

文章编号:1672-3961(2024)02-0013-14

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.252

光纤传感技术在道路交通中的应用

宋修广¹,赵涛¹,毕研美²,张紫豪¹,杜聪¹,田源^{1*},孔晓光³

(1.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002; 2.中国建筑第八工程局第二建设有限公司,山东 济南 250000; 3.山东高速高新科技投资有限公司,山东 济南 250102)

摘要: 光纤传感技术作为当前交通领域的研究热点,是交通基础设施和交通安全的重要监测手段。围绕光纤传感技术检测与监测应力应变信号、温度信号及振动信号的能力,从交通基础设施及交通信息两方面入手,系统阐述国内外相关研究成果。分析总结当前光纤传感技术在交通领域研究和应用的不足之处,并对该技术未来在交通领域中的发展和实际工程应用做出展望。

关键词: 光纤传感技术;交通基础设施;道路交通信息;检测与监测;交通安全

中图分类号: U495

文献标志码: A

引用格式: 宋修广,赵涛,毕研美,等. 光纤传感技术在道路交通中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 13-26.

SONG Xiuguang, ZHAO Tao, BI Yanmei, et al. Application of fiber optic sensing technology in road traffic [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2): 13-26.

Application of fiber optic sensing technology in road traffic

SONG Xiuguang¹, ZHAO Tao¹, BI Yanmei², ZHANG Zihao¹, DU Cong¹, TIAN Yuan^{1*}, KONG Xiaoguang³

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 2. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250002, Shandong, China; 3. Shandong High-Speed High-Tech Investment Co., Ltd., Jinan 250102, Shandong, China)

Abstract: As a current research hotspot in the field of transportation, fiber optic sensing technology was an important monitoring tool for transportation infrastructure and traffic safety. This review focused on the ability of fiber optic sensing technology to detect and monitor stress-strain signals, temperature signals and vibration signals. The related research results at home and abroad were systematically introduced from both transportation infrastructure and transportation information. Based on the fiber optic sensing technology, the shortcomings of its current research and application in the field of transportation were analyzed and summarized, and the outlook for its future development and practical engineering applications in the field of transportation was provided.

Keywords: fiber optic sensing technology; transportation infrastructure; road traffic information; detection and monitoring; traffic safety



宋修广, 1966年生, 教授, 博士生导师, 博士, 山东省路基安全工程技术中心主任, 主要从事交通岩土工程方面的研究。主持国家及省部级项目6项, 重大工程委托项目16项。荣获国家科技进步二等奖1项, 省部级科技进步奖6项。发表学术论文100余篇, 其中SCI及EI收录30余篇。获国家发明专利40余项。编写了国标《公路路基养护技术规范》和地方标准2项。

收稿日期: 2023-10-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2602102)

第一作者简介: 宋修广(1966—), 男, 山东威海人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为路基路面工程。E-mail: songxiuguang@sdu.edu.cn

* 通信作者简介: 田源(1990—), 男, 山东济宁人, 助理研究员, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为智慧交通。E-mail: yuantian@mail.sdu.edu.cn

0 引言

随着我国高速公路里程的不断增加,基础设施结构问题和行车安全问题随之增加,道路、桥梁、隧道等交通基础设施的自身安全性及交通行车安全性越来越重要。目前,众多交通基础设施在结构及运营环境中存在安全隐患,例如:道路路面易出现车辙等病害、结构性损伤,隧道围岩存在不稳定性,桥梁荷载分布影响自身的结构安全。及时检测到病害前兆特征并进行养护维修非常重要^[1],因此,对上述问题进行安全性及时检测和实时监测具有重要意义。一些传感器满足了检测与监测的需求,例如摄像头、激光雷达、探地雷达、毫米波雷达、红外成像仪、光纤传感技术等。但是普通的传感设备(如摄像头、微波雷达等)无法满足对基础设施结构及运营环境的微观检监测,而且这些传感器都是单点按照需求布设,通常不能实现距离长、范围的全路段连续检监测。光纤传感技术具有分布式、连续性等优点,能够克服上述不足。

光纤传感技术主要由光源、传感元件、光电探测器及信号处理单元构成,由光源发射光波,光波通过受外界因素影响的传感元件,将承载信息的出射光波传输到光电探测器,通过信号处理单元解调出外界信息,实现传感。光纤传感技术原理如图 1

所示。光纤传感技术主要有分布式光纤传感技术和光纤光栅传感技术,光纤传感技术的具体分类如图 2 所示。自 20 世纪 70 年代,随着光纤技术及光纤通信技术进步,分布式光纤传感技术出现并兴起^[2],是一种利用光纤作为传感敏感元件和传输信号介质的传感技术。在该技术中,光纤既作为信号传输介质,又能传感。整根光纤均是传感单元,传感点连续分布,因此分布式光纤能感知光纤沿线任意位置的外界信息。光纤光栅传感技术是通过在光纤中制造周期性的折射率变化结构,实现对光信号的测量和传感。与其他传感器相比,分布式光纤传感技术和光纤光栅传感技术具有覆盖范围广、分辨率和灵敏度高、实时监测能力及抗干扰性强等优点。其中,分布式光纤具有长距离传输能力;光纤光栅虽然本质也是点式测量,但一般为多点光纤光栅传感器测量,被称为准分布式传感器,传感距离也有一定优势。光纤在受到外力、温度、电场、磁场等环境因素影响时,光纤中传输的光易受外界影响调制。光纤传感技术可以根据不同的工作原理(瑞利散射、布里渊散射、拉曼散射、光栅)对外界因素的变化进行解调,即能够检测到这些外界因素的变化,是一种比较全面的检监测技术。因此,光纤传感技术在电力、土木水利、石油天然气、交通等领域具有广泛的应用前景,是实现分布式、连续性检监测的首选技术^[3-11]。

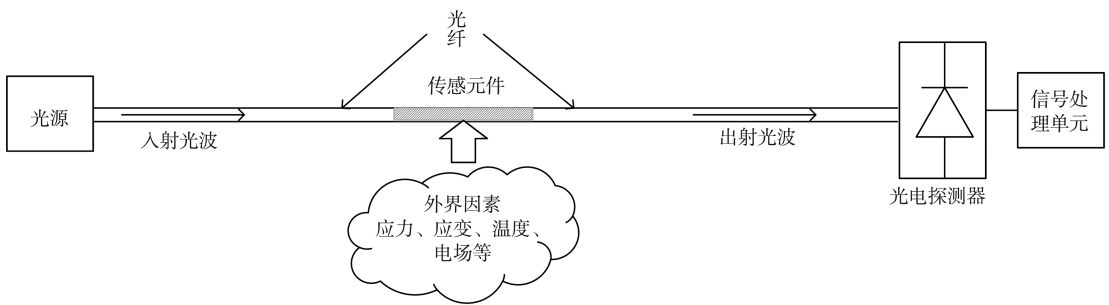


图 1 光纤传感技术原理

Fig.1 Principles of fiber optic sensing technology

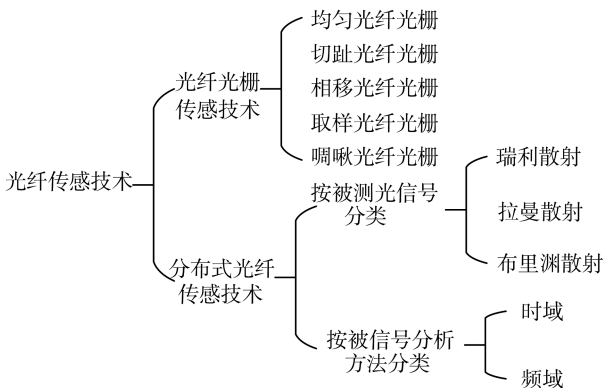


图 2 光纤传感技术分类

Fig.2 Classification of fiber optic sensing technology

基于光纤传感技术的不同传感原理,光纤传感技术在交通领域中具有对应应力应变信号、温度信号及振动信号的检监测能力,如图 3 所示。在不同信号检监测能力的基础上,光纤传感技术主要应用于道路、隧道、桥梁等交通基础设施的安全性及交通信息的监测,为发现和解决问题提供依据。本研究基于光纤传感技术检测与监测应力应变信号、温度信号及振动信号的能力,综述其在道路交通中的研究现状。

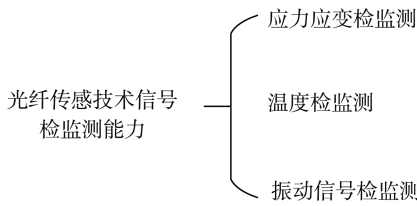


图3 光纤传感技术信号检测监测能力

Fig.3 Signal detection and monitoring capabilities of fiber optic sensing technology

1 应力应变信号检测监测技术

光纤传感技术检测应力应变的原理主要基于光纤中的布里渊散射和光纤光栅的特性。

布里渊散射是光与物质相互作用产生的非弹性散射效应。当激光光源发送光信号经过光纤时,光子与声子相互作用导致布里渊散射,部分光子能量转移到声子中,引起散射。布里渊散射的频率与光纤中的声子振动频率有关,声子振动频率与光纤的温度、应变成正比,因此光纤传感技术可实现应变监测。光纤光栅是一种在光纤中制造周期性折射率变化结构的传感器。光纤光栅的反射光谱与光纤中的折射率变化相关,当激光光源发送光信号经过光纤光栅时,入射光信号发生衍射,形成特定的反射光谱。应力应变检测的基本原理如下:光纤光栅传感器布置在需要检测应力和应变的结构表面,可以是点式或分布式;当结构受到应力或应变作用时,结构的折射率发生变化,导致光纤光栅传感器的反射光谱发生相应变化;收集和记录光纤光栅传感器的反射光谱;通过分析反射光谱的变化,可以推断出结构所受的应力和应变信息。

应力应变检测可以实现对结构的连续检测和实时监测,具有高精度和高灵敏度的特点。根据光纤传感技术的应力应变检测原理,学者们将其引入道路交通领域中,研究路面路基应变、隧道管片衬砌应力应变、桥梁挠度及其他与应力应变相关的问题。具体类型如图4所示。

1.1 路面路基应变

光纤传感技术在路面路基中的应用主要是检测变形与裂缝,其中路面主要是车辙和裂缝,路基主要是沉降和裂缝。目前路面变形与裂缝的检测和监测方法主要包括人工巡检法、图像自动检测法、激光位移检测法、热成像技术检测及光纤传感技术监测法^[12-14],前4种方法很难实现全路段连续性检测和监测。路基沉降和裂缝的检测和监测方法目前应用较多的是探地雷达。近年来,光纤传感

技术开始用于路基裂缝的检测和路基沉降的分布式监测。

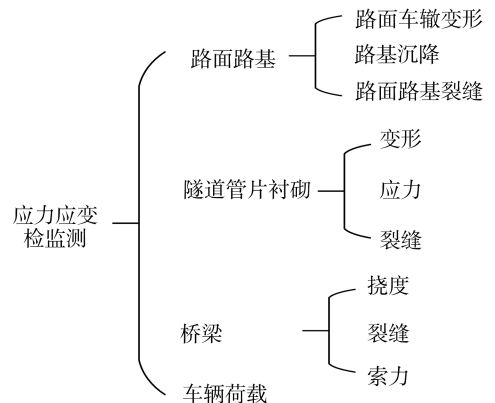


图4 光纤传感技术应力应变检测监测

Fig.4 Fiber optic sensing technology for stress-strain detection and monitoring

在路面变形检测监测方面,光纤传感技术具有检测距离长、范围广、实时性等优点,但目前研究依然存在精度低等问题。早期的相关研究主要是验证光纤技术在检测路面变形方面的适用性和可行性:文献[15]研究了光纤光栅传感技术在路面检测方面的适用性,为后续光纤传感技术应用于路面检测和监测提供了基础;文献[16]利用2组三维光纤光栅传感器布设于某高速公路路面的中下层,改变车辆的质量与速度,监测路面应变的变化规律,发现变化规律与力学分析一致,验证了光纤传感技术用于路面监测的可行性;文献[17]利用光纤传感器采集路面病害数据,总结光纤传感器的优缺点,对于多损伤沥青路面提出了基于光纤传感器的智能监测方法。近期的研究则依托前人研究的可行性开展更加精细的研究:文献[18-20]利用光纤光栅传感技术监测并研究了沥青混合料路面的永久变形、传感器与沥青混合料的协同变形及压实度;文献[21]提出基于分布式光纤形状传感技术的沥青混合料车辙变形监测方法,研发了一种柔性分布式光纤形状传感器用于沥青路面,通过理论和试验明确了形状测试原理,将传感器植入车辙试件,进行室内车辙试验,采用光频域反射设备(optical frequency domain reflectometer, OFDR)进行实时监测,获取各时刻各测点的应变数据,利用二维形状重构算法得出荷载作用处的位移,将应变数据和位移数据进行对比,平均相对误差为0.98%。

在路基沉降方面,监测方法分为地表监测和内部监测,目前常用的方法有沉降板法、水准测量法、监测桩法等^[22],但这些方法需要投入人力定时检测和测算,点式监测的连续性不强,整体智能化程度不高,易出现失误。近年来,随着光纤传感技术的

发展,分布式光纤传感技术开始用于路基沉降的监测,克服了上述方法的缺陷,但大多研究仅局限于室内试验,实际工程应用研究较少。文献[23]针对新旧路基固结时间不一、易出现沉降差的问题,利用分布式光纤的布里渊光时域反射(Brillouin optical time-domain reflectometry, BOTDR)原理进行室内试验,监测路基沉降变化规律,并通过有限元分析法得到新旧路基沉降变形规律,结果基本一致,验证了分布式光纤传感技术监测土体、碎石沉降的可行性;文献[24]针对传统高速公路软基沉降监测方法的实时性、连续性及自动化程度不高的问题,应用分布式光纤技术在实际高速公路中进行软基沉降监测,与传统监测结果相比可靠性较高,实现了实时连续监测;文献[25]利用分布式光纤BOTDR原理对路基沉降进行监测,为了从测量的应变或布里渊频移中获得位移量,研究了用于计算沉降的应变累积分法,与人工测量结果对比表明,2种方法的测量结果基本一致,所提出的方法能有效监测路基沉降;文献[26]提出一种用于路基监测的分布式光纤锯齿状布设方式,与传统监测方法相比,传感光纤锯齿状监测方法的监测结果更加精确,能在一定范围内更接近实际情况,利用MATLAB三维3次样条插值法使光线数据的表达更加直观;文献[27]利用分布式光纤监测钙质砂路基受水力影响的沉降特性,试验过程包括单向供水、单向排水和双向排水3个阶段,结果表明,钙质砂中的渗入水会导致不均匀沉降、倾覆和水平变形,大部分沉降发生在供水阶段,地面沉降主要由供水和排水过程中的颗粒滑动和旋转引起,当土壤离供水室较近时,沉降发生较早;文献[28]基于分布式光纤设计了一种用于路基应变监测的系统,确定实测应变与实际应变的数量关系,并对系统的有效性和耐久性进行了室内试验验证,确定该系统能够有效监测结构物内部应变分布和变化,识别病害的发展,将该系统应用于某高速路段进行封装布设,保证其耐久性,但没有将监测数据与真实数值进行对比,未验证系统室外试验的有效性。

在路面路基裂缝方面,文献[29]采用分布式光纤传感技术对沥青层裂缝情况进行监测,研究光纤在沥青层中的工作性能,通过室内试验模拟监测沥青层的裂缝扩展情况,指出在实际铺面的裂缝监测中紧套光纤比裸光纤性能更好;文献[30]基于分布式光纤传感技术检测应变原理,对光纤检测路面基层裂缝的可行性进行分析,通过室内外试验对可行性进行进一步验证,研究基层裂缝检测方法,包括

对光纤的布设及其他设施的施工和布置等,结果表明该方法对裂缝检测的精度较高。目前对于路面路基裂缝监测的研究尚不充分,在裂缝类型辨别方面没有进一步研究,在实际工程应用中的重要性尚不明确。未来可借鉴机器视觉技术,对分布式光纤信号进行解调和分析,利用机器学习算法,基于数据驱动分辨裂缝类型,增强该技术的实用性。还可将光纤监测混凝土等结构裂缝的技术推广应用于路面路基裂缝监测,实现全路段连续性病害监测。

综上所述,随着光纤传感技术的发展,光纤传感技术在道路结构监测中发挥着重要作用,光纤光栅传感技术主要用于路面变形监测,分布式光纤传感技术主要用于路基沉降监测。早期研究验证了光纤传感技术在道路结构监测领域的可行性,近年来则开始室内试验和现场试验,在实际试验研究过程中,众多学者均肯定了该技术的实时性、连续性 & 精度高等优势。

1.2 隧道管片衬砌应力应变

光纤传感技术对隧道管片衬砌的监测包括应力、变形和裂缝3个方面。其中,目前对管片裂缝监测主要有光纤光栅传感器、位移传感器等;对变形和隧道沉降监测的设备主要有全站仪、全球卫星导航系统等;对应力的监测主要有应力计等传感器。大多传感器均为点式测量,不能实现全路段连续性监测。

在隧道应力和变形方面,学者们分析验证了光纤传感技术应用于隧道应力和变形方面的可行性;文献[31]通过四点弯曲试验验证了分布式光纤传感技术的监测性能,通过隧道衬砌结构相似模型试验验证了分布式光纤在隧道结构中的监测性能,得到衬砌结构的变形规律,采用机器学习算法识别光纤监测数据,实现衬砌变形快速监测,在实际工程应用中验证了分布式光纤在恶劣环境中监测衬砌应变的可行性;文献[32]建立浅埋超大断面圆形隧道十字岩柱开挖模型试验,利用光纤传感技术对不同界面的水平应变进行监测,结果表明该技术能够准确记录试验过程中的应变变化,并对比多点位移计的监测结果,偏差控制在10%以内,验证了该技术在隧道变形中监测的可行性;文献[33]利用光纤光栅传感技术,在隧道管片衬砌缩尺模型中开展了盾构隧道水土压力场景下相似模型试验,得到管片变形信息,并与数值模拟结果对比验证,总结了隧道管片结构应变、曲率、位移的特征与变化规律;文献[34]依托某地铁

盾构隧道工程项目,利用光纤光栅传感器监测施工过程中现场的螺栓和盾构管片的变形,基于监测数据进行受力安全分析;文献[35]以某地铁盾构隧道管片为研究对象,运用分布式光纤传感技术对盾构管片的结构健康问题进行了监测,结果表明,在盾构管片变形最大的施工期,盾构隧道的变形问题主要集中于管片接缝处,管片接缝处变形远大于管片本身。

在隧道衬砌管片裂缝监测方面,文献[36]分析了混凝土裂缝处光纤和混凝土的应变分布,根据裂缝处光纤和混凝土变形协调推算混凝土结构的裂缝宽度,得到一种由分布式光纤监测信号计算混凝土结构裂缝宽度的新方法,通过已有的试验数据验证了该方法的正确性;文献[37]利用分布式光纤传感技术,对混凝土结构裂缝(包括裂缝的位置和宽度)进行了监测,裂缝定位误差小于1.11%,该技术能够实现裂缝初期的微裂纹识别,实现裂缝深度监测;文献[38]在混凝土二次衬砌的内表面和临时拱支撑的反面贴上分布式光纤,在混凝土衬砌上检测到裂缝发展。

综上,光纤传感技术能够实现隧道管片衬砌结构的应力和变形监测,而且应用和研究已经较为成熟,但在隧道衬砌管片裂缝监测方面研究较少。未来可在裂缝方面做更深入研究,在应力和变形检测精度和布设方案上继续改进。

1.3 桥梁位移和索力

桥梁结构病害主要有混凝土结构裂缝、主梁挠度过大、混凝土碳化和钢筋锈蚀等^[39-40]。在工程应用中,桥梁病害的检测方法主要依赖人工巡检和判别,以及传统的检测设备,如超声波检测仪、裂缝测宽仪、臂架式桥检车等,自动化智能化程度低。近年来,众多学者将光纤传感技术应用于桥梁结构安全的检测和监测,并取得了一定成果。

在桥梁挠度监测方面,由于桥梁挠度超过限值影响结构安全,21世纪初便有学者开展了挠度监测的相关研究。文献[41]在桥梁施工期间,将光纤埋入钢筋混凝土内部并做好线路保护措施,监测桥梁施工期、静载试验和运营期的应变响应,结果表明,该技术满足桥梁结构长期健康监测的需求,为后续研究奠定了基础;文献[42]通过室内试验验证了埋入式光纤光栅传感技术的精度稳定性和可靠性,在某大桥进行实地监测试验,验证了该方法在情况复杂的实地监测中具有良好的性能,能够满足桥梁应变监测的要求,具有推广价值;文献[43]提出一种基于光纤光栅传感技术的桥梁应变

监测方法,并安装于香港青马大桥,将结果与传统监测方法风与结构健康监测系统(wind and structural health monitoring system, WASHMS)相比,2种方法的结果有很高的一致性。近年来的研究主要在于提出新的改进技术,提高光纤传感技术用于桥梁应变监测的分辨率、有效性和耐久性。文献[44]采用分布式光纤传感器对一座1 108 m的悬索桥进行试验,给出实测应变沿桥梁全长的分布,论证了分布式光纤在桥梁监测中的可行性;文献[45]基于长标距光纤应变传感器研究桥梁挠度检测,通过室内试验验证了方法的有效性,将该方法用于实时监测实际桥梁的动态应变,基于共轭梁算法反推结构动挠度,与封闭式连通管法的结果进行对比,精度满足挠度测量需求;文献[46]基于分布式光纤精度高、抗干扰且可长距离监测等优点,采用分布式光纤监测桥梁应变,与传统监测方法对比,更能真实反映结构内部各位置的应变。

在桥梁混凝土结构裂缝监测方面,裂缝病害导致桥梁结构的承载能力下降。文献[47]针对钢管混凝土拱桥的混凝土裂缝问题,开发了适用于监测桥梁钢管混凝土裂缝的光纤传感技术,结果表明该传感器效果良好,具有一定推广价值;文献[48]研究了具有粗糙表面的外部聚合物覆层的分布式光纤,利用分布式光纤评估不锈钢钢筋混凝土梁在四点弯曲下的挠度和裂缝宽度的性能,结果表明,分布式光纤的测试结果很准确。

在桥梁索力监测方面,文献[49]提出一种基于光纤光栅传感技术的增敏型索力传感器,能够测量锚索应力,压力试验结果表明,传感器输出信号的灵敏度为0.75 pm/kN,具有一定的增敏效果。为提高光纤在索力监测中的存活率,文献[50]在钢绞线中心丝上设置凹槽,后嵌入光纤,结果表明,该方法提高了光纤成活率,监测距离长且误差小。

综上,国内外学者利用光纤传感技术对桥梁挠度监测的研究较为充分,在桥梁混凝土结构裂缝方面应用较少。后续可继续开展桥梁混凝土结构裂缝的监测研究。

1.4 车辆荷载

在车辆荷载监测方面,目前在实际工程应用中,大多利用动态称重系统测量车辆荷载,此外还有如计算机视觉等智能方法进行荷载监测^[51],但这些都是点式测量,不能实现分布式监测。光纤传感技术则能对桥梁车辆荷载进行实时性长距离监测。文献[52]提出光纤光栅传感技术可用于结构荷载的监测;文献[53]基于光纤光栅传感技术测量

位移的能力,通过桥梁上的竖向位移传感器测量的反作用力响应估计车辆荷载,进行数值分析和车辆加载试验,验证该传感器用于位移监测和荷载推算的性能和精度;文献[54]提出一种利用光纤技术进行列车荷载识别的系统,根据影响线能够对列车的速度、几何和静态轴重进行估计,对该系统做不同速度列车的监测试验,通过数值计算,证明该系统具有一定的精度,对速度 120 km/h 列车的轮距和轴重的最大估计误差分别为 10 cm 和 2.5%;文献[55]利用光纤光栅高速解调系统对重载车实现分级识别,为桥梁超载治理提供理论和技术支撑,同时实现重载车识别和交通流量识别,提供较为完善的交通荷载谱。

综上,实现车辆荷载分布的全方位实时性监测,对道路、桥梁结构的安全性具有重要意义。光纤传感技术能间接计算静载和动载,但目前相关技术在荷载监测方面的研究尚不充分,未来可在此方向展开研究,为道路、桥梁结构的安全性提供理论和技术支撑。

2 温度信号检测监测技术

光纤传感技术温度检测的原理主要基于光纤中的布里渊散射、拉曼散射效应及光纤光栅。

布里渊散射原理和光纤光栅在第 1 章中已经介绍,这里不再详细阐述。布里渊散射的频率与光纤中的声子振动频率有关,声子振动频率与光纤温度成正比,因此能够实现温度监测。在光纤光栅方面,温度检测原理与前文中应力应变检测原理基本一致,都是引起折射率变化并导致反射光谱变化,通过分析光谱变化得到温度信息。拉曼散射是光纤中光与物质相互作用而产生的非弹性散射效应,拉曼散射导致光信号的频率发生偏移,拉曼散射的频率偏移与光纤的温度成正比。温度检测原理如下:采集光纤布里渊散射信号或光纤拉曼散射信号,收集和记录信号的频谱信息,通过分析信号的频谱变化,推断光纤所处的环境温度;利用预先标定的温度-频谱关系曲线,将频谱变化与温度变化对应,得到温度信息。

光纤传感技术温度检测具有较高的温度分辨率和空间分辨率,可以实现对光纤的全程温度监测。光纤传感技术温度检测监测如图 5 所示,在道路交通领域中,基于光纤传感技术的温度检测及光学原理,学者们在道路结冰、隧道温度与火灾及桥梁结构温度等方面展开了研究。

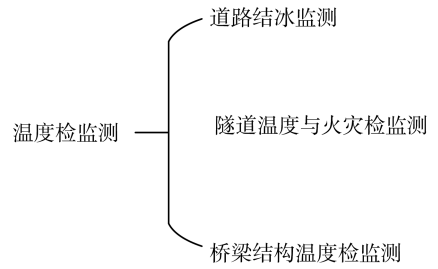


图 5 光纤传感技术温度检测监测

Fig.5 Fiber optic sensing technology for temperature detection and monitoring

2.1 道路结冰

道路结冰导致路面摩擦系数减小,车辆制动距离增大,可能出现打滑、侧滑等情况,极大增加行车风险^[56]。据统计,道路结冰情况的事故率是干燥情况的 10 倍^[57]。因此,对于道路结冰状况的预测和监测对道路运营管理和行车安全具有重要意义。

目前,道路结冰监测主要依靠将传感器安装于道路,通过感知数据推断是否发生道路结冰并测算道路结冰厚度。用于结冰监测的传感器可以根据原理分为电学式、机械式、光学式、电磁波式,以安装测量方法分类又分为接触式和非接触式传感器,具体类型如图 6 所示。非接触式传感器主要有光强法、红外式、图像法及偏振法等^[58-60],这些方法设备安装灵活,安装过程不会对道路结构进行破坏,但会受风速、温度及气压等外界环境干扰,且不能实现全路段连续性监测。接触式传感器主要有电容法、电导法、压电效应测量法及光纤法^[61-64]。光纤式传感器中,发射光纤射出一定波长的光,经冰层的反射和散射后,部分光将返回到接收光纤,检测接收的光强可推算出是否结冰及结冰厚度。其中光纤式传感器可靠性高,较其他方法而言抗电磁干扰性强,能实现全路段监测。

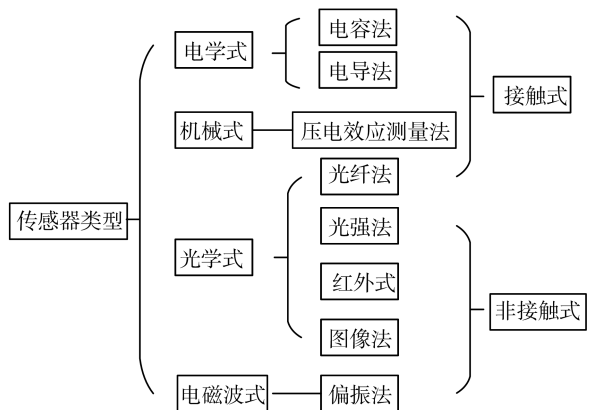


图 6 道路积水结冰传感器类型

Fig.6 Types of road water icing sensors

一直以来,对于光纤式结冰传感器的研究主要应用于飞机与输电线路:文献[65]设计了一种用于

抵抗恶劣飞行环境的光纤式结冰监测传感器,能检测结冰的微观厚度;文献[66]基于光纤设计了一种用于飞机的结冰监测器,通过模拟试验证明该监测器能有效监测结冰厚度;文献[67-69]对光纤监测输电线路结冰状况作了相关研究和述评。这些用于飞机和输电线路的结冰监测器为光纤用于道路冰雪监测提供了基础。有学者将这种方式应用于道路冰雪和积水监测;文献[70]针对传统的光纤结冰传感器用于道路冰雪监测的测量范围和抗干扰能力的局限性,在反射式光纤结冰传感器的基础上,提出一种新的基于多光路的结冰传感器设计方案,设计研发了相关软硬件,试验表明,该系统提高了监测范围和精度;文献[71]基于光纤传感器设计了一种道路结冰厚度检测系统,能测量10 mm以内的路面结冰,在测量精度方面,对厚度0~5 mm结冰的测量精度为0.2 mm,5~10 mm结冰的测量精度为0.5 mm;文献[72]针对现有结冰厚度监测不足的问题,提出基于分布式光纤传感技术的高分辨率测温系统,通过检测冰盖内部竖直方向上的温度变化,实现准确识别冰盖厚度。

综上所述,目前国内外对结冰监测的研究广泛应用于航空和输电管线等领域,但是缺乏在道路交通领域的研究,仅有少数学者研究了道路结冰监测,而道路结冰直接影响行车安全,结冰监测系统在道路领域的推广和深入研究具有重要意义。

2.2 隧道温度与火灾

隧道由于视野差、行车速度快等原因,是道路交通事故的高发区。隧道中四周封闭,仅两侧可以通风,一旦突发火灾,若未第一时间检测到火灾的温度和位置,火势能迅速扩大至无法控制的程度,造成严重的交通瘫痪、财产损失和人员伤亡。因此,有必要研究稳定可靠、响应速度快的隧道温度与火灾监测系统。

在光纤传感技术对温度和火灾监测的理论研究方面,早在20世纪70年代便有研究者发现了光纤传感技术的测温能力。依据光纤传感技术的测温能力,理论研究和在隧道中测温的可行性研究进一步发展。众多学者为提高光纤传感技术的温度检测精确度做了大量理论研究^[73-83]。学者们大多通过各种软件进行数值模拟试验或缩尺模型试验进行隧道测温 and 监测火灾的可行性研究。文献[84]为了验证光纤传感技术在公路隧道中火灾监测的有效性,建立了自然通风条件下的隧道火灾缩尺物理模型并进行动态模拟试验,对隧道拱顶温度进行监测,结果表明,基于分布式光纤的隧道拱顶

温度监测技术能够实现对火灾位置的定位和规模的判断,具有可行性和一定的可靠性;文献[85]基于光纤拉曼散射效应和布里渊光时域分析技术的测温原理,阐述了分布式光纤用于隧道测温 and 监测火灾的优势,建立了模拟点火试验,验证了分布式光纤测温 and 监测火灾的有效性和可靠性;文献[86]利用隧道缩尺模型,运用分布式光纤测温系统,实现对隧道火灾位置和规模的实时监测,将结果与热电偶测试结果对比,2种方法的结果基本一致,但分布式光纤具有分布式连续性的优点,更适用于隧道火灾和温度监测;文献[87]基于火灾动力学模拟试验,研究了隧道不同断面尺寸和纵向风速对光纤传感测温报警系统报警时间的影响,结果表明,隧道断面尺寸和纵向风速越大,光纤传感测温报警系统的报警时间越长,延迟越高。

具体到实际工程应用中,近年来,研究者在真实隧道中进行光纤布设,对隧道火灾和温度变化进行实时监测;文献[88]研究了光纤光栅测温传感器在隧道中的布设情况,认为线型与点型相结合的方式更适用于公路隧道火灾监测;文献[89]针对光纤光栅在实际应用中脆弱易折断的特点,利用环氧树脂将光纤光栅封装在毛细钢管内,基于光纤传感技术设计隧道火灾报警监测系统,结合现场监测试验,证明该系统灵敏度高、数据准确,能够准确判断隧道火灾发生的位置;文献[90]以实际工程应用为导向,介绍了一种基于双头结构的拉曼分布式光纤测温系统的隧道火灾报警系统,实现对隧道中所有分区温度进行实时在线、全天候监测,为确定事故地点及火势蔓延方向提供重要数据依据,显著提高了管理单位的运营与维护效率。

综上,分布式光纤传感在隧道火灾监测方面具有重要意义,且目前已经取得较好成果。在未来的研究中,研究者们将更关注分布式光纤传感技术在隧道中的布设方式、传感距离、空间分辨率与温度测量精度这几项参数的性能提升,从而更有效、更精确地发现隧道火灾和温度异常问题,并及时处理问题,保证隧道消防安全。

2.3 桥梁结构温度

桥梁结构温度监测主要可分为施工期和运营期。桥梁施工中混凝土的浇筑温度会影响混凝土的耐久性,桥梁运营期温度会影响桥梁结构的伸缩、应力等。

目前,大多研究聚焦于桥梁运营期温度的监测,施工期的研究相对较少。文献[91]针对桥梁结构中混凝土浇筑时水化热温度会影响主体结构,高

温膨胀和低温收缩会对混凝土耐久性产生影响,并指出传统用于混凝土浇筑时的测温技术多为点式,无法全方位有效监测,提出基于分布式光纤传感的温度监测技术,实现施工过程中对温度的连续全局监测;文献[92]在某主干道桥梁中,利用光纤光栅传感技术监测桥梁温度变化,根据持续1a的数据显示,该监测系统不仅能够准确监测桥梁的温度信息,还提高了监测的鲁棒性;文献[93]利用光纤传感器的温度补偿机制、环境适应性强及远距离传输等优点,实现了偏远寒冷地区的桥梁实时温度监测,根据数据分析了热负荷和桥梁响应之间的关系;文献[94]在某桥梁结构内部安装了大量光纤光栅传感器,通过长期监测的数据总结了桥梁不同截面和不同方向(纵向、横向及竖向)的温度分布规律,研究了桥梁结构温度与应力应变的关系。

综上,桥梁结构温度也影响桥梁的应力应变,对桥梁温度的监测无论对施工期还是运营期的桥梁结构健康均有重要意义,但目前对于施工期温度监测的研究尚不充分。

3 振动信号检测监测技术

瑞利散射声波振动监测是一种利用声波传播过程中的瑞利散射效应实现结构振动监测的方法。瑞利散射主要是由光纤内部各部分密度不均匀,导致光纤中折射率变化引起的。

瑞利散射声波振动监测的具体原理如下:在需要监测振动的结构表面或内部布置声波发射器和接收器;声波发射器激发声波在结构中传播,声波沿着结构表面或内部传播,声波传播时会与结构的微观不均匀性或材料中的微小缺陷、裂纹等发生散射,这些微观不均匀性在结构受到振动时会引起声波频率、幅值等变化;接收器接收经过结构的声波,记录散射回波信号;通过对接收到的回波信号进行分析和处理,可以得到结构的振动信息,包括振动的频率、振幅等。瑞利散射声波振动监测技术具有高灵敏度和高分辨率,能够实现对结构的实时、连续监测,在道路交通信息监测中应用广泛。

交通信息对道路使用者和管理者都具有重要意义。根据道路交通信息,道路使用者能够及时调整自己的驾驶决策,道路管理者能了解当前道路交通情况,更好地引导和指挥交通,并可将数据用于科学研究,改善道路交通环境。因此,有必要对交通信息进行实时性全方位监测。交通信息的监测包括对车辆轨迹的监测和交通事件的监测等。光

纤传感技术在交通信息监测中主要应用于对车辆信息检测和交通事件监测,具体内容如图7所示。

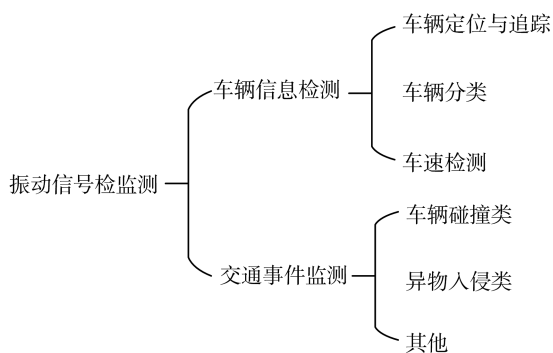


图7 光纤传感技术在振动信号检测监测中的应用
Fig.7 Application of fiber optic sensing technology in vibration signal monitoring

3.1 车辆信息

车辆信息是交通中的基础信息。目前,车辆信息检测主要包括车辆本身的检测与分类、车速检测、位置检测及车牌检测。车辆信息检测方法主要包括环形线圈、激光雷达、摄像机及地磁感应器等,但是这些方法均为点式检测,难以实现对车辆的长距离连续性检测。光纤传感技术中的分布式光纤通过声波振动信号检测和分析能解决上述问题,但光纤传感技术不能实现车牌检测。

在车辆本身的检测与分类、车速检测、位置检测方面,文献[95]讨论了光纤传感技术在车辆检测及交通流量检测中的有效性,进行了现场试验测试,证明了该技术的有效性。后来,学者们利用分布式光纤传感技术进行车辆信息检测;文献[96-97]提出一种用于高速公路的分布式光纤车辆检测方案,利用分布式光纤检测到的振动信号,通过去噪和轨迹增强,实现车辆轨迹的提取及远距离车辆追踪;文献[98]提出一种基于分布式光纤的车辆检测与分类系统,根据振动信号,利用改进的波消噪算法和双阈值算法对信号进行特征提取,实现车辆计数和速度计算,进一步利用机器学习算法支持向量机进行车辆分类,车辆检测、分类精度及速度误差都有较好的结果;文献[99]应用分布式光纤传感技术识别车辆振动信号,实现车辆的检测分类及道路双向车速的检测;文献[100]利用分布式光纤传感技术对车辆进行检测和计数,经过试验测试,人工检查生成的录像,最终车辆检测的成功率为73%。还有部分学者利用光纤光栅传感技术进行车辆信息检测;文献[101]利用光纤光栅传感技术对车辆及车速进行检测,车辆检测正确率为99.62%,车速的相对误差为2.62%。

综上,利用光纤传感技术对车辆信息进行检测

的研究相对比较成熟,后续研究可再提高其精度。进一步利用这些车辆信息,道路管理者能够计算推理出各种交通信息,例如排队长度、延误、交通流量信息,进而可推断出此时的道路占用情况、拥堵程度及交通冲突^[102]等问题。这些信息的获得有利于管理和分配道路资源,提高道路的通行效率。

3.2 交通事件

交通事件包括车辆互相碰撞、车辆撞击护栏及其他附属物等碰撞类事件、抛洒物等异物入侵类事件及其他类型事件。由于这些交通事件发生具有偶然性、突发性和不确定性等特性,无法预知事件发生的位置,因此传统的点式监测传感器无法有效监测到事件的发生。光纤传感技术中的分布式光纤可以分布于整条路段,实现全路段交通事件监测,无论何地何时出现事故,均可监测到。

文献[103]对分布式光纤传感技术用于交通事故监测的可行性做了分析,进行实地试验,将分布式光纤布设于护栏上,根据试验结果,验证了分布式光纤监测车辆撞击护栏的可行性,也为车辆相互碰撞或其他碰撞及振动的监测提供了依据。根据分布式光纤振动监测原理,对车辆之间相互碰撞、大型抛洒物撞击地面及油罐爆炸等振动的监测也存在理论上实现的可能。车辆之间的碰撞监测可参考文献[103]中车辆撞击护栏的研究,原理基本一致,但主要问题是试验难以实现,成本过高,也具有高危险性,初步研究可通过数值模拟实现。异物入侵类事件(如大型抛洒物撞击地面)的监测涉及多源信号的分离,由于抛洒物掉落和车辆行驶均会使道路产生振动,主要任务是通过试验将两信号进行分离:文献[104]研究了分布式光纤振动传感信号的多源分离方法,证明了利用分布式光纤技术实现大型抛洒物监测的可能性。其他类型振动事件(如油罐爆炸)的振动与车辆行驶引起的振动不在同一量级,可通过设置阈值,监测是否产生异常的强大振动。

综上,光纤传感技术在交通事件监测方面的研究尚不充分,仅有少数学者运用光纤传感技术研究了全路段交通事件监测。根据原理分析,本研究发现光纤传感技术还可用于抛洒物监测、车辆碰撞监测等交通事件。未来可对这些方向进行深入研究,做到对交通事件的及时监测并做好应对措施,降低损失。

4 结束语

本研究综述了光纤传感技术在交通领域的应

用,结合光纤传感技术的传感原理及其相对于其他传感器的优势,分章节探讨了光纤传感技术在应力应变、温度、振动信号检测监测能力在道路交通中的应用研究。在对三方面的综述中能够看出,现阶段研究者们利用光纤传感技术在交通领域做了大量研究,都取得了一定的进展和成果。

总体而言,光纤传感技术在交通领域已经得到广泛研究,但还有一些方向亟待改进和探究。在应力应变信号检测监测方面,未来可基于光纤检测应变的能力继续推广到结构裂缝检测中,实现对路面路基裂缝、隧道管片衬砌裂缝及桥梁结构裂缝的安全监测。在温度信号检测监测方面,未来可在道路结冰监测领域继续深入研究并推广应用。在振动信号检测监测方面,未来可对抛洒物监测、车辆碰撞监测等交通事件监测等方向进行深入研究。光纤传感技术在当下和未来都将是交通基础设施和交通安全领域的重要监测手段,对提高交通基础设施安全性、行车安全性及通行效率等方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] 金尔. 隧道长寿命周期大修分解可行方案评价及监管策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
JIN Er. Research on evaluation of feasible scheme and supervision strategy for tunnel overhaul decomposition based on long life cycle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [2] 朱燕, 代志勇, 张晓霞, 等. 分布式光纤振动传感技术及发展动态[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1072-1075.
ZHU Yan, DAI Zhiyong, ZHANG Xiaoxia, et al. Developments of distributed optical fiber vibration sensor[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(10): 1072-1075.
- [3] SUN Z, WANG P, VURAN M, et al. MISE-PIPE: magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring[J]. Adhoc Networks, 2011, 9(3): 218-227.
- [4] WANG C, OLSON M, SHERMAN B, et al. Reliable leak detection in pipelines using integrated DdTS temperature and DAS acoustic fiber-optic sensor[C]// Proceedings of the 52nd Annual IEEE International Carnahan Conference on Security Technology. Montreal, Canada: ICCST, 2018: 95-99.
- [5] WU H, CHEN J, LIU X, et al. One-dimensional CNN-based intelligent recognition of vibrations in pipeline monitoring with DAS[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(17): 4359-4366.
- [6] HICKE K, HUSSELS M, EISERMANN R, et al. Condition monitoring of industrial infrastructures using dis-

- tributed fibre optic acoustic sensors[C]// Proceedings of 2017 25th International Conference on Optical Fiber Sensors. Jeju-Do, Korea: IEEE, 2017: 1-4.
- [7] DUCKWORTH G, OWEN A, WORSLEY J, et al. Distributed acoustic and seismic sensing performance for multi-threat, multi-environment border monitoring[C]// Proceedings of 2013 European Intelligence and Security Informatics Conference. Uppsala, Sweden: IEEE, 2013: 273-276.
- [8] 吴建清, 宋修广. 智慧公路关键技术发展综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(4): 52-69.
WU Jianqing, SONG Xiuguang. Review on smart highways critical technology[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(4): 52-69.
- [9] BARRIAS A, CASAS J, VILLALBA S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Sensors, 2016, 16(5): 748.
- [10] RAJEEV P, KODIKARA J, CHIU W, et al. Distributed optical fibre sensors and their applications in pipeline monitoring[J]. Key Engineering Materials, 2013(558): 424-434.
- [11] 祝视, 郑惠敏, 王海燕. Φ -OTDR 技术在光缆故障快速定位中的应用研究[J]. 湖南电力, 2020, 40(5): 47-50.
ZHU Shi, ZHENG Huimin, WANG Haiyan. Application research on Φ -OTDR technology for quickly locating in optical cable faults[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(5): 47-50.
- [12] MOHAN A, POOBAL S. Crack detection using image processing: a critical review and analysis[J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(2): 787-798.
- [13] LIU F, LIU J, WANG L. Asphalt pavement crack detection based on convolutional neural network and infrared thermography[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 22145-22155.
- [14] MA J, ZHAO X, HE S, et al. Review of pavement detection technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 121-137.
- [15] 陈少幸, 张肖宁, 徐全亮, 等. 沥青混凝土路面光栅应变传感器的试验研究[J]. 传感技术学报, 2006(2): 396-398.
CHEN Shaoping, ZHANG Xiaoning, XU Quanliang, et al. Experiment and research of grating strain sensor on asphalt pavement[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006(2): 396-398.
- [16] 陈凤晨, 谭忆秋, 董泽蛟, 等. 基于光纤光栅技术的沥青路面结构应变场分析[J]. 公路交通科技, 2008(10): 9-12.
CHEN Fengchen, TAN Yiqiu, DONG Zejiao, et al. Research on strain field of asphalt pavement based on FBG sensor technique[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008(10): 9-12.
- [17] 宋宏伟, 覃丽坤, 李渊, 等. 光纤传感监测技术用于沥青路面损伤监测的研究[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 141-145.
SONG Hongwei, QIN Likun, LI Yuan, et al. Research on optical fiber sensing technology applied to damage detection of asphalt pavement[J]. Highway Engineering, 2015, 40(5): 141-145.
- [18] TAN Y, WANG H, MA S, et al. Asphalt pavement compaction monitoring based on fiber grating sensing technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 112-117.
- [19] TAN Y, CHEN F, DONG Z, et al. Calculation method of permanent deformation for asphalt pavement based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(4): 119-122.
- [20] TAN Y, DONG Z, TIAN G, et al. Evaluating method of the coordination deformation between asphalt mixture and fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 100-104.
- [21] 张冀雯, 马宪永, 赵含, 等. 基于分布式光纤形状传感的沥青混合料车辙变形监测研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 98-107.
ZHANG Jiwen, MA Xianyong, ZHAO Han, et al. Monitoring rutting deformation of asphalt using distributed optical fiber shape sensing technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(3): 98-107.
- [22] MIN Y, TAO J, REN W. A high-precision online monitoring system for surface settlement imaging of railway subgrade[J]. Measurement, 2020, 159: 107707.
- [23] 刘玉涛. 基于分布式光纤传感技术的新旧路基沉降变形监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
LIU Yutao. Monitoring research for the settlement of young and old subgrades based on distributed optical fiber sensing technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [24] LI J, ZHANG H, LIU Y, et al. Fiber Bragg grating monitoring technology applied in soft ground settlement of highway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(5): 1442-1446.
- [25] ZHANG D, HE J, XUE Y, et al. Investigation of settlement monitoring method based on distributed Brillouin fiber optical sensor[J]. Measurement, 2019, 134: 118-122.
- [26] 韦超群, 邓清禄. 基于分布式光纤技术的路基沉降监测应用研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5):

- 1091-1098.
WEI Chaoqun, DENG Qinglu. Research on application of distributed optical fiber monitoring technology for subgrade settlement[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1091-1098.
- [27] CAO D, ZHU H, GUO C, et al. Investigating the hydro-mechanical properties of calcareous sand foundations using distributed fiber optic sensing[J]. Engineering Geology, 2021, 295: 106440.
- [28] 姜臻. 适用于路基监测的分布式光纤传感器应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
JIANG Zhen. Application of a distributed optical fiber sensor for road subgrade monitorin[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [29] 钱振东, 黄卫, 关永胜, 等. BOTDA 在沥青混凝土铺装层裂缝监测中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 799-803.
QIAN Zhendong, HUANG Wei, GUAN Yongsheng, et al. Application of BOTDA on cracking monitoring for asphalt concrete pavement[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(5): 799-803.
- [30] 耿任山. 水泥稳定碎石基层裂缝发展规律研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
GENG Renshan. Research on crack development law of cement stabilized macadam base[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [31] 张泽尧. 基于分布式光纤传感技术的隧道衬砌变形监测及评估研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
ZHANG Zeyao. Research on tunnel lining deformation monitoring and evaluation based on distributed optical fiber sensing technology[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [32] LIU Q, WANG J, XIAO L, et al. Application of OFDR-based sensing technology in geo-mechanical model test on tunnel excavation using cross rock pillar method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1063-1075.
- [33] 姚忠明. 基于光纤光栅传感的水下盾构隧道结构变形状态感知研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
YAO Zhongming. Research on deformation state sensing of underwater shield tunnel structure based on fiber Bragg grating sensing[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [34] 潘建阁. 深圳复合地层对盾构隧道衬砌管片结构受力和变形的影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
PAN Jiange. Analysis of composite strata on force and deformation of shield tunnel lining segment structure in Shenzhen[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [35] 朱宁, 王兴. 基于分布式光纤感测技术的苏州盾构隧道管片变形监测分析[J]. 江苏建筑, 2018(6): 72-75.
ZHU Ning, WANG Xing. Monitoring and analysis of segment deformation in suzhou shield tunnel based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Jiangsu Construction, 2018(6): 72-75.
- [36] 张宝祥. 多种受力状态下结构分布式光纤传感应变传递及裂纹监测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG Baoxiang. Strain transmission and cracks determination of structures under various loading conditions by distributed optical fiber sensors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [37] 刘浩. 混凝土结构裂缝分布式光纤监测试验研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2020.
LIU Hao. The experimental study of distributed optical fiber for concrete structure cracks monitoring technology[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2020.
- [38] SUI Y, CHENG X H, WEI J X. Distributed fibre optic monitoring of damaged lining in double-arch tunnel and analysis of its deformation mode[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 110: 103812.
- [39] 陈景星. 高速公路梁桥加宽桩基础沉降差异控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
CHEN Jingxing. Research on differential settlement control technology of pile foundation used in widened beam bridge for expressway widening[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [40] 褚豪. 桥梁病害可视化表达研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
CHU Hao. Study on the visualization of bridge disease[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020.
- [41] 万里冰, 武湛君, 张博明, 等. 基于光纤光栅传感技术的桥梁结构内部应变监测[J]. 光电子·激光, 2004, 15(12): 1472-1476.
WAN Libing, WU Zhanjun, ZHANG Boming, et al. Internal strain monitoring of bridge structure based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(12): 1472-1476.
- [42] LIU Y Q, DU Y L, WANG X M, et al. Application research of submerged F-P optical fiber strain sensor used in the health monitoring of concrete bridge[J]. Optical Technology, 2006, 32(3): 349-352.
- [43] CHAN T H T, YU L, TAM H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: background and experimental observation[J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 648-659.

- [44] XU J, DONG Y, ZHANG Z, et al. Full scale strain monitoring of a suspension bridge using high performance distributed fiber optic sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27: 124017.
- [45] 张欣,樊锋,林宏磊,等. 基于长标距光纤应变传感器的桥梁挠度识别技术研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(增刊2): 1932-1937.
ZHANG Xin, FAN Feng, LIN Honglei, et al. Research on bridge deflection identification technology based on long gauge fiber optic strain sensor[J]. *Building Structure*, 2022, 52(Suppl. 2): 1932-1937.
- [46] 蒋孝鹏,邓清禄,胡晓磊,等. 分布式光纤在桥梁监测中的应用研究[J]. *建筑结构*, 2018, 48(增刊1): 617-620.
JIANG Xiaopeng, DENG Qinglu, HU Xiaolei, et al. Research on application of distributed optical fiber in bridge monitoring [J]. *Building Structure*, 2018, 48(Suppl. 1): 617-620.
- [47] 田长彬,王静,张峰,等. 用于桥梁钢管混凝土裂缝监测的FBG传感器研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2017(9): 20-23.
TIAN Changbin, WANG Jing, ZHANG Feng, et al. Study of fiber Bragg grating sensor for monitoring of concrete cracks in bridge steel tube[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(9): 20-23.
- [48] FERNANDEZ I, BERROCAL C G, ALMFELDT S, et al. Monitoring of new and existing stainless-steel reinforced concrete structures by clad distributed optical fibre sensing [J]. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22(1): 257-275.
- [49] 郭永兴,李志雄. 增敏型光纤布拉格光栅锚索测力传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 78-85.
GUO Yongxing, LI Zhixiong. Sensitized fiber Bragg grating anchor cable force sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 78-85.
- [50] 覃荷瑛,林勇,姜涌,等. 光纤光栅传感器在斜拉桥索力监测中的应用[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(10): 51-55.
QIN Heying, LIN Yong, JIANG Yong, et al. Application of fiber Bragg grating sensor in cable force monitoring of cable-stayed bridge[J]. *Railway Engineering*, 2020, 60(10): 51-55.
- [51] GE L F, DAN D H, KOO K Y, et al. An improved system for long-term monitoring of full-bridge traffic load distribution on long-span bridges[J]. *Structures*, 2023, 54: 1076-1089.
- [52] EVERALL L, GALLON A, ROBERTS D. Optical fibre strain sensing for practical structural load monitoring[J]. *Sensor Review*, 2000, 20(2): 113-119.
- [53] KIM S W, YUN D W, PARK D U, et al. Vehicle load estimation using the reaction force of a vertical displacement sensor based on fiber Bragg grating[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1572.
- [54] PIMENTEL R, RIBEIRO D, MATOS L, et al. Bridge weigh-in-motion system for the identification of train loads using fiber-optic technology[J]. *Structures*, 2021, 30: 1056-1070.
- [55] 刘胜春. 光纤光栅智能材料与桥梁健康监测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
LIU Shengchun. The study on application of FBG intelligent materials to bridge health monitoring system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [56] 苑会珍,葛俊锋,叶林,等. 基于线偏振度的非接触式路面状态探测方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2017, 415(8): 89-91.
YUAN Huizhen, GE Junfeng, YE Lin, et al. Noncontact road condition detection method based on degree of linear polarization[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017, 415(8): 89-91.
- [57] 张久鹏,王培,葛敬勇,等. 基于红外技术的沥青路面积水结冰厚度测试方法与影响因素[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(6): 1187-1192.
ZHANG Jiupeng, WANG Pei, GE Jingyong, et al. Test methods and influencing factors for asphalt pavement hydrates and icing thickness detection based on infrared technology[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(6): 1187-1192.
- [58] ZHANG J, WANG P, WANG H, et al. Development and verification of integrated photoelectric system for noncontact detection of pavement ponding and freezing [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2021, 28: e2719.
- [59] WANG P, ZHOU W, BAO Y, et al. Ice monitoring of a full-scale wind turbine blade using ultrasonic guided waves under varying temperature conditions[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2018, 25: e2138.
- [60] ZHAO W, XU L, BAI J, et al. Sensor-based risk perception ability network design for drivers in snow and ice environmental freeway: a deep learning and rough sets approach[J]. *Soft Computing*, 2018, 22(5): 1457-1466.
- [61] GUI K, GE J, YE L, et al. The piezoelectric road status sensor using the frequency scanning method and machine-learning algorithms[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 287(1): 8-20.
- [62] ROY S, IZAD A, DEANNA R G, et al. Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 69(3): 243-250.
- [63] TROIANO A, PASERO E, MESIN L. New system for detecting road ice formation[J]. *IEEE Transactions on*

- Instrumentation and Measurement, 2011, 60 (3): 1091-1101.
- [64] AMOIROPOULOS K, KIOSELAKI G, KOURKOUMELIS N, et al. Shaping beam profiles using plastic optical fiber tapers with application to ice sensors[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2503.
- [65] MARTINEZ J, RODENAS A, STAKE A, et al. Harsh-environment-resistant OH-vibrations-sensitive mid-infrared water-ice photonic sensor[J]. Advanced Materials Technologies, 2017, 2: 1700085.
- [66] GE J, LIU J, GUI K, et al. Atmospheric icing measurement and online ice type recognition for aircraft utilizing optical fiber sensor and machine learning algorithms[J]. Measurement, 2022, 205: 112215.
- [67] 高明, 张江涛, 赵振刚, 等. 基于光纤传感的输电线路覆冰监测系统研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(8): 1295-1300.
- GAO Ming, ZHANG Jiangtao, ZHAO Zhengang, et al. Monitoring and analysis of icing on transmission lines based on optical fiber sensing[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(8): 1295-1300.
- [68] 周恺, 张睿哲, 蔡瀛森, 等. 基于分布式光纤的架空输电线路覆冰监测技术及应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7): 177-180.
- ZHOU Kai, ZHANG Ruizhe, CAI Yingmiao, et al. Application and research of overhead transmission line icing monitoring technology based on distributed optical fiber[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7): 177-180.
- [69] 李先锋, 徐志钮, 郭一帆, 等. 基于光纤传感的输电线路覆冰监测技术应用评述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(2): 22-34.
- LI Xianfeng, XU Zhiniu, GUO Yifan, et al. Review of application of icing monitoring technology for transmission lines based on optical fiber sensing[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(2): 22-34.
- [70] 陆侃. 道路结冰与积水智能传感器系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- LU Kan. Research on intelligent sensor system of road icing and road waterlogging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [71] TAN S, GE J, YE L, et al. Road surface icing detecting system based on multiple sensor[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2016, 35(1): 107-109.
- [72] 王玕睿, 邓霄, 张均, 等. 面向冰盖剖面的高空间分辨率分布式光纤测温系统设计[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 941-948.
- WANG Dingrui, DENG Xiao, ZHANG Jun, et al. High spatial resolution distributed optical fiber temperature measurement system for ice cover profile[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 941-948.
- [73] KOMATSU K, FUJIHASHI K, OKUTSU M. Application of the optical sensing technology to the civil engineering field with optical fiber strain measurement device (BOTDR)[C]//Proceedings of Conference on Advanced Sensor Systems and Applications. Shanghai, China: SPIE, 2002: 352-361.
- [74] 曹立军. 分布式光纤温度测量及数据处理技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- CAO Lijun. Research on the distributed fiber optic temperature measurement and the data processing[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [75] 杨斌, 皋魏, 席刚, 等. 新型超远程分布式光纤拉曼温度传感器[J]. 光通信研究, 2011, 4(20): 54-56.
- YANG Bin, GAO Wei, XI Gang, et al. A novel ultralong range distributed optical fiber Raman temperature sensor[J]. Study on Optical Communications, 2011, 4(20): 54-56.
- [76] 张岩红. 分布式光纤温度传感器信号处理系统的研究与设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- ZHANG Yanhong. Study and design on signal processing system of distributed optic fiber temperature sensor[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2003.
- [77] XU M G, ARCHAMBAULT J L, REEKIE L, et al. Structural bending sensor using fibre gratings[C]//Proceedings of the SPIE's 1994 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. San Diego, CA, USA: SPIE, 1994: 407-413.
- [78] IWASHIMA T, INOUE A, SHIGEMATSU M, et al. Temperature compensation technique for fibre Bragg gratings using liquid crystalline polymer tubes[J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 417-419.
- [79] XU M G, ARCHAMBAULT J L, REEKIE L, et al. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors[J]. Electronics Letters, 1994, 30(13): 1085-1087.
- [80] JAMES S W, DOCKNEY M L, TATAM R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors[J]. Electronics Letters, 1996, 32(12): 1133-1134.
- [81] DU H Z, ZHANG Z S, WU H, et al. Single-ended self-calibration high-accuracy Raman distributed temperature sensing based on multi-core fiber[C]//Proceedings of 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, CA, USA: IEEE, 2021: 21298683.
- [82] LI J, ZHANG Q, XU Y, et al. High-accuracy distributed temperature measurement using difference sensitive-temperature compensation for Raman-based optical fiber sensing[J]. Optics Express, 2019, 27(25):

- 36183-36196.
- [83] HE T, RAN Y L, LIU T, et al. Distributed temperature/vibration fiber optic sensor with high precision and wide bandwidth [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 7104811.
- [84] 李震, 冷先伦, 殷秋雨. 基于分布式光纤监测的隧道火灾温度分布特征研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(6): 132-139.
- LI Zhen, LENG Xianlun, YIN Qiuyu. Research on the temperature distribution characteristics of tunnel fire based on distributed optical fiber monitoring[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(6): 132-139.
- [85] 胡其志, 殷秋雨, 李鸣, 等. 分布式光纤在公路隧道火灾监控中的应用研究[J]. *公路*, 2020, 65(4): 383-387.
- HU Qizhi, YIN Qiuyu, LI Ming, et al. Research on the application of distributed fiber optics in fire monitoring of highway tunnels[J]. *Highway*, 2020, 65(4): 383-387.
- [86] 殷秋雨. 基于分布式光纤监测的隧道火灾温度分布特征研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
- YIN Qiuyu. Research on temperature distribution characteristics of tunnel fire based on distributed optical fiber monitoring[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.
- [87] 孙东旭, 姚斌. 特大断面公路隧道线型感温火灾探测系统适用性研究[J]. *火灾科学*, 2021, 30(3): 165-172.
- SUN Dongxu, YAO Bin. Applicability of linear heat fire detection system in super-large section highway tunnels [J]. *Fire Safety Science*, 2021, 30(3): 165-172.
- [88] SUN X. Fiber Bragg grating temperature measurement combined with infrared flame detector applied to highway tunnel fire monitoring[J]. *Journal of Electro-technology, Electrical Engineering and Management*, 2022, 5(1): 61-67.
- [89] 付华, 谢森, 徐耀松, 等. 光纤布拉格光栅传感技术在隧道火灾监测中的应用研究[J]. *传感技术学报*, 2013, 26(1): 133-137.
- FU Hua, XIE Sen, XU Yaosong, et al. Application research of optical fiber Bragg grating sensing technology in the tunnel fire monitoring[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(1): 133-137.
- [90] 曹桂芳. 双头结构 RDTs 隧道火灾报警系统的研究[J]. *电子技术*, 2020, 49(6): 44-45.
- CAO Guifang. Study on RDTs tunnel fire alarm system with double head structure[J]. *Electronic Technology*, 2020, 49(6): 44-45.
- [91] 姜云, 余有光, 姜超, 等. 分布式光纤在大型桥梁建设中温度监测的智能化技术应用[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020, 16(9): 241-244.
- JIANG Yun, YU Youguang, JIANG Chao, et al. Intelligent technology application of distributed fiber optic in temperature monitoring in large bridge construction[J]. *Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition)*, 2020, 16(9): 241-244.
- [92] WEN X L, LI Y, WEI H. Urban bridges temperature measurement system based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2547: 361-363.
- [93] XIAO F, HULSEY J L, BALASUBRAMANIAN R. Fiber optic health monitoring and temperature behavior of bridge in cold region[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2017, 24(11): e2020.
- [94] 王宇斌. 大跨预应力混凝土刚构-连续梁桥温度效应研究与预测[D]. 济南: 济南大学, 2020.
- WANG Yubin. Research and prediction on temperature effect of long span prestressed concrete rigid continuous girder bridge[D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
- [95] MELLER S A, VRIES M J D, ARYA V, et al. Optical fiber sensors for vehicle detection[C]//*Proceedings of SPIE. Philadelphia, PA, USA: SPIE*, 1995: 39-45.
- [96] 王茂宁. 基于分布式光纤传感的高速公路车辆检测与轨迹预测关键技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- WANG Maoning. Research on key technologies for expressway vehicle detection and trajectory prediction with optical distributed acoustic sensing[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [97] 王茂宁, 李钟麒, 张建伟, 等. 基于分布式光纤传感系统的车辆轨迹提取方法[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(2): 141-150.
- WANG Maoning, LI Zhongqi, ZHANG Jianwei, et al. Vehicle trajectory extraction method using distributed optical acoustic sensing[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(2): 141-150.
- [98] LIU H, MA J, XU T, et al. Vehicle detection and classification using distributed fiber optic acoustic sensing [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1364-1374.
- [99] 叶彬. 分布式光纤传感车辆振动识别及车速算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- YE Bin. Research on distributed optical fiber sensing for vehicle identification and speed measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [100] CATALANO E, COSCETTA A, CERRI E, et al. Automatic traffic monitoring by phi-OTDR data and Hough transform in a real-field environment[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3579-3584.