

基于全同弱光纤 Bragg 光栅阵列的铁路轨道监测系统

张 翠^{1,2,*}, 陶 渊^{1,2}, 童杏林^{1,2}, 邓承伟¹, 何 为^{1,2}, 甘维兵¹, 王立新¹

(1. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 现有的铁路轨道监测主要采用电类传感技术, 易受电磁场、外界环境的影响, 存在着安全的隐患。因此, 采用基于全同弱光纤光栅(wFBG)阵列的铁路轨道应变在线监测技术, 用于实时监测轨道的占用情况。通过有限元模拟仿真设计出能感测铁路应变的传感器结构, 研究了传感器的封装技术。通过检测 wFBG 波长漂移得到应变信号从而实现高灵敏度应变测量。采用全同 wFBG 阵列对传感器和系统进行了实验室和现场实验研究。结果表明: 该传感结构可以实现较小的光学损耗, 并且能够保证传感器的灵敏度达到 $3.4 \text{ pm}/\mu\text{E}$, 线性度达到 0.997 82, 迟滞误差达到 0.8%。该铁路轨道在线监测系统可以满足铁路运行管理的实际需要。

关键词: 传感器; 全同弱 Bragg 光栅阵列; 铁路轨道; 应变; 分布式测量

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0622001

Monitoring system of railway track based on identity weak fiber Bragg grating array

Zhang Cui^{1,2,*}, Tao Yuan^{1,2}, Tong Xinglin^{1,2}, Deng Chengwei¹, He Wei^{1,2}, Gan Weibing¹, Wang Lixin¹

(1. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The existing monitoring technologies of railway tracks mainly use the technologies of electrical sensing. These technologies were easy to be affected by electromagnetic fields and external environments and there were potential security risks. Therefore, the on-line monitoring technology of railway track strain based on an identity weak fiber Bragg grating (wFBG) array was used to monitor the occupancy of the track in the real-time. The sensor's structure of sensing railway strain was designed by finite element simulation and the encapsulation technology of sensors was studied. The strain signal was obtained by detecting wFBG wavelength shift to achieve highly sensitive strain measurement. The identity wFBG arrays were used to verify this sensor and system in the laboratory and field experiments. The results show that the sensor structure can achieve a smaller optical loss, and can ensure that the sensitivity of the sensor reaches $3.4 \text{ pm}/\mu\text{E}$, the linearity reaches 0.997 82, and the hysteresis error reaches 0.8%. The online monitoring system of railway track can meet the actual needs of railway operation and management.

Key words: sensors; identity weak Bragg grating array; railway track; strain; distributed measurement

收稿日期: 2019-01-05; 修订日期: 2019-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61575148); 国家高技术研究发展计划(2015AA043505); 湖北省技术创新专项(2017ACA167)

作者简介: 张翠(1969-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: zc@whut.edu.cn

0 引言

传统的轨道监测技术,例如用于监测轨道占用情况的轨道电路和铜缆、测量列车运行状态的框架式测试床、基于轨道电路方式的驼峰测长技术、电磁计轴技术、雷达测速技术等的特点都是基于电子技术实现的,因此在采用这些技术或设备时容易受到电磁场、外界环境及天气的干扰^[1-3]。而光纤光栅传感技术具有抗环境干扰能力强、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高温、精度高、灵敏度高、响应速度快等诸多优点^[4],能够对应变、振动、温度等多种参量实现高精度光学测量,随着应用的逐步推广,现有技术暴露出诸多不足之处。在长距离分布式传感领域,传统波分复用技术存在传感容量不足、传感器复用容量低、信噪比低等缺陷,无法满足监测铁路轨道占用情况所需的长距离分布式测量等要求。

新型的光纤传感网络已成为传感技术的研究热点,也是当前实际工程应用的迫切需求。近年来,刚刚兴起的基于时分复用^[5-7]的全同低反射率光纤 Bragg 光栅(wFBG)传感技术以其高复用、高精度的优势在分布式光纤传感系统中得到快速的发展。但是,由于 wFBG 反射率极低,光纤链路中的宏弯损耗、微弯损耗、融接损耗以及安装带来的各种损耗如果不加以处理会严重影响其在长距离传感中的应用^[8-9]。实际工程应用中如何能最大限度地降低其光路中的光学损耗是 wFBG 传感器能否真正实现光学测量的关键因素。文中设计了一种低光学损耗的基于全同 wFBG 阵列的分布式应变传感系统。将全同 wFBG 阵列的分布式应变传感器固定在轨道一侧进行光学损耗实验和

灵敏度实验,以验证该系统的可行性,并对该系统进行现场行车试验,对实验结果进行分析与讨论。

1 全同弱光栅传感测量原理

低反射率光纤 Bragg 光栅(wFBG)是一种弱反射型光栅,只对特定中心波长的窄带光波具有反射作用,其他的光波则可以完全透过光栅继续向后传播,起到波长选择的作用,相当于一个带通滤波器,wFBG 折射率的调制强度很小,峰值的反射率低于 1%,并且 3 dB 反射带宽很窄。因此具有高的灵敏度并且保证了光信号通过每个传感器后都有足够强的光信号继续传播,从而提高传感器的复用能力^[10],wFBG 传感原理如图 1 所示。由耦合模理论可知,wFBG 反射光的中心波长与光栅周期和纤芯的有效折射率遵循如下关系:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率; Λ 为空间相位光栅周期; λ_B 称为光纤光栅 Bragg 波长。光纤纤芯的有效折射率、空间相位光栅周期等特征参数都会随着外部施加的温度、应力等物理量的变化而发生变化,从而导致其 Bragg 波长发生漂移,通过检测 Bragg 波长的漂移量可以测量引起波长变化的各种物理量,这就是光纤光栅应用于传感检测的基本原理。对公式(1)求微分可得:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

从上式可以看出 Bragg 波长的漂移量取决于光栅周期变化量 $\Delta\Lambda$ 和光纤纤芯有效折射率变化量 Δn_{eff} ,而它们都会受到外界温度和应变的影响,并且一切能够转化为温度及应变的物理量都可以影响光

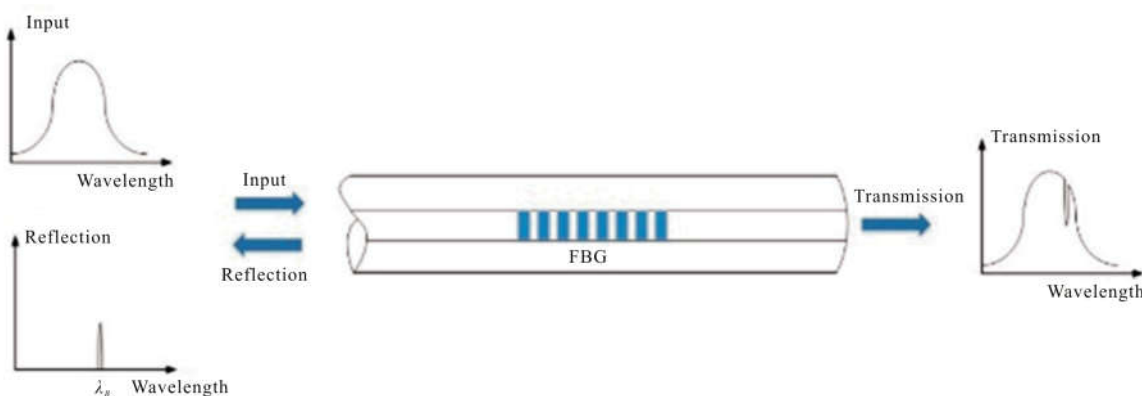


图 1 FBG 传感原理

Fig.1 Theory of FBG sensing

栅的波长。因此,在实际测量中可以通过解调出光栅的波长变化量 $\Delta\lambda_B$,从而计算出待测的物理量^[11-12]。波长的漂移量与温度、应变的关系式为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_e)\varepsilon + (\alpha + \zeta_f)\Delta T \quad (3)$$

式中: P_e 为光纤的弹光系数; α 为光纤的热光系数; ζ_f 是光纤的热膨胀系数; ε 为应变变量; ΔT 为温度变化量,对于应变的测量,假如温度不变,波长的漂移量为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_e)\varepsilon \quad (4)$$

对于掺锗石英光纤, $P_e=0.22$,则光纤光栅弹光效应单位应变引起的波长漂移为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\varepsilon} = 0.78\lambda_B \quad (5)$$

对于中心波长为 1 550 nm 的光栅,单位应变引起的波长漂移为 1.209 pm/ $\mu\varepsilon$ 。对于轨道占用监测系统,希望将轨道的变形毫无损耗地传递到传感器,通过传感器波长的变化量,采用占用判别算法实时在线对轨道状态进行监测。

时分复用技术采用串联拓扑结构,在同一根光纤上任意两个相邻 wFBG 传感器反射回来的光信号在时域上存在时间间隔,因此,可以有效地避免光源带宽和待测物理量动态范围的限制,从而在同一根光纤上可以复用多个 FBG 传感器^[13-15]。

2 传感器的设计

2.1 轨道应变的有限元分析

全同 wFBG 阵列分布式应变传感器将轨道受力导致的变形通过特制夹具传递给预先张拉之后的光纤光栅传感单元,从而改变光栅处的张力,使 Bragg 波长产生漂移。枕木之间的轨道各点对于同样的压力所受变形并不相同,实际应用中需要将传感器尽量布置在轨道变形最大处以提高系统的灵敏度。为了确定轨道的形变以及应变的分布情况,文中用 SolidWorks 进行建模,然后用 ANSYS-workbench 进行受力仿真,设置材料参数,轨道的材料为结构钢,其密度为 $7.85 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$,杨氏模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比为 0.3,设置网格划分为体划分的默认模式,如图 2 所示。然后设置固定方式为边界固定;静态结构模型的外力为垂直于车轮与轨道接触面 20 MPa 的均布力,分别分析列车与轨道的接触面在轨枕中

间、轨枕附近和轨枕上方时的形变特征,结果如图 3~5 所示。

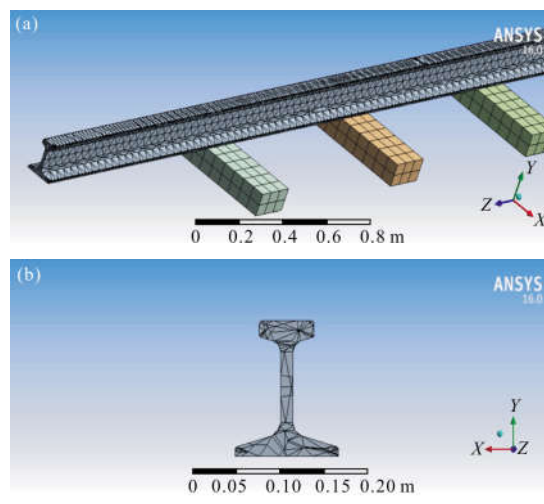


图 2 3D 和 2D 的轨道网格模型

Fig.2 3D and 2D grid model of track

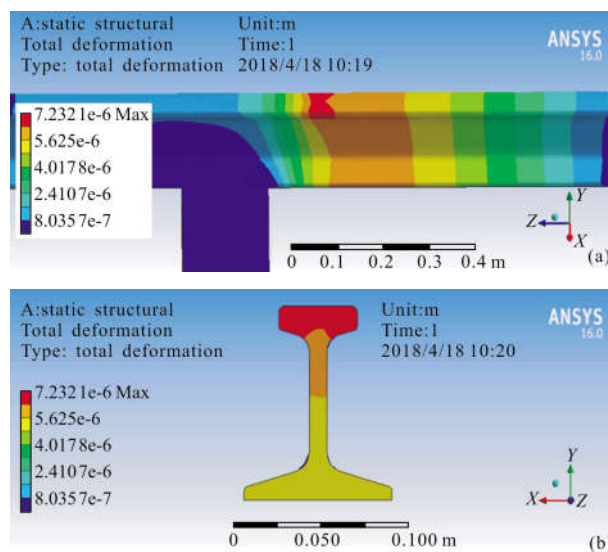
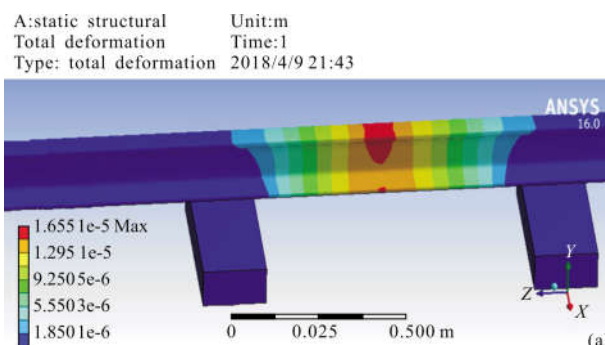


图 3 轨枕中间部分的 3D 和 2D 轨道形变云图

Fig.3 3D and 2D orbital deformation cloud image of middle part of sleeper



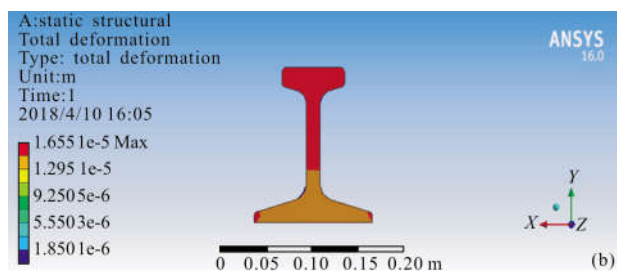


图 4 轨枕附近部分的 3D 和 2D 轨道形变云图

Fig.4 3D and 2D orbital deformation cloud image of adjacent part of sleeper

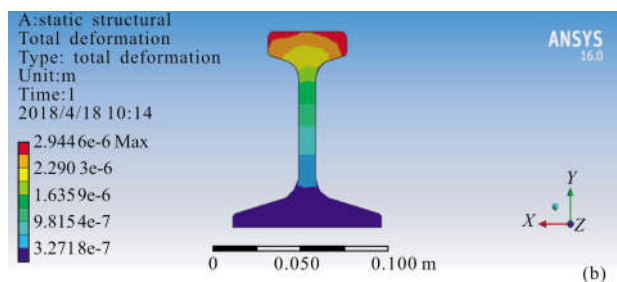
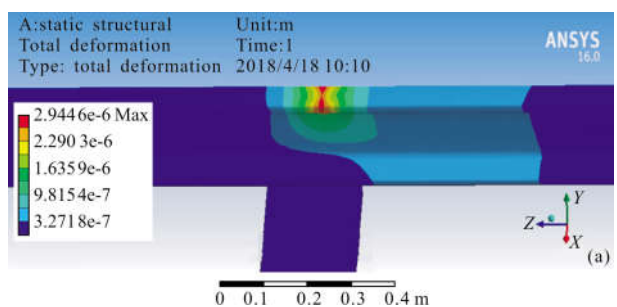


图 5 轨枕上方部分的 3D 和 2D 轨道形变云图

Fig.5 3D and 2D orbital deformation cloud image of upper part of sleeper

从以上有限元分析可知,在加载过程中,从轨枕上方到轨枕中间轨道变形逐渐增大。当力加载在两轨枕中间部分时轨道形变最大,受力范围也最大,而将力加载在轨枕上方时轨道变形最小,只在轨头部分有应力,轨道的最大形变处在轨头及轨腰部分。所以传感单元安装在两枕木之间靠近轨腰及轨头的部分可以实现最大的应变灵敏度。

2.2 传感器的设计与制备

由于轨道监测的特殊性,只能采用夹具安装传感光缆。在每个光栅的两端,为了减小夹具带来的光学损耗,设计了一种基于铁环的封装结构(总长 60 mm,内径 5 mm,外径 8 mm,中间切割部分 30 mm)。铁环的中间部分纵向切割 1/3(见图 6(a)),保证封装后光纤在槽内部不裸露而受到夹具的夹力。封装时首先

准备两对不同直径的热收缩管,将铁环和热收缩管套在光纤上。然后加热小直径热收缩管并插入到铁环的孔中,再加大大直径的热收缩管并套在铁环上。最后将大直径的热收缩管与小直径的热收缩管同时加热固定在铁环上。这样,铁环的尖锐部分被热收缩管封装,这可以防止光纤被损坏或割断。在确定封装结构的位置之后,将高性能结构环氧 AB 胶(产自美国)涂覆在铁环的中间并将光纤固定在管壁内。AB 胶的涂敷高度要低于三分之二的铁环直径。为使 AB 胶充分固话并保证封装效果,封装好的结构需放置 24 h 后再做实验。铁环的封装结构如图 6(b)所示。

这样的铁环封装结构有四个优点:首先,夹具夹在铁环的长槽上,使得 wFBG 阵列传感光缆可以很容易的用夹具固定在轨道的侧面而不至于滑动。其次,微调两个夹具之间的距离可以拉直光纤,给光栅施加预张力,提高传感器抗外界干扰能力与灵敏度。第三,可以避免光纤受到铁环尖锐部分的损坏。第四,夹具加持在铁环上,不与传感光纤接触,最大限度地减少了传输光路的光学损耗。

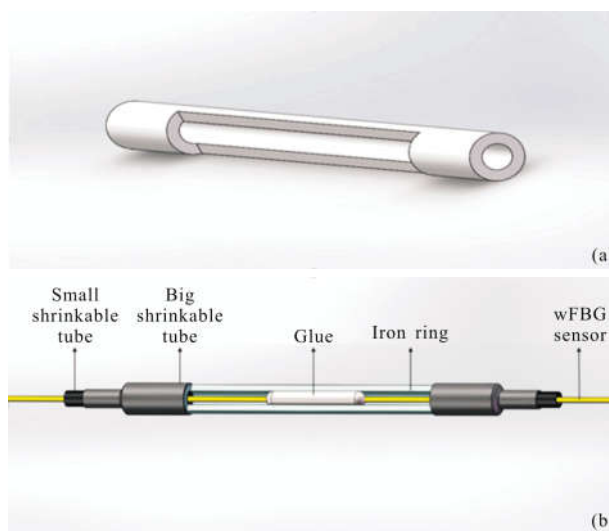


图 6 (a)铁环,(b)铁环封装结构

Fig.6 (a) Iron-ring, (b) the encapsulation structure of iron-ring

3 传感器及系统的性能研究

3.1 传感系统的搭建

文中基于时分复用技术,通过检测 wFBG 阵列中每个光栅的波长值,设计了一种基于全同 wFBG 阵列的分布式应变传感系统。全同弱反射 Bragg 光纤光栅阵列作为该系统的传感单元,中心波长、带宽

和反射率等光学参数均基本相同,系统的原理图如图 7 所示,信号解调单元发出的光进入全同弱光栅阵列,带有时域信息的光栅阵列反射再进入信号解调单元,信号解调单元将不同时刻反射回的光信号进行波长解调,通过标定得到与实际物理位置对应的应变信息。上位机系统根据每个位置的应变变化智能判断当前轨道的占用状态。全同弱光栅阵列通过特制的光栅夹具被固定在轨道一侧,并根据监测需要,通过应变传感单元自行定制应变传感点,实现对整条光纤链路的分布式应变监测。

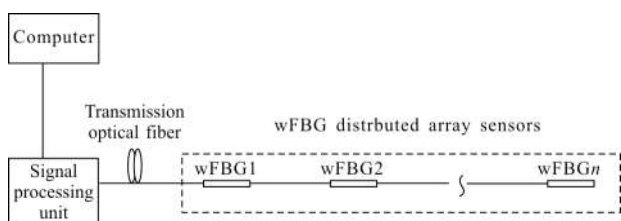


图 7 系统原理图

Fig.7 Theory diagram of system

3.2 传感系统的损耗特性研究

采用光栅个数为 14、封装结构为 28 个,相邻光栅间隔为 3 m 的全同弱光纤光栅阵列对该系统进行光学损耗实验,将封装结构处全部夹上夹具,消除光纤端面反射后,将光纤的另一端连接到解调仪上,未夹持夹具时测得光强、夹持全部夹具测得光强和 5 天之后测得光强的对比如图 8 所示。

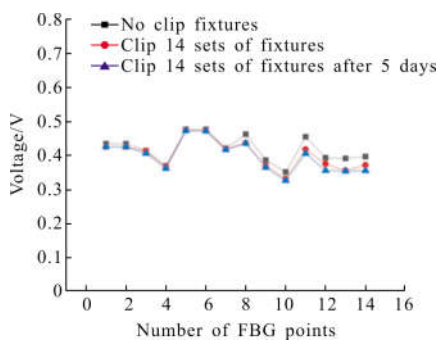


图 8 光学损耗对比图

Fig.8 Comparative diagram of optical loss

通过对实验数据分析可以得出,未夹持夹具所测得光强与夹持 14 组夹具所测得光强基本不变,铁环封装结构使 wFBG 传感光路的光学损耗很小,相比未夹持夹具所测得光强,最大光强损耗比仅为 0.081。并且保持夹具夹紧状态 5 天后,该 wFBG 传

感光路的光学损耗仍然很小,相比于 5 天前所测得光强值,最大光强损耗比仅为 0.051。所以铁环封装结构可以实现很小的光学损耗,并且这种铁环封装结构具有良好的稳定性。

3.3 传感器的灵敏度及线性度

为了研究采用该封装结构之后 wFBG 传感器的应变灵敏度是否符合工程应用,设计了灵敏度实验:为避免过多的外界因素(行车、人为等)对传感器的影响,并且能使传感器更大的感受轨道的形变,将全同 wFBG 阵列的分布式应变传感器布置在轨道一侧两枕木之间的轨头与轨腰的中间部分,如图 9 所示。



图 9 传感器布置图

Fig.9 Layout drawing of sensor

用夹具将第 9 个光栅点拉直固定在轨道侧面,然后在轨道上面放置千斤顶,通过千斤顶对轨道施压,在实验过程中对轨道在 0~15 MPa 内进行往复加载与卸载,每隔 2.5 MPa 记录一次返回的波长值,加载、卸载 10 次后的数据取算术平均值,然后根据轨道的弹性模量 $E=2e11 Pa$,将压强转化为微应变,其公式如下:

$$\mu\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \times 10^6 \quad (6)$$

最后将数据经过处理后,其灵敏度如图 10 所示。

根据下文可知,加载时,wFBG 传感器的线性度为 0.997 22,灵敏度为:3.4 pm/ $\mu\varepsilon$ 。卸载时,wFBG 传感器的线性度为 0.997 82,灵敏度为:3.4 pm/ $\mu\varepsilon$ 。加载和卸载的线性度和灵敏度均较高,且与理论上的应变灵敏度 1.209 pm/ $\mu\varepsilon$ 相比较,该传感器的灵敏度更高。由于夹具通过对封装结构的夹持,给予光栅预张力,轨道受力变形改变了光栅点两侧夹具的相对间距,夹具夹持的封装结构距离光栅点的两侧,形成了作用于光栅点的力臂,增大了作用于光栅点的微应变,所以该传感器封装结构以及夹具的夹持方式对该传感器具有良好增敏效果。

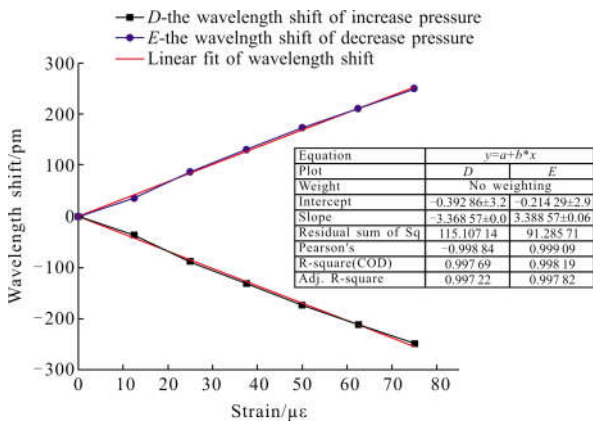


图 10 wFBG 传感器灵敏度

Fig.10 Sensitivity of wFBG sensor

3.4 传感器的重复性及误差分析

重复性及其误差分析是对传感器特性研究的一项重要指标,为了验证该传感器具有良好的重复性,设计了重复性实验,其实验过程与灵敏度实验相同,将灵敏度实验中的数据进行误差分析,其重复性如图 11 所示。

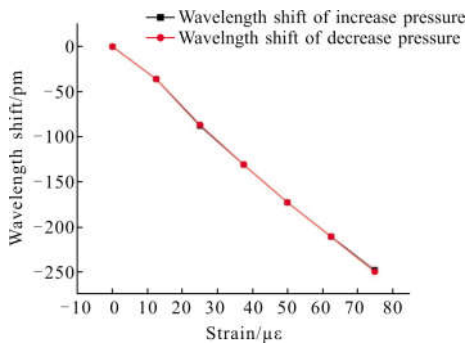


图 11 wFBG 传感器的重复性

Fig.11 Repeatability of wFBG sensors

图 11 中黑色折线为加载时测得的 Bragg 波长漂移值,红色折线为卸载时测得的 Bragg 波长漂移值,通过对轨道加载与卸载之后,对 Bragg 波长漂移值进行对比,重复性最大相差为 2 pm,根据迟滞误差计算公式:

$$\zeta_H = \frac{|\Delta\lambda_H|_{\max}}{|P_{\max} - P_{\min}|} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $(\Delta\lambda_H)_{\max}$ 为正反行程的最大差值; P_{\max} 为最大行程值; P_{\min} 为最小行程值,代入数据计算得到迟滞误差 ζ_H 为 0.8%,则误差对该系统的影响可以忽略不

计。以上实验分析说明该传感器具备较好的工程应用可行性。

4 传感器的现场试验研究与结果分析

采用光栅个数为 35、相邻光栅间隔为 3 m 的全同弱光纤光栅阵列对该系统进行验证,将已封装的全同弱光纤光栅阵列传感器固定在轨道一侧,然后在轨道上面行车,该平板车参数为自重 19.7 t,4 轴 8 轮,可载 60 t,最外边的两轴轴距 11.1 m,前后两对轴的轴距 2 m,中间相隔 7 m,车长 13 m,行车速度为 0.4 m/s。由于在轨道鱼尾板处无法夹持夹具,所以该处的光栅点未经张拉。在该系统中有效张拉的传感器 23 个,由于车前后两对轮间隔 7 m,根据轮间距与传感器布置间距差,当前一对轮驶出第 i 个传感器检测范围,进入第 $i+1$ 传感器检测范围时,后一对轮驶出第 $i-2$ 个传感器检测范围,进入第 $i-1$ 个传感器检测范围,所以列车行车时,应共有 4 个传感器响应,且前后两个传感器的响应比中间两个传感器的响应大,而行车到轨道的鱼尾板处时,应有 1~2 个传感器响应。当列车通过第 i 个传感器时,传感器会响应四次,根据平板车的参数可以算出理论上第一次响应与第四次响应时间间隔为 27.75 ± 2 s。列车行车时第一个传感器的波长漂移和全部传感器的波长漂移情况分别如图 12、13 所示。

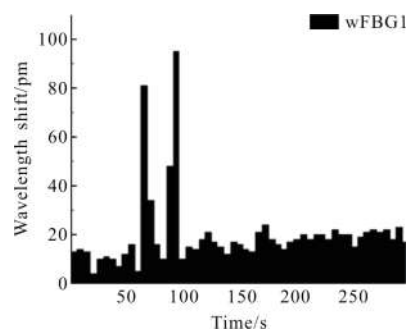


图 12 第一个传感器的波长漂移图

Fig.12 Wavelength shift graph of the first sensor

由实验数据分析可知,传感系统能在 1s 内迅速响应,列车驶出传感器检测范围后 1s 内迅速恢复到原始状态,且能够进行重复检测,该传感器的灵敏度及重复性较好。以上实验分析说明该系统具备较好的工程应用可行性。

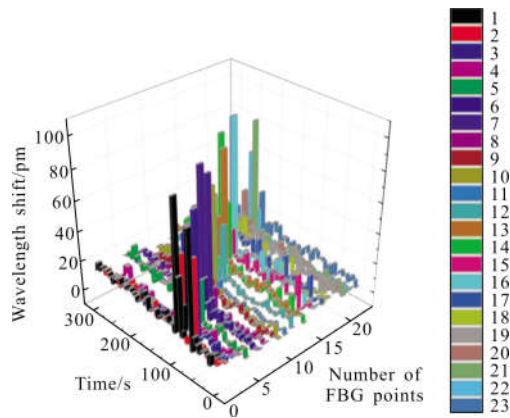


图 13 全部传感器的波长漂移图

Fig.13 Wavelength shift graph of all sensor

5 结论

基于时分复用技术,提出了一种基于轨道监测应用的全同弱光纤光栅阵列的分布式传感系统。基于有限元受力分析,确定了轨道最大形变位置即传感器安装位置,设计了一种超低损耗的传感器封装结构,可以方便光缆的安装与拆卸。采用光栅间隔为 3 m 的全同 wFBG 阵列对该传感器和系统进行了验证。实验结果表明,该封装结构在保证传感器的灵敏度及重复性等重要性能的情况下,能够有效避免传感器的光路损耗,系统的灵敏度为 $3.4 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度为 0.997 82,迟滞性误差仅为 0.8%,根据与理论上的应变灵敏度 $1.209 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 相比较,该传感器结构具有增敏功能,且重复性较好,验证了该系统具有较好的工程应用可行性。

参考文献:

[1] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2014, 26(20): 2055–2057.

[2] Kepak S, Cubik J, Zavodny P, et al. Fibre optic track vibration monitoring system [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2016, 48(7): 1–10.

[3] Minardo A, Coscetta A, Porcaro G, et al. Structural health monitoring in the railway field by fiber-optic sensors [J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2015, 319: 359–363.

[4] Ecke W, Latka I, Willsch R, et al. Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring [J]. *Measurement Science & Technology*, 2001, 12(7): 974–980.

[5] Anjum N, Sreekanth P C, Nayak J. Fiber optic sensors and optical sensing technology [C]//International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques IEEE, 2016: 3884–3891.

[6] Ou Y, Zhou C, Qian L, et al. A Large WDM FBG sensor network based on frequency-shifted interferometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(6): 535–538.

[7] Ma L, Ma C, Wang Y, et al. High-speed quasi-distributed strain sensing based on time division multiplexing of fibre Bragg gratings [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52 (8): 643–645.

[8] Zhang Wei, Ma Pengge, Wang Jinfeng, et al. Study on lateral force of Bragg grating under infrared spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1841–1844. (in Chinese)

[9] Zhang Faxiang, Lv Jingsheng, Jiang Shaodong, et al. High-sensitivity anti-impact fiber grating micro-vibration sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822002. (in Chinese)

[10] Zhang M, Sun Q, Wang Z, et al. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(13–14): 3082–3087.

[11] Ren L, Jia Z G, Li H N, et al. Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(1): 15–23.

[12] Kisala P, Cieszczyk S. Method of simultaneous measurement of two direction force and temperature using FBG sensor head [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2677–2687.

[13] Wang C, Jiang S, Sun Z, et al. Dynamic fiber Bragg grating sensor array with increased wavelength-division multiplexing density and low crosstalk [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56 (3): 037101.

[14] Elgaud M M, Zan M S D, Abushagur A G, et al. Analysis and simulation of time domain multiplexed (TDM) fiber Bragg sensing array using opti system and OptiGrating [C]//International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering, IEEE, 2017:301–304.

[15] Gao Y S. Time-and wavelength-division multiplex distributed sensing interrogation system based on distributed feedback laser array and ultraweak fiber Bragg grating [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 1–8.