

文章编号:1671-1637(2017)05-0121-17

## 路面检测技术综述

马 建<sup>1</sup>, 赵祥模<sup>1</sup>, 贺拴海<sup>1</sup>, 宋宏勋<sup>1</sup>, 赵 煜<sup>1</sup>, 宋焕生<sup>1</sup>, 程 磊<sup>2</sup>,  
王建锋<sup>1</sup>, 袁卓亚<sup>3</sup>, 黄福伟<sup>4</sup>, 张 健<sup>5</sup>, 杨 澜<sup>1</sup>

(1. 长安大学 陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究中心, 陕西 西安 710064; 2. 徐州徐工随车起重机有限公司, 江苏 徐州 221004; 3. 中国交通建设股份有限公司西北区域总部, 陕西 西安 710065; 4. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 5. 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西 西安 710065)

**摘 要:**总结了路面检测重要研究成果, 分析了路面损坏、平整度、车辙、抗滑性能(构造深度)和结构强度(弯沉)检测技术的发展现状, 研究了路面检测技术的不足与发展方向。研究表明:国内外路面检测技术的发展经历了 3 个阶段, 从早期传统的人工检测到 20 世纪末的半自动化检测, 发展到目前的无损自动检测; 无损自动检测的主要特点是快速与智能化, 采用多源传感器协同工作, 并且集成在多功能道路检测车上, 能够同时检测路面损坏、平整度、车辙、抗滑性能和结构强度以及道路线形与沿线设施等; 在路面损坏检测方面, 采用数字图像检测技术, 实现了路面裂缝的快速检测; 在路面平整度检测方面, 采用激光位移传感技术, 实现了快速自动化检测; 在路面车辙检测方面, 采用激光和数字图像技术, 实现了非接触智能化检测; 在路面抗滑性能和结构强度检测方面, 建立了铺砂法与贝克曼梁法检测结果的相关关系, 实现了基于激光技术的路面构造深度与弯沉快速检测; 为了减少外界因素对现有检测技术和检测设备的干扰, 提高检测信号的信噪比, 应该开发适合各种工况下的路面检测和数据处理方法, 实现路面检测高效化与智能化。

**关键词:**路面检测; 平整度; 车辙; 构造深度; 裂缝; 弯沉

**中图分类号:**U416.2 **文献标志码:**A

## Review of pavement detection technology

MA Jian<sup>1</sup>, ZHAO Xiang-mo<sup>1</sup>, HE Shuan-hai<sup>1</sup>, SONG Hong-xun<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>,  
SONG Huan-sheng<sup>1</sup>, CHENG Lei<sup>2</sup>, WANG Jian-feng<sup>1</sup>, YUAN Zhuo-ya<sup>3</sup>,  
HUANG Fu-wei<sup>4</sup>, ZHANG Jian<sup>5</sup>, YANG Lan<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Road Traffic Intelligent Detection and Equipment Engineering Technology Research Centre, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. XCMG Xuzhou Truck-Mounted Crane Co., Ltd., Xuzhou 221004, Jiangsu, China; 3. Northwestern Regional Headquarter of China Communications Construction Co., Xi'an 710065, Shaanxi, China; 4. China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 5. Shaanxi Provincial Expressway Construction Group Co., Xi'an 710065, Shaanxi, China)

**Abstract:** The important research results of pavement detection were summarized. The development state of technology detecting the damage, roughness, rutting, skid resistance (structure depth) and structural strength (deflection) of pavement was analyzed. The shortage and development direction of pavement detection technology were studied. Research result indicates that the development of pavement detection technology at home and abroad has

收稿日期:2017-11-02

基金项目:高等学校学科创新引智计划项目(B14043);国家重点研发计划项目(2017YFC0804800);陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-SF-091)

作者简介:马 建(1957-),男,陕西西安人,长安大学教授,工学博士,从事交通运输研究。

experienced three stages: early traditional manual detection, semi-automatic detection at the end of 20th century and nondestructive automatic detection at present. The main features of nondestructive automatic detection are rapidness and intellectualization, and the damage, roughness, rutting, skid resistance and structural strength of pavement as well as the alignments and facilities of roads are detected simultaneously because multi-source sensors work together and are integrated in the multi-purpose road test car. In term of pavement damage detection, digital image detection technology is used for the rapid detection of pavement cracks. In term of pavement roughness detection, laser displacement sensing technology is used to realize fast automatic detection. In term of pavement rutting detection, laser and digital image technology are used to realize noncontact intelligent detection. In terms of skid resistance detection and structural strength detection of pavement, the correlativity between the results detected by using sand paving method and Beckman beam method is established to realize the rapid detection of structure depth and deflection of pavement based on laser technology. In order to reduce the interference of external factors to the existing detection technology and detection equipment, and to improve the signal to noise ratio of detection, the road detection and data processing methods suitable for various working conditions should be developed to realize the high efficiency and intellectualization of pavement detection. 89 refs.

**Key words:** pavement detection; roughness; rutting; structure depth; crack; deflection

**Author resume:** MA Jian(1957-), male, professor, PhD, majian@chd.edu.cn.

## 0 引 言

近年来中国现代化建设快速发展,基础设施网络规模稳居世界前列,尤其在公路方面,获得了巨大的成就。截至2016年底,中国“五纵五横”综合运输大通道基本贯通,综合交通网络初步形成。公路总里程达到469.6万公里,全国99.99%的乡镇和99.94%的建制村通了公路,高速公路里程突破13万公里,跃居世界首位。2016年,全社会客、货运量分别达192亿人次和433亿吨,中国成为世界上运输最繁忙的国家之一。公路客货运输量及周转量均居世界首位,高速公路承担了全社会超过1/3的客运量和1/4的货运量。

随着公路里程的不断增加,高速公路网、国省县道路网和城市道路网迅猛发展。为进一步提高公路交通运输的经济社会效益,中国在公路建设快速发展的同时,也越来越重视公路交通的运营管理、路面养护和服务水平。公路养护管理工作日益重要,公路技术状况快速检测与评价成为道路科学养护工作的重中之重。通过道路路面检测可以获取道路的技术特征,进而判断道路的使用情况以及损坏程度,为道路建设、养护管理提供重要依据。公路技术状况检测与评价包括路面、路基、桥隧构造和沿线设施等四部分内容,其中道路路面检测评价包括路面损坏、

平整度、车辙、抗滑性能(构造深度)和结构强度(弯沉)等。

如何快速、准确获取道路路面信息成为公路养护管理的关键所在。国内外道路路面检测技术的总体发展趋势经历了3个阶段:从传统的人工检测到半自动化检测,发展到无损自动检测。传统的人工检测和半自动检测存在不足:工作环境恶劣,检测人员的人身安全得不到保证,影响交通的正常运行;费时,费人力,效率低,很难做到及时检测和周期性检测;受人为因素影响,不利于对路面损坏进行客观和准确的评价。随着检测技术和信息技术快速发展,第3阶段的无损自动检测主要体现在高速化、自动化和智能化方面,并且集成在多功能道路检测车上,能够同时检测路面损坏、平整度、车辙、抗滑性能(构造深度)和结构强度(弯沉),甚至能够检测道路线形、道路沿线设施等。

根据道路路面不同的检测与评价内容,需要采用不同的检测技术和仪器设备。路面质量指标所采用的检测技术与每年的检测频次,在国家有关标准如《公路技术状况评定标准》(JTGH20—2007)、《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80/1—2004)中已做了相应的规定。多功能道路检测车能够高效且准确地进行路面技术特征检测,已广泛运用于高速公路、国省县道路及市政道路的检测,国内主要研

制单位有长安大学道路交通智能检测与装备工程技术研究中心、交通运输部公路科学研究院公路养护管理研究中心、武汉武大卓越科技有限责任公司等,整体技术性能达到国际先进水平,现阶段中国道路检测主要以国产设备为主。

本文总结了路面检测研究领域重要成果,结合当前发展现状,分析了路面损坏、平整度、车辙、抗滑性能(构造深度)和结构强度(弯沉)检测技术,研究了检测技术的现状、不足与发展方向。

## 1 路面损坏检测技术

路面损坏检测与评价主要内容如下《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2007):

- (1) 裂缝类,如龟裂(轻、中、重)、块状裂缝(轻、重)、纵向裂缝(轻、重)与横向裂缝(轻、重)等;
- (2) 变形类,如沉陷(轻、重)与波浪拥包(轻、重)等;
- (3) 松散类,坑槽与松散(脱皮、麻面、露骨、剥落)等;
- (4) 其他类,如泛油与修补等。

路面损坏状况的检测评价对于水泥混凝土路面,其主要内容有:

- (1) 裂缝类,如纵向裂缝、横向裂缝、斜向裂缝、角隅断裂、交叉裂缝与断裂板等;
- (2) 竖向位移类,如沉陷与胀起等;
- (3) 接缝类,如接缝填缝料损坏、纵向接缝张开、唧泥、板底脱空、错台、接缝碎裂与拱起等;
- (4) 表层类,如磨损和漏骨、纹裂、网裂、起皮与坑洞等。

在路面损坏检测与评价中,要求记录损坏的类型、大小、位置与严重程度等。路面损坏检测是一项检测内容多、分类细、费时费力的检测项目。

路面损坏检测技术总体上可以分为两大类:一类是以检测路表面裂缝为目的的数字图像检测技术,即对路表面拍摄高清晰照片,通过图像处理获取路面裂缝、泛油与修补等信息;另一类是以检测路面变形为目的的激光位移检测技术,即检测路表面的相对变形,通过数据处理获得路面沉陷、坑槽与拥包等信息。

道路表面裂缝是道路路面结构退化的早期迹象之一,任由裂缝持续发展将加速路面破坏,检测判断裂缝的发展程度,是道路路面养护的重要依据。最早采用的裂缝检测方法是人工检查,需要绘制裂缝位置图,并记录路面裂缝长度、走向与严重程

度等具体情况。由于手工方法取决于检测人员的知识和经验,检测结果易受人为因素影响。近年来,基于图像自动识别的路面裂缝检测成为主流路面损坏检测方法<sup>[1]</sup>。

在实际工作中,裂缝的快速、准确检测与识别,是一个难度较大、不易解决的问题,因为:裂缝与路面的对比度低,成像后裂缝不明显;成像后裂缝的断续程度不同,不易准确计算裂缝长度;与裂缝相似的非裂缝阴影干扰;成像后的裂缝亮度受太阳光干扰严重。为解决这些问题,国内外学者们提出了有针对性的解决方法,取得了比较好的效果。

一部分学者主要研究路面裂缝的图像处理技术,通过采用不同算法,实现路面裂缝的检测和识别;另一部分学者主要研究如何提高路面裂缝图像的拍摄质量、检测和识别精度。目前,国内外通过研究不同算法来实现路面裂缝识别的研究较多,并取得了较好的成果,在如何提高图像拍摄质量与降低算法难度方面的研究较少。在实践工程应用中,后者的研究更有效,适应性更强。

### 1.1 路面损坏检测系统

#### 1.1.1 国外路面损坏检测系统

从20世纪70年代第1辆路面损坏自动检测设备(法国的GERPHO系统)<sup>[2]</sup>的诞生到现在,国外的路面损坏自动检测系统经历了四十多年的发展和更新换代,其发展过程主要经历了以下几个阶段。

##### (1) 基于摄影技术的路面损坏检测系统

基于摄影技术的路面快速检测设备最早起源于20世纪60年代末期,由日本的PASCO公司开始研发,但最早研制成功并投入使用的是法国LCPC道路管理部门开发的GERPHO系统,该系统采用同步摄影数据采集技术与35 mm电影胶片,由高速摄像机和车辆定位系统来实现路面损坏图像的同步采集。路面损坏图像胶卷经过冲洗,通过室内判读设备能再现路面损坏状况,这样技术人员即可在实验室判读各种路面病害,将判读结果人工输入到数据库<sup>[3]</sup>。法国GERPHO系统的研制成功,对公路养护历史来说具有划时代的意义,不但彻底改变了路面现场检测主要以人工为主的状况,而且极大地减轻了检测工作对交通流的影响。但由于该系统只能在夜间工作,存在实验室后期处理工作量大、耗时长、检测功能单一等缺点,因此,当时未能得到普及。

##### (2) 基于视频技术的路面损坏检测系统

随着视频技术与磁带存储技术的发展,20世纪80年代出现了基于视频技术的路面快速检测系统。

该系统与基于摄影技术的系统相比,在硬件和功能上均有较大提高,最主要的技术特点表现为:用当时最先进的视频技术,通过高性能的摄像机对路面损坏数据进行采集,路面图像全部存储在录像带中;在路面损坏检测的基础上,又逐渐增加了路面平整度、车辙和前方图像等数据的检测功能;后期图像数据处理软件在功能上得到较大改进。该类检测设备中最具代表性的是日本的 Komatsu 系统,摄像车辆两侧灯光照射路面,具有路面裂缝图像采集功能,将采集到数据基于信号处理器和传感器传输给存储设备<sup>[4]</sup>。Komatsu 系统代表了当时最先进的硬件技术,但是由于其不能识别裂缝的类型,而且为了控制光照条件,只能在夜间工作,车速必须控制在  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  内,因此没有得到推广。

### (3) 基于高速面阵数字相机的路面损坏检测系统

20 世纪 90 年代中期以后,CCD 数字成像技术和计算机图像处理技术的飞速发展,促进了以低成本、高分辨率、高采集速率的数字相机为采集设备的路面快速检测系统的诞生。这种数字相机与模拟视频摄像机的区别是:数字相机将物体图像的灰度或者色彩直接转成像素矩阵形式的数据,无需经过模拟/数字转换,其空间分辨率和图像采集速率要远远高于模拟视频摄像机。该类系统具有以下优点:采用面阵 CCD 传感器对路面图像进行捕获,通过专用总线接口(CameraLink、千兆网与 PCIE 等接口)直接将图片数据存储到计算机硬盘中;采用图像压缩技术对采集的图像数据进行实时压缩存储,节省硬盘空间;采用 GPS 定位技术和陀螺仪惯性系统对路线几何线形及纵横坡数据进行采集;在后期数据处理过程中,采用路面图像预处理技术,提高了图像数据的处理速度和准确率。这一时期比较成功的商业化产品有加拿大 ROADWARE 公司开发的 ARAN 系统、澳大利亚 ARRB 公司开发的 Hawkeye 2000 系统和瑞典 IME 公司研制的 PAVUE 系统。ARAN 系统在 KOMATSU 系统基础上配置了高强度的闪光灯,摄像车的车速可达到  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。PAVUE 系统的独到之处是拥有 IME 公司自行设计的图像处理系统,IME 开发的 12 个不同的 VME 芯片构成了图像处理系统的核心,全部 PAVUE 处理系统包括 80 个微处理器/板,图像处理软件固化在硬件中以提高处理的速度。高性能的硬件使得 PAVUE 系统能在  $88 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度下以高解像度处理路面图像,其不足是破损图像以模拟格式存储在 S-VHS 磁带上。由于数字相机的采集速率较高,成

像曝光时间短,需增加人工照明光源(高速闪光灯或者 LED 恒光源),才能获得较好的拍照效果<sup>[3]</sup>。

### (4) 基于高速线扫描数字相机和激光照明技术的路面损坏检测系统

2000 年以后,基于高速线扫描数字相机和激光照明技术的路面快速检测系统在路面损坏检测、辅助照明与图像识别等方面取得了巨大突破,其主要技术特征是用摄影技术和红外激光照明技术,使图像质量更加稳定。该类检测系统中具有代表性的是加拿大 INO 公司生产的 LRIS 系统和美国 ICC 公司生产的多功能路况检测系统。INO 公司的 LRIS 系统采用 2 部高速、高分辨率线阵相机与 2 套大功率线激光源,按照交叉对称式的光学结构进行同步采集,2 部线阵相机可以覆盖近 4 m 宽的路面,在  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的工作速度下,采集图像的横向最小分辨率可达 0.5 mm。

### (5) 基于热成像技术的路面损坏检测系统

基于热成像技术的路面损坏检测系统采用红外热成像相机进行图像采集<sup>[5]</sup>,其主要技术特征为:由于路面损坏处与完好路面相比,反光率较小,路面损坏处的表面温度与完好路面温度相差较大,2 种图像形成强烈的对比;由于红外图像中路面的纹理信息较弱,因此,图像处理算法相对简单。其缺点是红外热成像相机成本较高,图像采集速率和分辨率都有待提高。同时受天气影响较大,湿滑的路面无法进行检测,因此,该类系统目前还未得到应用。

### (6) 基于 3D 激光扫描技术的路面损坏检测系统

基于 3D 激光扫描技术的路面检测系统采用 3D 激光扫描技术获取路面的细微 3D 轮廓<sup>[6]</sup>,该系统采用线激光直射路面,用面阵相机拍摄激光线在路面上的投影,然后通过图像处理算法获得路面上每一个点的高程差。3D 激光扫描技术的特点是获得的图像是路面的点云集合,不含复杂的纹理和颜色信息,给后期的图像处理带来了便利。该系统目前存在的问题是检测数据量大,可靠性仍需进一步提高,但是代表了未来路面检测系统的发展方向。

除了商业公司开发的路面快速检测系统之外,国外一些大学和研究机构也纷纷开发了自己的快速路面检测设备。比较有代表性的有:美国阿肯色大学 Wang 等开发的 DHDV 检测车<sup>[7]</sup>、德州大学奥斯汀分校 Huang 等开发的 CrackScope 系统<sup>[8]</sup>与犹他州立大学 Cheng 等开发的路面损坏自动检测系统<sup>[9]</sup>。

#### 1.1.2 国内路面损坏检测系统

20 世纪 80 年代末期,中国开始了大规模建设

公路,大量公路建成并通车运营,道路养护工作日益繁重。中国科研院校及技术开发公司开始自主研发路面损坏图像检测系统,经过多年的不懈努力,虽起步较晚,但是发展迅速,取得了喜人的成果。

近年来,国内的路面损坏检测系统快速发展,并且已经进入商用化,成为路面损坏检测的主流设备。国内主要的研制单位有长安大学道路交通智能检测与装备工程技术研究中心、中公高科养护科技股份有限公司、武汉武大卓越科技有限责任公司等五六家。

长安大学道路交通智能检测与装备工程技术研究中心,结合西部交通建设科技项目的最新研究,成功开发了CT-501A高速激光道路检测车<sup>[10]</sup>。该检测系统采用面阵相机采集道路图像结合激光技术,能够实现路面平整度、车辙、构造深度与损坏的高精度快速检测,在路面损坏检测方面的突出特点是开发了多种照明系统,所拍摄的路面图像质量较好,为完全实现路面损坏的自动识别和分类提供了基础。

北京公路科学研究院下属子公司:中公高科养护科技股份有限公司,研发了路面检测车CiCS,采用线阵相机采集路面图像,并结合结构光照明,能够达到横向3.6 m的检测宽度,最高检测精度达1 mm,最高时速达100 km·h<sup>-1</sup>。该公司研发的路面破损处理软件CiAS(Cracking image Analysis System),能够自动处理包括裂缝、车辙与平整度在内的路面关键性指标。

武汉武大卓越科技有限责任公司研发了ZOYOM-RTM智能检测系统,对于路面几何性较为明显的裂缝可以做出准确的判断,并且能够实现路面裂缝的实时定位,但是对于块状和网状的裂缝识别率有待提高<sup>[11]</sup>。

几十年来,随着现代光学技术、计算机技术及传感器技术的飞速发展,国内大量研究者和企业将这些新技术应用于路面破损图像全自动采集系统的研究与开发之中,使得路面破损图像采集技术已趋近于成熟。一部分学者主要研究如何提高路面裂缝图像的拍摄质量、检测和识别精度,另一部分学者主要研究路面裂缝的图像处理技术,通过采用不同算法,实现路面裂缝的检测和识别。

## 1.2 路面损坏自动识别算法

自20世纪70年代第一台路面快速检测系统诞生以来,国内外有关学者和研究人员就开始致力于路面裂缝图像自动识别算法的研究。几十年来,相关研究人员不断地将数字图像处理领域的新技术应

用于路面裂缝的图像增强、目标分割与分类评估等各个环节之中。

### 1.2.1 路面裂缝图像增强算法

为了消除路面裂缝图像的光照不均匀,Cheng等用原始路面图像减去经过低通滤波的模糊图像,得到一幅图像差,消除了光照的缓慢变换以及道路白线标记、轮胎印等大面积噪声,同时保留了裂缝信息<sup>[12]</sup>。Bhutani等将模糊理论应用于路面图像检测中,提出了基于模糊理论的路面裂缝图像增强方法<sup>[13]</sup>,试验证明该方法有一定的可行性;刘玉臣等提出了一种基于模糊理论的图像增强方法,将破损图像运用Z函数进行模糊化处理,再运用中值滤波消除噪声平滑图像<sup>[14]</sup>。试验结果表明:该算法不用其他的外部参数,仅需用图像像素来进行运算,虽然会增加一些野点,但是可以通过一定的算法来消除,这样在后来的图像分割及识别中,会取得很好的效果。唐磊等提出了一种将P-M方程、Shock滤波器和相干增强扩散3种基本模型加以融合的方法,首先分析了相干增强扩散中扩散速度与局部结构一致性强弱的对应关系,并在假设图像不含噪声的基础上,设计了以梯度和局部结构一致性强弱作为参数的权函数,用来对3种基本模型进行加权融合,然后根据路面图像中的噪声及裂缝信息的特点,通过对基本模型和权函数的改进来对无噪模型进行推广,使之适合于处理复杂的路面图像,另外对模型中涉及到的一些主要参数也进行了详细的讨论<sup>[15]</sup>。理论分析和试验结果表明,该新算法在路面图像的去噪、裂缝边缘锐化和增强裂缝的流式结构等方面均可取得良好的效果,但其中的几个重要参数无法适应各种路面条件,需要进一步改进以提高通用性。Zuo等提出将小波包引入到路面图像降噪中的方法<sup>[16]</sup>,该算法将路面图像分解后,在每一级尺度上进行降噪处理。

Zhang等将多尺度几何分析技术用于路面损坏图像的增强,提出了一种自动脊波图像增强算法,首先对图像进行Ridgelet变换,然后采用模糊熵和模糊散度对变换后的高频系数进行拉伸,最后通过Ridgelet逆变换得到增强后的图像<sup>[17]</sup>。王兴建等为了去除路面裂缝检测中的各种噪声,在分析对比了目前常用去噪模型优缺点的基础上,根据路面图像中的噪声及裂缝信息的特点,结合已有去噪算法的优点,提出了一种新的基于路面裂缝检测的多级去噪模型,整个去噪模型包括灰度去噪模型、空间滤波去噪模型、裂缝特征去噪模型与几何特征去噪模

型。试验结果表明,该模型在路面图像的去噪、裂缝信息提取等方面有一定改进,但是模型的参数不具备通用性<sup>[18]</sup>。李清泉等为解决路面裂缝检测系统在不同光照条件下裂缝识别可靠性问题,研究了一种基于图像自动匀光的路面裂缝图像分析方法。该方法首先对基于面阵 CCD 相机图像裂缝检测存在的问题进行分析,提出采用图像自动匀光技术解决不同光照条件下图像一致性输入问题;其次,设计了一种基于自动电子印相机原理的路面图像快速匀光算法,提出了一种实用的路面裂缝图像处理策略并设计了路面裂缝图像处理流程;最后,对一组由面阵 CCD 相机获取的路面图像按照该方法进行路面裂缝检测试验,验证了基于图像自动匀光的路面裂缝图像分析技术的合理性和实用性<sup>[19]</sup>。

### 1.2.2 路面裂缝图像分割算法

近年来,针对路面算法的研究主要集中在对各种裂缝特征的提取,对于目标特征的分割优劣直接影响到检测算法的准确性。许多学者提出了各种形式的算法,主要有基于阈值的分割算法、基于边缘检测的分割算法、基于多尺度的分割算法、基于数学形态学的分割方法等。

阈值分割比较简单,易操作,即设定一个阈值,以这个阈值对图像进行分割,但是怎样准确设定这一阈值,及其对于不同的图像的适用性等方面还是存在很多问题。Kirschke 等提出了基于灰度直方图的图像阈值分割方法<sup>[20]</sup>,将图像划分成了多个子块,由子块的灰度直方图来确定裂缝,但是对于微小裂缝识别效果不佳。

Tanaka 等利用数学形态学的几种算子对路面裂缝进行检测,对于微小裂缝而言,该方法不太适应<sup>[21]</sup>。闫茂德等提出了一种新的基于形态学的检测方法。利用设计的结构元素对图像进行中值滤波去噪,再结合形态学算子边缘检测,弥合了裂缝空隙,取得了较好的检测效果<sup>[22]</sup>。Oliveira 等利用形态学进行滤波预处理,用图像的熵和动态阈值分割来识别路面裂缝<sup>[23]</sup>。

Cheng 等提出了一种基于模糊集理论的路面裂缝图像阈值分割算法,首先采用一个钝化掩模算子对原始图像进行模糊化,得到一幅低通滤波图像;然后用原始图像减去掩模图像得到一幅差分图像;最后通过模糊集理论得到一个全局阈值,并将差分图像进行二值化,但是该方法无法检测细微裂缝,并且耗时较长<sup>[24]</sup>。Cheng 等提出了一种基于减少样本空间和插值的实时阈值分割算法,基本思路是路面

图像的分割阈值与像素灰度的均值和方差明显相关,该算法首先建立一个巨大的样本空间,通过去掉相似样本,减小样本空间可以提高算法的实时性。但是该算法仅通过像素灰度的均值和方差来确定阈值,未考虑裂缝的空间分布特性,其漏检率和误检率都很高<sup>[25]</sup>。

李清泉等针对路面影像由于各种阴影、路面纹理结构不一致、路面反光强度不一致等多种因素以及路面影像中一般裂缝所具有的性质,提出了基于多尺度空间模型和邻域差分直方图的方法来分割裂缝影像,其中多尺度空间模型的应用有效地降低了裂缝检测的时间复杂度,邻域差分直方图方法可以从复杂的路面背景中检测出细小的裂缝;最后从一般几何图形出发,结合裂缝本身的特点,提出了便于裂缝分类的裂缝几何矢量点、线、面三大类几何特征,并用相应的方法从边缘矢量中提取出各几何参数,从而为后续的路面裂缝的分类系统提供基础数据<sup>[26]</sup>。孙波成等采用最大类间、类内距离准则对图像进行阈值分割,提取图像上的裂缝特征<sup>[27]</sup>。这 2 种方法从分割结果看,还存在一些孤立的噪点,并且裂缝边缘之间存在断续情况。

传统的基于边缘检测的算子有 Robert 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子与 LOG 算子,而近年来的 Canny 算子被广大学者认为具有最好的边缘检测效果,该算子先对图像作高斯滤波,再对图像做卷积操作,最后通过两个高低阈值来实现非极大值抑制,完成边缘的连接和提取。

Huang 等提出了一种基于 GCA 的边缘检测算法,将路面图像划分为若干个  $8 \times 8$  的网格,通过检测这些网格边界上是否存在明显“波谷”来判别这些网格内是否含有裂缝,若存在明显“波谷”,则以边界上的最小灰度值作为种子点,然后通过对这些种子点进行校验和跟踪,得到最终的裂缝<sup>[28]</sup>。Sorncharean 等采用双 GCA 链对 Huang 等的算法进行了改进,能较好地消除阴影造成的影响,难点在于不易确定网格上是否存在“波谷”<sup>[29]</sup>。

唐磊等将二维平面图像映射到三维空间曲面,使得在二维平面中难以描述的裂缝信息在三维曲面中能通过一条狭长的“山谷”来准确地描述,通过分析三维曲面中“山谷”的曲率特征,采用基于微分几何的空间检测算子准确提取曲面中的“山谷”,并映射到二维图像平面中作为裂缝点,该算法不适合细微裂缝的检测<sup>[30]</sup>。

路面图像中裂缝的特征是具有不同尺度的,对

于采用同一尺度的分析方法难以适应各种裂缝。小波分析和后小波分析在图像处理领域得到了广泛研究,主要包括脊波、曲线波、子束波、轮廓波、方向波与剪切波等<sup>[31]</sup>。

王刚等在脊波分析 Ridgelet 的框架下,提出了一种结合二进小波变换的局部脊波变换提取图像中的局部线性特征的新型算法,应用在含有线性裂缝的高速路面,通过寻找奇异点来得到裂缝的位置及宽度,且具有较高的几何逼近程度及信噪比,基于多尺度的方法仍然存在算法复杂、通用性不高等问题<sup>[32]</sup>。

### 1.2.3 路面裂缝自动识别算法

目前,路面损坏图像自动识别算法适应性和通用性较差,同时路面损坏的分类和评估算法进展不大,主要是因为缺乏统一路面图像测试样本和统一的算法评价标准。

Chua 等提出了一种基于不变矩和神经网络的路面裂缝分类算法,将路面图像二值化后,计算图像的 Hu 矩、Bamieh 矩与 Zemike 矩等 18 个矩变量作为多层感知器的输入,通过训练和测试,可以到达 100% 的分类精度,但具有较高的复杂度<sup>[33]</sup>。

Lee 等研究了基于神经网络的路面裂缝自动分类,提出 3 种路面裂缝自动分类算法,即基于图像灰度、基于直方图与基于近邻点的神经网络算法,研究结果显示:基于近邻点的神经网络算法对常见的路面病害类型的分类效果最好<sup>[34]</sup>。

肖旺新等在破损密度因子算法的基础上,进一步设计出了混合密度因子,得到一种基于图像子块分布特征的路面损坏识别算法,通过仿真,验证了其对于常见的 5 种路面损坏类型进行分类的可行性<sup>[35]</sup>。

丁爱玲等提出了基于支持向量机的分类算法,试验证明这种算法较传统基于小波的算法具有更高的识别准确率<sup>[36]</sup>。

Oliveira 等提出了一种对图像训练的方法,设计了分类器,对各种路面进行分类识别<sup>[37]</sup>。

李清泉等在路面图像二值化基础上,根据子块加权方法进行加权子块化,同时兼顾噪声子块及邻域破损密度,利用高斯加权卷积核计算各破损子块的加权破损量,最后累计加权破损量与所有子块的比率作为该路面图像的破损指数<sup>[38]</sup>。

在利用图像处理算法识别路面裂缝识别研究方面,Talab 等提出了一种基于图像处理方法检测路面裂缝的方法<sup>[39]</sup>,该方法包括 3 个步骤:第 1 步,将图像变为灰度图像并提取图像的边缘;第 2 步,在二

值图像中使用适当的阈值,并将所有像素分类为两部分,即背景和前景,并且在过滤区域之后获得所需区域,如果小于特定数量则返回区域;第 3 步,用 Sobel 滤波去除残余噪声后,用 Otsu 法检测主要裂缝。这种方法的优点是能够清晰准确地检测图像中的裂缝。

Zou 等开发了路面图像的阴影去除算法,在保留裂缝的同时去除路面阴影,利用张量投票法建立裂缝概率图,增强裂缝片段的接近性和曲线连续性。从裂缝概率图中抽取一组裂缝种子,用图模型表示这些种子,从该图中导出最小生成树,并进行递归树边修剪以确定所需的裂缝。运用这种自动检测方法对 206 个真实路面图像集进行了评价,试验结果表明,该方法具有很好的性能<sup>[40]</sup>。

Salman 等提出一种基于 Gabor 滤波器的路面裂缝图像自动检测方法,使用 Gabor 滤波器,并包含多取向过滤器,数字取向与 Gabor 过滤器的应用场景有关,生成 Gabor 核的主要参数是预定义的,并通过大量的试验获得;将给定方向的 Gabor 滤波器与输入的预处理图像进行卷积,卷积完成之后,内核响应的真实分量被阈值化以产生二进制输出图像,由不同方向的滤波器产生的二值图像通过组合以产生包含检测到的裂缝段的输出图像<sup>[41]</sup>。

Song 等提出了一种基于分数微积分的脊边缘检测方法和二值图像上的双阈值检测方法的路面裂缝检测算法<sup>[42]</sup>。首先,利用图像数据的多尺度缩小来缩小原始图像以消除噪声,不仅能够平滑图像,而且能够增强裂缝;然后,利用灰度图像中分数阶微分的脊边检测提取主裂缝;随后,应用短线和长线阈值进一步处理所得到的二值图像,以消除用于获得粗糙裂缝段的短曲线和噪声;最后,连接裂缝中的缝隙与人工智能程序的曲线连接功能。试验表明,该路面裂缝图像算法具有抗噪声,定位准确,精度高的优点,可以准确定位和检测其他传统算法难以识别的细小裂缝。

张德津等在观察大量实际工程路面图像基础上,对路面裂缝特征进行全新定义,提出了一种基于空间聚集特征的沥青路面裂缝检测方法,参考裂缝的空间分布、灰度与几何等特征,以子块图像为处理单元,采用逐步求精的策略对子块图像进行分割,快速定位空间聚集区域,再对聚集区域进行评估得到置信度高的裂缝候选区域;最后以裂缝候选区域为种子区域,在准确估算裂缝发展趋势的基础上,结合裂缝片段聚集及相似性等特性,在去除噪声的同



时合并连接断裂的裂缝,实现了裂缝区域较为完整的检测。通过测试多路况、多采集环境下的大量样本,并采用不同的方法对测试结果进行评估,结果显示此算法对不同类型路面图像中具有不同特征的裂缝区域均具有良好的检测性能,裂缝定位准确性达到 95% 以上,裂缝区域检测的完整性达到 90% 以上<sup>[43]</sup>。

除了基于二维图像的检测方法外,近年来基于三维的方法也越来越多地受到国内外学者的关注,并且在此基础上也提出了一系列的方法。Rabah 等从激光扫描测量中获得的数据提出了一种自动混凝土裂缝检测方法,通过地面激光扫描仪点云和相应的照相机图像的混合处理获取裂缝<sup>[44]</sup>。

Choi 等利用激光扫描仪测量创建道路三维数字表面模型,给出了基于光切面方法的道路表面裂缝自动检测方法。为了从图像数据中检测裂缝,将背景减除法(滚球背景减法算法)应用于渐变的背景噪声数据中,明显降低数据中存在的高度(深度)差异影响,通过图像分割、处理,获得数据库中的裂缝深度与长度等几何属性<sup>[45]</sup>。

Li 等提出了一种基于二维(2D)经验模态分解(EMD)算法的三维(3D)路面检测方法,即非参数化和数据驱动的筛选方法,能够检测路面开裂而不需要复杂的卷积过程。这种方法首先将路面裂缝数据分解为子模型函数(IMFs),它是具有定义好的瞬时频率的单分量函数,将二维 EMD 扩展到三维路面数据的分析中;通过将双相标准差与基于结构元素的形态学算法相结合,从原始采集的 3D 路面数据中消除了随机噪声;然后使用 EMD 方法提取主裂缝,对路面图像进行二值化处理;最后,结合区域生长法和二值化图像的形态学方法提取路面裂缝<sup>[46]</sup>。

Zhang 等提出了一种基于卷积神经网络(CNN)的高效体系结构 CrackNet,用于三维沥青路面的自动化路面裂缝检测<sup>[47]</sup>。与常用的 CNN 不同, CrackNet 没有缩小任何前一层输出的池层,从根本上可以确保像素完美的准确性,并且使用新开发的不变图像宽度和高度的技术。CrackNet 由 5 层组成,包含超过一百万个在学习过程中受过训练的参数;输入数据是由特征提取器提出的各种方向、宽度和长度的线滤波器生成的特征图;输出数据是所有像素的预测类别分数的集合;隐藏层是卷积层和完全连接层。道路试验结果表明:CrackNet 可以同时实现高精度(90.13%),回调(87.63%)和 F 测量(88.86%)。与最近开发的基于传统机器学习和成像算法的裂缝

检测方法相比, CrackNet 在 F-Measure 方面明显优于传统方法。

### 1.3 提高拍摄质量的装置与方法

在提高路面裂缝图像的拍摄质量方面,宋宏勋等发明了一种路面检测频闪照明装置,该装置具有一个通过上、下部调节铰链支撑件,安装在检测车后端接板上的灯架底板,在灯架底板上安装有一个倾斜灯架,在灯架内沿斜向紧邻并排设置有 2 个抛物面槽型反光罩,在两反光罩内槽面的顶部设置有一支或多支可向斜下方投射照明的闪光灯管。当采用该频闪照明装置照明时,在电气控制系统启动后,灯架内闪光灯管发出的直射光以及经反光罩反射的光照射在物面上,形成高亮度光面,并且通过灯架上的上、下部调节铰链支撑件使其灯体的倾角及上下位置等均可调节,通过控制电路可使该装置满足不同照明亮度与不同照明系统安装结构的要求。

宋宏勋等提出了一种路面检测 LED 灯聚光照明装置,具有一个通过上调节支撑螺杆和下连接架铰链安装在固定架板上的倾斜凹面腔灯架,在灯架的内腔表面通过铝基固定板装有多列 LED 灯排,在每列 LED 灯排的前方均设有一个前后位置及方向可调的柱面镜,由各列 LED 灯排发出的光线经可调柱面镜后在线阵相机拍摄位置处聚焦为一条亮带。采用该 LED 光源做路面检测线阵相机照明时,在电气控制系统启动后,多个 LED 灯发出的光经可调柱面镜后聚焦在物面上形成一条高亮度光带,通过调节灯排数列、聚焦距离和照射倾斜角,可使该装置满足不同亮度照明的要求。

在获取高质量路面裂缝图像的前提下,宋宏勋等提出了一种基于双相机立体摄影测量的路面裂缝识别方法,运用 2 部面阵相机,1 部垂直拍摄,1 部倾斜拍摄,对路面同一物点建立 2 部相机之间的映射关系。利用映射关系,计算出倾斜拍摄图像变换后的图像,将变换后的图像与垂直拍摄的图像进行运算,实现路面裂缝的快速分割与识别<sup>[48]</sup>。

### 1.4 路面损坏激光位移检测技术

路面变形类病害检测内容,除了路面平整度、车辙以外,还包括路表面上的各种高低不平现象,如沥青路面的沉陷、波浪、拥包、搓板与冻胀等,水泥混凝土路面的沉陷、胀起、错台与拱起等。主要采用三米直尺现场检测,目视查看,测量记录损坏的长度、宽度、位置与类型等,先进的路面变形类病害检测方法主要是采用图像分析和激光位移传感技术。对于采用多点激光位移传感器检测车辙的方法,应增加横



断面上的激光位移传感器数量,使其达到20个以上,增加行驶方向上的纵向采样密度,使其达到采样间距小于0.2 m,通过三维数字化处理方法获得路面的三维面形,进而分析路面变形等损坏指标。对于采用线激光束和数字图像检测车辙的方法,增加行驶方向上的纵向采样密度,使其达到采样间距小于0.2 m,即提高数字拍摄相机的拍摄频率(达到每秒200帧以上)。

综上所述,目前路面损坏检测主要采用数字图像方法,基本实现了路面裂缝的自动化检测,但是由于道路情况的复杂性,对裂缝的自动识别精确度因路而异,通用性不强,同时对除裂缝外的路面损坏的识别技术还有待发展,因此,减小太阳光等干扰,提高图像拍摄质量、裂缝损坏自动检测的准确性和通用性,其他路面损坏类型的自动检测是今后道路路面检测发展的重点。

## 2 路面平整度检测技术

对于路面平整度检测与评价,国内采用的主要检测仪器是三米直尺(主要用于路面施工质量的监控)、颠簸累积仪与激光路面平整度仪等。平整度检测技术需解决的技术问题如下:

(1)国内外情况:国内外目前遇到的最大技术难点是如何适应低速或随时停车检测,如何满足城市道路十字路口检测需要经常停车的问题;

(2)国内特殊情况:国内激光平整度检测产品的生产厂家,其采用的激光位移传感器基本上是引进的,因此,对于中国的激光路面平整度检测技术,最关键的问题是尽早研究开发自主的可用于路面平整度检测激光位移传感器。

路面平整度指的是道路纵断面竖直方向高低变化量,反映路面纵断面剖面曲线的平整性。当路面纵断面剖面曲线相对平滑时,则表示路面相对平整,平整度相对较好,反之则表示平整度相对较差。路面平整度是路面施工、验收及养护管理评价中的一个重要指标,其快速高精度检测成为研究的重点。路面平整度的检测可分为断面类和响应类。

### 2.1 断面类检测技术

断面类平整度检测以路面纵断面检测为基础,利用获取道路路面纵断面进行各种评价指标的计算。目前,路面平整度检测主要以国际平整度指数IRI为评价指标。道路纵断面的获取方法有水准仪高程法和手推断面仪等,但是由于效率低,逐步被高效的激光路面平整度仪所替代。在纵断面

快速检测方面,常用的方法是借助于安装在检测平台上的激光位移传感器获取平台到路面的竖向距离,利用平台上的加速度传感器信号的两次积分获得平台的振动量,采用两者之差来获取路面的纵断面。该方法的核心是如何精确实现加速度的2次积分。王建锋等提出了利用加速度通过频域-时域混合积分法精确测量动位移的方法<sup>[49]</sup>,克服了传统的时域内2次积分会产生较大累积误差与频域内2次积分产生较大低频误差的弊端,实现了道路纵断面的精确检测<sup>[50]</sup>。

吴秉军等提出了一种基于路面高程自动测量的全断面平整度计算方法<sup>[51]</sup>,采用自动跟踪全站仪、激光测距传感器与倾角仪等,实时获取道路全断面高程坐标;采用Kriging插值法对离散测量点高程进行全断面插值生成路面高程云图,获取道路任意纵断面的高程值,进而计算任意纵断面的国际平整度指数IRI。但是,该检测平台小车检测效率低,不适用于长距离路段检测。

王建锋等提出了一种基于阵列信号分析原理的激光路面平整度检测方法<sup>[52]</sup>,利用阵列信号处理方法,将路面信号转化为阵列信号源个数的估计,将激光检测系统相对于路面的运动转化为阵列信号波达方向的估计,将多传感器检测数据共同信息的提取转化为阵列信号中多信号权向量的加权处理,利用最佳权向量重构出路面断面形状。试验证明该方法为路面平整度检测设备的改进提供一种新方法。

Du提出了一种路面平整度测量系统,包括数据采集模块、车载终端和信息平台,该系统利用Zig-Bee和3G模块传输数据并在各个组件之间构建网络,采用Acceleration-IRI Model模型计算IRI,采用基于GPS的算法对实测道路进行分段,每段长度为1 km。结果保存在Oracle数据库中,显示在数字地图上,并提供给移动终端<sup>[53]</sup>。

毛庆洲等提出了一种基于小波变换的路面平整度检测方法,首先利用轮编码器信号对数据进行分段,然后充分利用各子数据之间的内在联系,自适应地选择不同分解层的小波变换对数据进行处理,提取有效的振动位移值来补偿激光位移传感器检测距离,得到完整的路面相对高程数据,最后计算路面国际平整度指数IRI,在不同的速度和运动状态下具有良好的适应性<sup>[54]</sup>。

### 2.2 响应类检测技术

该类检测方法需要建立检测量与IRI之间的相关关系。王建锋等研究了国际平整度指数IRI的计

算模型和求解方法,找出了影响 IRI 精度的主要因素,利用数值模拟定量分析了位移传感器精度、数据采样间隔、评价距离、检测方向和检测车速等对 IRI 的影响<sup>[55]</sup>。通过提高位移传感器精度与减少数据采样间隔可以提高 IRI 的测量精度。

Du 提出了一种具有 Z 轴加速度计和 GPS 装置的测量系统,建立了基于回归分析的 IRI 估算模型,在多元线性拟合模型和速度修正模型的基础上,开发了一种耦合系统,能够记录不同路面状况、不同时间的实时三轴加速度,利用三轴加速度的功率谱密度序列来模拟 IRI<sup>[56]</sup>。

江东等设计了一种磁悬浮路面平整度检测系统,通过实测输出电压与位移的关系,用虚拟仪器数据处理方法得到被测振动信号的功率谱,通过功率谱和波形分析,对路面平整度进行诊断并得出路面的平整度,设置振动幅度上下限、超限时报警和启动 GPS 定位系统,保存振动数据,实现波形回放和不平整位置的定位<sup>[57]</sup>。

刘庆华等提出了一种改进的 FCM 算法与遗传算法相结合的聚类方法,首先运用遗传算法得到聚类中心,然后用改进的 FCM 聚类算法得到最优解,并基于真实采集的道路谱数据,对路面不平度进行识别。聚类算法具有更好的处理噪声数据的能力,提高了聚类的准确率和路面的识别率<sup>[58]</sup>。

崔丹丹等提出了一种基于 BP 神经网络的路面不平度检测方法,以四自由度车辆振动模型为基础,把 ADAMS/CAR 中车辆平顺性仿真得到的汽车质心垂直加速度谱和俯仰角加速度谱作为输入样本,以路面功率谱密度为输出样本,应用 BP 神经网络建立非线性映射<sup>[59]</sup>。仿真结果表明:该方法识别出的功率谱密度与实际功率谱密度的平均误差仅为 1.23%,具有较强的抗噪声能力和较理想的识别精度。

Wang 等提出了一种基于广义回归神经网络 (GRNN) 的时域仿真方法。利用七自由度车辆振动模型,通过仿真计算车体质心的垂直加速度和俯仰角加速度,利用 GRNN 建立了加速度与路面平整度之间的非线性映射关系,通过训练网络识别路面的平整度<sup>[60]</sup>。

综上所述,路面平整度检测主要以断面类检测为主,实现了路面平整度的自动化检测,如何实现变速和随时停车情况的平整度精确检测是平整度检测技术发展和推广的重点。

### 3 路面车辙检测技术

车辙是车辆在路面上行驶留下的车轮压痕,分

为磨损型车辙、结构型车辙、失稳型车辙与压密型车辙。早期的人工车辙检测是采用刚性梁横跨在车辙上部,用直尺量出车辙底部与横梁的间距;后期发展到半自动检测,在人工辅助下利用横断面仪进行测量;近年来发展到全自动车载快速检测,采用横向布置的激光、超声与红外等非接触位移传感器检测路面横断面,通过数据处理得出车辙的各项指标。

王建锋等利用激光位移传感器的路面车辙检测是在刚性横梁上安装一排激光位移传感器来测量路面横断面,采用上下位机采集处理车辙数据<sup>[61]</sup>。下位机驱动激光位移传感器采集信号并传送至数据采集器中,利用单片机读取采集的数据并发送至上位机,上位机实现车辙数据的实时显示与存储,通过后处理程序对车辙数据进行计算并生成相应的报表,完成对路面车辙的检测。

宋宏勋等提出了一种对称式线激光路面车辙检测系统,具有两副分装在系统搭载车后的竖向系统支撑架杆,在支撑架杆的上方装有俯向拍摄相机,在两支支撑架杆的下部分别通过前、后向支撑杆安装有前、后侧线激光器,两侧线激光器向斜下方发出的线激光束对称相交于拍摄区的待测路表面处。在工作中,前、后两侧线激光器发出的光束在路面上的投影形成的激光散射线,通过数字拍摄相机成像并借助数字图像处理和计算后可得到路面车辙的尺寸等信息;当车辆因振动、颠簸造成车辆俯仰角度变化或当路面在小区域内存在坡度情况时,两线激光束产生相反的位移,通过提取两者车辙检测结果的均值,可减小或消除车辙检测的误差,获得准确客观的路面车辙信息。

李莉等提出了一种图像处理方法来处理路面表面纹理的复杂特征,采用线结构光进行路面车辙检测,将直线型结构光光束投射至路面,由于路面的变形,在被测量的路面上形成三维光栅条纹,在另一位置的摄像头对此三维条纹进行拍摄形成二维的光栅条纹图像;光学投射器与摄像机存在一定的位置关系,在计算机上进行图像处理,提取条纹中心线,能够得到路面车辙的深度曲线<sup>[62]</sup>。

线激光车辙检测的关键在于图像处理,运用图像处理分析原始的光条图像,提取路面横向的变形。由于实测路面的反射光及外界光照等复杂环境影响会对输出造成干扰,因此,需对其进行高斯拟合得到正确的峰值,再将拟合曲线去噪连接各点光心得到平滑的光心曲线,在此基础上得到有效的路面横向变形曲线<sup>[63]</sup>。

Wei等提出一种基于激光图像处理技术的自动车辙特征检测方法。首先对图像预处理,如模糊补偿和增强原始图像,然后采用分割方法得到二值分割图像,再采用多级滤波技术结合统计方法,得到路面车辙特征<sup>[64]</sup>。

陈小宇等提出了一种快速鲁棒的车辙检测方法,基于激光三角法的快速路面车辙检测方法,采用横向投影确定激光线的范围,并通过分段直线拟合去除激光线范围内粗差,用贝塞尔曲线对激光线进行拟合<sup>[65]</sup>。为了提高测量精度,李清泉等建立了更为密集的标定表,采用Delaunay三角形构造标定网形成不规则的三角网<sup>[66]</sup>。这种方法是通过车载式道路激光车辙仪实现的,可用于实时车辙测量和路面分析。检测结果表明,该方法能以每秒80次的采样频率进行车辙测量,检测结果与人工检测结果吻合较好。

Kage等提出了一种使用激光和车载立体相机进行车辙检测的方法,使用CLAHE和滤波器使激光线的形状更易识别,再通过匹配车辙图像来检测路面车辙,消除外部光线的影响<sup>[67]</sup>。

Zhang等提出了一种基于VC的车辙数字成像自动检测技术,利用数字成像技术检测车辙的灰度图捕获图像信息,着重于灰度图的图像处理,通过生成曲线可以准确反映道路的实际情况<sup>[68]</sup>。

综上所述,路面车辙检测技术实现了利用激光和数字图像进行非接触自动化检测,但目前车辙的主要检测指标是车辙深度,如何利用密集的车辙断面值,进行路面变形类病害(如坑槽、拥包与沉陷等)进行检测和评价仍是今后研究的重点。

## 4 路面抗滑性能检测技术

在沥青路面上的交通事故,在很大程度上与路面抗滑性能变差有关<sup>[69]</sup>。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)规定,新建沥青路面抗滑性能必须同时满足路面构造深度MTD和横向力系数SFC技术要求<sup>[70]</sup>。MTD与路表排水性能相关,合理的MTD可以及时排去路表面积水,防止滑水现象的出现<sup>[69]</sup>。获取沥青路面上的MTD,首先能够衡量路面抗滑性,对路面设计与表面性能检测提供指导,提高行车安全性;其次为探索路表抗滑性、透水率与构造深度之间的定量关系奠定基础。

国内外常用的路面构造深度检测方法主要有体积法(铺砂法)、排水测定法、数字图像法、激光断面检测法<sup>[71]</sup>。铺砂法包括手工铺砂法和电动铺砂法。

铺砂法的测试原理就是用定量体积的砂,平整地摊铺在路面上得到摊铺面积,用砂的体积与摊铺面积比值给出测点的构造深度平均值。电动铺砂法与人工铺砂法的原理一样,通过机器找平砂顶面,减小了人工法在摊铺时的误差<sup>[72]</sup>。排水测定法是通过监测固定体积的水通过路面排除的时间来间接地反映路面的宏观构造。数字图像法是通过拍摄的路面纹理图像进行数字分析,按照图像的灰度等信息计算路面的构造深度。激光断面检测法是通过安装在检测车(搭载平台)上的激光位移传感器高速测量路面的构造深度,这种方法具有操作简单、数据结果可靠等优点<sup>[72-73]</sup>。

铺砂法优点在于设备简单,操作快速,缺点在于人为因素太大,对试验砂的尺寸干湿度均有要求,但铺砂法仍是国内最常用的路面构造测试方法。近年来,基于数字图像技术的检测方法快速发展,宁斌权提出了基于二维图形的三维构造模型理论,数字图像处理结果也趋于正确、合理<sup>[74]</sup>。Cigada等提出利用双目相机在车辆运行中实时检测沥青路面纹理特征<sup>[75]</sup>。国内学者根据基于多线激光和双目视觉技术,提出了一种沥青路面平均纹理深度测量方法,结合剖面法和数字图像技术,建立了基于三角测量原理的三维数学模型,实现了沥青面层剖面的三维重建。图像处理技术可以精确地定位模型中各点的坐标,通过模型与得到的空间方程,求出沥青路面平均剖面深度的值,根据剖面法,建立了纹理深度综合计算过程。这种测量方法满足了现场和实验室中沥青路面MTD的测量要求<sup>[69]</sup>。另外还有学者结合部分数字图像技术和激光视觉技术,提出一种基于激光视觉的新MTD测量方法,基于三角测量原理,建立了激光视觉三维数学模型平均纹理深度。这种方法克服平均纹理深度(MTD)测量方法的缺点,操作简单,成本适中,其测量结果具有较高的分辨率和精度<sup>[76]</sup>。

综上所述,路面抗滑性能(构造深度)检测已发展到利用激光和数字图像技术进行非接触、自动化检测,高精度与通用性强是路面构造深度检测的发展方向。

## 5 路面结构强度检测技术

在汽车载荷作用下,路面产生垂直向下的变形,即路面弯沉。路面弯沉是表征路基路面整体强度的重要参数,在道路检测中,根据竖向变形的可恢复性,可分为表征回弹变形的回弹弯沉和包括塑性变形在内的总弯沉两类<sup>[77]</sup>。通过测定的回弹弯沉或

者总弯沉,反映路面结构的强度,因此,高精度的弯沉检测技术受到研究人员的关注。

路面弯沉检测技术按照荷载施加方式不同,分为静力弯沉测试、稳态动力弯沉测试、脉冲动力弯沉测试与波传递式测试四大类<sup>[78]</sup>。静态弯沉检测在结构设计和性能评价上存在着局限性,在弯沉检测的过程中,动态检测法更符合实际结构和材料技术特性。其中,稳态动力弯沉检测和脉冲动力弯沉测试是主要的动态检测法。

贝克曼梁法(BB)是一种规范化的静态弯沉检测方法<sup>[79]</sup>,操作简单,可测得各种路基路面弯沉。把测试车停止在测试点,在后轮之间间隙放置杠杆式弯沉仪测量总弯沉。在测量时,汽车荷载需要移出并远离测试点,待路面回弹后,测出回弹弯沉。该检测方法容易受人为因素影响,测量成本高,效率很低。

针对静态弯沉检测方法的缺陷,李盛等采用了脉冲动力弯沉检测方法<sup>[80]</sup>,研究了弯沉检测的合理温度以及混凝土板边缘和中部的实体变形对弯沉的影响,比较了落锤式弯沉仪(FWD)和贝克曼梁法(BB)弯沉检测的动静态试验结果。周岚等提出了基于落锤式弯沉检测(FWD)多点弯沉盆差值的高速公路沥青混凝土路面各结构层状况评价方法,用不同弯沉盆差值来评价面层、基层、底基层和路基结构承载力状况<sup>[81]</sup>。

目前,自动弯沉仪是国内路基弯沉检测的常用仪器。自动弯沉仪与贝克曼梁法一样,采用杠杆原理测量路面弯沉<sup>[82]</sup>。自动弯沉仪测定车在检测路段以一定速度行驶,将安装在测试车前后轴之间底盘下面的弯沉测定梁放到车辆底盘的前端,并支于地面保持不动,当后轴双轮隙通过测头时,弯沉通过位移传感器等装置被自动记录,这时测定梁被拖动,以2倍的汽车行驶速度被拖到下一测点,周而复始地向前连续测定。此动态检测方法降低了人的劳动强度,提高了测试效率,同时增大了采样数据的准确程度。相较而言,自动弯沉仪得出的是总弯沉,贝克曼梁法得出的是回弹弯沉,在两者结合的基础上,得出回弹弯沉与总弯沉的关系式,实现路基强度评定。洪亮等通过对前插式激光测距自动弯沉仪校准及贝克曼梁法(BB)进行对比试验,分析自动弯沉仪检测数据的准确性。结果显示在相同条件下测得的弯沉具有良好的相关性,得到的线性关系式可以有效评价路基路面施工质量<sup>[83]</sup>。

宋宏勋等发明了一种用于检测路面弯沉指标的道路弯沉光电快速检测装置,由沿长度方向依次组

合连接的空心短弯沉检测梁、分别安装在首节弯沉检测梁前端和后端的线激光阵列照明光源装置、向后准直激光器、安装在末节短弯沉检测梁后的光电接收传感器与安装在该光电接收传感器上部的向前准直激光器组成,由线激光阵列照明光源装置发出的光束射至光电接收传感器,可通过将各弯沉检测梁通过依次套插连接、螺栓连接或铰装连接的方式使之成为伸缩式、分段组合式或折叠分段式直弯沉检测梁。该检测装置可满足路面回弹弯沉、动弯沉高精度检测。

Varghese等使用循环三轴测试设备对印度南部地区红土的弹性模量进行调查检测,并且开发了一套回归方程<sup>[84]</sup>,检测结果与使用便携式落锤弯沉仪(PFWD)获得的结果一致性较高。国外许多道路机构在落锤式弯沉仪(FWD)的基础上又开发了高速弯沉仪(TSD),Chai等利用简化偏转模型(SDM)研究TSD在柔性路面上产生的变形,通过FWD和TSD数据之间的比较,验证了TSD的可行性<sup>[85]</sup>。

探地雷达技术作为一种无损检测方式,逐渐被用于道路结构的无损检测<sup>[86]</sup>。国外学者使用探地雷达技术(GPR)来检验FWD测试中反算分析结果的准确性<sup>[87]</sup>,运用GPR和FWD准确分析路面结构。Marecos等对落锤式弯沉仪(FWD)和探地雷达技术(GPR)进行了评估,分析了使用GPR进行层厚连续评估的重要性,以及使用FWD进行负荷测试对路面结构精确评估的重要性<sup>[88]</sup>。Ahmed等提出了基于机械—经验(M—E)设计的路面性能预测方法<sup>[89]</sup>,并且验证采用GPR和FWD检测方法进行路面质量评估的可靠性。

综上所述,弯沉检测技术逐渐由传统的静态检测向精度较高的动态检测与自动化检测方向发展。

## 6 结 语

中国路面损坏、平整度、车辙、抗滑性能和结构强度等检测技术快速发展,整体水平不断提高,满足了中国公路交通建设、质量验收和运营养护管理等方面的检测需求。目前,中国公路建设已逐渐进入养护维修阶段,未来将会面临大量的路面检测工作,综合多种路面指标检测的道路检测车以其快速、方便与安全等特点将会在未来的交通行业发展中得到广泛应用。本文总结了我国路面检测技术现状,还存在一些需要进一步研究解决的技术问题。

(1)在路面损坏检测方面:基于图像的路面损坏识别和分类方法还有待改进,主要集中在裂缝长度

的识别,对其他损坏类型识别的准确度和效率低。

(2)在路面平整度检测方面:基于惯性基准的断面类的平整度检测方法的检测结果受检测车速影响较大,不适应市政道路、省道与县道等复杂环境下的路面检测。

(3)在路面车辙检测方面:目前,主流采用点激光和线激光2种检测方法。对于点激光车辙检测,为了提高检测精度,需要增加点激光传感器的个数;对于线激光车辙检测,所拍摄的线激光图像的对比度、光线与路面上标志标线等都对激光线车辙的检测结果产生影响,同时受检测车的姿态变化影响也较大。

(4)在路面抗滑性能和结构强度检测方面:一些快速、自动化的路面构造深度与弯沉检测系统,检测结果还需要与铺砂法、贝克曼梁等的检测结果建立相关关系,并且相关性系数受试验检测情况的影响较大。

可见,如何减少各种因素对现有检测技术和检测设备的干扰,提高检测信号的信噪比,开发适合各种工况下的路面检测和数据处理方法,实现路面检测高效化与智能化仍然是今后路面检测技术发展的重点。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] MOHAN A, POOBAL S. Crack detection using image processing: a critical review and analysis[J]. Alexandria Engineering Journal, 2017, DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.020.
- [2] JIANG Ming-hu, GIELEN G, DENG Bei-xing, et al. A fast learning algorithm for time-delay neural networks[J]. Information Sciences, 2002, 148(1-4): 27-39.
- [3] 喂二勇. 国外路面自动检测系统发展综述[J]. 交通标准化, 2009(204): 96-99.  
CHUO Er-yong. Development summary of international pavement surface distress automatic survey system[J]. Transport Standardization, 2009(204): 96-99. (in Chinese)
- [4] KIM J Y. Development of new automated crack measurement algorithm using laser images of pavement surface[D]. Iowa: The University of Iowa, 2008.
- [5] MONEM T A, OLOUFA A A, MAHGOUB H. Asphalt crack detection using thermography[R]. Orlando: University of Central Florida, 2005: 1-12.
- [6] WANG K C P. Elements of automated survey of pavements and a 3D methodology[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(1): 51-57.
- [7] WANG K C P, GONG Wei-guo. Real-time automated survey system of pavement cracking in parallel environment[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(3): 154-164.
- [8] HUANG Ya-xiong, XU Bu-gao. Automatic inspection of pavement cracking distress[J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15(1), DOI: 10.1117/1.2177650.
- [9] CHENG H D, MIYOJIM M. Automatic pavement distress detection system[J]. Information Sciences, 1998, 108(1-4): 219-240.
- [10] 王建锋. 激光路面三维检测专用车技术与理论研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
WANG Jian-feng. Research on vehicle technology on road three-dimension measurement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [11] 罗瑞. 基于图像处理的路面裂缝检测算法研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2017.  
LUO Rui. Research of pavement crack detection algorithm based on image process [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2017. (in Chinese)
- [12] CHENG Heng-da, CHEN Jim-rong, GLAZIER C, et al. A novel fuzzy logic approach to pavement distress detection[C]// SPIE. Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways. Breda: SPIE, 1996: 97-108.
- [13] BHUTANI K R, BATTOU A. Application of fuzzy relations to image enhancement [J]. Pattern Recognition Letters, 1995, 16(9): 901-909.
- [14] 刘玉臣, 王国强, 林建荣. 基于模糊理论的路面裂缝图像增强方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006(2): 35-37.  
LIU Yu-chen, WANG Guo-qiang, LIN Jian-rong. Image enhancement for pavement crack image based on fuzzy theory[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2006(2): 35-37. (in Chinese)
- [15] 唐磊, 赵春霞, 王鸿南, 等. 路面图像增强的多偏微分方程融合[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(9): 1661-1666.  
TANG Lei, ZHAO Chun-xia, WANG Hong-nan, et al. Fusion of multiple basic PDE models for enhancing road surface images[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(9): 1661-1666. (in Chinese)
- [16] ZUO Yong-xia, WANG Guo-qiang, ZUO Chun-cheng. Wavelet packet denoising for pavement surface cracks detection[C]// IEEE. International Conference on Computational Intelligence and Security. New York: IEEE, 2008: 481-484.
- [17] ZHANG Da-qi, QU Shi-ru, HE Li, et al. Automatic ridgelet image enhancement algorithm for road crack image based on fuzzy entropy and fuzzy divergence[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1216-1225.
- [18] 王兴建, 秦国锋, 赵慧丽. 基于多级去噪模型的路面裂缝检测方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(6): 1606-1609, 1612.  
WANG Xing-jian, QIN Guo-feng, ZHAO Hui-li. Pavement crack detection method based on multilevel denoising model[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(6): 1606-1609, 1612. (in Chinese)
- [19] 李清泉, 胡庆武. 基于图像自动匀光的路面裂缝图像分析方法[J]. 公路交通科技, 2010, 27(4): 1-5, 27.  
LI Qing-quan, HU Qing-wu. A pavement crack image analysis

- approach based on automatic image dodging[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(4): 1-5, 27. (in Chinese)
- [20] KIRSCHKE K R, VELINSKY S A. Histogram-based approach for automated pavement-crack sensing [J]. Journal of Transportation Engineering, 1992, 118(5): 700-710.
- [21] TANAKA N, UEMATSU K. A crack detection method in road surface images using morphology[C]//DBLP. Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications. Trier: DBLP, 1998: 154-157.
- [22] 闫茂德,伯绍波,贺昱曜.一种基于形态学的路面裂缝图像检测与分析方法[J].工程图学学报,2008(2):142-147.  
YAN Mao-de, BO Shao-bo, HE Yu-yao. A method of image detection and analysis for pavement crack based on morphology[J]. Journal of Engineering Graphics, 2008(2): 142-147. (in Chinese)
- [23] OLIVEIRA H, CORREIA P L. Automatic road crack segmentation using entropy and image dynamic thresholding[C]//IEEE. 17th European Signal Processing Conference. New York: IEEE, 2009: 622-626.
- [24] CHENG H D, CHEN Jim-rong, GLAZIER C, et al. Novel approach to pavement cracking detection based on fuzzy set theory[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(4): 270-280.
- [25] CHENG H D, SHI X J, GLAZIER C. Real-time image thresholding based on sample space reduction and interpolation approach [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2003, 17(4): 264-272.
- [26] 李清泉,刘向龙.路面裂缝影像几何特征提取算法[J].中国科技论文在线,2007,2(7):517-522.  
LI Qing-quan, LIU Xiang-long. An algorithm to image-based pavement cracks geometry features extraction[J]. Sciencepaper Online, 2007, 2(7): 517-522. (in Chinese)
- [27] 孙波成,邱延峻.路面裂缝图像处理算法研究[J].公路交通科技, 2008,25(2):64-68.  
SUN Bo-cheng, QIU Yan-jun. Pavement crack diseases recognition based on image processing algorithm[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 64-68. (in Chinese)
- [28] HUANG Ya-xiong, XU Bu-gao. Automatic inspection of pavement cracking distress[J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15(1), DOI: 10.1117/1.2177650.
- [29] SOMNCHAREAN S, PHIPHOMONGKOL S. Crack detection on asphalt surface image using enhanced grid cell analysis[C]//IEEE. 4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications. New York: IEEE, 2008: 49-54.
- [30] 唐磊,赵春霞,王鸿南,等.基于图像三维地形模型的路面裂缝自动检测[J].计算机工程,2008,34(5):20-21,38.  
TANG Lei, ZHAO Chun-xia, WANG Hong-nan, et al. Automated pavement crack detection based on image 3D terrain model[J]. Computer Engineering, 2008, 34(5): 20-21, 38. (in Chinese)
- [31] 黄建平.基于二维图像和深度信息的路面裂缝检测关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
HUANG Jian-ping. Research on the key technologies of pavement crack inspection based on 2D image and depth information[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [32] 王刚,贺安之,肖亮.基于高速公路裂纹局部线性特征内容的脊波变换域算法研究[J].光学学报,2006,26(3):341-346.  
WANG Gang, HE An-zhi, XIAO Liang. Algorithm research in ridgelet transform domain based on the image content of freeway local linear crack[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 341-346. (in Chinese)
- [33] CHUA Koon-meng, XU Ling. Simple procedure for identifying pavement distresses from video images[J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(3): 412-431.
- [34] LEE B J, LEE H D. Position-invariant neural network for digital pavement crack analysis[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(2): 105-118.
- [35] 肖旺新,严新平,张雪.基于混合密度因子的路面损坏自动识别研究[J].交通运输工程与信息学报,2005,3(2):19-26.  
XIAO Wang-xin, YAN Xin-ping, ZHANG Xue. Research on the automatic pavement distress recognition based on synthetical distress density factor [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2005, 3(2): 19-26. (in Chinese)
- [36] 丁爱玲,焦李成.基于支撑向量机的路面损坏识别[J].长安大学学报:自然科学版 2007,27(2):34-37.  
DING Ai-ling, JIAO Li-cheng. Automation of recognizing pavement surface distress based on support vector machine[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 34-37. (in Chinese)
- [37] OLIVEIRA H, CORREIA P L. Supervised strategies for cracks detection in images of road pavement flexible surfaces[C]//IEEE. 16th European Signal Processing Conference. New York: IEEE, 2008, 1-5.
- [38] 李清泉,刘向龙.路面影像破损加权评定方法[J].中国公路学报, 2009,22(4):45-49.  
LI Qing-quan, LIU Xiang-long. Pavement image distress evaluation method based on weighted scheme [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 45-49. (in Chinese)
- [39] TALAB A M A, HUANG Zhang-can, XI Fan, et al. Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(3): 1030-1033.
- [40] ZOU Qin, CAO Yu, LI Qing-quan, et al. CrackTree: automatic crack detection from pavement images[J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(3): 227-238.
- [41] SALMAN M, MATHAVAN S, KAMAL K, et al. Pavement crack detection using the Gabor filter[C]//IEEE. 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2013: 2039-2044.

- [42] SONG Hong-xun, WANG Wei-xing, WANG Feng-ping, et al. Pavement crack detection by ridge detection on fractional calculus and dual-thresholds [J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2015, 10(4): 19-30.
- [43] 张德津,李清泉,陈颖,等.基于空间聚集特征的沥青路面裂缝检测方法[J].自动化学报,2016,42(3):443-454.  
ZHANG De-jin, LI Qing-quan, CHEN Ying, et al. Asphalt pavement crack detection based on spatial clustering feature[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(3): 443-454. (in Chinese)
- [44] RABAH M, EIHTTAB A, FAYAD A. Automatic concrete cracks detection and mapping of terrestrial laser scan data[J]. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2013, 2(2): 250-255.
- [45] CHOI J, ZHU L, KUROSU H. Detection of cracks in paved road surface using laser scan image data[C]//ISPRS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vienna: ISPRS, 2016: 559-562.
- [46] LI Wei, HUYAN Ju, TIGHE S L, et al. Three-Dimensional pavement crack detection algorithm based on two-dimensional empirical mode decomposition[J]. Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements, 2017, 143(2), DOI: 10.1061/JPEODX.0000006.
- [47] ZHANG A, WANG K C P, LI Bao-xian, et al. Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep-learning network[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(10): 805-819.
- [48] 宋宏勋,马建,王建锋,等.基于双相机立体摄影测量的路面裂缝识别方法[J].中国公路学报,2015,28(10):18-25,40.  
SONG Hong-xun, MA Jian, WANG Jian-feng, et al. Identification of pavement crack based on dual camera stereo photogrammetry[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 18-25, 40. (in Chinese)
- [49] 王建锋,马建,马荣贵,等.动位移的加速度精确测量技术研究[J].计算机科学,2010,37(12):201-202,237.  
WANG Jian-feng, MA Jian, MA Rong-gui, et al. Study on calculation of dynamic displacement from time-frequency integration of acceleration[J]. Computer Science, 2010, 37(12): 201-202, 237. (in Chinese)
- [50] 王建锋,李平,韩毅.基于多传感器综合的路面不平度测量[J].武汉大学学报:工学版,2012,45(3):361-365.  
WANG Jian-feng, LI Ping, HAN Yi. Road roughness measurement based on multi-sensor data comprehension[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(3): 361-365. (in Chinese)
- [51] 吴秉军,刘东海,孙源泽,等.基于路面高程自动测量的全断面平整度计算方法[J].中国公路学报,2016,29(11):10-17.  
WU Bing-jun, LIU Dong-hai, SUN Yuan-ze, et al. Pavement roughness calculation of entire road surface based on automatic road elevation measuring[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(11): 10-17. (in Chinese)
- [52] 王建锋,宋宏勋,马荣贵.基于阵列信号融合的路面平整度检测原理研究[J].微电子学与计算机,2012,29(10):69-73.  
WANG Jian-feng, SONG Hong-xun, MA Rong-gui. Road roughness detection method based on array signals processing[J]. Microelectronics and Computer, 2012, 29(10): 69-73. (in Chinese)
- [53] DU Yu-chuan, LIU Cheng-long, WU Di-fei, et al. Application of vehicle mounted accelerometers to measure pavement roughness[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, DOI: 10.1155/2016/8413146.
- [54] 毛庆洲,叶浩,丁诗雄,等.基于小波变换的路面平整度自适应提取算法[J].中国公路学报,2015,28(10):11-17.  
MAO Qing-zhou, YE Hao, DING Shi-xiong, et al. Adaptive extraction algorithm of pavement roughness based on wavelet transformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 11-17. (in Chinese)
- [55] 王建锋,宋宏勋,马荣贵.路面平整度评价指标 IRI 的影响因素[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(6):1145-1148.  
WANG Jian-feng, SONG Hong-xun, MA Rong-gui. Influencing factors of international roughness index [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(6): 1145-1148. (in Chinese)
- [56] DU Yu-chuan, LIU Cheng-long, WU Di-fei, et al. Measurement of international roughness index by using Z-axis accelerometers and GPS[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, DOI: 10.1155/2014/928980.
- [57] 江东,刘绪坤.基于磁悬浮振动测试技术的公路平整度测试研究[J].仪表技术与传感器,2017(2):102-106.  
JIANG Dong, LIU Xu-kun. Road flatness detection based on magnetic levitation vibration measurement technique [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(2): 102-106. (in Chinese)
- [58] 刘庆华,周炜,何仁,等.基于优化模糊C均值聚类算法的路面不平度识别[J].农业工程学报,2014,30(22):195-200.  
LIU Qing-hua, ZHOU Wei, HE Ren, et al. Road roughness recognition based on improved fuzzy C-mean algorithm combined with genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 195-200. (in Chinese)
- [59] 崔丹丹,张才千,韩东.基于BP神经网络的路面不平度检测与仿真[J].计算机仿真,2014,31(5):162-166.  
CUI Dan-dan, ZHANG Cai-qian, HAN Dong. Road roughness detection and simulation based on BP neural network[J]. Computer Simulation, 2014, 31(5): 162-166. (in Chinese)
- [60] WANG Wei, BEI Shao-yi, ZHANG Lan-chun, et al. Pavement roughness identification research in time domain based on neural network[J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(7): 3865-3875.
- [61] 王建锋,马建,马荣贵,等.精确车辙检测系统的研究与开发[J].微电子学与计算机,2011,28(2):175-177,180.



- WANG Jian-feng, MA Jian, MA Rong-gui, et al. Research and development of detection system for road rut[J]. Microelectronics and Computer, 2011, 28(2): 175-177, 180. (in Chinese)
- [62] 李 莉, 孙立军, 谭生光, 等. 用于路面车辙检测的线结构光图像处理流程[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 710-715.
- LI Li, SUN Li-jun, TAN Sheng-guang, et al. Line-structured light image processing procedure for pavement rut detection[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(5): 710-715. (in Chinese)
- [63] WANG C Y, TAN Q C, GUO R H. Design and optimization of a linear laser beam[J]. Lasers in Engineering, 2014, 27(5/6): 373-381.
- [64] WEI Yun-tao, HONG Han-yu, ZHANG Xiu-hua, et al. A new method for automatic detection of rut feature based on road laser images[C]//SPIE. 6th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition. Breda: SPIE, 2009, DOI: 10.1117/12.833155.
- [65] 陈小宇, 雷 波. 一种快速鲁棒的车辙检测方法[J]. 应用科学学报, 2013, 31(5): 512-518.
- CHEN Xiao-yu, LEI Bo. Fast and robust measurement of pavement ruts[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 31(5): 512-518. (in Chinese)
- [66] 李清泉, 雷 波, 毛庆洲, 等. 利用激光三角法进行快速车辙检测[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(3): 302-307.
- LI Qing-quan, LEI Bo, MAO Qing-zhou, et al. A fast method for pavement ruts measuring with laser triangulation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(3): 302-307. (in Chinese)
- [67] KAGE T, MATSUSHIMA K. Method of rut detection using lasers and in-vehicle stereo camera[C]//IEEE. 2015 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences. New York: IEEE, 2015: 48-53.
- [68] ZHANG Yue, GAO Ting-ting. VC-based rutting digital imaging automatic detection technology research and design for road construction[J]. Advanced Materials Research, 2012(461): 370-372.
- [69] CUI Xin-zhuang, ZHOU Xing-lin, LOU Jun-jie, et al. Measurement method of asphalt pavement mean texture depth based on multi-line laser and binocular vision[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(5): 459-471.
- [70] 刘仪培, 皇甫懿. 路表构造特征的沥青路面抗滑性能评价方法研究[J]. 黑龙江交通科技, 2016(3): 1-3.
- LIU Yi-pei, HUANG Pu-guang. Study on asphalt pavement skid resistance evaluation method based on the road surface structural features[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2016(3): 1-3. (in Chinese)
- [71] 马荣贵, 王建锋, 李 平. 沥青路面构造深度精确检测方法研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 265-268.
- MA Rong-gui, WANG Jian-feng, LI Ping. Research on high precision measurement of pavement texture depth[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8): 265-268. (in Chinese)
- [72] 刘琬辰, 黄晓明. 基于图像处理的沥青路面构造深度评价方法的优化研究[J]. 北方交通, 2013(3): 9-13.
- LIU Wan-chen, HUANG Xiao-ming. Optimization research of the asphalt pavement surface texture evaluation based on digital image[J]. Northern Communications, 2013(3): 9-13. (in Chinese)
- [73] 王景彬. 高速公路沥青路面检测方法及注意事项探究[J]. 建筑知识, 2017(10): 153-154.
- WANG Jing-bin. Study on detection methods and precautions of asphalt pavement of expressway[J]. Architectural Knowledge, 2017(10): 153-154. (in Chinese)
- [74] 宁斌权. 基于数字图像技术的沥青路面构造深度的评价方法[J]. 装备技术, 2017(7): 143, 65.
- NING Bin-quan. The evaluation method of asphalt pavement construction depth based on digital image technology[J]. Equipment Technology, 2017(7): 143, 65. (in Chinese)
- [75] CIGADA A, MANCOSU F, MANZONI S, et al. Laser-triangulation device for in-line measurement of road texture at medium and high speed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(7): 2225-2234.
- [76] 周兴林, 蒋难得, 肖旺新, 等. 基于激光视觉的沥青路面构造深度测量方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 11-16.
- ZHOU Xing-lin, JIANG Nan-de, XIAO Wang-xin, et al. Measurement method for mean texture depth of asphalt pavement based on laser vision[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 11-16. (in Chinese)
- [77] 王旭东. 沥青路面弯沉指标的探讨[J]. 公路交通科技, 2015, 32(1): 1-12, 24.
- WANG Xu-dong. Discussion of asphalt pavement deflection indicator [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(1): 1-12, 24. (in Chinese)
- [78] 胡 蓉. 杭州市政道路动态弯沉检测及半刚性路面结构适用性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- HU Rong. Research on dynamic deflection testing and semi-rigid pavement structure applicability of Hangzhou municipal roads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [79] 吴 玉, 蒋 鑫, 梁雪娇, 等. 轮载作用下典型沥青路面结构力学行为分析[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 563-570.
- WU Yu, JIANG Xin, LIANG Xue-jiao. Mechanical behaviors of typical asphalt pavement structures under wheel loads[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(3): 563-570. (in Chinese)
- [80] 李 盛, 陈尚武, 刘朝晖, 等. 旧水泥混凝土路面弯沉测试的若干问题研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(12): 4713-4718.
- LI Sheng, CHEN Shang-wu, LIU Chao-hui, et al. Some problems on deflection test of old cement concrete pavement[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(12): 4713-4718. (in Chinese)

- [81] 周 岚,倪富键,王浩仰. 基于弯沉盆的高速公路沥青混凝土路面结构状况评价研究[J]. 公路, 2015(9): 1-6.  
ZHOU Lan, NI Fu-jian, WANG Hao-yang. Research on evaluation of highway asphalt pavement structure based on deflection basin[J]. Highway, 2015(9): 1-6. (in Chinese)
- [82] 赵永胜. G207 锡海线公路改建工程路基弯沉检测方法对比分析[J]. 黑龙江交通科技, 2016(9): 24-25.  
ZHAO Yong-sheng. Contrastive analysis of subgrade detection methods for Highway G207 Xihai Line reconstruction project[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2016(9): 24-25. (in Chinese)
- [83] 洪 亮,杨 帆,付 丽,等. 前插式激光测距自动弯沉仪校准及贝克曼梁对比试验分析[J]. 交通标准化, 2014, 42(17): 149-153, 156.  
HONG Liang, YANG Fan, FU Li, et al. Contrast test analysis on front-insert type auto deflectometer with laser range meter and Benkelman beam method[J]. Transportation Standardization, 2014, 42(17): 149-153, 156. (in Chinese)
- [84] GEORGE V, KUMAR A. Studies on modulus of resilience using cyclic tri-axial test and correlations to PFWD, DCP and CBR[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016: 1-10.
- [85] CHAI G, MANOHARAN S, GOLDING A, et al. Evaluation of the traffic speed deflectometer data using simplified deflection model[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3031-3039.
- [86] 郑佳麒. GPR 信号处理技术研究及在道路沥青注浆评价中的应用[J]. 交通科技, 2017(2): 143-146.  
ZHENG Jia-qi. Research on GPR data processing and application on the evaluation of asphalt grouting[J]. Transportation Science and Technology, 2017(2): 143-146. (in Chinese)
- [87] AHMED M, TAREFDER R, MAJI A, et al. Variation of FWD modulus due to incorporation of GPR predicted layer thicknesses[C]//IEEE. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. New York: IEEE, 2014: 345-350.
- [88] MARECOS V, FONTUL S, DE LURDES ANTUNES M. Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: falling weight deflectometer and ground penetrating radar[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 1164-1172.
- [89] AHMED M U, TAREFDER R A. Incorporation of GPR and FWD into pavement mechanistic-empirical design[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 1272-1282.