

文章编号:1005-0523(2021)04-0099-14



# 铁道车轮踏面损伤实时监测方法研究综述

肖乾,姜雄峰,刘海涛,谢锋云,周生通

(华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室,江西 南昌 330013)

**摘要:**简要介绍列车车轮踏面损伤实时监测方法研究现状、特点及应用情况。列车车轮踏面损伤检测方式有静态检测和动态检测两种。其中,动态检测法可实现列车车轮的健康状态监测,根据传感器安装位置的不同可将动态检测方法分为轨旁式和车载式两种。对轨旁式检测法中轮轨力检测法、激光检测法、声发射检测法等方法及车载式检测法中的轴箱振动加速度检测法、光纤传感检测法进行介绍、归纳。分析了各检测方法的原理、研究现状及应用中存在的问题并对车轮损伤实时监测方法在轨道交通领域的应用进行了展望。分析发现,现有的监测方法仍然需要进一步完善,监测精度应得到提高,在未来的研究中需考虑将车轮损伤实时监测方法与智能诊断、大数据及物联网等技术融合,并使之具备故障预警和设备剩余寿命预测的功能,实现智能运维技术在高速铁路服役中的应用。

**关键词:**铁道车轮;实时监测;车轮损伤;检测技术

中图分类号:U270.12

文献标志码:A

本文引用格式:肖乾,姜雄峰,刘海涛,等.铁道车轮踏面损伤实时监测方法研究综述[J].华东交通大学学报,2021,38(4):99-112.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.011

## Research on Real-Time Monitoring Methods for Railroad Wheel Tread Defects: A Review

Xiao Qian, Jiang Xiongfeng, Liu Haitao, Xie Fengyun, Zhou Shengtong

(Key Laboratory of vehicles and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** A brief introduction to the current status of research, characteristics and applications of real-time monitoring methods for train wheel tread damage is presented. The train wheel tread defects detection method has two kinds of in-workshop inspection and in-service inspection. Among them, the in-service inspection of good real-time, can provide the technical basis for the realization of real-time monitoring of wheel tread defect. According to the different sensor installation locations, the in-service inspection can be divided into two types of on-board measurement and wayside measurement. The methods of wayside measurement, such as wheel-rail force detection, image detection and acoustic emission detection, as well as axle box vibration and acceleration detection and fiber optic sensing detection are introduced, summarized, and analyzed in terms of their principles, research status and application problems. The results show that the existing monitoring methods still need further improvement, and in future research it is necessary to consider the integration of real-time wheel defect monitoring methods with intelligent diagnosis, big data and Internet of Things technologies, with the function of fault warning and equipment remaining life prediction, to realize the application of intelligent operation and maintenance technology in high-speed railroad construction.

收稿日期:2021-07-20 © 1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目:国家自然科学基金项目(51975210)

作者简介:肖乾(1977—),男,教授,博士,研究方向为轨道车辆轮轨关系,轨道车辆运维装备研究与开发。E-mail:jxralph@qq.com。

**Key words:** railway wheel; condition monitoring; wheel tread damage; signal processing

**Citation format:** XIAO Q, JIANG X F, LIU H T, et al. Research on real-time monitoring methods for railroad wheel tread defects: a review[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 99-112.

高速铁路和城市轨道交通的快速发展给国民经济注入了强大的活力, 给人们的出行带来了极大的便利, 但同时也为铁路的安全运营带来了巨大的挑战。安全和平稳是高速列车运行的最基本要求, 其核心在于轮轨关系。车轮作为轮轨关系中的重要一环, 是影响轮轨关系的重要因素。列车轮对的工作环境比较复杂, 不但要和钢轨、车闸发生撞击和摩擦, 且常受到雨水、油污甚至腐蚀剂的侵蚀和损害, 列车轮对工作一段时间后, 会造成一定程度的磨损和缺陷。列车车轮踏面损伤常见形式为扁疤、剥离/剥落等车轮局部损伤和车轮踏面凹坑磨耗、车轮多边形等车轮全周损伤, 其他缺陷形式如硌伤、脱层、塌陷等对轮轨动态响应的影响和与车轮扁疤和剥离/剥落类似<sup>[1-3]</sup>。踏面损伤会加剧车辆横向振动, 甚至发生列车脱轨事故<sup>[4]</sup>。轮对质量的优劣对铁路和城市轨道交通安全运行至关重要。及时对已损坏轮对进行检修, 可以有效降低事故发生率、提高列车使用率。对列车轮对几何参数进行长期监测跟踪, 可以为轮对设计与制造、使用与维修、轮轨磨耗预测及钢轨型面优化提供科学决策的依据。如何对轮对几何参数与损伤进行实时、准确的测量, 一直是轨道交通领域迫切需要解决的问题, 也是此领域科研人员长期研究的重要课题<sup>[5]</sup>。

为了列车的安全运营, 自上个世纪 70 年代以来, 世界各国相继进行了车轮踏面擦伤、磨耗、剥离等车轮损伤自动检测监测技术研究<sup>[6]</sup>。凯飏<sup>[7]</sup>综述了国内外学者对车轮踏面擦伤和不圆度检测所采取的静态检测和动态检测两大类方法。日本 JR 公司于 1994 年开始在铁路中实际应用列车轮对尺寸和车轮踏面形状的动态检测装置<sup>[8]</sup>。我国西南交通大学研制的 LY 系列轮对动态检测系统采用了“电磁超声探伤技术”和“光截图像检测技术”两大关键技术, 实现了对车轮的外形尺寸和踏面缺陷检测, 操作便捷、自动化程度、实用性强、工作稳定性好、缺陷检出能力强, 故障预警信息准确、检测准确性高, 系统重复性好, 在我国铁路系统中广泛应用<sup>[9]</sup>。Cheng 等<sup>[10]</sup>在钢轨旁布置一维、二维激光位移传

器和车轮位置传感器, 结合三角测量原理, 有效判别了通过轮对的轮缘高度、轮缘厚度和车轮直径。然而, 采用轨旁检测的方法既不直接也不连续, 无法做到对车轮在整个服役期间的实时监控<sup>[11]</sup>。我国地铁车辆普遍受到车轮踏面磨耗的困扰, 汪群生等<sup>[12]</sup>建立考虑车体弹性振动和车下悬吊设备的刚柔耦合动力学模型, 分析一个镟轮周期内车轮磨耗对车体和车下悬吊设备振动响应的规律, 随着运营里程增加和列车运行速度的提高, 车体及其悬吊设备的振动特性不断恶化。而谐波磨耗车轮在车辆运行过程中会产生周期性的垂向激励引起车辆的强迫振动。列车速度越高, 激励就越大, 现场实测因车轮谐波磨耗引起的轴箱垂向振动加速度达到 100~300 g, 引发了轴箱端盖螺栓松动构成行车隐患<sup>[13]</sup>。也就是说, 车轮磨耗与转向架或车体振动特性间必定存在某种联系。Wang<sup>[14]</sup>建立了车轮磨耗演变规律与转向架和车体振动之间的关系, 提出了车轮镟修周期的优化方案。Song 等<sup>[15]</sup>采用数值方法建立车辆-轨道耦合系统, 分析了车轮多边形引发的轴箱加速度动态响应, 并使用 EMD (ensemble empirical mode decomposition) 方法和 Wigner-Ville 分布时频法分析其时频特性, 由此监测车轮多边形化并识别车轮损伤程度。轴箱加速度 (axle box acceleration, ABA) 分为垂向振动加速度、横向振动加速度以及纵向振动加速度, 轴箱加速度测量方便, 在列车日常运行中可以直接测量, 国内外学者基于 ABA 方法在轨道检测和车轮局部损伤方面做了大量的研究工作。邓金豪等<sup>[16]</sup>采用现场测试和数值分析相结合的方法探讨了高速列车轮对踏面擦伤与轴箱垂向加速度之间的关系, 并提出一种自适应形态提升小波法有效识别了车轮踏面擦伤。Wei Liu<sup>[17]</sup>研究了轮对纵向振动特性与车轮踏面剥离的关联性, 轮对纵向振动与踏面剥离引起的接触位置等接触参数密切相关。Molodova 和 Li 等<sup>[18]</sup>为了进一步提高钢轨压溃损伤的准确性, 对轴箱加速度检测方式、信号处理方法以及自动分析算法上做了大量改进, 现场试验验证了基于 ABA 的钢轨压溃损伤检测的有效性。

列车车轮踏面损伤监测方法在近年来得到了迅速的发展,研究成果不断积累,其中不乏许多新颖前沿的理论方法和技术手段。为了更好地掌握铁道车轮踏面损伤实时监测方法,促进相关研究领域的研究发展,本文总结了近年来国内外轮对踏面损伤实时监测方法,对各方法的特点及其应用进行讨论并分析其优缺点,系统全面地介绍研究现状并对诊断方法的发展方向进行讨论。

## 1 车轮踏面损伤类型及检测方法

### 1.1 损伤类型

铁道车轮踏面损伤主要包括扁疤、剥离/剥落、踏面凹坑磨耗和车轮多边形等类型。车轮踏面损伤会引起轮轨间强作用力,影响轮轨正常接触和动力学性能,其中踏面/轮缘磨耗和车轮多边形是高速列车检测重点关注对象。

#### 1.1.1 扁疤

车轮扁疤通常是在车辆异常制动或低黏着条件下,由于车轮运行状态改变而引起轮轨间强烈摩擦,进而导致车轮接触区材料缺失而产生的一种缺陷,如图1所示<sup>[19-21]</sup>根据车轮磨损情况可将车轮扁疤的损伤演化分为新扁疤、扁疤边缘磨损、扁疤完全磨损3个阶段,其中,扁疤边缘磨损、扁疤完全磨损统称为旧扁疤。车轮扁疤诱发的轮轨冲击力和轮轨动态响应可达正常情况下的数倍,产生轮轨噪声<sup>[22-23]</sup>,且会对列车重要零部件造成冲击,影响列车行驶安全。



图1 车轮扁疤  
Fig.1 Wheel flat

#### 1.1.2 车轮剥离/剥落

车轮踏面剥离指列车车轮在正常行程中由于热-机载荷作用或轮轨滚动接触疲劳而在踏面圆周或局部圆周上表现的金属掉块剥落损伤现象,如图2所示<sup>[24-26]</sup>。有国外学者将热损伤导致的这种现象称

为剥离,而由于轮轨滚滚动接触疲劳产生的损伤定义为剥落。然而,在实际情况中对这两种情况区分较难,且可能同时存在,故国内学者将其统一命名为剥离。车轮踏面剥离的出现不但会影响列车行车安全,还会增加车轮镟修和换轮的频次,在减少车轮实际寿命的同时造成不必要的经济损失<sup>[27]</sup>。



图2 车轮剥离  
Fig.2 Wheel tread spalling

#### 1.1.3 车轮凹坑磨耗

车轮踏面磨耗为轮轨间滚动摩擦接触中发生的一种自然损耗现象。在高速铁路系统中,由于列车运行的平稳性指标和轨道平直度标准都很高,轮轨接触点基本聚集在车轮名义滚动圆处,轨道轨头的轮轨接触光带也较为集中,引发车轮踏面横向凹坑磨耗。当凹坑磨耗达到一定深度后,会导致由轮轨滚动接触不连续引起的车轮横向失稳,将直接影响列车的安全性和舒适性,车轮踏面凹坑如图3所示<sup>[1,28]</sup>。

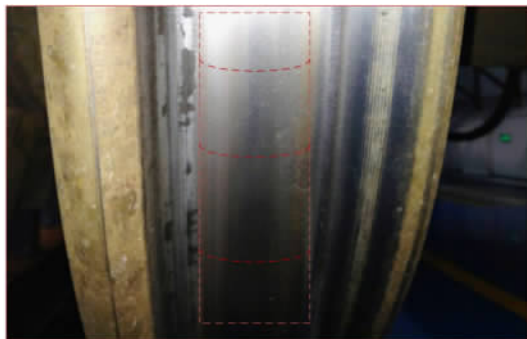


图3 车轮凹坑磨耗  
Fig.3 Wheel tread hollow wear

#### 1.1.4 车轮多边形

车轮多边形是指车轮沿踏面圆周方向的波状、非均匀磨耗,属于车轮不圆顺的一种特殊形式,可分为周期性车轮不圆顺和非周期性车轮不圆顺2种



类型,如图4所示<sup>[29-31]</sup>。列车车轮多边形磨耗会引起列车轨道间强烈振动和噪声,加速车辆轨道系统零部件疲劳破坏,严重威胁列车安全运营<sup>[32]</sup>。



图4 车轮多边形  
Fig.4 Wheel polygonization

## 1.2 检测方法

目前车轮踏面损伤的检测方法,从检测方式上分为静态检测和动态检测两类。静态检测法是在车辆入库进行检修维护时,检修员通过手持轮对尺寸测量仪器等测量工具手动测量轮对的各项参数,此法不能做到对车轮状态的实时监测。动态检测法是在列车运行状态下定性或定量的测量车轮踏面损伤程度。动态检测法不影响列车调度,具有信息化和自动化的特点,能够自动检测踏面损伤并储存检测结果,可实现实时的车轮状况监测。

自20世纪70年代起,世界各国相继开展了铁道车辆踏面故障动态检测系统的研究工作<sup>[33]</sup>。我国在90年代中期提出了一些新的方法并应用于铁路交通<sup>[4]</sup>。依据检测装备安装位置的不同,动态检测法可分为车载式检测和轨旁式检测两种<sup>[7,34]</sup>,具体检测方法如表1所示。

表1 铁道车轮踏面缺陷动态检测方法

Tab.1 Railroad wheel tread defect dynamic detection methods

Method	Test item	Technique	Features	Literature sources
On-board measurement	Wheel polygonization, wheel tread flat	Axle box acceleration technique	High precision, location and quantitative identification	[15, 70-76]
	Wheel tread defects	Fibre optic sensing technology	Comprehensive function, high technique difficulty	[77-78]
Wayside measurement	Wheel/rail contact force	Wheel/rail contact force technique	Well system stability, simple function	[35-39]
	Wheel hollow wear, wheel tread flat	Laser and machine vision technique	Reliability, accurate ault location	[40-48]
	Wheel tread flat, wheel/Rail crack	Acoustic emission	System simplicity, limited accuracy	[54-56]
	Wheel polygonization, wheel tread flat	Vibration technique	Stable performance vulnerable to interference	[57-60]
	Wheel tread defects	Ultrasonic technique	high precision, expensive	[61-64]
	Wheel hollow wear, wheel tread defects	Fibre optic sensing technology	Stable and high precision, high technical difficulty	[66-69]

## 2 轨旁式动态检测法

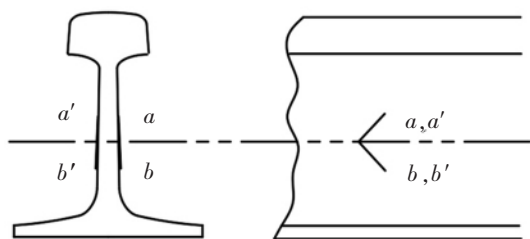
轨旁式检测法是在列车行进线路上安装检测系统,列车通过该段轨道时才可对车轮进行检测。目前,按照技术原理的不同常用轨旁动态检测方法可分为轮轨力检测法、激光与机器视觉检测法、声

发射检测法、振动加速度法、超声波检测法、光纤光栅技术法。

### 2.1 轮轨力检测法

一般情况下,可在钢轨上粘贴应变片或在车轮上装置应变片以获取列车车轮行驶时所产生的振动激励及由损伤引起的动态响应,从而反映车轮踏

面状态<sup>[35]</sup>。在检测时,要通过标定,得到载荷与应变片的输出之间的对应关系,利用这种关系换算出轮轨垂向力的大小。通过观察轮轨垂向力的幅值,可以对其进行简单分析,初步判断车轮状态。Nielsen等<sup>[36]</sup>利用安置在轨腰和轨底的应变片电路成功测量轮轨接触力和轨道弯矩。为了得到列车车轮损伤与轮轨间动态响应的映射关系,Johansson等<sup>[37]</sup>将应变片安装在轨腰、轨底及轨枕上,将加速度传感器装于轨枕建立了一套车轮冲击载荷监测系统,用于研究车轮不圆对轮轨接触力和轨道响应的影响。提高监测系统的可靠性与便利性一直是研究人员关注的方向,Paolo等<sup>[38]</sup>通过高速摄像机和激光器对车轮踏面特征进行监测,并结合轮轨力测量数据来制定车轮维护计划,为车轮维修决策提供了有用信息,图5为在轨腰安装应变片的示意图及实际安装图。随着技术的进步,应变片的安装位置也不再局限于轨道上,Pedro等<sup>[39]</sup>开发了一种轮轨接触力测量系统,主要通过安装在车轮上列装应变片获取车轮变形,经计算后算得轮轨接触力,并与激光位移传感器测车轮幅板变形获取轮轨接触力的方法进行比较,此方案在等比例车辆模型中成功进行了实验。研究发现,在过大曲线时,应变片法对轮轨接触力更为敏感,并提出未来可将此法用于整车系统。



(a) Sensor installation diagram



(b) Actual installation diagram

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.

图5 轨腰应变片的安装情况

Figure.5 Installation of rail strain gauges

轮轨力检测法系统稳定性较好,适用于高低速,但检测结果受应变片数量、车轮直径和轨枕间距的影响,且有一定的技术要求。

## 2.2 激光和机器视觉检测法

激光、机器视觉及两者结合的测量方式是目前国内对几何参数检测方法的热点研究方向。Samsøe U等<sup>[40]</sup>提出一种基于激光位移传感器的车轮磨耗检测方法:列车行驶过监测区段时,外侧1D激光位移传感器测量车轮踏面外形曲线,内侧1D激光位移传感器用于定位车轮内侧面位置,再结合修正算法即可计算出经过车轮的轮廓曲线和踏面磨耗。该方法结构简单,设置多套外侧激光传感器可在瞬间得到车轮踏面外形曲线的多个点,减少车速对精度的影响,但成本将大幅提升。激光传感器也可用于测量车轮的踏面廓形,Nanumann等<sup>[41]</sup>研发出一套基于多个1D激光位移传感器的列车车轮几何参数测量系统,可判断车速高于72 km/h的车轮是否存在过深磨耗,测量速度低于9.6 km/h的列车车轮的直径,轮缘厚度及磨耗等参数。然而,单1D激光位移传感器进行车轮踏面测量会造成定位精度相对较低的问题,冯其波等<sup>[42-43]</sup>提出多种基于激光传感器的车轮参数检测方法,其使用的双1D激光位移传感器检测方法可减小由车轮姿态和蛇形运动导致的横向定位误差,测量原理如图6所示,在C点设置一个涡流传感器,在A,G两点分别放置激光位移传感器,以 $\beta$ 角度射出的激光照在车轮点E上,根据C,E两点计算车轮半径R,当 $\alpha=\beta$ 时有

$$R = \frac{L_1^2 + l_2^2}{4 l_1 \sin \alpha} \left( 1 + \frac{L}{l_1 + l_2} \right) - \frac{L}{\tan \alpha} \quad (1)$$

同时,其发现在机械加工过程中确保3个激光位移传感器处于同一平面时,测量同一踏面滚动圆的3点空间坐标,通过坐标拟合可得轮对直径,提高测量精度且无需安装涡流传感器。Zheng等<sup>[44]</sup>利用此原理开发出使用3个1D激光位移传感器动态精确测量列车车轮直径的系统,大大降低了轨道形变对测量精度的影响,实验证明,该系统测量误差符合要求,未来可应用于高速铁路系统中。

列车车轮踏面机器视觉检测法通常是以一束激光射向驶来的轮对形成踏面外形光带,此光带反应了车轮踏面在光平面内的几何图形<sup>[45]</sup>,在轮对下方与光平面成一定角度布置CCD(charge coupled

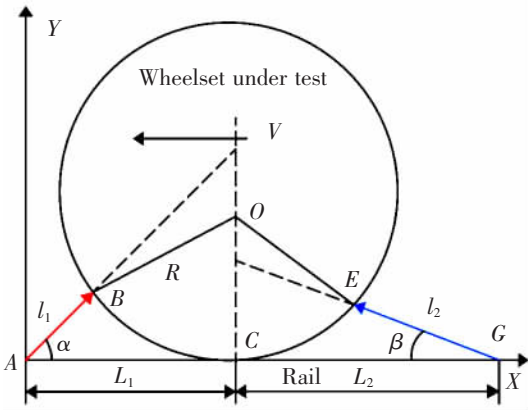


图6 双1D激光位移传感器测量原理

Fig.6 Schematic diagram of the diameter measurement using double 1D laser displacement transducer

摄像机采集图像,通过边缘检测、跟踪算法对图像进行出列和综合分析计算,实现车轮外形的关键尺寸参数以及边缘曲线的动态测量,最终得到车轮踏面的损伤信息。随着机器视觉技术的发展,激光传感器与摄像机的结合形成的结构光视觉传感器更为常用。成都车辆段与开发单位结合 CCD 图像检测技术和超声探伤技术联合研制出 LY 型车辆轮对动态检测装置并投入线路实装,基本实现普速客车车轮外形与擦伤检测功能<sup>[9]</sup>。张广军等<sup>[46]</sup>提出的结构光列车车轮直径测量系统实现了车速 100 km/h 时,踏面磨损测量误差为 0.18 mm,测量原理如图 7 所示。设置多套结构光传感器可获取车轮整个踏面轮廓,可用于车轮故障分析,谭志忠等<sup>[47]</sup>在钢轨内外侧设置多套结构光几何参数测量系统。此系统可拍摄车轮完整一周的踏面,经算法处理后可识别获取车轮几何参数及识别车轮擦伤故障。环境光的强弱是影响监测系统对车轮踏面损伤识准确率的重要因素。Ran 等<sup>[48]</sup>提出一种基于骨架提取的亚像素激

光条纹中心提取算法应用于结构光视觉传感器的车轮参数检测系统中,可显著降低复杂光照环境的干扰,提高测量精度。同时分析了动态检测引起的偏心误差对测量结果的影响并建立模型进行修正,提高了系统稳定性,且成功应用于铁路工务段。还有学者将激光传感器技术与机器视觉技术结合起来以期获得更为可靠高效的检测方法。He 等<sup>[49]</sup>提出了激光与机器视觉结合法的轮对几何参数检测方法,1D/2D 激光位移传感器分别确定车轮内侧空间位置和测量外侧踏面曲线,由于车轮轮缘内侧基本不产生磨损与擦伤,即可求出车轮直径、轮缘厚、轮缘高、磨损与内侧距等参数。该方法具有系统简单、成本低、系统可靠性好等优点。

基于激光、机器视觉及两者结合的检测方法实施起来较为简单,故障定位精准,分析结果可靠,且机器视觉技术广泛应用于车轮踏面检测领域<sup>[50-51]</sup>,具有良好发展前景。

### 2.3 声发射检测法

列车在钢轨上运行时,正常车轮与钢轨之间发出的声音是均匀而规则的。当车轮故障产生后,声音信号的规律性会被破坏,会发出不同的振动声音信号。利用传感器接收带有故障车轮与钢轨之间发出的不规则的声音信号并对该声音信号进行分析,就可判断出车轮是否存在损伤。早期日本开发的基于噪声检测法的检测系统,在轨旁安装 2 个声音传感器,一个传感器用于探测车轮与轨道间产生的振动噪声,另外一个用于探测背景声,通过对比两个传感器采集到的信号,可以从传感器采集到的声音波形中分辨出车轮是否带有踏面故障。市场比较常见的有 TADSTM, RailBAMTM 等声发射监测系统<sup>[52-53]</sup>,但其主要对车轮轴承进行故障诊断,而非车轮损伤。

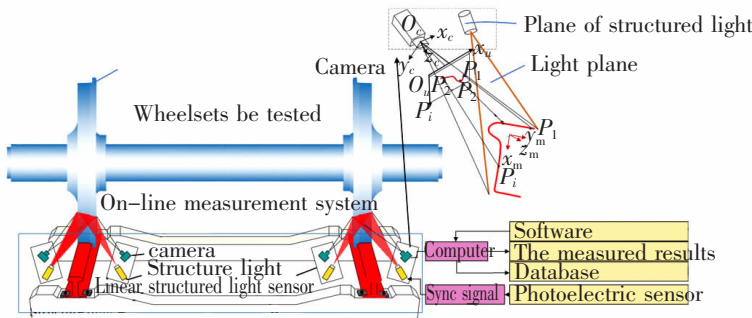


图7 基于结构光的车轮几何参数测量系统

Fig.7 Schematic diagram of the structured light-based wheel geometry measurement system



近年来,铁路行业对监测系统的实时性和最高测量速度有了更高要求,研究人员对声发射检测技术进行不断地改进。Bollas 等<sup>[54]</sup>对高频 AE 传感器在车轮状态动态检测中的应用进行了探讨。声发射检测技术也可用于钢轨裂纹检测中,Hao 等<sup>[55]</sup>利用 AE 技术检测高速铁路强轮轨噪声下的轮轨裂纹信号,并提出了一种 Hurst 指数改进型自适应谱线增强器,抑制了列车高速状态下的噪声,提高了信噪比,取得了良好的检测结果,其实验台如图 8 所示。对于此类非接触式的测量方法,改进其数据处理算法可获得更好的识别效果,Chen 等<sup>[56]</sup>提出了一种麦克风阵列信号处理方法用于识别故障车轮和定位,通过宽带加权多信号分类方法估计车轮转动过程中的声源位置,应用 Levenberg-Marquardt 和 Crank-Nicolson 方法得出相应的地面阻抗,再经过库尔特斯波束成型器确定损伤的准确位置,实验证明该方法可适用于车轮表面损伤产生的冲击噪声,且数值仿真和实验具有良好的的一致性。

声发射检测法的优点是系统安装简单,检测方式简单,但该方法测量精度受到限制,检测信号易被邻轮干扰,只能对车轮做定性检测。

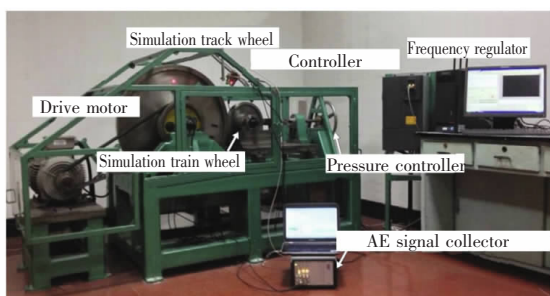


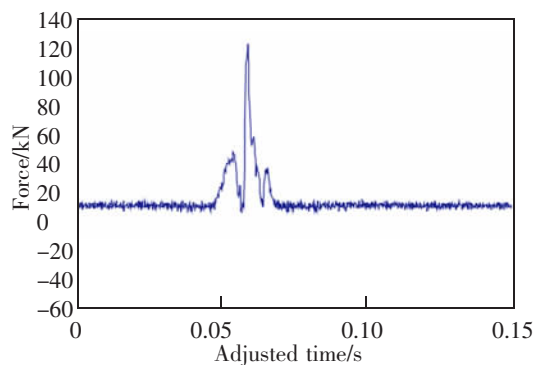
图 8 高速轮轨滚动接触模拟试验台

Fig.8 Simulation rig for high-speed wheel-rail rolling contact

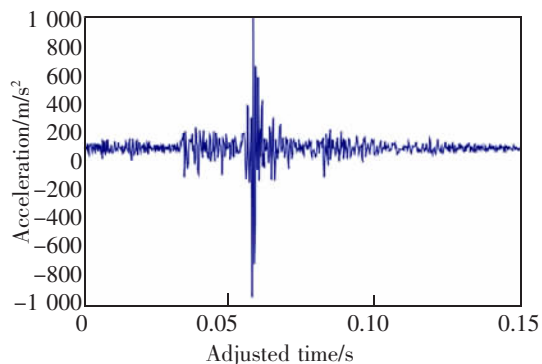
## 2.4 振动加速度法

基于振动加速度的检测方法主要是借助加速度传感器来测量由轮轨相互作用产生的冲击振动信号,进而通过时域分析、频域分析和模式识别等手段来判断车轮故障情况<sup>[57]</sup>。轨旁式动态检测中的振动加速度法则是将加速度传感器安装在钢轨上用于接收钢轨的振动信号,检测范围包括车轮整个圆周。Skarlatos 等<sup>[58]</sup>应用模糊逻辑方法来诊断铁路车路缺陷,利用装置在新铁轨的轨头外侧、轨腰和轨底的加速度传感器获取车轮驶过时的轨道振动

信号,将信号的振动幅度值、中心频带和列车速度作为输入进行分析以判断车轮缺陷等级,如良好、轻度损坏、故障和危险。并提出扩充数据库以获得更精准的测量结果。采用应变片构成的剪力桥无法做到对车轮全周长进行故障诊断,因而必须加入其他类型的传感器进行联合检测。Lee 和 Chiu<sup>[59]</sup>提出将测量的加速度振动信号转化为轮轨冲击力以克服此缺点,同时比较了通过加速度计和应变片剪力桥两种方法获取的轨道加速度与车轮冲击力大小之间的关系,应用反分析法和均方根法作为信号处理技术。研究发现,剪力桥法在计算应变计工作区域以内的冲击力方面表现良好,且不受车辆速度限制。图 9(a)和图 9(b)分别给出了应变片传感器和加速度计接收到的部分时域信号。从剪力桥在标定过程中获得的冲击的标准偏差来看,剪力桥的测量结果在其工作状态下不受列车速度和载荷的影响。赵蓉和史红梅<sup>[60]</sup>提出了一种基于高阶谱的 PSO-SVM 的车轮擦伤识别方法,并取得良好识别结果。振动加速度法能适应列车高低速运行,实现对车轮擦伤的判别。并且性能稳定,但难以避免来自邻轮的干扰。



(a) Signal 1



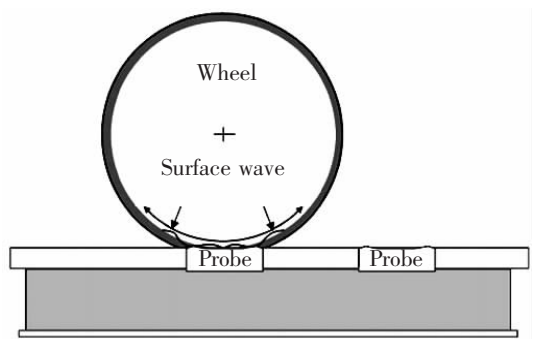
(b) Signal 2

图9 部分振动信号

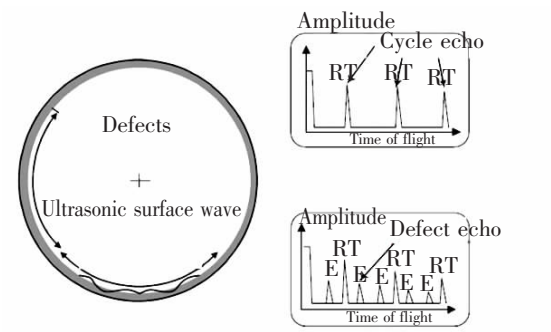
Fig.9 Partial vibration signal

## 2.5 超声波检测法

超声波检测法一般有超声测距法和电磁超声法两种。超声波在物体表面传播时以瑞利表面波为主,视材料特性,其仅在目标表面以下半个波长的深度传播,当遇到表面缺陷时超声波会受到阻挡而反射。利用超声波的这种原理,可实现对车轮表面缺陷进行检测。俄罗斯于上世纪90年代中期研制出基于超声测距法的轮对参数检测装置,但检测车速只能低于5 km/h。Salzburger等<sup>[63]</sup>提出了如图10(a)所示的基于电磁超声的轨旁动态检测系统,其主要手段是在钢轨合适的位置安装超声探头组,进行检测状态下,探头持续发出高频超声波信号,当车轮碾压到探头上时,若车轮表面完好则超声波会沿车轮运行一周,若车轮表面存在缺陷超声波传播则受到阻挡,被反射回发射探头,经处理则可确定缺陷位置,诊断结果如图10(b)所示。该法测量方便,但测量车速需低于15 km/h。铁路车辆车轮和轨道之间的接触条件对轮轨的寿命和列车行车安全至关重要,采用超声波反射测量法可有效测量轮轨状态。Brunskill等<sup>[62]</sup>在轨道上开口以安装超声波传感



(a) Sensor installation diagram



(b) diagnostic result

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.

图10 超声波检测技术

Fig.10 Ultrasonic technique

器来测试不同速度和负载下轮轨接触压力,利用准静态弹簧模型从反射的波形信号中提取轮轨接触面积和接触刚度信息,将数据处理后可得到轮轨接触力二维曲线图。然而,在钢轨上开口安装传感器会破坏钢轨的整体性,这将破坏钢轨的整体性,加大钢轨的局部接触应力,同时也影响列车运行质量和乘坐舒适度。为此,Zhou等<sup>[63]</sup>采取在轨腰上安装超声波阵列传感器来检测轮轨接触应力,从而得到轮轨接触应力在轨道分布云图,为检测车轮踏面状态提供基础依据。在此研究的基础上,Zhou等<sup>[64]</sup>提出一种新型的基于超声波反射测量法的短期和长期动态轮轨接触监测方法。并对超声波在钢轨中的传播途径及超声波元件的最佳安装位置和发射器-接收器的组合进行了深入的探索,研究表明该法可在列车轮严重磨损情况下检测多个接触点,且不需要改变轨道结构,但此法仍处在实验室阶段。

列车车轮超声波缺陷信号本身受缺陷本身性质、超声波衰减、踏面材质、踏面表面粗糙度、探头耦合效应和马氏体等因素影响,会导致计算机进行分析时,经常出现对缺陷大小的错误判定。故现阶段仍需对缺陷信号的波形分析和当量比较标准进行更多的研究和实验测试。超声波检测法的检测精度高,计算速度快,能够适应不同车速,但是系统设计复杂,安装实现困难,成本高。

## 2.6 光纤光栅技术法

布拉格光纤光栅(fibre bragg grating,FBG)传感器的工作原理是通过在相位掩模上将一截短光纤暴露于紫外线辐射,而后掩模图案将产生周期性折射率<sup>[65]</sup>,FBG传感器在受到机械应变和热应力变化的作用下,会导致反射光光谱中心波长变化,从而可从中心波长的变化反映外界物理量的变化。

FBG传感器具有无需电源布线,有强抗电磁干扰能力等特点,因此被广泛用于铁路检测系统中。在技术应用方面,国内外一些学者通过直接在轨旁加装FBG传感器来间接得到列车车轮健康状况信息。Lee等<sup>[66]</sup>利用FBG组成的系统来测定列车的脱轨率,同时评估了FBG传感器在计轴、列车识别和速度检测方面的能力。Wang等<sup>[67]</sup>在桥梁伸缩缝、轨腰、轨底板和混凝土板床安置了FBG传感器建立了一个轨道性能监测和安全预警系统,并且能够随着季节和温度的变化提供完整准确的轨道变化的长期数据。采用FBG传感技术还可同时对列车车轮和



钢轨健康状态进行实时监测,Roveri 等<sup>[68]</sup>沿 1.5 km 的铁轨安装 FBG 传感器建立了一套车轮和轨道粗糙度的识别检测系统,经频率滤波器、时域切分、时间和集合平均等手段处理数据后提取出每节车厢和轨道上的粗糙度信息,再由算法处理后即可确定轨道和车轮的磨损状态、列车速度和列车负载等,为铁路维修服务部门实时反映轨道和运行中的列车的健康状况。车轮多边形化是高速列车转向架结构异常振动的主要激扰源,可导致运营列车车辆关键部件的缺陷或故障,危害列车行驶安全,Liu 等<sup>[69]</sup>提出将 FBG 传感器粘于钢轨轨腰处建立了一种车轮状态监测系统,并结合了贝叶斯盲源分离的算法对信号进行处理,能够在通过的车轮组中识别出车轮局部缺陷和车轮多边形,预测车轮局部缺陷的位置。在线路上进行实测后,成功识别了偏差为 0.06 mm 的轻度车轮踏面损伤,监测结果与静态检测结果吻合良好,监测系统如图 11 所示。基于光纤光栅技术的检测系统稳定性较高,适用于高低速,但技术难度和造价偏高。

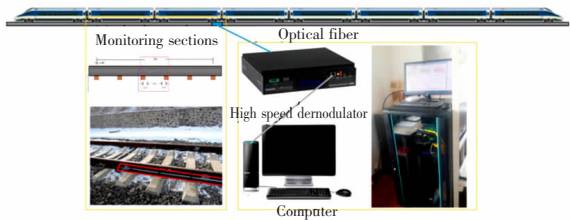


图 11 实际线路上的 FBG 监测系统  
Fig.11 On-line FBG detection systems

### 3 车载式动态检测法

车载式动态检测法是将检测系统安装在车辆上以获取车轮状态信息,进行车轮不间断监测。车载式检测系统传感器一般安装在轴箱上和转向架上,采用监测方法为轴箱振动加速度法(ABA)和光纤传感技术(FBG)。

#### 3.1 轴箱振动加速度法

将加速度传感器直接安装在车轮轴箱上,可以更直接的检测到车轮故障引起的振动信号。车辆轴箱振动信号比较复杂,因为它不仅包含车轮缺陷信息,还包括轨道状态信息,故障不能直观的反映出来。因此,如何从强背景噪声中有效地提取车轮特征是铁路车轮故障检测的关键问题。周璇等<sup>[70]</sup>通过

在滚动试验台的轴向上安装 3 个加速度传感器获取车轮踏面擦伤故障信号,对信号经验模式分解<sup>[71]</sup>(empirical mode decomposition, EMD)后得到本征模函数分量(intrinsic mode function, IMF),提取各阶 IMF 分量的能量和峭度特征以构建出特征向量并输入到神经网络中进行故障识别。结果显示车速在 200 km/h 内具有较高识别率。滚动试验台及传感器安装位置如图 12 所示。然而,EMD 算法存在模式混叠的缺点,会导致 IMF 在物理上不唯一,甚至失去意义, Li 等<sup>[72]</sup>提出了一种改进的 EMD 法并应用于模拟轴箱加速度振动信号和实测轴箱加速度振动信号中,通过实验对比后发现改进后的 EMD 法可抑制模式混叠现象,具有更高的抗噪性。在之后的工作中, Li 等<sup>[73]</sup>还提出了一种自适应多尺度形态滤波的算法用于提取轴箱振动信号中的特征分量,并用于识别车轮是否存在扁疤故障,研究结果表明所提出的方法能够实时诊断出车轮的扁疤,且这种技术可适用于铁路车轮实时监测系统中。陈博<sup>[74]</sup>将集合经验模态分解法<sup>[75]</sup>运用到车轮轴箱加速度振动信号处理中,采用基于遗传算法-支持向量机的车轮多边形识别方法并应用于构建的故障识别模型中,实验表明模型对多边形的识别效果良好。对算



(a) Rouing test rig



图 12 实验台  
Fig.12 Test rig

法进一步改进后, Song 等<sup>[15]</sup>采用改进的集合经验模式分解法和 Wingner-Ville 法对仿真得出的轴箱振动加速度信号进行处理。数值结果表明, 车辆最大轴箱加速度及其频率与车轮多边形的阶数之间存在定量关系。国内外学者还研究了除 EMD 算法外的其他方法在车轮故障识别中的应用, 邓金豪和金炜东<sup>[16]</sup>采用改进的自适应形态提升小波对实测轴箱垂向振动加速度信号进行分析, 有效的检测出车轮踏面擦伤。Bosso 等<sup>[76]</sup>提出了一种用于识别车轮损伤的算法并将其集成到车载故障诊断系统中用于车载应用。

轴箱加速度检测法能实现对在役列车车轮状态的实时监测, 检测精度较高并可依据实测信号通过各手段来对车轮故障进行定量定位识别, 是目前的研究热点。但此法数据采集通道多, 数据处理量大且仍停留在实验室阶段, 未见成规模、系统的实装应用。

### 3.2 光纤传感检测法

应用 FBG 传感器的监测技术可实现车载装备的车轮损伤识别。香港理工大学 Wang 等<sup>[77]</sup>利用装在列车转向的 FBG 传感器来获取应变数据, 开发了一种基于贝叶斯预测和动态线性模型 (dynamic linear model, DLM) 的车轮缺陷监测系统, 并经过了实验验证。在贝叶斯框架下, 通过制定 DLM 获取由应变监测数据得出的近似实际应力范围, 并得到下次观测的预测分布, 同时引出贝叶斯系数、最大累积贝叶斯系数和运行长度这 3 个指标进行离群值检测和变化点检测, 在确认变化点后, 通过对变化点前后的连续观测值进行贝叶斯假说检验, 执行损伤

评估, 最终实现车轮损伤实时监测。多检测技术融合使用可让信息呈现方式更加多元与形象, 有利于对车轮状态融合分析, 王其昂等<sup>[78]</sup>通过在线上车辆的轴箱处以如图 13 的方式布置双向加速度计和 FBG 应变计来获取列车轴箱加速度响应, 设计卷积神经网络机构, 对不同标签的数据展开训练, 进行损伤特征提取后实现了对高铁车轮损伤的高效识别, 开拓了神经网络在列车车轮损伤识别中的应用。

## 4 结束语

车轮踏面损伤普遍存在于铁路运输系统中, 车轮不圆与轨道不平顺耦合作用产生的强振动与强噪声严重影响车辆部分零件的服役寿命和列车动力学性能, 危害列车行车安全。本文从轨旁式检测法和车载式检测法方面, 总结和分析了目前国内外列车车轮踏面损伤实时监测方法发展情况, 得到结论如下。

- 1) 目前车轮踏面擦伤检测技术还处于不断的探索和发展中, 目前投入实际使用的车轮踏面擦伤检测方法检测精度不高。
- 2) 基于轴箱加速度的检测方法虽然成功的应用于一些实验室条件下的车轮损伤识别。然而, 并没有形成整套的设备, 无法在实际情况中充分应用。
- 3) 大多检测系统只适用于低速, 在实际运行的列车上实用性并不强。
- 4) 现阶段轨道车辆踏面损伤检测系统需要加快理论向应用的转化速度, 切实提高轨道交通关键装备的故障诊断及健康管理能力。

国内外铁路列车车轮状态检测技术有了一定成果, 但总体而言, 无论是理论研究还是实际系统的研制都还不够成熟, 仍有许多工作需要进一步开展:

- 1) 铁道列车车轮踏面检测系统中传感器的种类、位置和数量受结构、成本制约。传感器的布置工作需同时考虑技术要求和经济效益, 要求有足够的测试信息数据量, 使得踏面损伤检测方法在实际应用中面临阻碍。同时, 检测手段的易用性、实用性和兼容性的不完善是系统面临的主要困难, 解决该问题需要从提高损伤识别精度、优化系统结构、降低成本等多个角度考虑。

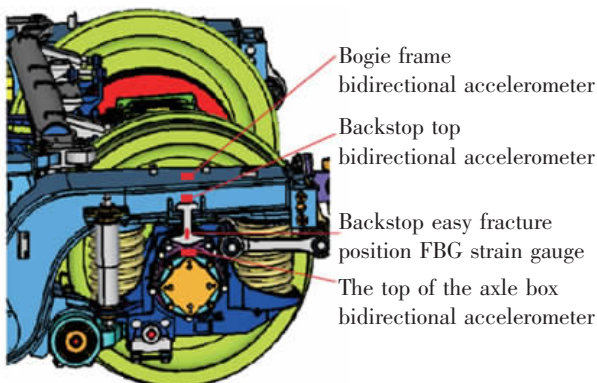


图 13 传感器布置

Fig.13 Layout of sensors installation

2) 车轮踏面损伤诊断方法的激励形式除了轮轨间相互的作用外还包含环境激励, 传感器接收的

信号中包含干扰源;而大部分检测方法都假定环境激励为一般的高斯白噪声激励,这与实际不符。因此,对于如何有效处理接收的非平稳信号,提高抗噪及识别准确度未来将开展进一步的研究。

3) 对于目前信号处理的各种智能算法仍处在实验室阶段,开展不同损伤诊断方法与算法相结合的应用研究,充分发挥各自的优势,以解决在实际环境中遇到的问题。

4) 现阶段对检测方法的研究还在以定量定位为主,而损伤诊断中还应包含故障预警与剩余寿命预测。准确的作出故障预警与剩余寿命预测,能在保证列车安全行驶的同时减少人力物力投入,降低维修成本。

5) 目前车轮镟修是及时消除多边形磨耗的关键手段。科学的镟修策略应基于车轮多边形磨耗实时精确监控技术确定合理的多边形深度镟修限界、准确预测车轮多边形的发展阶段及制定更经济性的状态修决策。这些都是目前需要进一步开展的工作。

6) 轨道车辆需要针对性的智能运维策略,继续发展基于车轮损伤识别技术的研究,实现状态感知、故障特征提取、挖掘和分析,加强与人工智能、大数据等新技术的融合,利用现代信号处理技术的方法,基于信号和基于知识的损伤识别技术研究。建立轮对全寿命周期跟踪管理功能的轮对运营状态智能管理系统,实现从人工检测、人工管理到自动在线监测、智能分析管理,不仅为轮对设计和管理提供设计与科学决策的依据,还能满足现代城市轨道交通和铁路发展的实际需求。

#### 参考文献:

- [1] 金学松,梁树林,陶功权,等. 高速铁路轮轨磨损特征、机理、影响和对策——车轮踏面横向磨耗[J]. 机械工程学报,2018,54(4):3-13.  
JIN X S,ZHAO G T,LIANG S L,et al. Characteristics, mechanisms, influences and counter measures of highspeed wheel/rail wear: transverse wear of wheel tread[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 3-13.
- [2] NIELSEN J C O,JOHANSSON A. Out-of-round railway wheels—a literature survey[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2000, 214(2): 79-91.
- [3] 敬霖,刘凯. 车轮踏面缺陷引起的轮轨动态响应综述[J].

交通运输工程学报,2021,21(1):285-315.

- JING L,LIU K. Review on wheel-rail dynamic responses caused by wheel tread defects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 285-315.
- [4] 张渝,王黎,高晓蓉,等. 国内外车轮踏面损伤检测技术综述[J]. 机车车辆工艺,2002(1):1-4.  
ZHANG Y,WANG L,GAO X R,etal. A review of wheel tread damage detection technologies in and out of China[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2002(1): 1-4.
- [5] 曾元辰,张卫华,宋冬利. 高速列车凹形磨耗及其动力学影响规律[J]. 铁道机车车辆,2018,38(4): 5-9.  
ZENG Y C,ZHANG W H,SONG D L. Wheel profile concave wear and its effect law on vehicle dynamics of high-speed trains[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(4): 5-9.
- [6] 宋颖. 高速车轮失圆对轮轨动力作用的影响及其监测方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.  
SONG Y. Study on influence of out-of-round high-speed railway wheels on wheel/rail interaction force and monitoring method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [7] 杨凯. 车轮踏面擦伤及不圆度检测技术的研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.  
YANG K. Research on detecting method of the wheel tread flat and out-of-roundness[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [8] 酒田登己惠等,高魁源译. 轮对尺寸、踏面形状的自动检测装置[J]. 国外铁道车辆,1997(5):54-57.
- [9] 张甬成. 车辆轮对动态检测装置—LY系列轮对动态检测系统的研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.  
ZHANG Y C. Wheel device for dynamic testing—LY series round of the dynamic detection system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [10] CHENG X Q,CHEN Y J,XING Z Y,et al. A novel online detection system for wheelset size in railway transportation [J]. Journal of Sensors, 2016: 9507213.
- [11] ALEMI A,CORMAN F,LODEWIJKS G. Condition monitoring approaches for the detection of railway wheel defects [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231(8): 961-981.
- [12] 汪群生,曾京,罗光兵,等. 车轮磨耗下车下悬挂系统振动特性研究[J]. 机械工程学报,2016,52(10):113-118.  
WANG Q S,ZENG J,LUO G B,et al. Study on vibration behavior of carbody underneath suspended systems under wheel profile wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 113-118.
- [13] 陈光雄,崔晓璐,王科. 高速列车车轮踏面非圆磨耗机理[J]. 西南交通大学学报,2016,51(2-3):244-50.  
CHEN G X,CUI X L,WANG K. Generation mechanism for polygonalization of wheel treads of high-speed trains



- [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2-3):244-50.
- [14] WANG J, SONG C, WU P, et al. Wheel reprofiling interval optimization based on dynamic behavior evolution for high speed trains[J]. Wear, 2016, 366:316-324.
- [15] SONG Y, LIANG L, DU Y L. Railway polygonized wheel detection based on numerical time-frequency analysis of axle-box acceleration[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5):1613.
- [16] 邓文豪, 金伟东. 一种基于自适应形态提升小波的车轮踏面擦伤识别新方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21):45-48.  
DENG W H, JIN W D. An improved adaptive morphological gradient lifting wavelet method for detecting high-speed train wheel tread scratch[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(21):45-48.
- [17] LIU W, MA W, LUO S, et al. Research into the problem of wheel tread spalling caused by wheelset longitudinal vibration[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(4):546-67.
- [18] LI Z, MOLODOVA M, NEZ A, et al. Improvements in axle box acceleration measurements for the detection of light squats in railway infrastructure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7):4385-4397.
- [19] 史红梅, 赵蓉, 余祖俊, 等. 基于钢轨振动响应分析的车轮扁疤检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10):24-28.  
SHI H M, ZHAO R, YU Z J, et al. Detection method for wheel flats based on rail vibration responses analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10):24-28.
- [20] 凌亮, 曹亚博, 肖新标, 等. 车轮擦伤对高速轮轨接触行为的影响[J]. 铁道学报, 2015, 37(7):32-39.  
LING L, CAO Y B, XIAO X B, et al. Effect of wheel flats on the high-speed wheel-rail contact behavior[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7):32-39.
- [21] STEENBERGEN M J M M. The role of the contact geometry in wheel-rail impact due to wheel flats: Part II [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8):713-717.
- [22] 查浩, 任尊松, 徐宁. 车轮扁疤激起的轴向轴承冲击特性[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4):165-173.  
ZHA H, REN Z R, XU N. Impact characteristics of axle box bearing due to wheel flat scars[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4):165-173.
- [23] 翟婉明. 铁路车轮扁疤的动力学效应[J]. 铁道车辆, 1994(7):1-5.  
ZHAI W M. Dynamic effect of flat scar on railway wheel[J]. Rolling Stock, 1994(7):1-5.
- [24] 张斌, 付秀琴. 铁路车轮、轮箍踏面剥离的类型及形成机理[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2):73-78.  
ZHANG B, FU X Q. Type and formation mechanism of railway wheel and tire tread spall[J]. China Railway Science, 2001, 22(2):73-78.
- [25] LIU W, MA W H, LUO S H, et al. Research into the problem of wheel tread spalling caused by wheelset longitudinal vibration[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(4):546-567.
- [26] 张军, 王雪萍, 马贺. 增黏砂对机车车轮踏面剥离影响的试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8):68-73.  
ZHANG J, WANG X P, MA H. Experimental study on influence of sanding on peeling of wheel tread of locomotive[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8):68-73.
- [27] 张关震, 任瑞铭, 吴斯, 等. 不均匀组织对高速动车组车轮踏面剥离损伤的影响[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(5):80-86.  
ZHANG G Z, REN R M, WU S, et al. Influence of non-uniform microstructure on shelling damage of wheel tread for high speed EMU[J]. China Railway Science, 2019, 40(5):80-86.
- [28] GAN F, DAI HY, CHI MR. Wheel-rail wear progression of high speed train with type S1002CN wheel treads[J]. Wear, 2015, 328:569-581.
- [29] TAO G Q, WANG L F, WEN Z F, et al. Experimental investigation into the mechanism of the polygonal wear of electric locomotive wheels[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(6):883-899.
- [30] 金学松, 吴越, 梁树林. 车轮非圆化磨耗问题研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1):1-14.  
JIN X S, WU Y, LIANG S L. Mechanisms and countermeasures of out-of-roundness wear on railway vehicle wheels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1):1-14.
- [31] 吴越, 韩健, 刘佳, 等. 高速列车车轮多边形磨耗对轮轨力和转向架振动行为的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4):37-46.  
WU Y, HAN J, LIU J, et al. Effect of high-speed train polygonal wheels on wheel/rail contact force and bogie vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4):37-46.
- [32] 金学松, 吴越, 梁树林, 等. 高速列车车轮多边形磨耗、机理、影响和对策分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(16):118-136.  
JIN X S, WU Y, LIANG S L, et al. Characteristics, mechanism, influences and countermeasures of polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(16):118-136.
- [33] 王方程, 迟宝全. 平轮在线自动检测方法综述[J]. 城市轨道交通研究, 2006(1):31-33.  
WANG F C, CHI B Q. On the on-line automatic detection method of flat wheel[J]. Urban Mass Transit, 2006(1):31-33.
- [34] WARD C P, WESTON P F, STEWART E J C, et al. Con-

- dition monitoring opportunities using vehicle-based sensors[J]. Proc IMechE, Part F: J Rail and Rapid Transit, 2011(225):202-218.
- [35] MILKOVIC D, SIMIC G, JAKOVljeVIC Z, et al. Wayside system for wheel-rail contact forces measurements[J]. Measurement, 2013, 46(9): 3308-3318.
- [36] NIELSEN J C, OSCARSSON J. Simulation of dynamic train-track interaction with state-dependent track properties[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2007, 7(3): 218-215.
- [37] JOHANSSON A, NIELSEN J C O. Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Rail and Rapid Transit, 2003, 217(2): 135-146.
- [38] PALO M, GALAR D, NORDMARK T, et al. Condition monitoring at the wheel/rail interface for decision-making support. Proc IMechE, Part F: J Rail and Rapid Transit, 2014, 228: 705-715.
- [39] PEDRO U, SERGIO M, JAVIER F, et al. Wheel-rail contact force measurement using strain gauges and distance lasers on a scaled railway vehicle[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2020, 138(2020): 106555.
- [40] DANNESKIOLD-SAMSOE U. Apparentus for track-based detection of the wheel profile of passing railwat wheels: 4932784[P].1990.
- [41] NAUMANN H J. Wheelset sensing system:US, US 5935737 [P]. 1999.
- [42] 冯其波, 张志峰, 陈士谦, 等. 一种激光位移传感器动态测量列车车轮直径的新方法[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1059-1062.
- FENG Q B, ZHANG Z F, CHEN S Q, et al. A novel method for dynamically measuring diameters of train wheels using laser displacement transducers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7): 1059-1062.
- [43] 冯其波, 杨婧, 郑发家. 列车轮对几何参数与缺陷动态测量[J]. 计测技术, 2018, 38(3): 120-129.
- FENG Q B, YANG J, ZHENG F J. Research on dynamic measurement of geometric parameters and defects of train wheelsets[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(3): 120-129.
- [44] ZHENG F Z, ZHANG B, GAO R, et al. A High-precision method for dynamically measuring train wheel diameter using three laser displacement transducers[J]. Sensor, 2019, 19(19): 4148.
- [45] 徐志军, 陈建政. 基于图像处理和 Hough 变换的轮对踏面轮廓检测方法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 117-121.
- XU Z J, CHEN J Z. Tread profile of wheel detection method based image processing and Hough transform[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(6): 117-121.
- [46] CHEN X, SUN J H, LIU Z. Dynamic tread wear measurement method for train wheels against vibrations[J]. Applied Optics, 2015, 54(17): 5270-5280.
- [47] 谭志忠, 赵晓华, 刘刚, 等. 列车车轮踏面擦伤检测方法: CN107150700A[P]. 2017-9-12.
- [48] RAN Y, HE Q, FENG Q B, et al. High-accuracy on-site measurement of wheel tread geometric parameters by line-structured light vision sensor [J]. IEEE Access, 2021, 9: 52590-52600.
- [49] HE H T, SHAO S Y, FENG Q B. Online measurement for geometrical parameters based on 2D laser sensor[C]//The Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, Changsha: International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [50] 侯涛, 张志腾. 改进 Canny 算子在列车车轮踏面损伤检测中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 2107-2112.
- HOU T, ZHANG Z T. Improve the application of the Canny algorithm in the detection of wheel tread damage [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 2107-2112.
- [51] BERNAL E J, MARTINOD R M, BETANCUR G R. Partial-profilegram reconstruction method to measure the geometric parameters of wheels in dynamic condition[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(5): 606-616.
- [52] LU S, HE Q, HU F, et al. Sequential multiscale noise tuning stochastic resonance for train bearing fault diagnosis in an embedded system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 63(1): 106-116.
- [53] WANG J, HE Q, KONG F. A new synthetic detection technique for trackside acoustic identification of railroad roller bearing defects[J]. Applied Acoustics, 2014, 85(4): 69-81.
- [54] BOLLAS K, PAPASALOUROS D, KOUROUSIS D, et al. Acoustic emission monitoring of wheel sets on moving trains[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 1266-1272.
- [55] HAO Q S, SHEN Y, WANG Y, et al. An adaptive extraction method for rail crack acoustic emission signal under strong wheel-rail rolling noise of high-speed railway[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 154: 107546.
- [56] CHEN L, CHOY Y S, TAM K C, et al. Hybrid microphone array signal processing approach for faulty wheel identification and ground impedance estimation in wheel/rail system[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107633.
- [57] BELOTTI V, CRENNNA F, MICHELINI R C, et al. Wheel-

- flat diagnostic tool via wavelet transform[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(8): 1953–1966.
- [58] SKARLATOS D, KARAKASIS K, TROCHIDIS A. Railway wheel fault diagnosis using a fuzzy–logic method[J]. *Applied Acoustics* 2004, 65(10): 951–966.
- [59] LEE M L, CHIU W K. Determination of railway vertical wheel impact magnitudes: field trials [J]. *Structural Health Monitoring*, 2007, 6(1): 49–65.
- [60] 赵蓉, 史红梅. 基于高阶谱特征提取的高速列车车轮擦伤识别算法研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(6): 102–109. ZHAO R, SHI H M. Research on wheel–flat recognition algorithm for high–speed train based on high–order spectrum feature extraction[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(6): 102–109.
- [61] SALZBURGER H J, SCHUPPMANN M, LI W, et al. In–motion ultrasonic testing of the tread of high–speed railway wheels using the inspection system AUROPA III[J]. *Insight*, 2009, 51(7): 370–372.
- [62] BRUNSKILL H, HUNTER A, ZHOU L, et al. An evaluation of ultrasonic arrays for the static and dynamic measurement of wheel rail contact pressure and area[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2020: 1–14.
- [63] ZHOU L, BRUNSKILL H, PLETZ M, et al. Real–time measurement of dynamic wheel–rail contacts using ultrasonic reflectometry[J]. *Journal of Tribology–transactions of The Asme*, 2019, 141(6): 061401.
- [64] ZHOU L, BRUNSKILL HP, LEWIS R. Real–time non–invasive measurement and monitoring of wheel–rail contact using ultrasonic reflectometry[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(5/6): 1953–1965.
- [65] 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 Sensor*, 2012, 2012: 1–7.
- [66] LEE K Y, LEE K K, HO S L. Exploration of using FBG sensor for derailment detector[J]. *WSEAS Trans Top Syst*, 2004, 3: 2344–2439.
- [67] WANG C Y, TSAI H C, CHEN C S, et al. Railway track performance monitoring and safety warning system [J]. *American Society of Civil Engineers*, 2011, 25(6): 577–586.
- [68] ROVERI N, CARCATERRA C, SESTIERI A. Real–time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 60: 14–28.
- [69] LIU X Z, XU C, NI Y Q. Wayside detection of wheel minor defects in high–speed trains by a Bayesian blind source separation method[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 3981.
- [70] 周璇, 陈光雄, 赵鑫. 基于经验模式分解和神经网络的车轮踏面擦伤检测方法[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(6): 13–18. ZHOU X, CHEN G X, ZHAO X. Fault diagnosis of wheel thread flats based on empirical mode decomposition and ANNs[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(6): 13–18.
- [71] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non–stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1998, 454A: 903–995.
- [72] LI Y F, LIU J X, WANG Y. Railway Wheel flat detection based on improved empirical mode decomposition[J]. *Shock and Vibration*, 2016: 4879283.
- [73] LI Y F, ZUO M J, LIN J H, et al. Fault detection method for railway wheel flat using an adaptive multiscale morphological filter[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 84(2017): 642–658.
- [74] 陈博. 高速车轮多边形的检测与识别方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018. CHEN B. Study on detection and diagnosis method of wheel polygonization of high–speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [75] 郑旭. 车辆与内燃机振声信号盲分离及噪声源识别的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. ZHENG X. Research on blind separation and noise source identification for the vibro–acoustic signals of vehicle and engine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [76] BOSSO N, GUGLIOTTA A, ZAMPIERI N. Wheel flat detection algorithm for onboard diagnostic[J]. *Measurement*, 2018, 123: 193–202.
- [77] WANG Y W, NI Y Q, WANG X. Real–time defect detection of high–speed train wheels by using Bayesian forecasting and dynamic model[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2020, 139: 10665.
- [78] 王其昂, 王腾, 倪一清. 基于卷积神经网络的高铁车轮损伤识别方法研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(4): 781–787. WANG Q A, WANG T, NI Y Q. Damage detection of wheels for high–speed rail based on convolutional neural network[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(4): 781–787.





特约专家徐长节:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委副书记、副校长(主持行政工作),教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年基金获得者,“万人计划”科技领军人才,国家百千万人才工程入选者,国务院特殊津贴获得者。主持及参与国家及省部级科研项目 10 余项、工程项目 100 余项。获国家科技进步二等奖等。



特约专家陈梦成:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委委员、副校长,江西省先进工作者,中国优秀留学回归人员,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队学术带头人。主持完成及在研国家 973、国家自然科学基金江西省等各类科研项目 30 余项;发表学术论文 400 余篇。获省部级奖项 5 项等。



特约专家刘林芽:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,国家百千万人才工程国家级人选,教育部新世纪优秀人才,享受国务院特殊津贴专家,赣鄱英才 555 工程领军人才,主持国家自然科学基金、教育部等各类科研项目 50 余项。获国家科技进步二等奖,江西省自然科学一等奖等奖项 11 项。



特约专家杨辉:男,二级教授,博士生导师。新世纪百千万人才工程国家级人选,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队领军人才,获国务院特殊津贴、江西省突出贡献人才等荣誉,现任华东交通大学副校长,江西省人大常委。获江西省自然科学奖一等奖、江西省技术发明一等奖等省部级奖项 7 项。



特约专家罗文俊:女,教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,防灾减灾研究所所长。教育部青年长江学者,江西省主要学科学术及技术带头人,首批江西省青年井岗学者,享受国务院特殊津贴专家。主持国家自然科学基金 4 项,省部级科研课题 10 余项。获教育部科技进步二等奖 2 项,江西省科技进步一等奖等。



特约专家刘燕德:女,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学首席教授,华东交通大学首批天佑学者,智能机电装备创新研究院院长,第三批国家“万人计划”领军人才,科技部重点领域创新团队负责人,江西省光电检测工程技术中心主任等。获江西省科技进步一等奖、江西省自然科学二等奖等省部级奖项 8 项。



特约专家宋立军:男,教授,博士生导师,智能激光制造湖南省重点实验室主任。研究方向:激光智能制造(3D 打印、超快激光微纳制造)、激光光谱学、激光制造材料科学、传感及控制。主持及参与多项国家自然科学基金、湖南省等各类科研项目。获中国机械工业联合会和中国机械工程学会一等奖等。



特约专家肖乾:男,教授,博士生导师。现任华东交通大学机电与车辆工程学院院长,华东交通大学天佑拔尖人才,江西省百千万人才工程入选,获全国詹天佑铁道科学技术奖青年奖、茅以升铁道科学技术奖、江西省科技进步一等奖等。近 5 年来,主持国家自然科学基金 3 项,省部级科研课题多项以及企业横向课题等近 20 项。