光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.022

基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法研究

甘维兵[1*]，艾凌云[2]，涂世宇[2]，柳　苗[2]，姜　茹[2]

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

摘　要： 针对现有驼峰溜放监测技术易受电磁干扰和外界环境影响，且很难实现大容量、高密集测量的不足，提出一种基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法。首先，采用反射率仅为0.2‰的弱光栅阵列及混合复用组网技术解决了大容量、高密集检测的难题；其次，结合有限元模型和轮轨耦合理论对轨道受力情况、传感器灵敏度进行推导分析；最后，将封装好的光栅阵列传感光纤安装在试验现场，并进行了压道实验。结果表明，该方法能够准确识别溜放车组的轮轴信息、行车方向以及轨道占用信息。系统可靠性高、灵敏度较高，为轨道占用检查技术提供了新的思路。

关键词： 光栅阵列；混合复用；轮轨耦合；应变传感；轨道占用；轮轴计数

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0566－06

Research on New Method of Track Occupancy Detection Based on Strain Sensing of Weak Fiber Bragg Grating Array

GAN Weibing[1]，AI Lingyun[2]，TU Shiyu[2]，LIU Miao[2]，JIANG Ru[2]

（1. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology；
2. School of Information Engineering，Wuhan University of Technology，Wuhan 430070，CHN）

Abstract： In view of the fact that the current monitoring technology of track occupancy detection is easy to be influenced by electromagnetic interference and external environment，and it is difficult to realize large capacity and high density measurement，a new method based on strain sensing of weak fiber grating array is proposed. Firstly，the weak fiber grating array with reflectivity of 0.2‰ and the hybrid multiplexing technology are used to solve the problem of large capacity and high density detection. Secondly，based on the finite element model and wheel-rail coupling theory，this paper deduces and analyzes the force on the track and the sensitivity of the sensor. Finally，the packaged fiber grating array is installed on the test site，and the track load experiment is carried out. The experimental results show that the system can accurately identify the axle information，running direction and track occupation information. The system has good reliability and high sensitivity，which provides a new idea for track occupation inspection technology.

Key words： fiber grating array；hybrid multiplexing；wheel-rail coupling；strain sensing；track occupation；axle counting

0　引言

轨道交通是我国国民经济大动脉、关键基础设施和重大民生工程，是综合交通运输体系的骨干和主要交通方式之一，在国民经济发展中的地位和作用至关重要。铁路编组站作为货运列车到达、解体和重新编组出发的“工厂”，其安全高效的编组操作直接关系到铁路运输效率，关乎国民经济大提速。

收稿日期：2020－02－18.
基金项目：国家自然科学基金项目(61875155，61735013).
* **通信作者：**甘维兵
E-mail： ganweibing@whut.edu.cn

驼峰溜放作为编组站作业最为关键的一环，其溜放过程的安全监测至关重要[1]。溜放过程中经常遇到途停、超速连挂、追钩撞车等安全问题，解决此问题的关键就是要实时监测列车的位置信息，并对轨道占用状态进行智能判断[2]。目前，轨道电路是应用最为广泛的一种检查设备，已成为一种较为成熟的轨道闭塞技术装备，在世界各国得到广泛应用。但是，轨道电路的智能化程度较低，易受电磁场和恶劣环境影响，从而造成“红光带”故障[3]。图像识别技术被广泛应用于驼峰溜放监测中，摄像机以一定时间间隔对溜放车组进行拍摄，通过图像处理与模式识别对溜放车组的特征和运行趋势进行判断[4-5]。然而，该技术对拍摄质量要求较高，存在检测盲区，且在夜间、暴雨、浓雾等极端天气下图像识别精度会大大降低[6-7]。全球定位系统(GPS)定位技术也被尝试应用于驼峰溜放监测，但其定位精度有限，达不到编组站调车机的定位要求。有研究者提出采用差分 GPS 技术来提高定位精度，从而达到溜放准确检测的目的，但该方法不能识别轮轴信息，且无法获取溜放车组的荷载信息[8]。

光纤光栅(FBG)传感技术具有测量精度高、可靠性好、易实现分布式组网、不受电磁干扰等优点，近十年来已在智能轨道交通安全监测等领域得到了广泛应用[9]。但传统的光栅传感器是点式准分布传感，无法同时满足长距离、大容量和高密集检测，而编组站驼峰溜放检测恰好需要这种长距离、高密集的检测技术[10]。针对上述需求，本文拟采用弱光栅阵列技术解决光栅传感无法实现长距离、高密集检测的科学难题，通过应力应变传感的方式准确获取溜放车组的轮轴、车速及轨道占用信息，并实现对溜放车组的精准定位。

1　传感原理及大规模组网

1.1　弱光栅传感原理

和传统光栅传感原理一样，弱光栅也是一种滤波器，只对特定中心波长的窄带光具有反射作用[11]。由于其峰值反射率仅为 0.2‰，且 3 dB 反射带宽很窄，因而具有灵敏度高、复用能力强等特点。由耦合模理论可知，弱光栅反射光的中心波长与光栅周期、纤芯有效折射率遵循如下关系：

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \tag{1}$$

式中，n_{eff} 为纤芯有效折射率，Λ 为光栅周期，λ_B 为弱光栅反射光中心波长。光纤纤芯有效折射率、光栅周期等特征参数都会随着外界温度、应变等物理量的变化而发生变化，从而导致光栅中心波长发生偏移，通过检测其偏移量即可获得被测物理量如温度、应变等变化情况，弱光栅传感原理如图 1 所示。

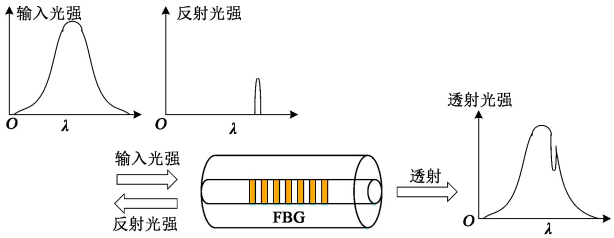


图 1　弱光栅传感原理示意图

由传感原理可知，光纤光栅中心波长偏移量与温度、应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon \tag{2}$$

式中，α_f 为光纤的膨胀系数，ξ 为光纤的热光系数，P_e 为光纤的弹光系数。假设温度变化 ΔT 为 0，即不考虑温度影响时，轴向应变对光栅波长漂移产生的总影响为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon \tag{3}$$

对于掺锗石英光纤，$P_e = 0.22$，则光纤光栅单位轴向应变引起的波长漂移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\varepsilon} = 0.78\lambda_B \tag{4}$$

对于中心波长为 1 550 nm 的光栅，单位应变引起的中心波长漂移为 1.2 pm/με。可以看出，FBG 波长变化与其所受应力应变有着良好的线性关系，可通过检测 FBG 中心波长变化来推导轨道应力的应变情况。

1.2　弱光栅阵列组网

光纤光栅可采用波分、时分、空分复用技术实现分布式传感或构建传感网络。单一的复用技术已无法满足大规模组网需求，如基于波分复用(WDM)的分布式传感系统，受光源带宽的限制，单一通道最多只能复用 30 只传感器；空分复用(SDM)串扰低，但测量点数少，利用率较低；时分复用(TDM)适合分布式测量，但传感参量有限[12]。本文首次提出了一种基于超低反射率光栅阵列技术的时分和波分复用传感器网络，在时域和波长域二维空间进行寻址，很好地解决了光纤传感大规模组网的难题，其架构如图 2 所示。

传统光纤光栅传感网络存在焊点多、损耗大、抗

拉强度低等缺点。相比之下，弱光栅阵列传感网络具有独特的优势和特点：无节点损耗，一致性好，抗拉强度高，容量大，单根光纤可以复用成千上万只传感节点；可以同时对温度、应变、位移和震动等多个参量进行测量，工业拉丝塔制备的光栅阵列最小间隔可以达到 10 cm[13]。综上所述，弱光栅阵列技术能够很好地满足编组场驼峰溜放监测对大容量、长距离、高密集检测的工程需求。

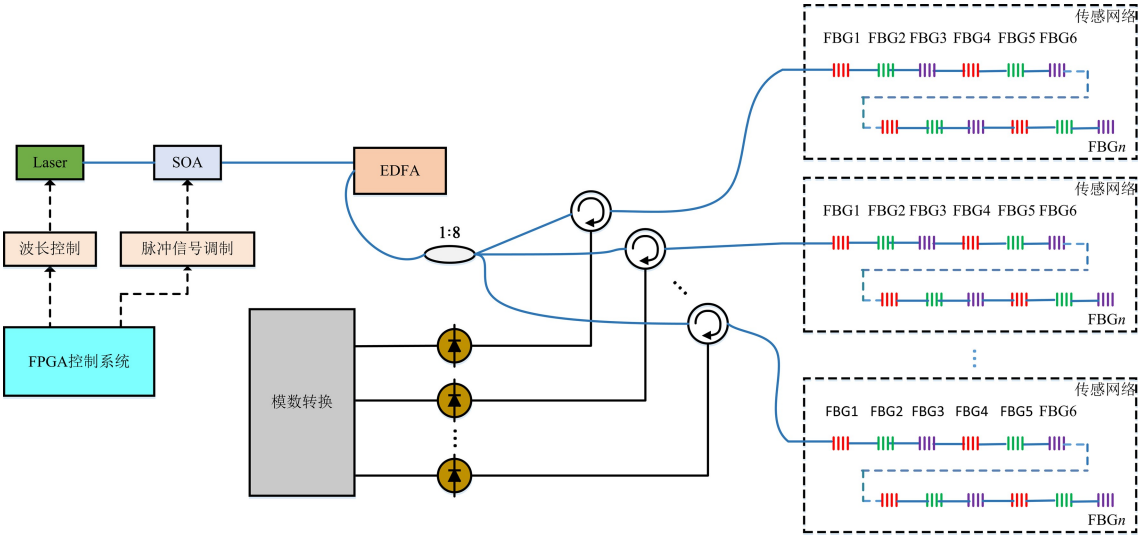
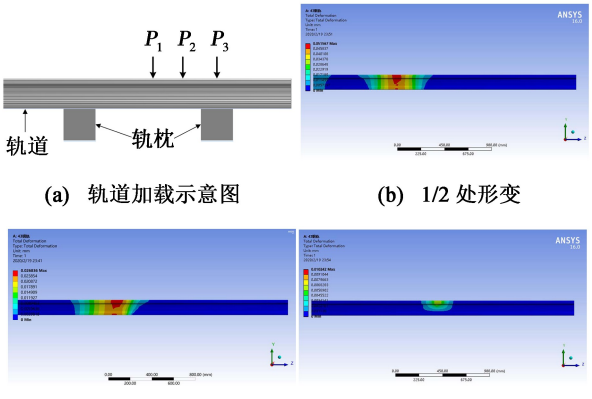


图 2 基于波分和时分混合复用的传感网络

2 传感器受力分析

2.1 轨道受力分析

为了确定轨道形变与应变的分布情况，利用 ANSYS 建立有限元模型对轨道受力特性进行分析，模拟轴重为 2.25 t 的溜放车组作用在 45 kg/m 的有砟钢轨上，其中枕木之间的标准间距为 60 cm。当车轮分别停留在两枕木的 P_1 点(1/2 处)、P_2 点(1/4 处)和 P_3 点(枕木正上方)时，轨道的形变情况如图 3 所示。



(a) 轨道加载示意图 (b) 1/2 处形变

(c)1/4 处形变 (d) 枕木正上方形变

图 3 轨道的形变情况

通过对枕木之间不同位置加载后的轨道应变集中程度进行分析，可以得出：当车轮运行至两枕木正中间(1/2 处)时，轨道形变最大，并且远远超过其他两种情况。

2.2 传感器灵敏度分析

考虑到轨道受力与应变传递率的问题，选择 304 不锈钢夹具与钢轨进行刚性连接，其中夹具底部固定在轨道的下边沿，顶部用于紧固、张拉光纤光栅传感器。当两枕木正中间受到车轮载荷(2.25 t)作用时，即在轨道形变最大的情况下，用于固定光纤光栅传感器两端的刚性夹具会随着轨道的形变而发生微小倾斜，如图 4 所示。

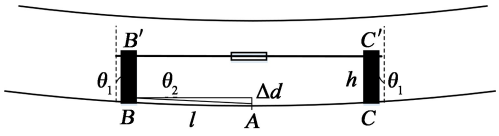


图 4 轨道受力等效图

由于夹具底部 B，C 两点相对固定且对称，因而夹具 BB' 和 CC' 均会产生相同的倾斜角 θ_1；若点 A 为 BC 中点，则钢轨 AB 与 AC 段会因形变产生相等的弯曲角 θ_2，此时固定在两夹具之间的光纤长度将从 BC 缩短为 $B'C'$。倾斜角 θ_2 可通过 AB 两点的形变差来求得：

$$\tan\theta_2 = \frac{\Delta d}{l} \tag{5}$$

式中，l 为 AB 的长度，Δd 为 A，B 两点垂直方向的形变差。已知 BC 的长度为 L_2，所以上式可以改写

为

$$\tan\theta_2=\frac{2\Delta d}{L_2} \tag{6}$$

假设刚性夹具的高度为 h，可以得到钢轨形变前后 BC 两点的长度变化值，即光纤光栅的长度变化值：

$$\Delta l=2h\tan\theta_1 \tag{7}$$

由于 θ_1 和 θ_2 均为趋于零的极小角度值，因而可近似认为

$$\tan\theta_1=\tan\theta_2 \tag{8}$$

所以式(7)可改写为

$$\Delta l=\frac{4h\Delta d}{L_2} \tag{9}$$

所制备的光栅阵列传感器采用了增敏的方法，将每只传感器两端分别采用内径为 3 和 5 mm 的不锈钢管进行嵌套封装，中间的软连接部分为紧套光纤，其长度为 L_1，如图 5 所示。

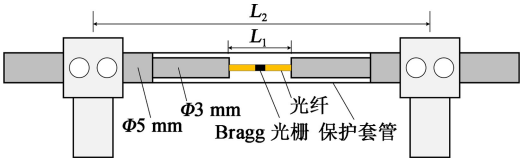


图 5　传感器的增敏封装示意图

轨道受力，通过两端的刚性夹具和不锈钢管传递到紧套光纤，此时光纤光栅的微应变 $\mu\varepsilon$ 可表示为

$$\mu\varepsilon=\frac{\Delta l}{L_1}\times10^6=\frac{4h\Delta d}{L_2L_1}\times10^6 \tag{10}$$

在实验过程中，取 h 为 7 cm，L_1 为 10 cm，L_2 为 25 cm，由有限元仿真可知 Δd 为 0.020 5 mm，由此可推算出传感器此时的理论应变值达到了 229.6 $\mu\varepsilon$。对于空车来讲，其灵敏度可很好地满足工程需求。

3　实验与分析

3.1　实验场景

本次实验在某铁路信号厂内的运营轨道上进行，该轨道为标准的 45 kg/m 钢轨，实验平板车载重 18 t，包含前、后轮组共计 8 个轮子(单轴 2.25 t)，采用人工推行平板车的方式进行溜放试验，如图 6 所示。

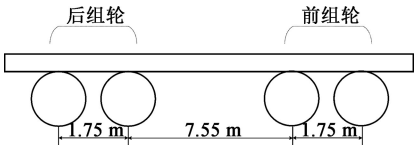


图 6　实验平板车及尺寸

3.2　系统架构

本系统主要由传感单元、解调单元和处理单元三部分组成，其中传感单元由敷设在各条股道上的传感光纤构成，解调单元主要包括光栅阵列信号解调仪，处理单元包括 PC 机和软件处理部分。图 7 所示为驼峰溜放监测系统基本架构。

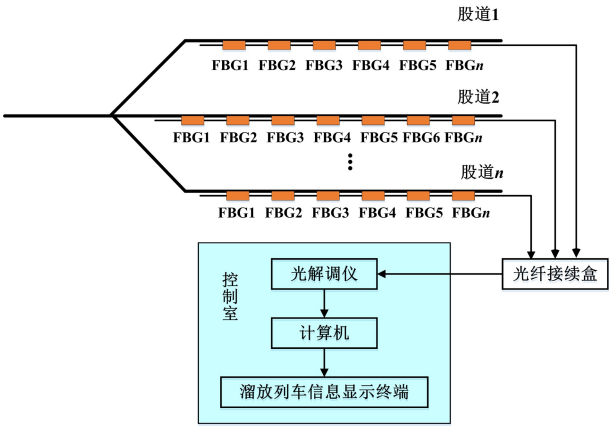


图 7　驼峰溜放监测系统架构

当溜放车组行驶在传感区域时，车轮对轨道产生的应变使得光栅阵列传感器的中心波长发生偏移，光栅阵列信号解调仪器实现对波长信号的解调，并将解调后的信息输送到处理单元，经过解算后由 PC 机输出溜放车组的实时行车信息。通过计算单位时间内传感器波长峰值出现的个数可以获得溜放车组的轮轴信息；通过标定波长变化值与轮轴载重信息可以推断溜放车组荷载；通过获得溜放车组车轮依次经过相邻两个传感器的间隔时间可以获取当前的车速。

3.3　传感器安装

如图 8 所示，将传感光纤沿轨道一侧依次进行敷设及安装，确保相邻两个轨枕缝之间均安装 1 只传感器，相邻传感器之间的传输光纤采用铠装护套进行保护，以确保传输部分的长期可靠性。此次敷设传感光纤长度约 200 m，共计 150 只传感器。



(a)　沿轨道安装　　(b)　局部细节

图 8　传感器敷设与安装场景照片

在分岔口后的多条溜放股道上分别按照图 8 所

示铺设传感光纤，多条股道的传感光纤汇聚到光纤接续盒后，再通过传输光缆连接到位于控制室内的解调仪。

3.4 实验分析

随机选取 10 只连续分布的光栅阵列传感器 FBG11～20 进行数据分析，将列车经过以上 10 只传感器前、后的所有中心波长变化数据列于表 1。

表 1 10 只连续 FBG 中心波长值(单位:nm)

FBGn	λ_0	λ_1	$\Delta\lambda$
11	1 553.461	1 553.236	0.225
12	1 551.770	1 551.542	0.228
13	1 553.617	1 553.421	0.196
14	1 551.610	1 551.415	0.195
15	1 553.321	1 553.109	0.212
16	1 551.599	1 551.386	0.213
17	1 553.504	1 553.311	0.193
18	1 551.208	1 551.017	0.191
19	1 553.293	1 553.159	0.234
20	1 551.463	1 551.256	0.207

其中，λ_0 为静态未受力时 FBG11～20 传感器的中心波长值，λ_1 为列车车轮位于传感器正上方时 FBG11～20 传感器的中心波长值，$\Delta\lambda$ 为 λ_0 与 λ_1 的差值。由此可以看出，列车经过时，每个 FBG 传感器都能很好地响应，且灵敏度较高。

任意选择一只传感器和一组传感器对列车前、后轮依次经过时的传感器波长变化情况进行分析，如图 9 和 10 所示。

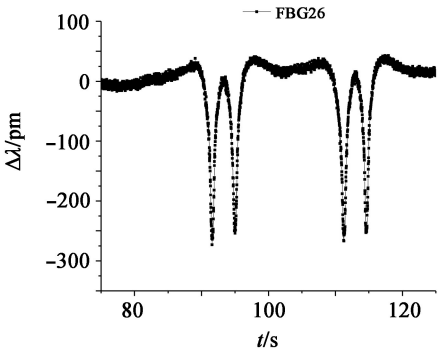


图 9 列车轮轴计数波形图

从图 9 可以看出，传感器感知车轮经过时的现象十分明显，由于是单轨敷设传感光纤，故只有 4 个峰值，且一致性较好，具备计轴功能。由于平板车载重 18 t，共有 8 个轮子，即单轴重 2.25 t，对应传感器波长变化最大值为 200 pm 左右，通过精确标定即可获得溜放车组荷载；结合轮轴间距(1.7 m)与传感器峰值时间间隔(4 s)，就能获知此时列车推行速度为 0.44 m/s。

从图 10 可以看出，随着车轮的移动，相邻传感器的中心波长依次发生变化，当车轮位于某一只传感器正上方时，该传感器波长变化值达到最大，其相邻的传感器中心波长变化相对较小。根据相邻传感器的波长变化和时序就能判断出列车的行进方向。

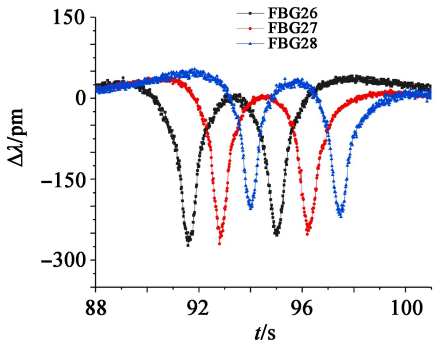


图 10 列车运行方向波形图

将所有传感器在不同时刻 t、不同位置 n 和中心波长的变化值绘制成瀑布图，如图 11 所示。每个传感器中心波长变化值 $\Delta\lambda$ 与时间的曲线均包含四个峰值，分别对应列车单侧 4 个车轮的轮轴信息。随着列车的行进，4 个波峰随时间依次向后面的传感器进行传递，由此可得到列车的运行轨迹，因此根据轮轴信息可以对列车进行精准定位。

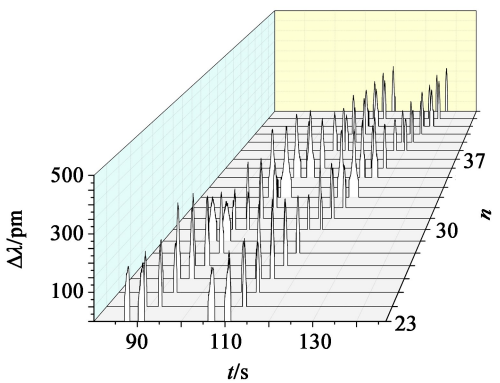


图 11 传感器感知列车运行瀑布图

从图 11 可以看出，溜放车组运行至任意位置，都有对应区域的 FBG 传感器对其响应，从而可以实现监测区域的全覆盖。

3.5 实验小结

通过以上实验现象可以看出：光栅阵列传感器具有可靠性高、重复性好、灵敏度高等优点。通过对单只传感器的受力进行分析，可以清晰地分辨出列车的轮轴信息，由此可知该传感器具备测速功能；通过对单只传感器的受力进行精确标定，可较为准确

地获取溜放车组的荷载，由此可知该传感器具备称重功能；通过对相邻传感器组的受力大小和时序进行分析，可对列车行进方向进行准确判断。

4　结论

本文针对传统的驼峰溜放监测技术存在的易受电磁干扰、无法精准定位、无法实现编组站全覆盖监测以及无法同时监测溜放车组多个物理量信息的问题，提出了一种基于大容量光栅阵列应变传感技术的驼峰溜放监测方法，对该方法进行了理论分析和推导，并通过现场实验验证了该方法的可行性。

与传统方法相比，大容量光栅阵列应变传感技术用于驼峰溜放监测具有以下几点优势：(1)采用全光进行通信，不受沿线电磁干扰，稳定性好，可靠性高；(2)该方法是一种连续式的监测手段，可实现监测区域的全覆盖，未来有望大大提高驼峰溜放的高效性和安全性；(3)该方法能较全面地反映溜放车组的行车信息，可同时监测车组的轮轴、车速和载重信息；(4)基于波分和时分的混合复用方法可以大大提高光栅阵列传感器的复用数量，为大容量、长距离的监测需求奠定良好基础，能很好地满足各型编组站对多条溜放股道同时进行监测的要求。

在驼峰溜放监测过程中，轨道占用检测空间分辨率取决于阵列光栅应变传感器的分布密度，本实验所能达到的空间分辨率为相邻两轨枕之间的距离，即 60 cm；对于目前铁路上最轻的平板车，传感器的灵敏度可以达到 200 pm 以上。所设计的阵列传感光纤具有良好的可靠性和可重复性，证明该系统具有较好的工程应用可行性。

参考文献：

[1] Levine B, Lu A, Reddy A. Measurement of subway service performance at New York city transit: Case study with automated train supervision track-occupancy data [J]. Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board, 2013, 2353(1): 57-68.

[2] Chang M, Dong W, Ji Y. A distributed approach for track occupancy detection[J]. Control Engin. Practice, 2014, 22(1): 69-80.

[3] Tong W, Liu Y, Jin X, et al. Analysis to space location between excitation coil and induction coil of unilateral axle counting sensor[C]// Proc. 2015 Fifth Inter. Conf. on IEEE Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015: 1951-1954.

[4] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(20): 2055-2057.

[5] Rodriguez L, Pinedo C, Lopez I, et al. Eurobalise-Train communication modelling to assess interferences in railway control signalling systems [J]. Network Protocols and Algorithms, 2016, 8(1): 58-72.

[6] Dou F, Dai C. Filtering algorithm and direction identification in relative position estimation based on induction loop-cable [J]. J. of Central South University, 2016, 23(1): 112-121.

[7] Li L, Wang J, Zhang Z, et al. Radiation characteristics of rectangular leaky waveguide under high speed railway environments[C]// Proc. 2011 IEEE 4th Inter. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), 2011: 493-497.

[8] Acharya A, Sadhu S, Ghoshal T K. Train localization and parting detection using data fusion [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(1): 75-84.

[9] Tam H Y. World's first city-wide fiber Bragg grating sensing network for railway monitoring[C]// IEEE Conf. on Optical Fibre Technology, 2014: 1056-1057.

[10] Majumder M, Gangopadhyay T K, Chakraborty A K, et al. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 150-164.

[11] Yi Kuang, Guo Yongxing, Li Xiong, et al. Packaging and temperature compensation of fiber Bragg grating for strain sensing: A survey[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(4): 320-331.

[12] Luo Zhihui, Wen Hongqiao, Guo Huiyong, et al. A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Opt. Express, 2013, 21(19): 22799-22807.

[13] G Xin, L Zhengying, W Fan, et al. Distributed sensing technology of high-spatial resolution based on dense ultra-short FBG array with large multiplexing capacity[J]. Opt. Express, 2017, 25(23): 28112-28122.

作者简介：

甘维兵(1978—)，男，湖北省武汉市人，博士，副研究员，主要从事光纤传感技术及应用方面的研究工作；

艾凌云(1995—)，男，湖北省黄冈市人，硕士研究生，主要从事光纤传感方面的研究工作。