 等. 一种人字门光纤裂纹传感器的施工方法: 中国, CN106197486A [P]. 2016–12–07.
- [14] Ai Fan, Li Hao, He Tao, et al. Simultaneous distributed temperature and vibration measurement with UWFBG based coherent OTDR [C]//San Diego, California: Optical Fiber Communication Conference, 2018: paper W2A.12.
- [15] Ai Fan, Sun Qizhen, Zhang Wei, et al. Wideband fully-distributed vibration sensing by using UWFBG based coherent OTDR [C]// Los Angeles, California: Optical Fiber Communication Conference, 2017: paper W2A.19.