

基于光纤激光传感器的重载铁路列车 在途安全状态监测技术

杜彦良¹, 张文涛²

(1. 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 石家庄 050043;

2. 中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

[摘要] 针对重载铁路运行安全监测的迫切需求,提出了一种基于光纤激光传感器的重载铁路在途安全状态监测技术。在给出了光纤激光传感器基本原理与在途安全状态监测技术方案的基础上,指出了其中需要重点解决的关键技术,并给出了具体的实现方案。主要包括:高性能光纤激光振动传感器技术,高精度波长解调技术以及危险状态模式识别技术等。最后,给出了该监测技术的系统实现方案。

[关键词] 光纤激光器;重载铁路;安全状态;在途

[中图分类号] TU311.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)10-0061-06

1 前言

我国成功借鉴世界发达国家发展重载铁路的经验,大力发展重载铁路运输,缓解运量与运能之间的矛盾,取得了巨大的经济效益和社会效益^[1,2]。然而轴重的提高无疑使动载荷不断增大,冲击振动显著加剧,致使钢轨结构的损伤加剧,导致铁路断轨、脱轨等重大事故时有发生,对铁路运输和人民生命财产造成了巨大损失^[3]。因此,对现有重载铁路列车的在途安全状态进行监测十分必要。

目前现有的检测技术主要有两种:其一是传统人工检测,主要由铁道工务技术人员靠看、听、摸等传统检测方法,该方法不仅费时费力效率低下,而且更容易出现误检、漏检的现象;另一种方法是采用专用轨道检测车,但是该设备不仅造价高,且我国的干线日趋繁忙,检测车无法实现实时、在线的监测^[4],不能及时获取车辆运行状态信息。

针对上述问题和重载车辆运行安全的迫切要求,提出一种基于光纤传感技术的重载铁路危险状

态监测技术,尤其是采用高灵敏度、高分辨率的光纤激光传感器对重载列车横向振动和轨道危险状态监测的技术,以期实现对重载铁路的全光纤、实时自动监测,提高现有的监测技术水平,保障重载铁路高效、安全的运营。

2 车载在途安全状态监测系统的基本原理与技术方案

2.1 基本原理

光纤传感技术虽然已经经历多年的发展,然而,在使用波长调制型传感器实现高灵敏度、大动态范围的监测系统时,其波长检测的分辨率仍是目前的技术瓶颈问题。目前通用的基于FBG(光纤布拉格光栅)传感器的信号带宽是0.1~0.2 nm,显然亚pm量级的波长变化对于FBG来说几乎无法检测。因此要提高解调系统对微小信号的检测能力,必须减小光信号的带宽,于是建立基于光纤激光器(FL, fiber laser)传感器的传感网络成为20世纪末以来世界各主要光纤传感器研究机构研发的对象^[5-7]。利

[收稿日期] 2009-08-11;修回日期 2009-08-30

[基金项目] 国家“863”计划项目资助(2009AA11Z212,2009AA11Z102)

[作者简介] 杜彦良(1956-),男,河北石家庄市人,石家庄铁道学院教授,博士生导师,主要从事土木工程防灾减灾领域大型交通基础设施安全保障技术研究;E-mail:DUYIL@sizri.edu.cn

用在有源光纤两端或直接在有源光纤上写入 FBG, 构成光学谐振腔, 通过远程泵浦, 从而形成光纤激光器。由于输出激光的线宽在 10^{-3} pm 量级, 在解调端与光纤干涉技术结合即可以实现 10^{-6} pm 量级的波长检测能力, 从而实现灵敏度和动态范围在现有 FBG 传感器的基础上若干数量级的提升。同时,

由于信号的带宽十分窄, 信号解调也不能再依赖于可调谐探测或空间色散 + 探测器阵列技术, 而需要采用光纤干涉检测技术, 将极其微弱的波长变化经过干涉仪后放大为相位变化后进行检测。这样, 就形成了如图 1 所示的基于光纤激光传感器的传感系统^[8]。

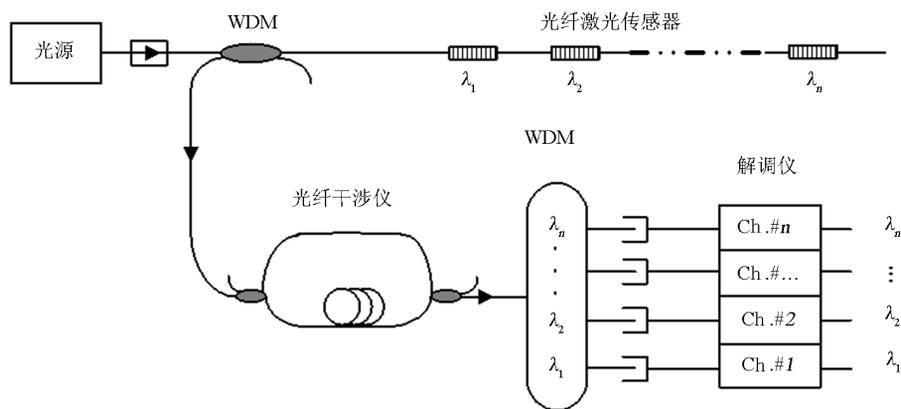


图 1 基于光纤激光器的光纤传感系统图

Fig. 1 Fiber optic sensing system based on FLs

列车的故障和危险状态可以用走行部位的振动特征来表达^[9]。波磨是指钢轨沿纵向表面出现的周期性的类似波浪形状的一种不平顺现象, 是一种常见的钢轨磨损。当重载铁路的钢轨发生波磨时, 列车通过必然会引起走行部位的附加垂直振动。通过安装于车体的光纤激光加速度传感器采集车体的振动信号, 从而实现对波磨的监测和由此引起的列车横向振动的监测。轴箱加速度二次积分是目前波磨检测中普遍采用的方法。其基本原理是采用安装于轴箱或转向架上的加速度计采集列车振动的加速度信号, 通过二次积分而得到车体振动的位移信号, 从而计算出波磨量的大小^[10]。

列车的横向振动将引起较大的横向冲击力, 直接影响列车的脱轨系数^[11]。对于长大列车编组的重载铁路列车, 由于偏载、线路不平顺、断轨、三角坑等引起的横向振动更为严重。当这些振动超过一定的阈值, 列车便进入危险运行状态。因此, 也同样可以通过加速度计提取车体的振动特征来实现横向振动的监测。

现有报道的电学加速度计在使用过程中暴露出抗电磁干扰差(尤其在电气化铁路更为严重)、灵敏度低(最小可检测加速度为 μg 量级)、动态范围小(< 90 dB)、复用不方便等缺点。而光纤加速度计

是目前报道灵敏度最高的一类传感器。它具有天然的抗电磁干扰能力、灵敏度高(最小可检测加速度为 ng 量级)、动态范围大(> 120 dB)的优点。而基于光纤激光器的加速度传感器在上述优点基础上进一步具有体积小、重量轻、更适合大规模组网复用的优点。这就是文章所提出的基于光纤激光传感器的重载铁路列车在途安全状态监测的一种新技术。

2.2 技术方案

在高增益掺稀土光纤写入 FBG 形成 DFB(分布反馈布拉格)激光器结构, 在外界泵浦激光的作用下形成光纤激光器并产生稳定的窄线宽稳定输出; 对光纤激光器进行特殊封装, 采用圆形平膜片的结构封装加速度传感器实现对外界振动信号的感测, 利用弹性力学理论对传感器特性进行理论分析, 研究各参数对传感器性能的影响, 通过调整平膜片的相关参数以满足灵敏度和频响特性的要求; 设计并制作非平衡干涉仪结构, 将光纤激光器中被振动信号调制的激射波长变化转化为相位变化, 通过解调相位变化得到振动信号; 通过专用算法实现波磨和横向振动的识别与预警。整个系统采用波分复用的方案, 总体方案如图 2 所示。

为了实现上述技术方案, 需要解决一系列关键技术, 主要包括:

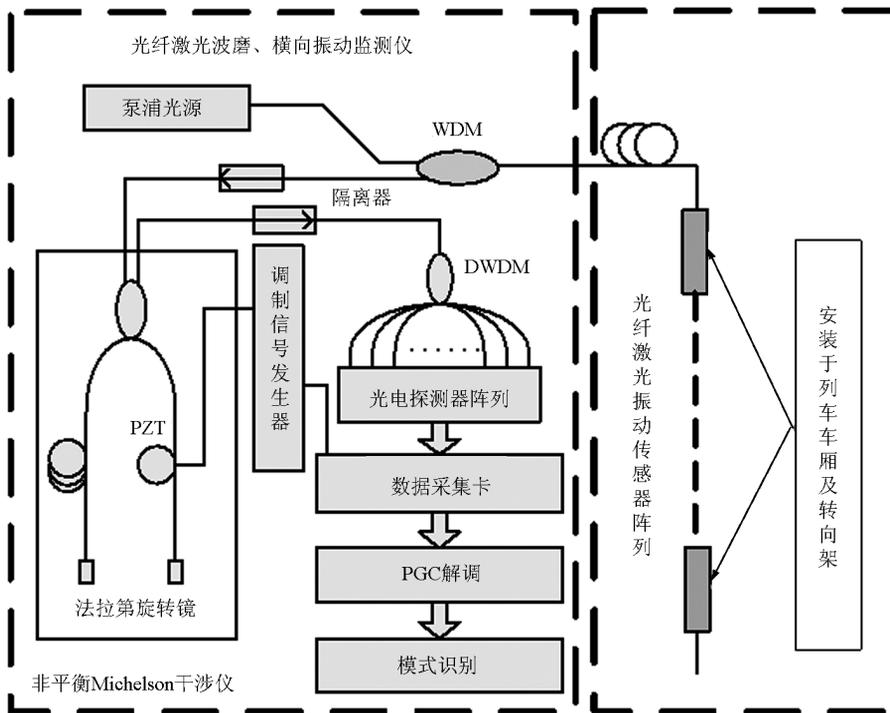


图2 光纤激光监测系统整体方案示意图

Fig. 2 Schematic of the FL sensor monitoring system

1) 适用于列车横向振动监测和钢轨磨损监测的低频、高灵敏度加速度传感器研制。为了能有效地将波磨引起的微小加速度信号耦合到激光器中,形成激光器激光波长的变化,并结合在实际应用中对于传感器的体积、重量、隐蔽性、耐环境性的要求,必须研发专用的传感器换能结构,不仅要求体积小、安装方便,而且要做到加速度灵敏度高而横向灵敏度低。

2) 基于干涉仪的高精度波长解调技术研究。已有报道的基于干涉法的光纤激光传感器信号解调技术有相位跟踪零差法、外差法与 3×3 耦合器法^[12]。在深入分析现有技术的基础上,提出了采用改进的相位载波解调技术(PGC)来实现高精度的相位解调^[13]。相比于其他技术,该技术具有解调分辨率高、动态范围大、易于复用组网的特点。

3) 高准确率的重载列车危险状态识别算法的实现。在实用过程中,由于轨道刚度变化、轮对蛇形运动、轮轴机械间隙、轴箱机械变形、轮踏面擦伤等,都会对加速度传感器输出信号产生干扰,影响波磨和横向振动测量的精确性。因此,需要对波磨及横向振动产生的振动信号进行特征提取。目标特征提取的好坏与识别的结果密切相关,在深入理解波磨及横向振动导致振动信号特性的基础上,找出不同

种类振动信号之间最本质的差别,通过大量的统计工作,提取出特征参量。然后利用特征量评价方法予以评价,从而实现重载列车在途安全状态的获取。

3 关键技术的实现方案

3.1 高灵敏度光纤激光加速度传感器的设计

笔者设计的加速度计采用双膜片结构。即质量块通过两个圆形膜片固定在支撑环中间,光纤一端和加速度计外壳固定,另一端穿过质量块与质量块固定在一起。加速度计工作时将其固定在车体。而质量块在惯性力的作用下带动光纤激光器产生轴向应变,使光纤激光器的波长发生改变。

如图3所示,当加速度计感受到外界振动信号时,膜片将发生形变,拉动光纤,从而在光纤中产生拉力 T

$$T = \varepsilon E_f A \quad (1)$$

而膜片中心由于拉力 T 和惯性力 ma 产生的附加形变为^[14]

$$w = \frac{1}{2} \cdot \frac{(ma - T)R^2}{16\pi D} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \frac{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 4 \ln^2 \left(\frac{r}{R} \right)}{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2} \right] \quad (2)$$

其中

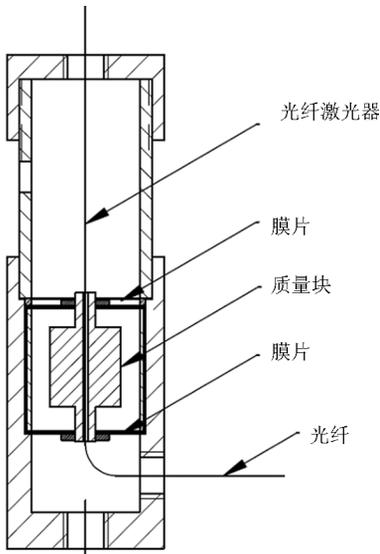


图3 光纤激光加速度计剖面图

Fig. 3 Structure of the FL accelerometer

$$D = \frac{E_m t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

由应变的定义有

$$\varepsilon = w/L \quad (4)$$

式(2)中: m 为质量块的质量, a 为待测加速度, A 为光纤的截面积, E_f 为光纤的杨氏模量, t 为膜片厚度, R 为膜片的半径, r 为质量块与膜片的接触半径(定义为接触半径), E_m 为膜片的杨氏模量, ν 为膜片泊松比, L 为被固定的光纤长度。

光纤 Bragg 光栅中心波长的漂移量与光纤轴向应变关系可以写为^[15]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon \quad (5)$$

式(5)中, $P_e = 0.22$,为光纤的有效弹光系数。

联合式(1),(2),(4),(5)可得双膜片加速度计的加速度灵敏度为

$$M_a = \frac{\Delta\lambda_B}{a} =$$

$$\frac{0.78\lambda_B m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \frac{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 4\ln^2 \left(\frac{r}{R} \right)}{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2} \right]}{\frac{32\pi DL}{R^2} + E_f A \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \frac{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 4\ln^2 \left(\frac{r}{R} \right)}{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2} \right]} \quad (6)$$

式(6)为笔者设计和改进光纤激光加速度传感

器提供了指导方向。在此基础上,研制了光纤激光加速度计样品,其外径为12 mm,长度为80 mm。该加速度计在振动台上与标准加速度计进行了标定测试,其测试结果如图4所示。

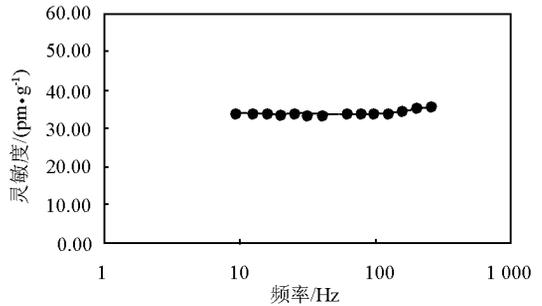


图4 光纤激光加速度计幅频特性曲线

Fig. 4 Frequency response of the FL accelerometer

图4是光纤激光加速度计样品试验所测得的幅频特性曲线。从图4可以看出,加速度计样品在5~200 Hz内幅频特性曲线较为平坦,加速度灵敏度为33 pm/g左右。

3.2 高分辨率、大动态范围的解调设备的研制

光纤激光振动传感器的高分辨率解调设备是基于干涉式解调的基本原理,通过非平衡干涉仪将光纤激光振动传感器波长的变化转化为相位变化,然后采用高分辨率的相位产生载波(PGC)方案进行相位检测,从而实现光纤激光振动传感器波长解调。解调设备原理如图5所示。

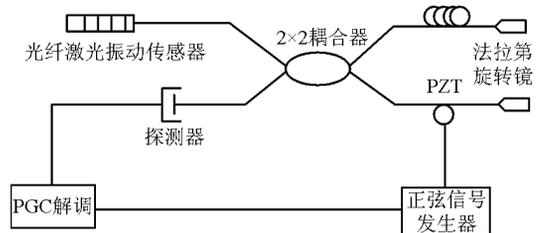


图5 光纤激光振动传感器高分辨率波长解调方案原理图

Fig. 5 Schematic of the wavelength demodulation for FL accelerometer

PGC解调技术利用远离被测信号频带信号的高频、大幅度载波信号对光纤干涉仪信号的初始相位进行调制,消除由于相位随机漂移对信号检测灵敏度的影响,然后通过信号处理将被测相位信号从载波信号中提取出来。最后通过相位变化与波长变化的关系从而得到光纤激光器的波长变化值。图6为研制的高精度波长解调仪本底噪声的测试结果。

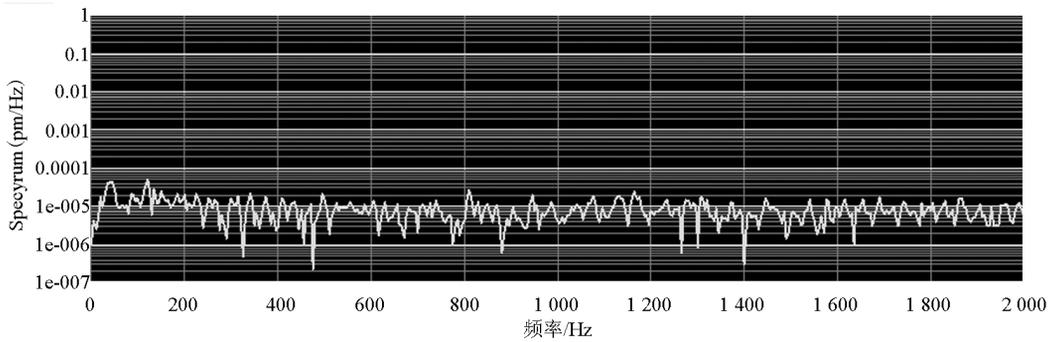


图6 高精度波长解调仪本底噪声测试结果

Fig. 6 Noise floor of the high - accuracy demodulator

由图6可以看出,系统的本底噪声在 1×10^{-5} pm/Hz,结合上述加速度灵敏度为33 pm/g左右的加速度传感器,可以实现对300 ng微小加速度信号的检测。在现有技术基础上取得了较大进步。

3.3 高准确率的重载列车危险状态识别算法的实现

光纤激光传感器安装于重载列车车厢及转向架时,由于轨道刚度变化、轮对蛇形运动、轮轴机械间隙、轴箱机械变形、轮踏面擦伤等原因,光纤激光加

速度传感器的输出信号除去波磨引起的振动和车体由于钢轨不平顺、断轨等引起的横向振动外,还包含各种噪声。因此,需要对波磨及横向振动产生的振动信号进行特征提取。

如图7所示,光纤振动传感器经过信号解调得到外界振动信号,通过滤波等预处理措施后,进行目标特征提取,并将这些特征信号输入模式分类器进行分类识别,最终将目标分为波磨、钢轨横向振动两类。

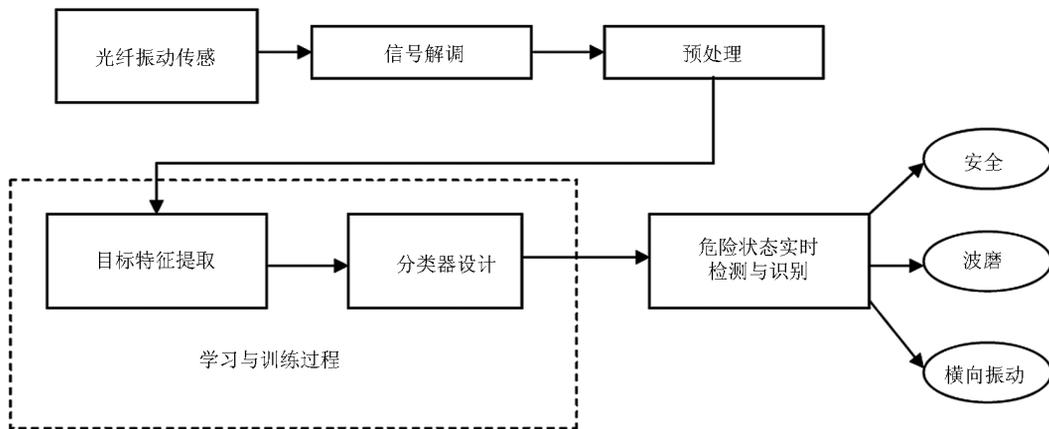


图7 基于光纤振动传感器的模式识别系统原理图

Fig. 7 Schematic of pattern recognizing system based on fiber optic accelerometers

首先是振动信号的采集和样本库的建立,在外场实验条件下,采集多种环境下各种目标信号样本,为后面的处理和识别做好准备。各类目标不同状态主要考虑如下:不同轨道状态、空载和满载的重载列车状态、不同车速情况、不同偏载状态、背景噪声信号等。根据采集到的目标信号,建立训练集和测试集。

然后是目标特征的提取。最简单的方法是对信号进行功率谱估计,包括经典方法和现代方法。通

过对信号的分析,进行大量的统计工作,找出两类目标根本不同。根据我国各铁路局工务段对现有铁路损伤的统计结果,我国波磨发生时的波长一般在100~600 mm,也有极个别地区波长在1 m左右,结合我国重载铁路时速,可推算出由波磨引起的振动频率一般在20~350 Hz,且主要为竖直方向的加速度分量。而由于钢轨变形、偏载等引起的横向振动频率一般在20 Hz以下,且主要为水平加速度分量。

因此,可对采集到的信号的频率分布和主要分量的方向作为特征进行提取。

4 车载在途安全状态监测系统的实现

文章提出的基于光纤激光传感器的重载列车在途安全状态监测的系统方案如图 8 所示。主要包括两个部分:

高灵敏度光纤激光振动传感器,安装于车体及

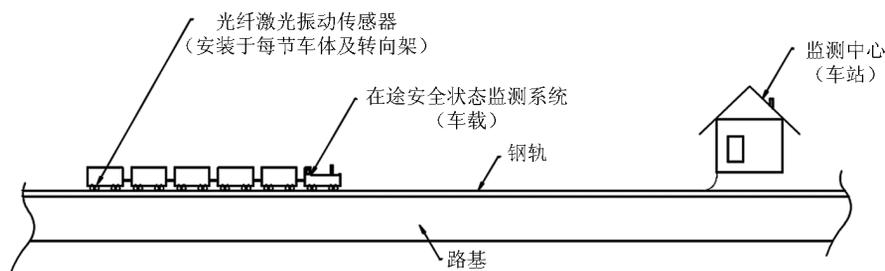


图 8 基于光纤传感技术的重载列车安全状态监测的总体方案

Fig. 8 Schematic of the heavy haul train safety monitoring based on fiber optic sensors

5 结语

随着铁路的高速化、重载化,对重载铁路的运输列车的在途安全状态进行实时、在线监测已经是必然的趋势。针对重载列车运行时在途安全状态监测具体应用要求,提出适用于实时监测重载列车横向振动和钢轨波磨的高灵敏度光纤激光振动传感技术,指出了其关键技术及其实现方案,实现对重载列车在途安全状态的监测和预警。

笔者提出的采用光纤激光传感技术进行重载列车运行危险状态监测的方法,汇集了铁路列车及轨道监测技术和光纤传感技术发展的最新趋势,是二者完美有机的结合。将同时提高我国的轨道监测技术和光纤传感技术发展水平,对提高我国的科技实力,实现自主创新具有重要的现实意义。

参考文献

[1] 刘文亮,田葆栓. 从快捷、重载和专用化探讨我国铁路货运装备的发展[J]. 铁道车辆, 2007, 45: 23 - 27

[2] 魏井奎,李辰中. 重载运输—中国铁路货运发展之路,科技资讯[J]. 2008, (10): 196 - 197

[3] 朱耀斌,魏庆朝. 重载列车运输安全问题分析[J]. 中国安全科学学报, 2005, (15): 6 - 10

[4] 王伟,廖玉凤. 铁路提速后轨检车检测性能分析与研究[J]. 上海铁道科技, 2006, (6): 38 - 39

[5] Foster S, Alexei Tikhomirov, Mark Englund, et al. A 16 Channel

转向架,用于拾取列车的振动信号。

重载列车车载在途安全状态监测系统,通过搭建高灵敏度光纤激光解调仪,实现高精度解调,结合信号特征提取与模式识别技术实现重载列车运行危险状态的分类、识别及预警。并通过无线传输技术与位于车站的监测中心通信,对危险状态进行预警并采取相应措施。

Fibre Laser Sensor Array[J]. in OFS - 18, 2006, FA4

[6] Hill D J, Ben Hodder, Jolyon De Freitas, et al. DFB fibre - laser sensor developments[C]. 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2005: 904 - 907

[7] Guan B - O, Hwa - Yaw Tam, Sien - Ting Lau, et al. Fiber Grating Laser Hydrophone[C]. Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2004: 116 - 119

[8] Koo K P, Kersey A D. Fiber laser sensor system with interferometric read - out and wavelength multiplexing[J]. Proc. SPIE, 1994: 331 - 334

[9] 张思远,沈 钢. 轨道车辆走行部振动异常预警系统的技术方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009, (3): 43 - 46

[10] 刘继承,徐庆华,查建新. 用加速度传感器测量振动位移的方法[J]. 现代雷达, 2007, 29: 69 - 71

[11] 向 俊,曾庆元,娄 平,等. 再论列车脱轨能量随机分析[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 26 - 32

[12] 肖 浩,李 芳,刘育梁. 高分辨率波长位移解调技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44: 50 - 55

[13] Feng Lei, He Jun, Duan Jingyuan, et al. Implementation of phase generated carrier technique for FBG laser sensor multiplexed system based on compact RIO[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2008, 6: 385 - 388

[14] Timoshenko S. Theory of plates and shells[M]. New York: McGral - Hill Book Company, 1959

[15] Zhang Wentao, Liu Lihui, Li Fang, et al. Fiber Bragg grating pressure sensor with enhanced sensitivity[J]. Chinese optics letters, 2007, 5: 507 - 508

(下转 78 页)