doi：10. 11823/j. issn. 1674 - 5795. 2018. 03. 09

列车轮对几何参数与缺陷动态测量

冯其波[1]，杨婧[1]，郑发家[1]，赵晓华[2]

（1. 北京交通大学 理学院光电检测技术研究所，北京 100044；2. 东莞市诺丽电子科技有限公司，广东 东莞 523050）

摘　要：轮对是列车运动和受力的主要部件，轮对故障是列车安全运营的一大隐患。对轮对几何参数与缺陷进行快速、准确的测量，可有效降低事故率和维修成本，为轮轨设计与制造提供科学的决策依据，已成为世界各国相关领域的研究重点。本文在简述轮对几何参数检测发展现状的基础上，主要介绍我们近 20 年来在轮对几何参数与缺陷动态在线检测方面的工作，我们率先提出平行四边形机构定量测量轮对踏面擦伤与圆周磨耗原理，进而提出使用一维激光位移传感器高精度动态测量踏面直径、多线激光测量车轮几何参数与缺陷等方法，研制了几种不同类型的轮对在线测量系统应用于铁路现场。论文最后讨论了轮对检测未来的发展趋势。

关键词：轮对；几何参数；缺陷；动态测量

中图分类号：TB92；TN 249；TP 212　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674 - 5795(2018)03 - 00120 - 10

Research on Dynamic Measurement of Geometric Parameters and Defects of Train Wheelsets

FENG Qibo[1]，YANG Jing[1]，ZHENG Fajia[1]，ZHAO Xiaohua[2]

（1. Institute of Optoelectronic Measurement and Control Technology School of Science，Beijing Jiaotong University，Beijing 100044，China；
2. Dongguan Noni Electronic Technology Limited，Dongguan 523050，China）

Abstract：Wheelsets are the main movement and stress component of trains. Wheelset fault is one of the main causes that threaten the safety of trains. The rapid and accurate measurement of the geometric parameters and defects of wheelset can effectively reduce the accident rate and the maintenance cost，and provide the scientific decision-making basis for the design and manufacture of wheel and rail. Therefore it has become the research focus in the relevant fields of the world. In this paper，based on a brief description of the development of wheelset geometric parameter detection，our work in the dynamic measurement of geometric parameters and defects in the past 20 years is introduced. We first proposed the principle for quantitatively measuring the wheel tread abrade and abrasion using a parallelogram mechanism，and then put forward methods for accurately measuring the tread diameter by one-dimensional laser displacement sensors and the method for measuring geometric parameters and defects by multi-line lasers. We also developed several different types of wheelsets on-line measurement systems that have been applied to the railway site. The development trend of wheelset inspection is discussed as well in the end of this paper.

Key words：wheelset；geometric parameters；wheel defects；dynamic measurement

0　引言

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方便，但同时给铁路和城市轨道交通的运行安全带来了巨大的挑战。世界各国的高速铁路和城市轨道交通均发生过不同程度的列车脱轨事故，造成不同程度的人员伤亡和财产损失，其中最为灾难性的当数 1998 年德国高速列车由轮对故障引起的脱轨事故和我国 723 温州动车事故。造成高速列车事故的主要原因包括：人为因素、控制系统失灵、铁路重要零部件损伤、轮轨配合异常等。根据美国联邦铁路局安全分析办公室官方网站的调查数据显示，美国自 1975 年以来，机械与电气故障引起 25884 起铁路事故、造成经济损失 21. 13 亿美元，其中 19% 的事故以及 27% 的经济损失由轮对故障引起[1]。一项数据显示，2013 年北美铁路货车修理费用超过 12 亿美元，其中车轮踏面损伤比例达到 56%[2]。

由此可见，轮对质量优劣对铁路和城市轨道交通运行安全有至关重要的影响。及时对已损坏轮对进行检修，可以有效降低事故发生率、提高列车利用率；对轮对几何参数进行长期跟踪监测，可以为轮对设计与制造、运用与维修、轮轨磨耗预测以及钢轨型面优化提供科学决策的依据。因此，如何对轮对几何参数与擦伤进行快速、准确的测量，成为轨道交通领域迫切需要解决的问题，也是此领域科技人员长期研究的

重大课题。到目前为止，轮对几何参数与擦伤测量经历了人工测量、离线自动测量与在线测量三个阶段。

人工测量：通过轮径尺、第四检查器等工具[3]手动测量轮对几何参数。存在测量误差大、效率低等不足，不能准确、快速获取所有列车轮对的几何状态，造成轮对“带伤工作”，存在较大的安全隐患。

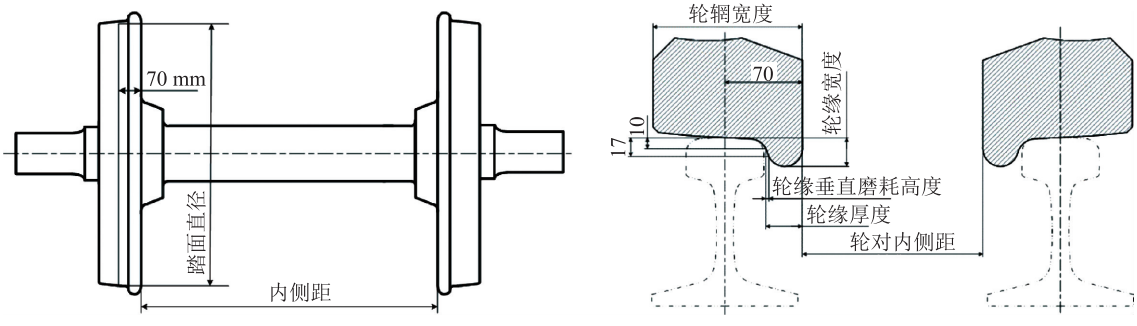
离线自动测量：即列车运行一定周期后强制送到工厂，将所有轮对从车体上卸下，送入自动检测装置自动测量轮对参数。离线自动测量主要采用激光器和CCD摄像头构建的激光机器视觉系统[4]，通过测量系统时得到轮对踏面轮廓，经过处理得到轮对的各种尺寸。离线测量与定期检测制度联系在一起。定期检修制度一方面不能及时发现列车轮对故障，造成轮对“带伤工作”，构成安全隐患；另一方面使轮对没有故障也要强制检修，造成财力物力的浪费。这种定期检修制度无法满足我国高速铁路和城市轨道交通快速发展的需要，因此基于轮对几何参数在线测量的状态修成为世界发达国家的管理模式。

在线动态测量：即利用轨边测量系统动态测量所有通过的列车轮对参数。该方法不仅可以实时快速准确获取列车轮对几何参数，而且对超限轮对及时更换、实现状态修，既保证了列车的安全运营，又提高了轮对的使用效率，成为目前国内外轮对几何参数测量的发展趋势。在线动态测量主要采用激光传感法、机器视觉法或激光传感与机器视觉相结合的方法。

本论文就轮对状态参数定义进行介绍，概述国内外轮对几何参数与擦伤测量方法，分析各种方法的优缺点，介绍近20年来我们在轮对几何参数与缺陷动态在线检测方面的工作，并讨论未来轮对检测的发展趋势。

1　轮对状态参数定义

如图1（a)所示，将两个相同的车轮和一根车轴压装在一起形成的整体即为轮对。轮对是机车和车辆最重要的运动部件，车轮与钢轨的接触部分称为踏面，车轮踏面内侧有一沿圆周突起的凸缘称为轮缘[5-6]，如图1(6)所示。轮对状态参数分为几何尺寸(车轮直径、轮缘厚、轮缘高度、QR值、轮辋宽、踏面磨耗、内侧距，见图1)、位置和形状(踏面滚动圆不圆度、内侧面平行度、轮廓)、缺陷(擦伤、剥离与损伤)三类。



（a）轮对　　（b）轮对踏面放大图

图1　轮对几何参数的定义

列车运行一段时间后，轮对踏面会发生磨损，出现轮对参数异常、磨耗超限、擦伤、裂纹等情况。尺寸超限影响轮轨配合，可能造成脱轨；擦伤引起振动和冲击，对线路固定设施(如轨道结构、桥梁等)及车辆结构造成了极大的损害，加大了维修成本；损伤和裂纹可造成轮对开裂和列车重大事故。要保证轨道交通的运行安全、降低系统的维护成本，需要通过检测判断轮对是否存在内部缺陷、轮对与钢轨的位置及配合是否存在异常。需要测量的轮对主要几何参数有：

车轮直径：踏面上距离车轮内侧面70 mm处为基点，通过基点且垂直于车轴形成的圆称为滚动圆，滚动圆的直径即车轮踏面直径。

轮缘厚度：做一条垂直于车轮内侧面的直线，并使直线与基点的距离为12 mm，直线和轮缘相交，两交点之间的距离称为轮缘厚度。

轮辋宽：车轮的内侧面是在生产车间中加工车轮时的基准面，内、外侧面之间的距离被定义为轮辋宽。

踏面磨耗：使用后的轮对踏面基点与标准踏面基点之间的垂直距离[5-6]。

2　轮对几何尺寸测量方法

轮对几何尺寸、位置和形状都属于几何量，测量方法比较类似，目前主要采用激光传感法[7-10]、机器

视觉法[11-20]、激光传感与机器视觉结合法[21]进行测量。由于直径测量属于大尺寸测量，且其测量精度受车轮姿态影响较大，成为轮对几何参数测量的重点与难点。根据以上分类，对轮对几何参数和直径的测量方法进行介绍。

2.1　激光传感器法

1990 年，Danneskiold－samsoe U 等人提出一种基于激光传感器的列车车轮踏面磨耗测量方法[7]：列车车轮经过时，外侧 1D 激光位移传感器测量一条踏面轮廓曲线，内侧 1D 激光传感器测量内侧面位置，修正测量的轮廓曲线，可降低蛇行对测量结果的影响，对比修正后的踏面轮廓曲线与标准轮廓曲线，得出踏面磨耗。当列车以 30～100 km/h 速度经过时，磨耗测量精度为 0.1 mm。该方法结构简单、测量速度快、精度高，但测量精度受车速影响。设置多套外侧激光位移传感器可以在一瞬间得到踏面轮廓曲线上的多个点，可不受车速影响，但成本大大提高。

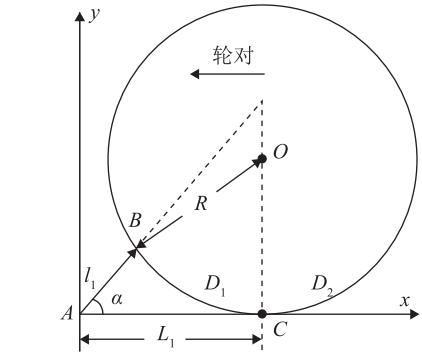
1998 年，Naumann H J 研制出一套基于多个 1D 激光位移传感器的列车车轮几何参数测量系统[8]：列车经过时，多个 1D 激光位移传感器发射的激光分别投射到车轮轮廓不同位置，通过对各传感器测得结果进行处理，获得轮对几何参数。该系统安装于轨边时，可以判断速度高于 72 km/h 的列车是否有磨耗过大的车轮；该系统安装于车间时，可以测量速度低于 9.6 km/h的列车轮对的轮缘高、轮缘厚、轮辋宽、直径以及磨耗等参数。

2008 年起，我们提出多种基于激光传感的车轮直径测量方法[9-10]，精度从最初的 1.5 mm 提高到 0.3 mm。

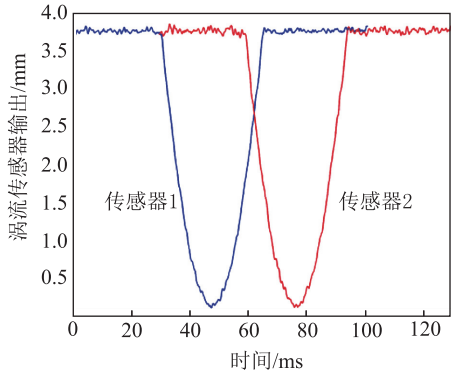
单 1D 激光位移传感器测量方法如图 2(a)所示。1D 激光位移传感器在原点 A 以 α 角度出射的激光照射在车轮踏面上，在 B 点形成光斑，得到原点 A 与 B 点间距 l_1；设车轮圆周的最低点与 x 轴(即钢轨)相切于 C 点，C 点与 A 点相距 L_1。将 B 点坐标($l_1\cos\alpha$，$l_1\sin\alpha$)与 C 点坐标(L_1，0)代入车轮圆周方程$(x-L_1)^2+(y-R)^2=R^2$，有

$$R=\frac{(L_1+l_1)}{2l_1\sin\alpha}-\frac{L_1}{\tan\alpha} \tag{1}$$

已知 1D 激光位移传感器安装角 α，当车轮到达 C 点时测量 l_1即可根据式(1)得到车轮半径 R。在 C 点设置一个涡流传感器时，通过判断传感器输出曲线最低点定位车轮。由图 2(b)可以看出，越靠近最低点输出曲线变化越缓慢，导致定位精度相对较低。若在图 2(a)中沿 C 点对称的 D_1，D_2两点分别设置两个涡流传感器，当车轮位于 C 点时两个涡流传感器的曲线斜率较大，通过两个涡流传感器差分后的过零点定位车轮，可提高沿 x 轴方向的定位精度[10]，从而提高测量直径的精度。



(a) 测量原理



(b) 双涡流传感器输出曲线

图 2　单 1D 激光位移传感器直径测量

图 2(a)和式(1)成立的前提是准确定位车轮最低点即 C 点。通过双涡流差分定位可以提高沿 x 轴方向的定位精度，但无法减小由于车轮姿态与蛇形引入的横向定位误差。为此我们提出如图 3(a)所示的双 1D 激光位移传感器测量方法：在与 C 点相距 L_2的 G 点上增加一个 1D 激光位移传感器，以 β 角度出射的激光照射在车轮踏面的 E 点上，得到 G，E 两点间距 l_2。与式(1)类似，根据 E 点与 C 点计算车轮半径 R。

$$R=\frac{(L_2+l_2)}{2l_2\sin\beta}-\frac{L_2}{\tan\beta} \tag{2}$$

取式(1)、式(2)平均值作为被测车轮半径 R。

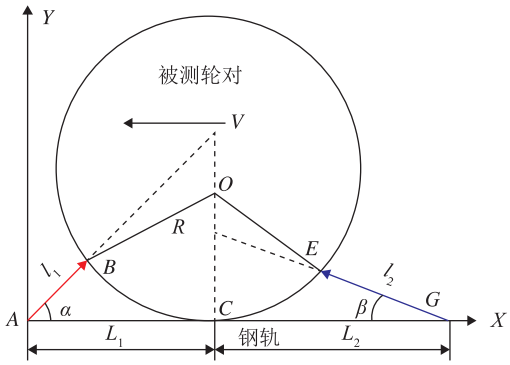
$$R=\frac{L_1^2+l_1^2}{4l_1\sin\alpha}-\frac{L_1}{2\tan\alpha}+\frac{L_2^2+l_2^2}{4l_2\sin\beta}-\frac{L_2}{2\tan\beta} \tag{3}$$

若 $\alpha=\beta$，$L=L_1=L_2$，可将式(3)进一步简化为

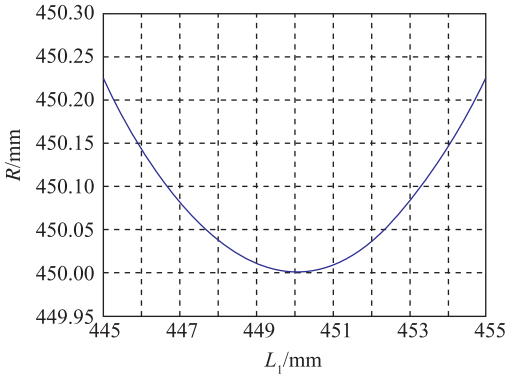
$$R=\frac{l_1+l_2}{4l_1\sin\alpha}\left(1+\frac{L}{l_1l_2}\right)-\frac{L}{\tan\alpha} \tag{4}$$

当 $R=450$ mm，$L=450$ mm，$\alpha=\beta=45°$时，由于

涡流位移传感器横向定位不准造成的半径测量误差的仿真计算结果如图3(b)所示：当涡流位移传感器横向定位误差在 ±4 mm 内时，造成的半径测量误差小于0.2 mm。



（a）测量原理

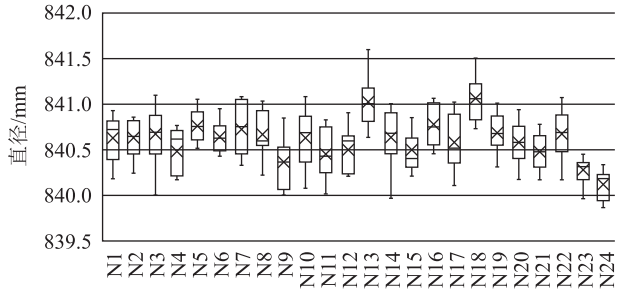


（b）车轮横向定位误差对测量结果的影响

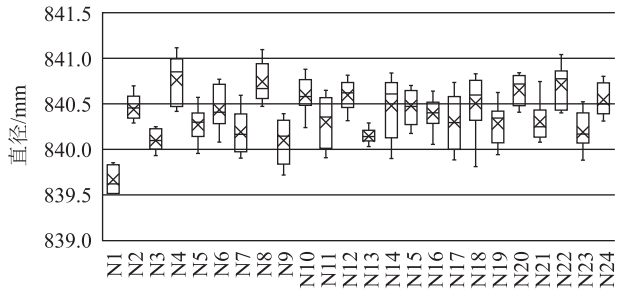
图3　双1D激光位移传感器直径测量

当给定半径的车轮沿一个方向运动时，其中的一个1D激光位移传感器的输出在增加，而另一个1D激光位移传感器的输出在减少，结果使得两个1D激光位移传感器的输出之和基本不变。经过实验发现，通过输出之和最低点也可以实现车轮定位，得到被测直径的大小，涡流传感器可以去掉。

考虑到实际安装时，很难保证双1D激光位移传感器与涡流传感器共面，为了进一步提高测量精度，故提出三点测圆法：通过机械加工保证三个激光位移传感器位于同一平面，测量同一踏面滚动圆上三点的空间坐标，根据三点坐标拟合得到滚动圆方程，从而得到轮对直径。通过该方法对同一辆地铁车辆(含24组轮对)9次入库时进行轮对直径测量，其结果如图4所示。左右两侧车轮实测精度分别为0.37 mm与0.31 mm，明显高于国内外产品标称0.5 mm精度，解决了踏面直径高精度动态测量关键问题。



（a）左侧车轮直径9次测量结果



（b）右侧车轮直径9次测量结果

图4　现场同一辆车(24组轮对)9次测量结果图

2.2　机器视觉法

上世纪90年代，Ionescu Octavian 用缝隙式照明装置结合摄像机的方法实现了最大速度为10～12 km/h的车轮轮廓与磨耗的在线测量[11]。随着机器视觉测量技术的发展，基于结构光的测量成为常用的轮对几何参数在线测量方法，测量系统如图5所示，激光器与摄像机构成结构光视觉传感器，两个结构光视觉传感器分别安装于钢轨内外两侧，同时测量得到一条完整车轮轮廓曲线，与标准车轮轮廓对比，可得到直径、轮缘厚、轮辋宽、踏面磨耗等参数。

2015年张广军等人利用该原理，实现了车速100 km/h时，踏面磨耗测量误差为0.18 mm[14]。在此基础上提出的结构光车轮直径测量系统，通过拟合车轮踏面圆上均匀分布的八个特征点得到车轮直径[15]，结合全局标定技术[22－23]，在车速小于80 km/h时，直径测量极限误差为0.54 mm。

传统的结构光测量方法一次只能获得一条车轮轮廓，当采用车轮轮廓计算直径时，需要设置多套结构光视觉传感器拍摄多幅图像，增加系统成本。张渝等人提出将正弦条纹光投射到轮对踏面，利用小波变换轮廓术实现车轮表面三维重构，拍摄几幅图像就可实现车轮几何参数与擦伤检测[16]。该方法重建精度受条纹方向影响，仅进行了实验室实验，并未用于实际测量。

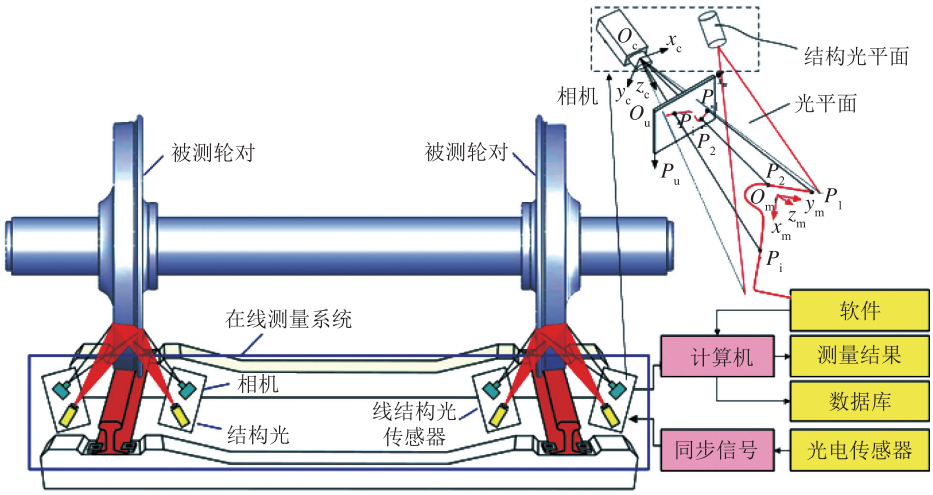


图 5　基于结构光的车轮参数检测系统[14]

经过对结构光轮对几何参数动态测量多年的研究，目前，提出图 6 所示的一体化结构光的轮对几何参数测量方法：对结构光视觉传感器进行一体化封装，当列车经过时，可减小由于震动引入的测量误差。此外，采用“张正友标定”法，通过拍摄三幅以上的棋盘格图像，对现场的结构光视觉传感器进行标定，得到传感器的内参、外参和畸变系数，对传感器进行校准并获得三维重建的基础。

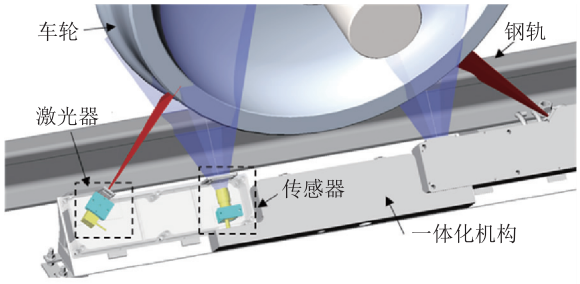


图 6　一体化结构光车轮参数检测装置

基于结构光的轮廓测量方法难点在于激光器投射的激光平面与被测轮对圆心不重合。造成结构光不过圆心的主要原因(如图 7 所示)：①被测车轮直径不一致，例如针对直径为 $2R$ 的标准车轮设计的结构光测量系统，当标准轮通过定位点 C 点时，结构光过圆心 O，当直径为 $2R'$的磨耗轮通过定位点 C 点时，结构光不过圆心 O'；②由于机械加工与安装引入的误差，结构光实际出射角度 α'与设计角度 α 不一致，也会导致结构光不过圆心；③由于定位不准导致结构光不过圆心。当结构光不过车轮圆心时，测得的轮廓与被测车轮踏面轮廓存在一定的坐标平移与旋转，给测量结果带来误差。为了修正这一误差，需要精确测量安装参数 α 和车轮直径，提高车轮定位精度。在我们研制的轮对几何参数与缺陷动态测量系统中包含高精度的车轮直径测量系统，可根据该系统测得的车轮直径，结合安装参数，对结构光不过圆心进行动态修正。

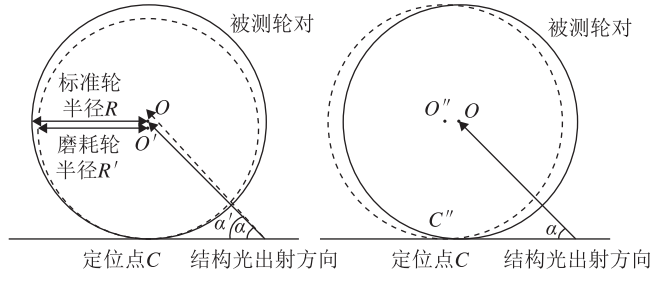


图 7　结构光不过车轮圆心示意图

为此，我们提出一种基于多线结构光的轮对几何参数动态测量系统[17]，其基本结构如图 8 所示，包括一个定位传感器与两个对称分布的多线结构光视觉传感器。多线结构光视觉传感器由一个多线激光器和一个摄像机组成。列车经过时，定位传感器触发多线结构光视觉传感器拍摄包含如图 9 所示多线结构光光条的车轮轮廓信息，通过算法可以成功提取大部分光条。若干组基本结构分布在轨道的内外侧，形成一个检测区域，轮对在检测区域转动一周后，若干多线结构光视觉传感器完成对车轮踏面不同区域的拍摄，对所有图像进行融合与三维重建后，可以得到整个轮对的完整轮廓，与标准轮廓相比，得到车轮几何参数。目前，该方法实验室测得直径、轮缘高与轮缘厚的极限误差分别为 ± 0.38，± 0.06，± 0.21 mm。

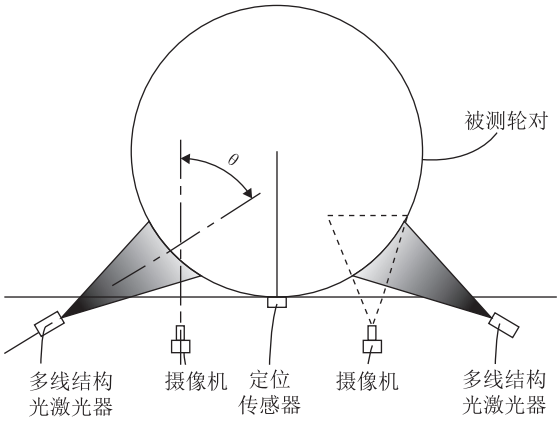
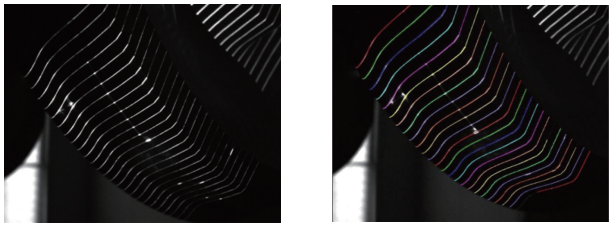


图 8　基于多线结构光的轮对状态自动测量系统



（a）拍摄图像　　（b）光条提取

图 9　多线结构光光条提取

除了采用上述分离式结构光传感器[12－15]之外，还可采用一体式 2D 激光位移传感器[18－20]进行轮对几何尺寸在线测量。分离式结构光传感器可以通过多线结构光等方法拍摄一幅图像得到多条车轮轮廓，但测量结果受安装误差影响较大；一体式 2D 激光位移传感器测量精度高，且受安装误差影响较小，一个传感器只能得到一条轮廓曲线，要得到完整的车轮轮廓需要多个二维激光传感器，成本较高。

2.3　激光传感与机器视觉结合法

2015 年，我们提出如图 10 所示的轮对几何参数测量方法[19]：2D 激光位移传感器测量车轮外侧踏面曲线，1D 激光位移传感器确定内侧面空间位置，由于车轮轮缘内侧基本不产生磨耗与擦伤，确定内侧面位置以及外侧轮廓即可求出车轮直径、轮缘厚、轮缘高、磨耗与内侧距等参数。该方法具有系统简单、成本低、系统可靠性好等优点。

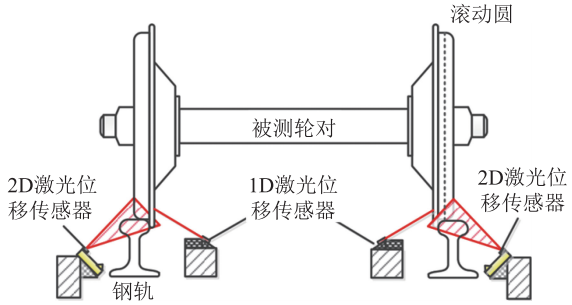


图 10　基于 2D 激光位移传感器的轮对几何参数测量系统[19]

为了提高直径测量精度，采用激光传感法测量直径与机器视觉测量轮廓相结合的方法对车轮的几何尺寸进行在线测量，实现了 20 km/h 以下车速经过时，车轮直径极限误差 ±0.3 mm，其他几何参数极限误差 ±0.2 mm。

3　擦伤测量方法

车轮踏面为车轮在钢轨面上滚动接触的部位。踏面的擦伤、磨损等缺陷会给车辆与钢轨带来振动和噪声，尤其是踏面擦伤会给车轮轴承与钢轨带来巨大的额外冲击载荷，其附加冲击的大小随擦伤的深度、长度及列车的速度、载重量的不同可达到车轮静载荷的几倍到几十倍，是引起轮对轴承损伤、造成轴温升高、轮轴断裂、钢轨和混凝土轨枕断裂的主要原因之一[24]。因此踏面缺陷测量也是车轮状态测量的重要部分，踏面缺陷测量主要是测量擦伤。20 世纪 80 年代初，国外曾研制了轨道电路中断时间法和涡流法测量擦伤的仪器[25]，但测量精度不高，已不再使用。目前常用的擦伤测量方法包括应力应变法[26－35]、超声法[36－38]、平行四边形法[39－40]等。

3.1　应力应变法

列车在行驶过程中，轮对与钢轨相互作用，状态良好的车轮对钢轨产生的冲击力是周期性的，而有擦伤的车轮在擦伤处撞击钢轨时会产生较大的非周期性冲击力。通过在钢轨沿线不同位置安装一系列应变计[26－27]、光纤传感器[28－32]、加速度计[33－35]等传感器对钢轨状态进行监测，可以得到列车蛇形、钢轨擦伤与磨耗等参数。使用该方法进行踏面缺陷判断时，会受到列车载重与速度影响。为消除列车载重影响，通常采用多个轮对经过时的平均应力/应变作为动态标准应力/应变，当某个轮对应力/应变明显超过动态标准应力/应变时，认为该轮对存在擦伤。该方法适用范围广、装置结构简单、技术难度较低，但只能定性判断车轮是否存在擦伤，无法得到准确擦伤值。

2006 年，Belotti V 等人对加速度计采集的数据进行小波变换，可以准确测量列车速度，并对不同车速下轮对踏面擦伤进行检测和量化。通过如图 11 所示的带有不同擦伤长度车轮的测试车，以 50～100 km/h 范围内不同速度通过检测路段时，可以准确识别所有的擦伤车轮，但车速超过 80 km/h 后会误报[35]。

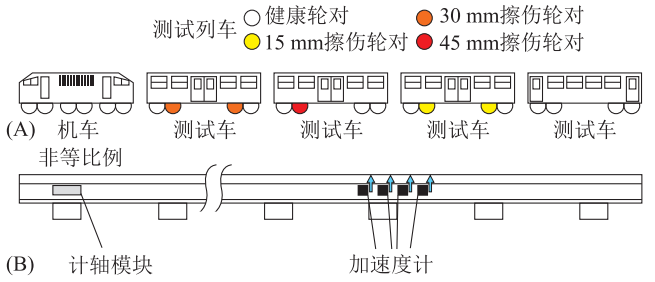


图 11　基于振动加速计法的轮对踏面擦伤测量系统[35]

3.2　超声法

超声法分为电磁超声法[36]与超声测距法[37－38]。

2008 年，Salzburger H J 等人提出如图 12 所示的电磁超声轮对表面缺陷在线测量方法[36]，车轮通过时，嵌入钢轨表面的电磁超声探头与车轮踏面接触，探头将会激发超声波在车轮内部传播，当车轮存在擦伤或缺陷时产生回波，分析接收到的回波信号可获得轮对踏面处信息。该方法适用于车速低于 15 km/h 时，无需耦合剂，测量方便，但安装时会破坏钢轨原有结构。

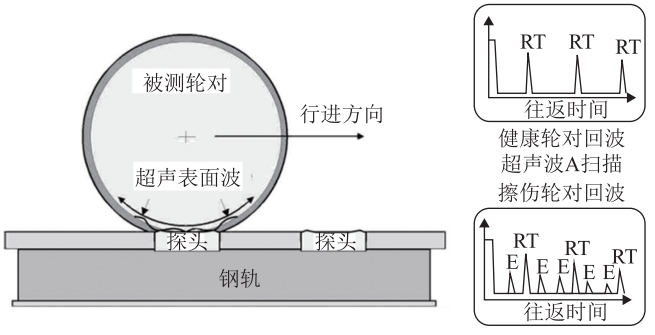


图 12　基于电磁超声探头的轮对擦伤测量系统[36]

俄罗斯在二十世纪九十年代中期研制出的基于超声测距法的“轮对参数自动化检测装置”[24]。当列车以不超过 5 km/h 经过该系统时，可得到踏面缺陷等参数。该套系统结构较复杂，调试安装较困难，且不能准确判定缺陷性质和大小。2010 年，Brizuela J 等人提出了如图 13 所示的使用瑞利波检测踏面磨耗的方法[37－38]：在钢轨一端安装超声发生与探测装置，超声

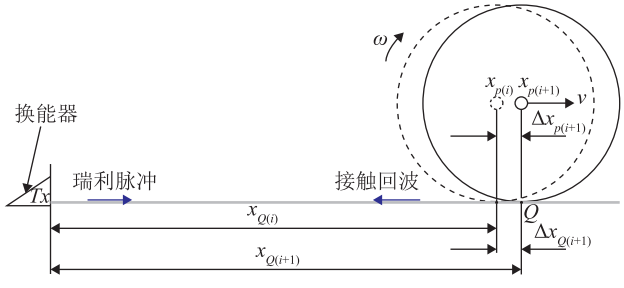


图 13　基于瑞利超声回波的轮对踏面擦伤测量系统[38]

波脉冲沿轨道表面向前传播，遇到轮对接触点时产生回波，通过超声波脉冲往返于轮轨接触点的时间不同来判断车轮接触面磨损度。该方法不受轮对磨耗程度与不圆度影响。当列车车速控制在 10.8 km/h 经过时，测得的擦伤长度误差小于 5%。

3.3　平行四边形法

利用平行四边测量机构动态定量测量车轮踏面擦伤的方法[40]其测量原理示意图与整个测量系统构造分别如图 14、图 15 所示。测量系统主要包括：平行四边形机构、位移传感器、数据采集处理系统以及计算机与数据通信系统四大部分。其测量原理是：当列车通过此测量装置时，车轮轮缘顶部压下平行四边形机构的上平板，使得此平板产生平动，非接触式位移传感器可以直接测量平板相对于钢轨的垂直位移。理想情况下，如果平行四边形机构及钢轨不存在加工误差，平行四边形机构与钢轨之间处于理想的装配条件，新车轮和磨损擦伤车轮通过传感器得到的输出波形如图 16 所示，通过简单的数据处理可以直接测量出踏面擦

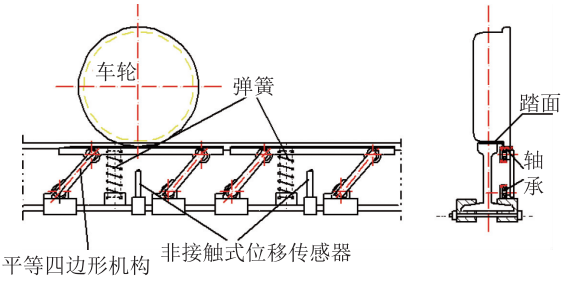


图 14　平行四边形机构测量车轮擦伤磨损原理图

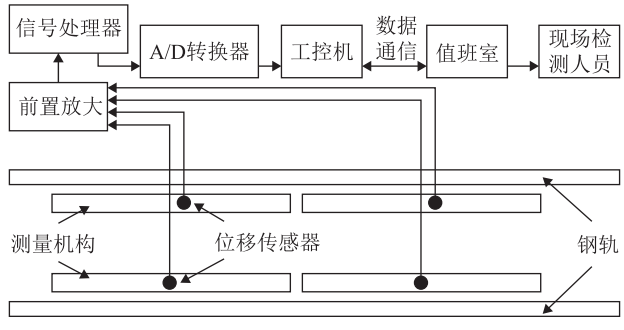


图 15　平行四边形机构测量车轮擦伤磨损系统构成

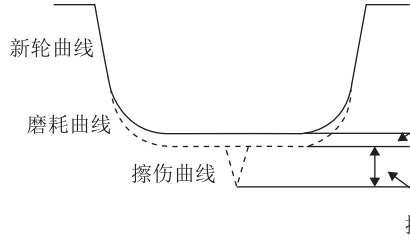


图 16　车轮踏面存在磨耗及擦伤、剥离的波形

伤及磨损量。经过现场试验表明：当列车速度低于 15 km/h 时，系统性能稳定，测量精度和准确率很高。系统测量误差为 0.2 mm。

3.4　结构光法

如图 17 所示，在钢轨内外两侧设置多套如图 8 所示的结构光几何参数测量系统，当列车经过该区域时，可以拍摄整个车轮踏面完整一周的轮廓，从而进行擦伤测量[41]。如图 18(a)所示，根据算法将提取后的结构光线条分解为轮辋、踏面、轮缘三部分，以便于对踏面部分数据进行单独分析；当车轮踏面存在擦伤时，摄像机拍摄的光条发生如图 18(b)所示的明显弯曲，根据弯曲曲线的长短和数量，可以计算出擦伤面积和深度，通过深度信息可以清楚的区分出踏面脏污与擦伤，从而避免检测误报。

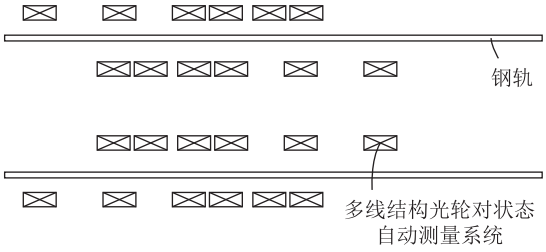
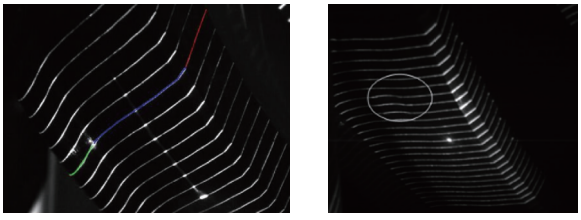


图 17　基于多线结构光的轮对擦伤自动测量系统



（a）光条分解　　（b）擦伤识别

图 18　基于多线结构光的轮对擦伤自动测量系统

4　轮对几何参数与缺陷动态测量系统

尽管目前国内外市场出现了一些轮对在线测量系统，但这些系统普遍存在两大不足：

1)整个检测系统集成度低、整体性差，没有对动态误差进行补偿，造成测量的可靠性和准确性差。

目前国内轮对检测系统普遍采用 CCD 和激光线分离方法测量，整个测量系统由 10 多个不同大小的监测箱体组成，由于各箱体无法安装在同一个基准上，各箱体之间的位置会随环境变化、列车振动而发生变化，给测量带来误差。此外，由于测量装置安装在轨道旁，环境恶劣，环境温度变化大，列车通过测量机构时引起的振动，造成测量机构、钢轨、地基等变形，不同列车的车速、自重与载重、满载与空载等情况变化，均会引入测量误差，造成测量结果重复性差，目前均未对此类误差进行有效补偿。

2)国内外均缺乏对轮对进行全寿命周期管理的方法与手段。

目前国内外所有轮对检测系统均为单个独立的检测系统，尚未建立轮对制造、运用、维修、报废等过程的全寿命周期管理方法、手段与体系，不能对轮对的使用状态进行跟踪、预警。

根据国家和行业重大需求，针对轮对检测存在的主要不足，在数十年研究的基础上，我们开展列车轮对检测研发与产业化工作，研制出多套轮对几何参数与缺陷测量系统。

2007 年，以平行四边形测量机构为平台实现踏面擦伤及磨耗的在线测量；以双激光位移传感器测量踏面直径方法，克服已有方法车轮定位误差给直径测量带来的影响，实现客车入库时对轮对几何参数进行在线测量，速度范围 5～15 km/h，轮缘厚、轮对内侧距、圆周磨耗等参数测量精度为 0.5 mm，轮辋宽测量精度为 0.8 mm，踏面直径受自制激光器精度所限，测量精度仅为 1 mm。

近两年研制了如图 19 所示的轮对几何参数与缺陷动态测量系统，整个系统由车号读取模块、基于平行四边形的擦伤测量模块、基于机器视觉的擦伤与剥离测量模块、基于结构光的几何尺寸测量模块以及基于激光传感的直径测量模块组成，该系统安装于车轮入库的在线路上，对经过的轮对几何参数进行测量，对超限轮对进行报警实现状态修；同时可对轮对进行长期跟踪测量，实现超限预警和轮对从制造出厂到报废的全寿命周期管理。2017 年 1 月在南宁安装了测量系

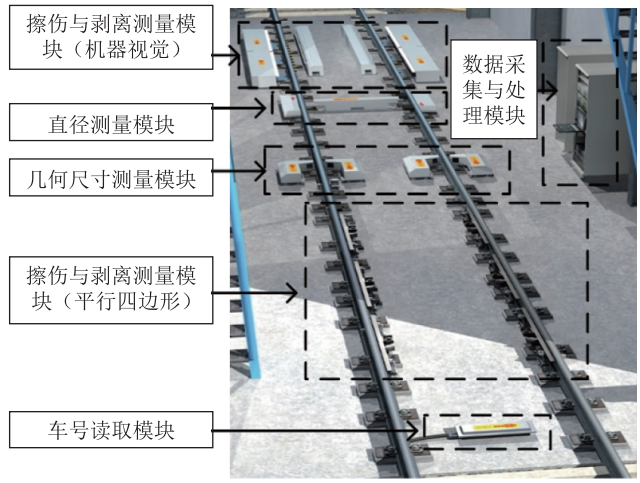


图 19　轮对几何参数与缺陷动态测量系统

统，对同一列车(24 组轮对共 48 个车轮)进行了 5 次测量，结果如表 1 所示。

表 1 轮对几何参数重复性测量结果 mm

参数	重复性极值范围分布			均值
直径	<0.3	0.3~0.5	>0.5	0.208
	40	8	0	
	<0.2	0.2~0.3	>0.3	
轮缘厚	38	4	6	0.119
轮缘高	33	13	2	0.176

5 发展趋势

总体来看，目前国内外轮对检测与管理向如下两个方面发展：

一是测量方法和手段向激光、机器视觉以及两者结合的方面发展。美国、日本、意大利、罗马尼亚、英国以及中国等已经先后研制出不同类型的动态测量系统，这些测量系统主要采用激光测量、激光视觉测量技术。其中最为典型的为意大利 TECNOGAMMA 公司开发的轮对轮廓与直径测量系统，该系统主要由 8 台一体式的激光视觉传感器构成，每 2 台传感器为一组，分别位于同一条钢轨的内外两侧，同时拍摄获取一条完整的踏面轮廓，4 组传感器分别获取 2 个车轮前后两侧的踏面轮廓，与标准轮廓对比计算几何参数，利用三点法计算车轮直径，采用一体式的激光视觉传感器，提高测量系统的可靠性，但测量成本高。

二是轮对由定期检修向状态修发展。定期修即车辆运行一定里程或时间后，送入工厂解体检测维修，是目前我国采用的车辆检修制度。这种检修制度会造成有些轮对“带伤工作”，给列车运行安全带来隐患；而有些轮对则“无病提前进入病房”，造成不必要的浪费。因而，根据轮对的实际状态进行维修是发展的必要趋势。例如，日本东铁正在发展智能维护理念，通过列车固定检查，连续不断监测线路状态，正在由基于时间维护向状态修转变。有效获得和使用各种检测手段得来的维修数据是“智能维修”理念的核心，检测仪器是关键。

基于高速铁路和城市轨道交通快速发展的需要，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] Federal Railroad Administration Office of Safety Analysis. Train Accidents-Query FRA Accident Data-Accident Causes. http://safetydata.fra.dot.gov/officeofsafety/publicsite/Query/inccaus.aspx, 2017-11-6/2017-11-7.

[2] 田葆栓. 北美铁路协会(AAR)第 20 届年会综述[J]. 国外铁道车辆, 2017, 54(2): 1-6.

[3] 贺永胜. 有关铁路车辆轮对检测技术综述[J]. 科技传播, 2013(17): 67-68.

[4] 王华, 邢春齐, 高金刚, 等. 点云频域配准的双目双线结构光列车轮对检测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 616-624.

[5] 高岩. 轮对几何尺寸自动与动态在线测量方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[6] 张志峰. 轮对几何参数在线动态测量方法与系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[7] Danneskiold-Samsoe U. Apparatus for track-based detection of the wheel profile of passing railway wheels: US 4932784 [P]. 1990.

[8] Naumann H J. Wheelset sensing system: US 5767973 [P]. 1998.

[9] 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.

[10] Gao Y, Feng Q, Cui J. A simple method for dynamically measuring the diameters of train wheels using a one-dimensional laser displacement transducer[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 53(7): 158-163.

[11] Ionescu Octavian. 车轮外形磨耗自动检测系统[J]. 吕晓晖, 译. 国外铁道车辆, 1995(4): 53-57.

[12] Douglas M W, Burns L R. Methods and systems for wheel profile measurement: US, US8111387[P]. 2012.

[13] 高岩, 邵双运, 冯其波. 一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 176-181.

[14] Chen X, Sun J, Liu Z, et al. Dynamic tread wear measurement method for train wheels against vibrations [J]. Applied Optics, 2015, 54(17): 5270-5280. doi: 10.1364/AO.54.005270.

[15] Gong Z, Sun J, Zhang G. Dynamic structured-light measurement for wheel diameter based on the cycloid constraint [J]. Applied Optics, 2016, 55(1): 198-207.

[16] Zhang Yu, Chen Rui. Study on Train Wheel Surface 3D Reconstruction by Wavelet Transform Profilometry[J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2016, 13(6):

[17] 谭志忠, 赵晓华, 刘刚, 等. 列车车轮几何尺寸测量方法及其检测装置: CN107150701A[P]. 2017-9-12.

[18] Xing Z, Chen Y, Wang X, et al. Online detection system for wheel-set size of rail vehicle based on 2D laser displacement sensors[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(4): 1695-1702.

[19] He H, Shao S, Feng Q. Online measurement for geometrical parameters based on 2D laser sensor [C]// International

Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2015: 189 – 192.

[20] Baibakov A N, Kuchinskii K I, Paterikin V I, et al. Experience in developing and using automated laser diagnostic equipment for the contactless monitoring of the parameters of freight car wheels[J]. Measurement Techniques, 2010, 53(4): 444 – 448.

[21] Cheng Xiaoqing, Chen Yuejian, Xing Zongyi, et al. A Novel Online Detection System for Wheelset Size in Railway Transportation[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016(1): 1 – 15.

[22] 张广军, 魏振忠. 多视觉检测系统的世界坐标唯一全局标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1268 – 1272.

[23] Zheng Xuehan, Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun. Global calibration of unleveled theodolite using angular distance constraints[J]. Applied Optics, 2016, 55(33): 9495 – 9503.

[24] 马林. 车轮踏面外形几何参数的检测技术[J]. 国外铁道车辆, 1998(6): 40 – 42.

[25] 张渝, 王黎. 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.

[26] 卢汝均. 美国车轮踏面擦伤检测系统[J]. 国外铁道车辆, 1994(6): 54 – 55.

[27] Stratman B, Liu Y, Mahadevan S. Structural Health Monitoring of Railroad Wheels Using Wheel Impact Load Detectors[J]. Journal of Failure Analysis & Prevention, 2007, 7(3): 218 – 225.

[28] Lee K Y, Lee K K, Ho S L. Exploration of Using FBG Sensor for Derailment Detector[J]. WSEAS Transaction on systems, 2004, 3(6): 2433 – 2439.

[29] Ho T K, Liu S Y, Lee K Y, et al. An Investigation of Rail Condition Monitoring byFiber Bragg Grating Sensors[J]. Hkie Transactions, 2009, 16(2): 9 – 15.

[30] Filograno M L, Corredera P, Rodríguez-Plaza M, et al. Wheel Flat Detection in High-Speed Railway Systems Using Fiber Bragg Gratings[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(12): 4808 – 4816.

[31] Batenko A, Grakovski A, Kabashkin I, et al. Weight-in-motion (WIM) measurements by fiber optic sensor: Problems and solutions[J]. 2011, 12(4): 27 – 33.

[32] Iele A, Lopez V, Laudati A, et al. Fiber Optic Sensing System for Weighing In Motion (WIM) and Wheel Flat Detection (WFD) in railways assets: the TWBCS system[C]//8th European Workshop On Structural Health Monitoring. Bilbao, 2016.

[33] 渡边直史, 金祥林. 车轮踏面损伤检测装置的开发[J]. 国外机车车辆工艺, 1997(4): 36 – 42.

[34] 井野智裕, 李伟平. 利用踏面擦伤检测装置管理货车车轮踏面[J]. 国外铁道车辆, 2013, 50(6): 42 – 45.

[35] Belotti V, Crenna F, Michelini R C, et al. Wheel-flat diagnostic tool via wavelet transform[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2006, 20(8): 1953 – 1966.

[36] 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-Non-Destructive Test Condition Monitoring 2009, 51: 370 – 372.

[37] Brizuela J, Ibañez A, Nevado P, et al. Railway wheels flat detector using Doppler effect[J]. Physics Procedia, 2010, 3(1): 811 – 817.

[38] Brizuela J, Fritsch C, Ibáñez A. New Ultrasonic Techniques for Detecting and Quantifying Railway Wheel-Flats[J]. Cdn. intechopen. com, 2012.

[39] 李远哲, 张春生. 机车轮对踏面磨耗自动检测新方法[J]. 铁道机车车辆, 1998(1): 51 – 53.

[40] 冯其波, 赵雁, 崔建英. 车轮踏面擦伤动态定量测量新方法[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 120 – 122.

[41] 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.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51275032); 东莞市引进创新科研团队(201536000600028)

作 者 简 介

冯其波(1962 –), 男, 教授, 博士, 研究领域为光电检测技术与仪器、轨道交通安全检测技术与设备。

在 1983 年、1986 年分别获合肥工业大学精密仪器系学士学位、硕士学位; 之后在合肥工业大学精密仪器系任助教; 1990 年至 1993 年在清华大学精密仪器及机械学系攻读博士学位。1998 年, 赴 University of North Carolina at Charlotte 访问教授; 2001 起任北京交通大学理学院副院长, 2005 年起任理学院院长。

主持国家自然科学基金重大科研仪器研制项目、重点项目、863 等多项高水平项目, 发表学术论文 150 余篇, 其中 SCI 检索期刊论文 40 余篇, 申请和获得国家发明专利近 60 项, 获得省部级科技成果奖一等奖和二等奖各 1 项, 有 5 项科研项目通过省部级技术鉴定, 研制的两种测量系统获得铁道部发文推广。主编、参编出版教材 2 部。

外界兼职: 中国仪器仪表学会设备结构健康监测与预警分会副理事长; 中国仪器仪表学会光机电技术与系统集成分会副理事长; 中国计量测试学会计量仪器专业委员会副主任委员; 中国计量测试学会理事会常务理事; 中国光学工程学会理事; 全国光电测量标准化委员会委员。