

DOI: 10.3901/JME.2022.08.063

特种微结构光纤振动传感器及其铁路监测应用*

刘正勇^{1,2} LIN Htein³ 刘 繁⁴ 钟永康^{2,3} 谭华耀³

(1. 中山大学电子与信息工程学院 广州 510006;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室 珠海 519000;

3. 香港理工大学电机工程学系 香港 999077;

4. 武汉理工大学机电工程学院 武汉 430205)

摘要: 提出基于特种微结构光纤的振动加速度传感器,将高性能的光纤振动传感器应用于铁路结构的健康监测,设计并研制了 Sagnac 型的振动传感器。通过对光纤结构的合理设计和优化,可以获得高双折射率特性,并能针对外界侧向压力的变化产生对应的相位改变量,进而建立起外界振动引起的动态压力与微结构光纤中传导模式之间的线性关系。基于此原理设计的振动传感器具有较高的加速度灵敏度,以及较宽的频率响应,灵敏度高于 25 pm/g,其实际谐振频率高于 2 500 Hz,并与传感器机械结构封装有关。通过对铁路运营列车的实时监测,所提出的新型微结构光纤振动传感器可以准确获得低频范围内的大幅振动信息,并可较好的反映出高频扰动,有助于实时监测钢轨波纹形变。所提出的新型六孔微结构光纤振动传感器对于铁路、桥梁及机械等结构的振动实时监测提供了新思路和方法,具有很大的应用前景。

关键词: 微结构光纤; 振动传感器; 加速度; 结构健康监测

中图分类号: TN253

Special Microstructured Optical Fiber Based Vibration Sensor and Its Application in Railway Monitoring

LIU Zhengyong^{1,2} LIN Htein³ LIU Yi⁴ CHUNG Weng-Hong^{2,3} TAM Hwa-Yaw³

(1. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519000;

3. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077;

4. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430205)

Abstract: In this paper, a special microstructured optical fiber based vibration sensor is proposed and experimentally employed in the structural health monitoring of railway. To achieve this, the vibration sensor based on Sagnac interferometer was designed and fabricated. By optimizing the structure of the microstructured optical fiber that has six air holes in the cladding, it could possess high birefringence that changes with the external force applying to the fiber laterally, based on which a linear relationship between the dynamic force and the propagating mode guided in the fiber could be established. Such vibration sensor exhibits a sensitivity of 25 pm/g to acceleration as well as a broad response frequency range. Its resonant frequency is up to over 2 500 Hz, which is dependent on the mechanical design of the sensor package. A field test was conducted using the proposed vibration sensor, and the sensor could measure the large amplitude vibration in low frequency range, as well as those vibrations in high frequency range, which is helpful to identify the corrugations on the rail. The proposed novel vibration sensor based on six-hole microstructured optical fiber provides a new pathway or approach for monitoring the vibration of structures in railway, bridge and mechanical engineering, showing great potential in the applications.

Key words: microstructured optical fiber; vibration sensor; acceleration; structural health monitoring

* 国家自然科学基金资助项目(61905096)。20210130 收到初稿, 20211226 收到修改稿

0 前言

随着高铁机械技术及通信网络的发展,对铁路结构健康的监测时效性直接影响着高速列车运行的安全。列车的运行状况需要有先进的监测技术来保证车轮、车轨等结构的无缺陷性,并通过离线检修、在线监测等手段预先杜绝任何的安全隐患。铁路系统是集重型机械、机械电子、通信、传感等技术于一体的复杂综合系统网络,保障其机械结构安全的核心技术是完善可靠的传感监测系统。而可靠的传感系统同样依赖于高性能的传感器件。不同的传感器可实现对列车的各类参数进行监测,比如车轮间的振动、车轨应变、车轮计数、列车重量、导电弓接触力及位置等。相比于传统的电学传感器,近年来,光纤传感技术在铁路监测的应用当中表现出优异的性能,其具有的优点主要表现在质量轻巧、抗电磁干扰、高灵敏性、可复用以及可长距离监测、可与光通信网络融合等方面^[1]。因此,光纤传感技术逐渐应用在铁路系统中的对机械结构的应力、振动、温度等进行监测。

目前,在铁路监测中应用比较多的是基于光纤光栅技术的传感器。WEI 等^[2]利用光纤光栅测量路轨在列车经过时引起的应变,对车轴计数进行实时分析,进而建立监测列车间距、车速等信息的系统。此外,YUEN 等^[3]利用光纤光栅测量出铁路列车的载荷,并分析两侧车轮的负载平衡,从而分析对路轨受车轮挤压的情况,同时也结合振动传感器分析出列车运行过程中的振动指数,用以判断列车的健康安全。早期,香港理工大学谭华耀教授研究团队^[4-5]开发出多种光纤光栅传感器,并在香港地铁上开展了多次场地试验,研究出一套高效的振动数据分析算法,既监测列车振动,同时也测量列车重量,实现车轴计数、列车识别、车速监测。经过多年的积累,此套监测系统也已在中国香港、中国台湾、印度、荷兰、新加坡等获得推广应用^[6]。另外,通过设计光纤光栅悬臂梁结构,KINET 等^[7]也研制出振动传感器,分别测量了列车车轴、转向架及车厢的振动情况,进一步实时监测了运行列车的车速、车轴数。BUGGY 等^[8]通过在路轨上安装光栅应变传感器,实现了对铁轨在列车高速经过后造成的应变监测,对评估路轨的健康提供了实时数据。基于混合型的光纤光栅的温度和振动传感器,深圳大

学、武汉大学及武汉理工大学的 WANG 等^[9]设计出新型的振动传感器,获得其机械结构的共振频率为 970 Hz,灵敏度为 27.28 pm/g(g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$),并安装在列车车轴进行了试验测试。

除了光纤光栅技术之外,通过光纤干涉仪结构也被广泛应用在铁路监测系统中。ZHAO 等^[10]报道了一种光纤法布里-波罗干涉仪,并提出了高速白光干涉解调方法。其谐振频率在 270 Hz,并在 $\pm 30g$ 范围内达到 8.5 μg 的分辨率,可较好的测量出列车机械结构的振动加速度。由此可见,光纤传感技术已可胜任铁路监测中的各类机械结构参数测量,包括实时监测列车在运行过程中的振动。对此,我们在前期也提出了利用保偏光子晶体光纤构建 Sagnac 干涉仪的结构,并研制出高性能的振动加速度传感器^[11]。其谐振频率可达 2 500 Hz,灵敏度为 $\sim 8 \text{ pm/g}$,并在 0 到 1 kHz 的宽频谱范围内具备平坦的灵敏度,意味着该传感器可适用于 1 kHz 以内的各类机械振动监测。我们通过将该传感器安装在新加坡地铁上,进行了在线试验测试,并获得了良好的场地测试结果。由于其谐振频率高,且具有宽频响应,可用于监测铁路路轨的波纹变形和磨损^[12],对此钢轨波纹磨损的测量目前还没有一种较好的方法。因此,通过结合特种光纤的设计灵活性特点,研究新型的振动传感器将有助于精确测量此类钢结构表面的挤压受损情况。

特种微结构光纤是一种在横截面具有周期性的空气孔结构的特殊光纤,空气孔具有十分灵活的分布方式,因此可调节光纤的机械参数和光学性质。早在 20 世纪 90 年代,RUSSELL 等^[13-15]发明并成功制备出第一根微结构的光子晶体光纤开始,此类特种光纤即引起许多研究学者的关注和深入探索。目前,基于微结构光纤已有多种传感器件被相继报道,并展现出优异的感知性能,包括有高温传感器^[16-17]、应变传感器^[18]、压力传感器^[19]、剪应力传感器^[20]、振动传感器^[21]、倾斜传感器^[22]、扭力传感器^[23]等测量不同物理参量的器件。同时,大部分机械结构的应用场景也需要对这些参数进行精确的测量,以保证其安全性和性能。相比于传统的单模通信用光纤,特种微结构光纤可通过对光纤的导光结构进行特殊优化,从而改变光纤的光传输性质,比如偏振态,并能打破传统单模光纤圆对称结构,进而实现不同的力学传能结构,如外界压力。因此,设计并研制新型的微结构光纤传感器,对机械结构力学测量以及大型装

备如铁路系统监测等具有十分重要应用前景。

本文将从特殊微结构光纤的设计和制备出发, 提出基于 Sagnac 光纤干涉结构, 并优化其对机械振动的测量, 以振动加速度为主要被测参量, 介绍通过高双折射率的微结构光纤实现加速度监测的方法, 并最后展示我们利用该类光纤振动传感器在铁路监测里的实际应用。

1 特种微结构光纤的设计及制备

1.1 特种微结构光纤设计

研究中, 针对钢结构振动测量的加速度传感器, 我们采用了六孔的特殊微结构光纤设计, 如图 1 所示。图 1a 所示结构为我们自研的六孔悬吊芯微结构光纤, 具有 6 个“冰淇淋”型的大空气孔, 长轴约为 $25\ \mu\text{m}$, 光纤包层直径 $125\ \mu\text{m}$, 纤芯为类椭圆结构, 尺寸约为 $8\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$ 。光纤的材料为纯熔融石英, 折射率在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长时为 1.444。光纤由于传统的芯包层圆对称结构被破坏, 变为轴对称结构。设计上, 光纤 y 轴方向的 2 个空气孔尺寸小于 x 轴方向的 4 个空气孔。在拉制过程中, 可以利用孔径的尺寸差异, 在同样外部负压下, 实现轴对称结构。同时, 纤芯结构为类椭圆形, 增加了正交偏振模式的传播常数差异, 因此具有较高的双折射, 可以支持保偏光传输。

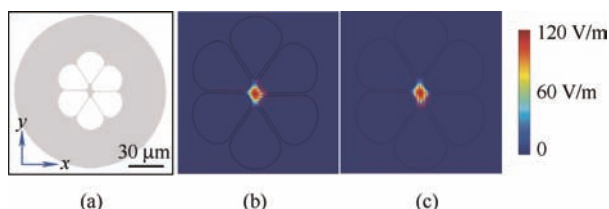


图 1 研究中用于振动加速度传感器研制的两种微结构光纤端面图

光纤的双折射由所支持的基模在两个偏振态方向上的有效折射率差所决定, 即

$$B = |n_{\text{eff},x} - n_{\text{eff},y}| \quad (1)$$

式中, B 为光纤的双折射率, $n_{\text{eff},x}$, $n_{\text{eff},y}$ 分别为基模在 x , y 两个正交方向上的有效折射率。通过对以上两种光纤进行有限元分析, 我们可以计算出光场在纤芯的具体分布。图 1b、1c 为六孔微结构光纤的电场分布, 其 x 、 y 两个方向的模式有效折射率分别为 1.435 5、1.435 7, 即双折射率为 2×10^{-4} 。光纤的双折射特性是搭建 Sagnac 干涉结构的必要条件, 因此针对不同结构的光纤, 计算其双折射值是光纤设计的重要一环。在此基础上, 进一步引入外界压力,

计算在外压环境下光纤材料由于弹光效应引起的折射率变化, 再通过有限元法求解双折率的改变, 可以获得双折率与压力的对应关系。由于单轴方向的振动主要对光纤的侧面施加和振动频率 f 一致的压力, 因此分析光纤受单轴压力的灵敏度, 可以进一步优化响应振动的最佳结构。我们在前期工作也报道了通过分析不同方向的侧向压力灵敏度, 基于商用的保偏光子晶体光纤, 优化选择加速度传感器中光纤的排布^[11]。

1.2 特种微结构光纤制备

在确定光纤空气孔结构的基础上, 我们进一步制备出所设计的特种微结构光纤。试验中, 我们采用的是应用最广的“堆叠-拉制”法^[24]。如图 2 所示, 制备上述微结构光纤之前, 需要准备不同尺寸的毛细石英玻璃管, 用于堆叠不同的空气孔结构。对于六孔悬吊芯微结构光纤, 我们将外径为 $30\ \text{mm}$, 内径为 $27\ \text{mm}$ 的石英玻璃管拉制成外径为 $1.3\ \text{mm}$ 的毛细玻璃管, 并以此在外径为 $12\ \text{mm}$, 内径为 $4\ \text{mm}$ 的玻璃管中进行堆叠, 形成预制棒, 最后利用商用的光纤拉制塔(Nextrom OFC 20-755)在 $\sim 1\ 940\ ^\circ\text{C}$ 的高温下将其拉制成光纤。在拉制的过程中, 光纤的外径控制在 $125\ \mu\text{m}$, 同时对毛细玻璃管外的空间施加负压, 实现六个毛细管可以集中坍塌形成纤芯。最后获得的微结构光纤端面的扫描电镜结果如图 2 中所示。

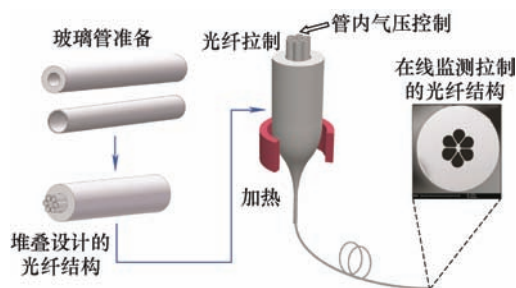


图 2 研究中制备微结构光纤的拉制工艺流程示意图

此堆叠拉制的方法, 也适用于制备其他结构类型的光纤, 包括商用的保偏型光子晶体光纤。所制备的六孔悬吊芯微结构光纤的传输损耗在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长下约为 $0.2\ \text{dB/m}$, 与普通单模光纤的熔接损耗约为 $1\ \text{dB}$, 可以满足传感器的研制要求。由于该光纤的包层为六个大空气孔, 因此, 悬吊纤芯中的光场可以被强约束, 进而具有很低的弯曲损耗。试验中我们测得其在弯曲直径为 $5\ \text{mm}$ 的情况下, 也仅引入了约 $0.1\ \text{dB}$ 的损耗。该超低弯曲损耗, 可以保证此光纤应用在空间有限或需要小弯曲盘绕的场景。

2 基于 Sagnac 结构的振动传感器

研究中,我们利用自研的六孔悬吊芯微结构光纤和商用的保偏光子晶体光纤搭建了 Sagnac 干涉仪,并以此开发用于铁路健康监测的振动加速度传感器。

图 3 给出了研究中我们基于微结构光纤搭建 Sagnac 干涉仪的结构示意图。具体是利用一个 1×2 的 3 dB 耦合器,将微结构光纤经过端面处理后熔融连接到耦合器的两个输出端口,构成一个闭合光纤环。耦合器的输入端连接到光解调仪的输出端。原理上,输入宽带光经过 3 dB 耦合器后分为两路,两路光从不同的方向进入光纤干涉环,并在微结构光纤中相向传输,最后两路相向光在耦合器汇合形成干涉。此两路光在微结构光纤中由于双折射的影响,因而会引入固定的相位差 $\delta=\delta_x-\delta_y$ 。该相位差由微结构光纤本身的双折射和长度决定,即

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} B \cdot L \quad (2)$$

式中, L 为六孔微结构光纤的长度, λ 为工作波长。因此,在 3 dB 耦合器的位置,两路光产生干涉,其对应的干涉谱可以由以下的归一化关系得到

$$T = \frac{1 - \cos \delta}{2} \quad (3)$$

试验中,我们利用制备的六孔微结构光纤搭建 Sagnac 干涉仪,由图 3 结构光解调仪获得的光谱如图 4 所示。当机械钢结构受到振动时,安装的振动传感器受振动引起微结构光纤受压,由于弹光效应^[25]引起光纤内的双折射产生同频率的周期性改变,最后反映在干涉谱的波长发生漂移。

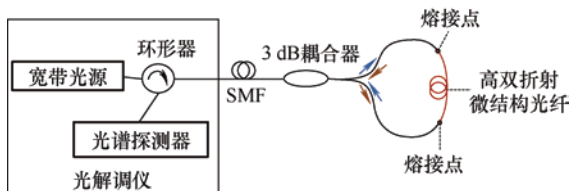


图 3 基于高双折射微结构光纤的 Sagnac 干涉仪结构示意图

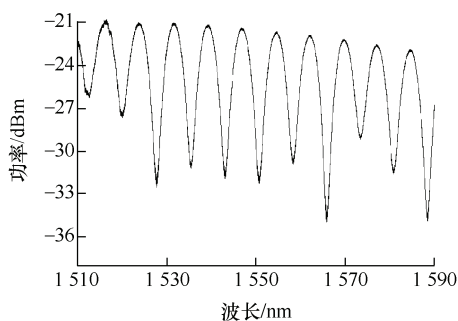


图 4 基于六孔微结构光纤的 Sagnac 干涉光谱图

图 5 给出了基于微结构光纤 Sagnac 干涉结构的振动加速度传感器封装设计图,主要包括核心底座以及挤压光纤的圆柱形质量块。微结构光纤通过逐圈盘绕的方式放置于底座与质量块之间,并通过耐高温胶固定。当传感器随着列车钢架结构振动时,微结构光纤受质量块的挤压形成周期性的侧向压力。

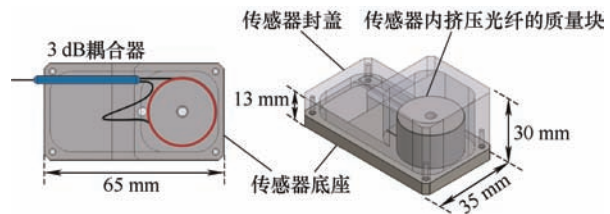


图 5 基于微结构光纤 Sagnac 干涉结构的振动加速度传感器封装设计示意图

原理上,双折射微结构光纤受到单方向的应力时,光纤材料的折射率会由于弹光效应发生改变,此时光纤中的传输模式的有效折射率随之变化,即

$$\Delta B(t) = \alpha \cdot F_m \sin(2\pi f t + \varphi_0) \quad (4)$$

式中, $\Delta B(t)$ 为微结构光纤中双折射率的变化量, F_m 为光纤受到侧向压力的最大值, f 为振动频率, t 为时间, φ_0 为初始相位值, α 为试验测定的常数。利用图 3 所示的 Sagnac 干涉结构,我们可以通过测量干涉谱中极小值位置的波长变化来得到双折射率的改变值。干涉谱中的极小值位置波长与光纤双折射率的关系为

$$\Delta \lambda(t) = \frac{\lambda}{G} \Delta B(t) \quad (5)$$

式中, λ 为选定极小值位置的初始波长; $\Delta \lambda$ 为特定压力下该极小值位置波长的变化量; G 为微结构光纤的群双折射率,与光纤的色散有关。

试验中,我们对两种微结构光纤都进行了如上传感器封装,并测试了传感器的振动响应。测试中,我们将自研的振动传感器置于振动平台上(Bruel & Kjaer: type 4808),传感器底座同时还具有商用的电学加速度传感器(Bruel & Kjaer: type 8305)用以标定实际的加速度值,并通过光解调仪(型号: MOI si155,采样频率: 5 kHz)实时测量特定波长的变化。图 6 给出了两类传感器在给定频率为 500 Hz,加速度为 10g 的振动下,所测得的波长变化信号。其中图 6a、6b 为保偏光子晶体光纤和六孔微结构光纤测得的波长变化时域信号,图 6c、6d 为其对应的快速傅里叶变换后的频域信号可以看出,两类微结构光纤的振动传感器均可以准确的测量出对应的频率的振动信号。

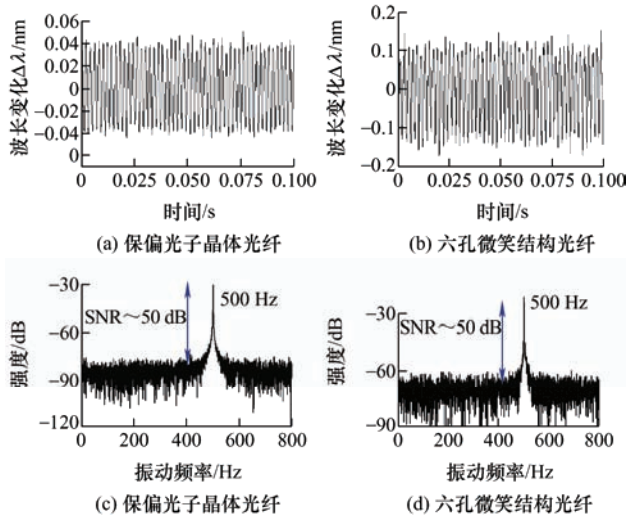


图 6 试验测得的 500 Hz 频率, 10 g 加速度下的振动信号

3 传感器标定

由上文可知, 基于 Sagnac 干涉仪结构的振动传感器可以实时的测量机械结构的振动信息。在实际应用此类传感器时, 我们还需要对其进行灵敏度的标定, 建立波长变化与实际加速度值之间的线性对应关系。试验中, 我们通过施加不同频率, 不同加速度的振动信号, 测量两种加速度传感器对应的波长变化, 获得的测试结果如图 7 所示。图 7a 为前期测得的保偏光子晶体光纤的灵敏度响应作为对比, 分别测量了频率为 20 Hz, 100~800 Hz 下的振动, 每个频率下的加速度由 0 逐渐增加到 16g, 获得的波长总变化量约为 0.13 nm, 可计算出其灵敏度为 $\sim 8 \text{ pm/g}$ ^[11]。对于六孔微结构光纤的振动传感器, 我们也做了同样的灵敏度测试, 结果如图 7b 所示。其对应的总波长变化量约为 0.4 nm, 计算出其灵敏度为 $\sim 25 \text{ pm/g}$ 。所测试的结果均具有很好的线性度, 线性拟合得到 $R^2 > 0.995$ 。由此可以看出, 通过对六孔微结构的优化, 其所获得的振动灵敏度进一步得到了提高。

此外, 我们还进一步测量了该振动传感器的灵敏度频谱响应, 通过测量频率为 0~2 500 Hz 的振动灵敏度, 所得的结果如图 7c 所示。可以看出, 随着频率的进一步增加, 振动传感器的灵敏度也随之提高, 并在高于 2 500 Hz 后, 达到最大的谐振点。由于测试仪器的频率范围有限, 所以我们没有实际得到该传感器的谐振频率位置。在铁路监测或者机械钢架结构的测量应用中, 人们更多是利用振动传感器具有平坦灵敏度的频率范围内使用, 试验测得的该新型微结构光纤振动传感器可以在 1 000 Hz 范

围内具有较为平坦的灵敏度响应, 因此足够胜任大部分的振动监测场景。

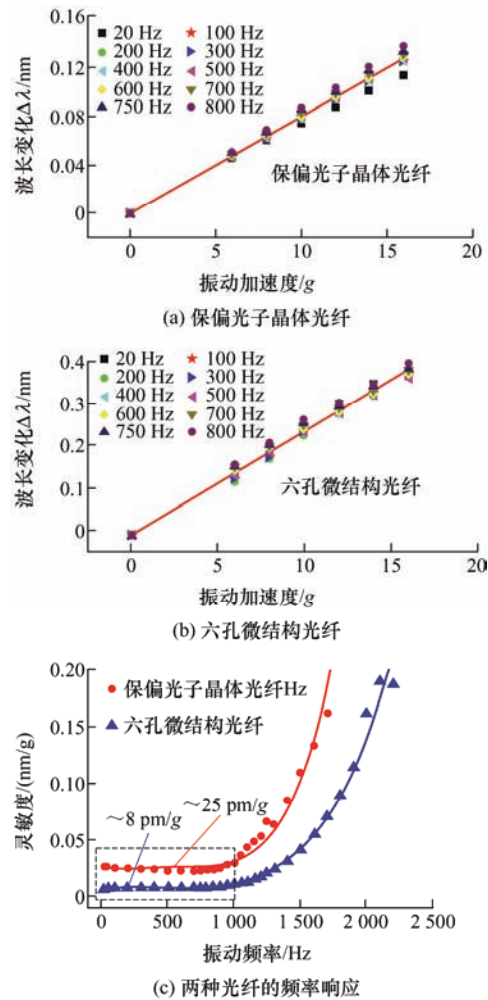


图 7 试验中测得的两种振动加速度传感器的灵敏度及频率响应

4 铁路监测应用测试

为了验证我们提出的新型微结构光纤振动传感器, 我们还开展了应用试验。研究中, 我们将自研的微结构光纤振动传感器安装于营运的铁路列车上, 通过自研的铁路健康监测系统^[26], 实时获取传感器测的振动信息。图 8 给出了我们在一辆运营中的火车车轮转向架位置安装自研振动传感器(谐振频率 $> 2.5 \text{ kHz}$)的示意图, 与此同时, 我们也安装了保偏光子晶体光纤加速度传感器, 光纤光栅型加速度传感器(谐振频率约 250 Hz)和压电型振动传感器(谐振频率 $> 24 \text{ kHz}$)作为对比。在列车运行的过程中, 通过振动传感器实时获取整段路线的振动数据。所测的实时信号, 通过车载数据采集及预处理模块进行存储并分析。

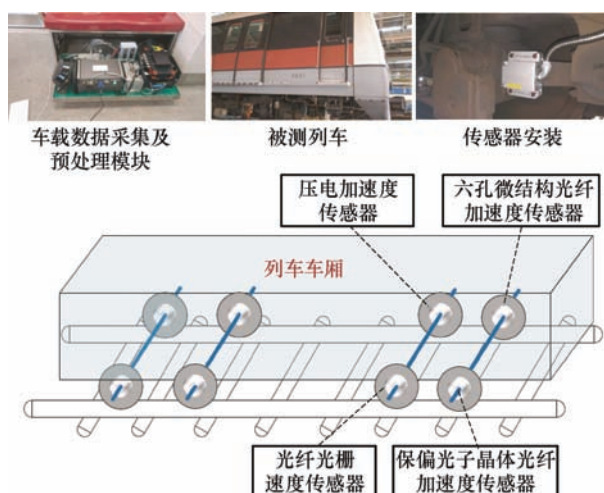


图 8 针对自研微结构光纤加速度传感器开展场地试验的安装示意图

研究中,我们针对列车运行的两个站点之间的数据进行了分析。站点 A 至站点 B 之间的距离约为 2 700 m。通过前期对微结构光纤振动传感器的标定结果,我们可以建立被测波长变化与实际加速度值之间的关系,并以此通过监测的波长获得振动加速度。图 9 给出了四类振动加速度传感器监测的两个站点之间的原始振动信号。可以看出,由于光纤光栅型的谐振频率较低,因此其测得的加速度信号具有较多的高频干扰,而另外三种传感器由于谐振频率比较高,则具有较少的高频信号,其中压电型加速度传感器为最佳,六孔微结构光纤型传感器次之。此外,在 0~500 m 的范围内,可以看出列车出现多个大幅度振动点,可能由于路轨的局部不平或缺陷导致,微结构光纤传感器和压电型传感器均较好的反映了该路段引起的列车大幅振动。而光纤光栅型由于高频噪声的干扰,此类振动信号被掩盖了。

对此,我们对图 9 中的数据进一步分析,通过对所得数据进行 250 Hz 的滤波,可以筛选出频率低于 250 Hz 的列车振动信息。图 10 给出了处理后的结果。可以看出,此时光纤光栅型振动传感器的数据仅保留了有用的低频部分,可以分析出 0~500 m 范围内的几个大幅振动,因为该类振动处于低频范围。与此同时,经过滤波后,微结构光纤型的振动传感器还进一步反映出 1 000~1 500 m, 2 000~2 500 m 之间的小幅振动,并能与压电型传感器结果匹配。通过场地试验的结果来看,我们提出的微结构光纤型振动加速度传感器均给出了可观的结果。相比之下,由于新型的振动传感器具有更宽的可工作频率范围(0~1 kHz),其还可以用于分析出路轨因

列车挤压产生的波形变和缺陷^[12],因此可以获得更广泛的应用,为铁路健康监测或具有强振动机械装备的测量提供了新的技术手段。

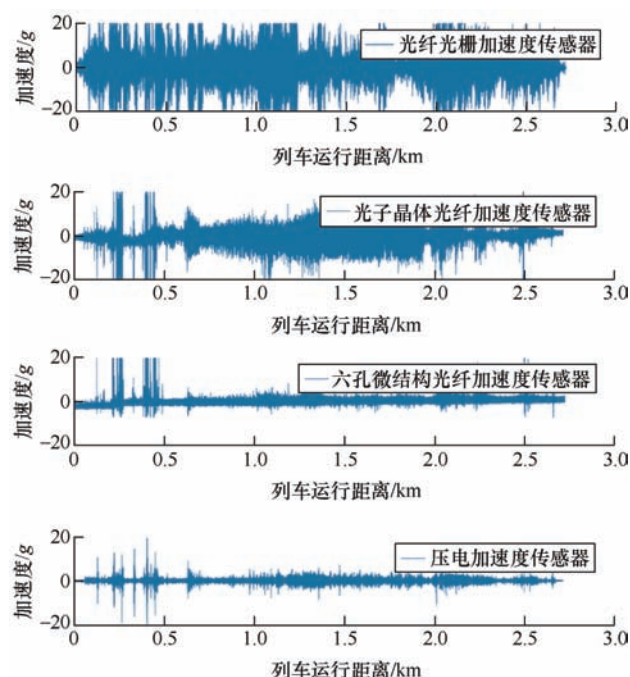


图 9 在运行列车上的振动加速度传感器实时测得的加速度结果

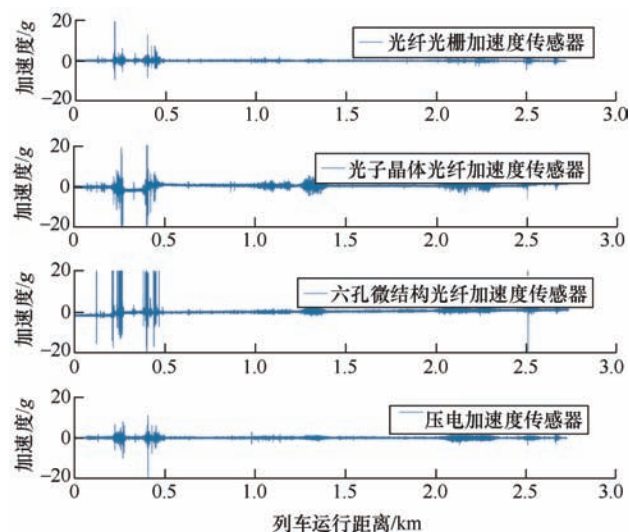


图 10 在运行列车上的振动加速度传感器实时测得的加速度通过 250 Hz 滤波后的结果

5 结论

(1) 本文通过分析特殊微结构光纤的设计制备并开发为振动传感器,提出了一种振动加速度监测的新方法,系统介绍了特种微结构光纤的设计制备工艺,以及基于 Sagnac 干涉仪结构研制振动传感器

的原理。通过对自研的微结构光纤型振动传感器的标定试验分析, 该类型的加速度灵敏度可达 25 pm/g, 并具有高于 2.5 kHz 的谐振频率, 同时其灵敏度平坦的可工作频率范围为 0~1 000 Hz, 可应用于大部分的机械振动场景, 尤其是铁路钢结构的振动监测。

(2) 特种微结构光纤的空气孔大小决定了振动传感器的灵敏度。本文分析对比了两种光纤的振动加速度传感器性能, 一种为排布均匀的商用保偏型光子晶体光纤, 具有两个直径稍大的空气孔, 形成轴对称结构; 另外一种是采用六个较大空气孔排布, 并引入椭圆纤芯, 形成轴对称结构。通过测压型的 Sagnac 干涉仪结构, 后者所获得的振动加速度灵敏度高于前者。此类光纤型振动传感器的谐振频率均获得提高, 并主要由传感器封装的结构、侧向挤压光纤的质量块重量所决定。封装结构的优化可进一步调整传感器的响应频率范围。

(3) 通过将自研的微结构光纤振动传感器应用于铁路健康监测, 开展场地试验, 所得测试结果展现出了极具前景的特性。该类传感器可以胜任较宽频率范围的振动测量, 对铁路列车引起的典型振动监测可达到传统压电型振动传感器的水平, 并优于光纤光栅型振动传感器, 在灵敏度方面也优于商用的保偏光子晶体光纤。相比之下, 光纤型的振动传感器还具有设计灵活、抗电磁干扰、多个传感器可复用、支持长远距离监测、信号传输损耗小等诸多传统电学传感器不具备的优点。因此, 此项研究成果为特殊应用场景或长远距离钢件结构的振动测量提供了新的思路和传感方案, 可推动光纤传感技术在机械工程中的应用。

参 考 文 献

- [1] JOE H E, YUN H, JO S H, et al. A review on optical fiber sensors for environmental monitoring[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018, 5(1): 173-191.
- [2] WEI C L, LAI C C, LIU S Y, et al. A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(12): 1905-1912.
- [3] YUEN K K. Novel application of a fibre optic-based train weigh-in-motion system in railway[J]. HKIE Transactions, 2014, 21(4): 272-280.
- [4] LAI C C, KAM J C P, LEUNG D C C, et al. Development of a fiber-optic sensing system for train vibration and train weight measurements in Hong Kong[J]. Journal of Sensors, 2012, 365165: 1-7.
- [5] TAM H Y, LIU S Y, HO S L, et al. Fiber bragg grating sensors for railway systems[M]. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2012.
- [6] LIU S Y, TAM H Y, LEE K K, et al. Optical fibre networks facilitate shift to predictive maintenance[J]. International Railway Journal, 2017, 57(8): 38-41.
- [7] KINET D, CAUCHETEUR C, KOUROUSSIS G, et al. Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27: 105033.
- [8] BUGGY S J, JAME S, STAINES S, et al. Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27: 055201.
- [9] WANG Xiaofeng, GUO Yongxing, XIONG Li. Hybrid fiber Bragg grating sensor for vibration and temperature monitoring of a train bearing[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(7): 070604.
- [10] ZHAO Zhihao, YU Zhihao, CHEN Ke, et al. A fiber-optic fabry-perot accelerometer based on high-speed white light interferometry demodulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(9): 1562-1567.
- [11] LIU Zhengyong, HTEIN L, GUNAWARDENA D S, et al. Novel accelerometer realized by a polarization-maintaining photonic crystal fiber for railway monitoring applications[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21597-21607.
- [12] GRASSIE S L. Rail corrugation. Characteristics, causes, and treatments[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(6): 581-596.
- [13] KNIGHT J, BIRKS T, RUSSELL P. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [14] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P S. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.
- [15] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299: 358-362.
- [16] WARREN-SMITH S C, NGUYEN L V, LANG C, et al. Temperature sensing up to 1300°C using suspended-core microstructured optical fibers[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3714-3719.
- [17] GUNAWARDENA D S, LAW O K, LIU Zhengyong, et al. Resurgent regenerated fiber Bragg gratings and thermal annealing techniques for ultra-high temperature

- sensing beyond 1400°C[J]. Optics Express, 2020, 28(7): 10595-10608.
- [18] DONG Xinyong, TAM H Y, SHUM P. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90: 151113.
- [19] FU Hongyan, TAM H Y, SHAO Liyang, et al. Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. Applied Optics, 2008, 47(15): 2835-2839.
- [20] SULEJMANI S, SONNENFELD C, GEERNAERT T, et al. Shear stress sensing with Bragg grating-based sensors in microstructured optical fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 20404-20416.
- [21] VILLATORO J, ANTONIO-LOPEZ E, ZUBIA J, et al. Interferometer based on strongly coupled multi-core optical fiber for accurate vibration sensing[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25734-25740.
- [22] HU Xiongwei, PENG Jinggang, YANG Lüyun, et al. Design and fabrication of a heterostructured cladding solid-core photonic bandgap fiber for construction of Mach-Zehnder interferometer and high sensitive curvature sensor[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7005-7012.
- [23] ZHANG Feng, LIU Shen, WANG Ying, et al. Highly sensitive torsion sensor based on directional coupling in twisted photonic crystal fiber[J]. Applied Physics Express, 2018, 11: 042501.
- [24] RUSSELL P S J. Photonic-crystal fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4729-4749.
- [25] BARLOW A J, PAYNE D N. The stress-optic effect in optical fibers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(5): 834-839.
- [26] LEE K Y, LEE K K, HO S L. Exploration of using FBG sensor for axle counter in railway engineering[J]. WSEAS Transaction System, 2004, 3(6): 2440-2447.
-
- 作者简介: 刘正勇, 男, 1987 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为特种光纤的设计制备、光纤传感技术及其应用。
E-mail: liuzhengy@mail.sysu.edu.cn
- LIN Htein, 男, 1977 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为特种光纤制备及其传感应用。
- 刘繁, 男, 1980 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为光纤传感及装备安全监测。
- 钟永康, 男, 1974 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为光纤光栅及其铁路健康监测应用。
- 谭华耀(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 首席教授, 博士研究生导师。主要研究方向为光纤传感及其应用。
E-mail: hwa-yaw.tam@polyu.edu.hk