

文章编号:1671-1637(2021)04-0032-16

路面抗滑性能检测与预估方法综述

谭忆秋^{1,2}, 肖神清¹, 熊学堂¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 城市
水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要:针对道路工程中路面抗滑性能检测与预估中存在的问题,分别从力学机理、检测方法、预估模型 3 个方面系统梳理了路面抗滑性能相关成果及进展;基于传统的库伦摩擦定律,阐明了路面抗滑性能的摩擦力学机理,从路面、轮胎以及接触环境 3 个方面总结了抗滑性能的影响因素;总结了抗滑性能的直接与间接测量方法,重点分析了路表纹理检测技术的难点以及测试数据的预处理方法;对比分析了抗滑性能预估的传统经验统计模型、力学模型以及机器学习等方法的优点与不足。研究结果表明:影响路面抗滑性能的因素众多,传统的摩擦理论难以描述橡胶与粗糙表面接触界面第三体的力学行为,因此,需要进一步研究具有润滑介质的接触界面摩擦机理;抗滑性能直接检测方法功能单一,成本较高,表面纹理的高速无接触自动化检测更加符合未来智能一体化检测需求,但高精度、大量程检测以及数据清洗仍是需要突破的瓶颈;相比现行的各类预估模型,经验统计模型及机器学习弱化了胎-路接触特性,导致预估模型缺乏扩展性;推行有限元仿真力学模型方法,有望进一步揭示复杂物理场下的摩擦机理,从而开发更精准、高效的路面抗滑预估模型。

关键词:道路工程;抗滑性能;智能检测;预估方法;机器学习

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.002

Review on detection and prediction methods for pavement skid resistance

TAN Yi-qiu^{1,2}, XIAO Shen-qing¹, XIONG Xue-tang¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: The relevant achievements and progress of skid resistance performance of pavements were systematically reviewed based on three aspects: mechanical mechanism, detection methods, and prediction models. The friction mechanism of pavement skid resistance was introduced based on the traditional Coulomb friction law, and the factors influencing the skid resistance were summarized based on road surface, tire, and contact environment. The direct and indirect measurement methods of skid resistance were evaluated, and the difficulties of road-surface texture detection and test data preprocessing methods were analyzed. The advantages and disadvantages of the skid resistance prediction methods, including traditional empirical statistical models, mechanical models, and machine learning, were compared and analyzed. Analysis results show that many factors influence the skid resistance of pavements, and it is difficult to describe

收稿日期:2021-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(U20A20315);国家重点研发计划项目(2016YFE0202400)

作者简介:谭忆秋(1968-),女,吉林德惠人,哈尔滨工业大学教授,工学博士,从事道路材料功能特性与应用研究。

引用格式:谭忆秋,肖神清,熊学堂.路面抗滑性能检测与预估方法综述[J].交通运输工程学报,2021,21(4):32-47.

Citation: TAN Yi-qiu, XIAO Shen-qing, XIONG Xue-tang. Review on detection and prediction methods for pavement skid resistance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(4): 32-47.

the mechanical behavior of the third body between rubber and rough surface. Thus, further investigations are required to reveal the friction mechanism toward the contact interface with the lubrication medium. For the single function and high cost of the direct detection of skid resistance, surface texture detection using automatic high-speed noncontact measurements will be more in line with future intelligent integrated requirements. However, high-precision and large-range detection and data cleaning are still bottlenecks that need to break through. Compared to the existing prediction models, the tire-pavement contact characteristics are weakened by the empirical statistical model and machine learning, resulting in a lack of scalability in the prediction model. The implementation of the finite element simulation model method is expected to reveal the friction mechanism under complex physical fields to develop a more precise and efficient model for predicting the skid resistance of pavements. 1 tab, 13 figs, 89 refs.

Key words: road engineering; skid resistance; intelligence detection; prediction method; machine learning

Author resume: TAN Yi-qiu(1968-), female, professor, PhD, yiqiutan@163.com.

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (U20A20315); National Key Research and Development Program of China (2016YFE0202400)

0 引言

路面交通安全一直是道路、交通工程等领域的热点话题。路面的抗滑性能是影响道路行车安全的重要因素。据不完全统计,中国81%的交通事故与路面抗滑能力不足导致车辆制动时发生侧滑有关^[1]。在美国,平均每12 min就会发生交通碰撞事故,尤其是与湿滑路面性能相关^[2]。在英国和希腊等一些国家,路面抗滑性能不足引发了至少25%的湿滑路面交通事故^[3]。研究表明,路表抗滑水平提升10%,则交通事故率将下降近13%^[4]。此外,据数据统计显示,中国每年的交通事故的直接花费达到百万亿级,且近10年都在呈现增加趋势,交通事故费用也占用了大量可用于改善公路基础设施的资源。中国高等级公路进入运营中末期,表面抗滑功能大幅度降低,每年由于道路抗滑能力不足导致的交通事故层出不穷,尤其是雨雪天气时,路面抗滑能力不足将带来严重的交通威胁,因此,如何提高路表抗滑能力,提高保持路表纹理多尺度粗糙特性也一直是路面安全研究的重要方向。

2009年,美国国家合作公路研究计划发布的*Guide for Pavement Friction*^[5]对抗滑性能的研究做了系统的总结,将路面抗滑性能管理纳入作为路面管理系统的子系统,介绍了路面摩擦机理、测试与管理等方面内容,提出了路面摩擦管理(Pavement Friction Management, PFM)框架,其中涉及到数据获取、处理、管理与应用(设计)等。2010年,美国

公路安全改善计划(Highway Safety Improvement Program, HSIP)要求各州公路机构通过策略和数据驱动的方法来提高公路网的安全性。作为HSIP的一部分,联邦公路管理局要求各州开发一个PFM系统,以降低致命和伤害事故的发生率,并根据事故风险优选安全改进项目。在借鉴国外足尺试验路的基础上,中国2015年底建成首条野外足尺环道,铺设了19种沥青路面结构,用于研究沥青路面结构与材料的长期使用性能及其演化规律。通过对每个加载周期后路面的路用性能进行摩擦因数及表面纹理的检测,以分析并验证各种结构在全寿命周期内各项路面服役性能的长期演化规律^[6]。然而,通过目前道路检测、养护及管理等部门所表现的问题来看,路面抗滑性能仍然面临着许多亟待解决的问题,例如,检测手段多样化,海量数据处理及管理问题;胎-路接触力学系统复杂,预估模型不准确、不统一等问题。

另一方面,大数据时代下的人工智能已经渗透到了各个科学技术领域。在道路工程领域中,特别是在路面病害图像检测与评价方面取得了一系列成果。结合时代技术的发展及需求,中国相继颁布了各项相关政策及指南。2018年,交通运输部办公厅发出《关于加快推进新一代国家交通控制网和智慧公路试点的通知》,与云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代互联网技术融合,实现对公路透彻全面、实时、准确的感知与预测,从而建设协同共享、强大高效的统一智慧管理平台,让业务管理、应急处置

实现可视化、移动化、智能化和精准化。

本文在上述问题的背景下,总结及分析目前路面抗滑性能检测及预估方法,以期大数据时代下的路面抗滑智能检测管理提供一定的指导与参考。

1 路面抗滑性能力学机理及影响因素

1.1 胎-路界面摩擦力学机理

传统的库伦摩擦定律认为物体表面摩擦因数与荷载、接触面积、滑动速度以及温度无关,静态摩擦因数高于滑动摩擦因数。在物理学中有滑动摩擦力(或滑动摩擦因数)的概念,而在汽车轮胎行业,习惯采用附着力(或附着系数)表示。车辆行驶时,轮胎法向荷载分布在整个接触表面,作用在接地面上切向反作用力之和称为附着力^[7],对应的附着系数为附着力与施加在整个接触面积上的法向荷载之比。图1示意了轮胎制动时滑移率与制动附着系数之间的关系。轮胎与路面的接触区域可分为黏着区域和滑动区域。由图1可见:随滑移率增加,滑动区域逐渐增大,黏着区域逐渐减小;在接近临界滑移率(通常为7%~25%)时,制动纵向附着系数达到峰值附着系数(最大静摩擦因数),制动效果最佳,而当车轮处于制动抱死沿路面拖滑(或驱动车轮完全打滑)的极限状态时,即滑移面积(或滑转面积)扩大到整个接触面积,轮胎所受摩擦力称为极限附着力,其大小等于整个接触区域滑动时的摩擦力,因此,附着摩擦因数并不完全遵循库伦摩擦定律,相比于摩擦力概念更具有普遍性。然而在道路工程中,路面抗滑性能定义为完全制动状态下(轮胎滑移率为100%)阻碍轮胎滑动的作用力(即极限附着力)^[5],通常采用一定形式的摩擦测量来量化,如摩擦因数或抗滑值,此时的摩擦因数一般小于峰值附着系数。

对于轮胎橡胶和沥青路面这类温度敏感的黏

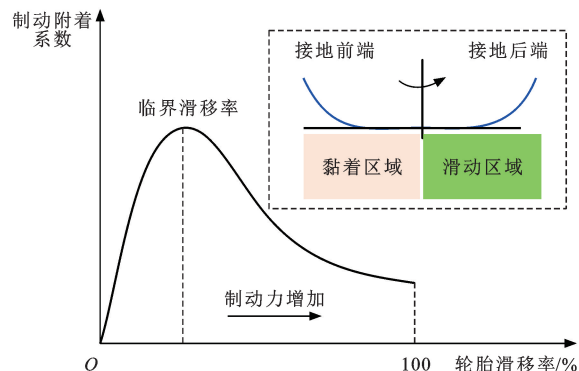


图1 不同滑移率下轮胎的附着系数

Fig. 1 Adhesion coefficients under different slip ratios of tire

弹性材料,胎-路摩擦作用包括以下四方面^[8]:轮胎与路面间范德华力作用;轮胎与路面间的黏附力;胎面橡胶的弹性变形;路面上小尺寸微凸体的微切削作用。Grosch等^[9-12]针对轮胎与粗糙路表之间的摩擦理论进行了一系列研究,认为路面与橡胶之间的摩擦力可以主要归结为黏附分量和黏滞分量的综合影响。

图2为摩擦机理,其中黏附分量是由接触面的剪切作用产生的,特别是在光滑、洁净的表面。由于表面粗糙颗粒与橡胶之间的法向应力(一般可达2.7~6.9 MPa)挤压^[5],当颗粒挤压至橡胶内部时,界面会产生黏附成分。在整个接触区域上的剪切应力之和构成了表面摩擦力的黏附分量。黏滞分量比黏附分量要复杂。黏滞分量与橡胶阻尼消散能量衰减有关。当橡胶块向右滑动时,它必须经过变形滑过颗粒。变形过程包括颗粒左侧的压缩阶段和右侧的恢复阶段。由于两侧能量并不能等量传递,耗散的能量以热的形式释放。这种能量损失由作用于运动方向的外力来补偿。高速滑动时,黏滞分量达到最大值,而相对低速滑动时,黏附分量达到最大值^[13]。

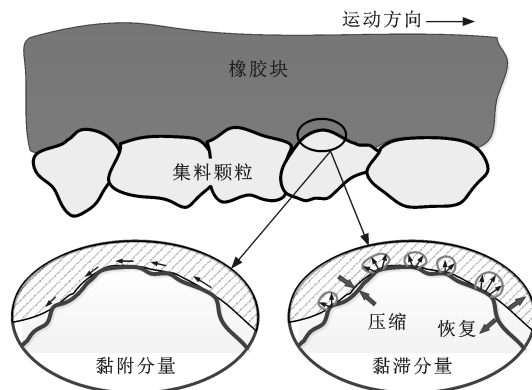


图2 胎-路摩擦机理

Fig. 2 Tire-pavement friction mechanism

1.2 影响因素

轮胎与路面间的抗滑性能是一个非常复杂的现象,影响因素也非常之多。从整个接触系统来讲,路面抗滑性能主要受到路面、轮胎以及接触环境三方面因素的影响^[13-16]。黄晓明等^[8]将这些影响抗滑性能不确定性因素分别归纳到了道路寿命周期不同阶段(设计、施工以及运营)。图3从路面、轮胎及环境3个方面总结了影响抗滑性能的主要因素。

在路面方面,影响路面抗滑性能主要因素有路面表面纹理、几何线型以及结构刚度等因素。其中,研究最多的是路表纹理的微观纹理及宏观纹理特性。宏观纹理(水平波长为0.5~50 mm,幅度为

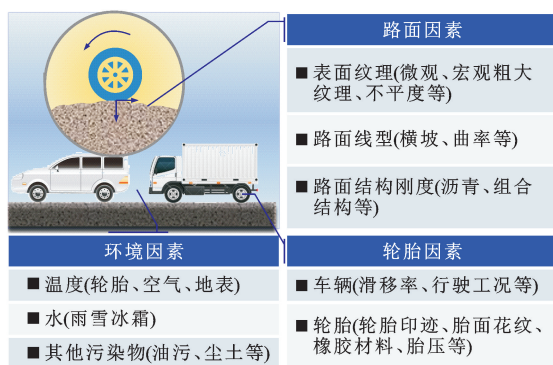


图3 抗滑性能影响因素

Fig. 3 Influencing factors of skid resistance

0.1~20 mm)是指路表粗糙纹理的不规则性,这些不规则性受到路面施工中使用的粗集料的尺寸、形状和分布、骨料的公称最大尺寸以及路面表层施工中使用的特定施工方法影响^[17-18]。微观纹理(水平波长小于0.5 mm,幅度为1~500 μm)是指集料颗粒表面的精细结构不规则性,一般达到微米级别,主要与集料颗粒矿物成分相关。微观纹理主要控制着低速时的路面摩擦,影响着摩擦力的黏附成分。宏观纹理则主要是降低轮胎的滑水风险,并提供高速行驶下因黏滞而产生的摩擦。

在轮胎方面,影响抗滑性能主要因素包括车辆特性及轮胎特性两方面。其中,轮胎滑移率直接影响摩擦因数的大小,通常滑移率峰值为7%~25%,并且随速度变化而变化^[19-20]。轮胎胎面设计(即类型、花纹和深度)对路面积水的排放有明显的影。胎-路接触区域的积水可由轮胎花纹及路面凹孔排出。研究指出,与新轮胎相比,花纹完全磨耗的胎面湿滑摩擦因数减少了45%~70%^[21];许多国家规定了胎面花纹深度的最低要求,例如,英国、美国和加拿大规定的最小胎面花纹深度为1.6 mm^[22]。

胎-路接触环境方面影响的因素更表现出了多样性。例如温度,汽车轮胎橡胶是黏弹性材料,其性能会受到温度变化和其他热性能(如导热系数和比热)的显著影响^[5]。再如水,可以呈现多种形态作为润滑剂,显著减少轮胎和路面之间的摩擦。水膜厚度对摩擦的影响在低速(小于30 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)时较小,在高速(大于60 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)时相当明显。试验结果表明^[23],路面只要0.05 mm的水膜覆盖,摩擦因数就可以降低20%~30%,这种现象甚至也可能在0.025 mm的水膜下发生,而这种水膜厚度能在降雨量大于0.25 mm的任何时刻形成。更为危险的情况是路表凝冰,几乎在任何突然制动或方向突然改变都会导致车轮打滑和车辆方向稳定性丧失^[24]。

此外,胎-路界面的污染物(泥土、沙子等)都会对摩擦产生不利影响。一般污染物越厚或黏性越大,对胎-路摩擦的润滑作用就越大。这些界面第三体的作用类似于滚珠轴承中的滚珠,减少2个表面之间的摩擦^[5]。硬质污染物(如沙子)的研磨作用更加快了路面的磨损速度。以上这些影响因素的耦合使得胎-路接触摩擦问题变得复杂,由胎-路接触模型转变成轮胎-润滑介质-路面三体接触模型,这增加了预估路面抗滑性能的难度,需要进一步考虑颗粒介质摩擦界面的润滑效应。

2 抗滑性能检测方法

过去的70多年里,国内外已经先后开发了许多不同类型的检测设备,它们之间在测量原理以及测量数据的处理等方面具有较大差异。表1中列出了目前抗滑性能的检测方法、部分产品检测特点及相关文献与规范标准。目前,路面抗滑性能的检测方法中使用相对广泛的是路面摩擦因数的检测以及路表纹理检测两类。

2.1 路面摩擦因数检测

目前,行业内已经开发了许多不同类型的摩擦因数商业检测车,如横/纵向摩擦因数检测车、固定/可变滑移率检测车等。一些设备的检测速度可达160 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,同时可改变试验轮胎条件,如载荷、尺寸、胎面设计和结构以及充气压力^[5]。中国《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)中介绍了铺沙、动态摩擦因数测量以及横向摩擦因数等8种现场抗滑性能检测方法。其中抗滑性能检测车以单轮或双轮的横向摩擦因数作为评价指标。而美国测量路面摩擦的最常用方法是纵向摩擦因数(锁紧轮法,ASTM E 274),该方法旨在测试无防抱死制动车辆在紧急制动条件下的表面摩擦特性。

横向力摩擦测试是测量垂直于行驶方向的1个(或2个)自由转动斜交轮胎的路面侧向摩擦力。检测速度约为64 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,喷水速率为1.2 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。检测过程中,同时记录横向力、轮胎负荷、距离和车速。数据通常隔25~125 mm收集一次,并以1 m的数据间隔进行平均。横向力试验可以用于直线路段、曲线和陡坡路段,但这种方法对路面状态非常敏感,例如裂缝和坑洞,对轮胎损害较大。

纵向摩擦检测是一种只能在直线路段上间断性测量的试验,锁定的车轮无法旋转,轮胎滑移速度接近车速(一般为64 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。检测装置安装在拖车上,在路面上喷洒约0.5 mm厚的水,然后通过制

表 1 路面抗滑性能检测方法

Tab. 1 Pavement skid resistance test methods

检测方式	检测方法	代表性装置	检测特点	文献、规范标准
直接测量	横向力检测	英国 Mu-Meter、 SCRIM	检测速度为 $64 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 喷水速率为 $1.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; 数据采集为 $25 \sim 125 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$, 以 1 m 间隔; 适用于直线路段、曲线和陡坡路段。	ASTM E 670
	(锁轮)纵向力检测	美国 Trailer	检测速度为 $64 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 水膜厚度为 0.5 mm ; 数据采集为完全锁定后 $1 \sim 3 \text{ s}$ 取均值; 适用于直线路段。	ASTM E 274
	固定滑移率	英国 Grip Tester、 芬兰 BV-11	滑移率为 $12\% \sim 20\%$; 喷水速率为 $1.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; 数据采集为 $25 \sim 125 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$, 以 1 m 间隔平均; 适用于直线路段。	ASTM E 1844
	可变滑移率	法国 IMAG、 挪威 RUNAR	滑移率为 $0 \sim 100\%$; 水膜厚度为 0.5 mm ; 数据采集间距小于 2.5 mm ; 适用于直线路段、曲线和陡坡路段。	ASTM E 1859
	小型移动式摩擦测试仪	步行式摩擦测试仪 (Walking Friction Tester, WFT)	检测方式为人工手推; 喷水速率为 $45 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 接触压力为 99.2 kPa ; 适用于室内或现场。	[24]
	旋转摩擦因数检测	动态摩擦因数仪 (Dynamic Friction Tester, DFT)	检测速度为 $5 \sim 89 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 喷水速率为 $3.6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; 适用于室内及现场。	ASTM E 1911
	摆式摩擦因数检测	英式摆锤 (British Pendulum Tester, BPT)	检测速度为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 适用于室内及现场。	ASTM E 303
	刹车距离测量	客车或轻型卡车	检测速度为 $64 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 适用于直线路段。	ASTM E 445
	减速度测量	加速度计	检测速度为 $32 \sim 48 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 适用于直线路段。	ASTM E 2101
间接测量	铺沙法	铺沙仪	通过相关特征参数来表征路表的抗滑性能, 如平均构造深度。	ASTM E 965、ISO 10844
	排水法	路面渗水仪		ASTM E 2380
	表面纹理	激光扫描仪		ASTM E 2157、ASTM E 1845、ISO 13473
	其他方法	力/声/温度传感器		[25]~[27]

动系统锁定轮胎测量摩擦阻力, 取车轮完全锁定后的 $1 \sim 3 \text{ s}$ 内的平均值, 作为路面的纵向摩擦因数。

固定滑移率摩擦检测是测量光面轮胎在以恒定滑移速度 ($12\% \sim 20\%$) 下的摩擦阻力。其检测方法与纵向摩擦检测方法类似。固定滑移试验只能用于直线段, 具有连续采集高分辨率摩擦数据的能力, 可用于路网级摩擦检测。

相比于固定滑移率检测, 可变滑移率摩擦测量的滑移率可控制在 $0 \sim 100\%$ 。测试过程中匀速喷洒 0.5 mm 厚的水膜, 通过逐渐降低试验车轮速度, 以 2.5 mm 或更小的间隔收集车速、行驶距离、轮胎转速、车轮负载和摩擦力等信息。可变滑移率试验可用于直线路段和曲线路段的现场连续检测, 能够提供不同滑移速度下的摩擦因数结果。但该测量装置体积大、结构复杂, 维护成本高, 数据处理和分析需求复杂。

总体而言, 检测车可在不影响或低影响交通的情况下, 实现全线路网抗滑性能检测, 但安装复杂、

维护成本和操作培训费用高昂是检测车普遍的缺点。相比之下, 一些常用于实验室或现场低速测量 (一般需要封闭交通) 的路面摩擦特性装置价格相对较低, 如表 1 中的摆式摩擦仪、动态摩擦测试仪及步行式摩擦测试仪。该类设备虽简化了轮胎与路面的接触情况, 但却是目前室内路表抗滑水平普遍适用且相对有效的评价方法。

2.2 路表纹理检测

2.2.1 路表纹理检测方法

路表纹理能够间接地反映路面的抗滑性能。一些较为典型的定点检测方法需要关闭交通, 如铺沙法和流出法。铺沙法是一种基于体积的试验方法, 通过将已知体积的沙子摊铺在道路表面上并测量得到的圆的直径来评估路面表面宏观纹理。沙的体积除以圆的面积即为路表平均构造深度。流出法是一种通过表面纹理和内部空隙测量排水率的体积试验方法。它通过轮胎底部水流出时间来表示表面的透水性能。该设备由底部带有密封橡胶圈的开口圆筒

组成。传感器测量已知体积的水进入路面所需的时间。流出时间越长,表明表面纹理越粗糙。上述2种基于体积的测试方法仅能粗略地体现表面宏观纹理特性。

圆形激光纹理仪是一种定点非接触式激光纹理测试装置,它以0.868 mm的间隔沿直径为286 mm的圆形路径测量表面轮廓。设备以 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度旋转,生成路面的8段轮廓线,并将其传输和存储在便携式计算机中。从这些轮廓可以计算出2种不同的宏观纹理指数:平均断面深度和轮廓均方根。平均断面深度是平均构造深度的二维估计值。轮廓均方根提供了实测数据与拟合数据之间的偏差。尽管圆形激光纹理仪是一种非接触式方法,但是其旋转式的测量方式也限制了其向高精度、大量程的扩展潜力。

目前,路表纹理高速自动测量是新兴的非接触式路网级测量技术。早期美国联邦公路局开发的路面纹理分析仪就是采用激光传感器测量路面纹理的车载便携式的自动化的系统。该设备最高可达 $113 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。自动测量系统提供了大量纹理数据的基础信息,大大减少了传统体积测量方法固有的安全和交通控制问题。如今,商业化的道路病害一体化检测设备日益增多,如图4所示,典型的激光裂缝测量系统(Laser Crack Measurement System, LCMS)一般包括纹理数据和光密度数据采集系统。通过获取路表纹理数据以及图像信息,采用数据处理方法,进一步分析各种路面状态评价指标。高速自动测量系统一些应用场景也包括:路面管理系统、现场路面安全调查、新建路面的质量控制以及结合摩擦、噪声等测试设备实现同步测量。

2.2.2 路表纹理检测难点

随着数据采集技术、传感器技术和计算机数据

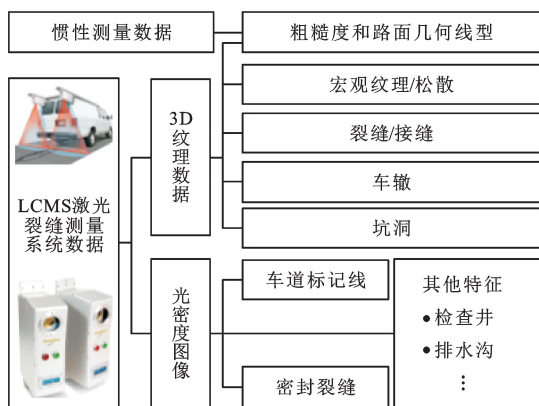


图4 路表状态高速自动检测系统

Fig. 4 High-speed automatic detection system of road surface condition

处理能力的发展,形成高速智能轻量化检测是当下路面检测装备的研究方向。尽管直接测量法能够获得相对准确的抗滑性能结果,但除了高费用外,检测功能较为单一。相比之下,表面纹理的获取则更符合检测功能一体化的发展方向。但是,目前纹理检测方法及设备也存在一些测量技术难点与瓶颈。

根据实践经验,从这些精密的光学传感器设备上获得的原始测量结果,仍存在一些缺陷,如以漏点和尖峰形式存在的噪声。美国公路合作研究计划的报告指出,对长期路面性能中收集的断面数据存在数据尖峰的问题^[28]。美国联邦公路局在进行国际粗糙度指数(International Roughness Index, IRI)测量时也指出了数据尖峰的问题^[29]。Sayers等^[30]指出路面轮廓测量中存在尖峰,主要是表面反射率变化原因引起,潜在因素包括水、路面标记、磨光骨料、二氧化硅成分等。另一方面,由于路表几何不规则,采用机器视觉观测时许多凹陷部分是无法反馈深度信息的,则会出现漏点,表面纹理测试数据缺失。

值得注意的是,黑色和发亮的材料(如新铺路面表面沥青)同时存在这2个问题。如图5所示,黑色材料吸收了大量的测量光,只散射入射光的一小部分;有光泽的镜面会导致激光以不可预知的方式反射,改变反射到接收透镜的光量信息。这些影响因素普遍存在于集料中矿物成分、道路上的反光涂料以及凝冰积雪路面中。此外,还包括一些其他因素,如温度、几何形状、二次反射、带宽和采样率等,均是测量中的潜在噪声源,因此,获得相对精确的检测数据,先进的检测设备还需要配套准确的数据处理算法。

2.2.3 纹理数据预处理

漏点和尖峰的存在导致测量的纹理信息包含了噪声信息。这将会对路面断面深度以及国际粗糙度指数等指标的计算产生非常大影响,计算的结果误

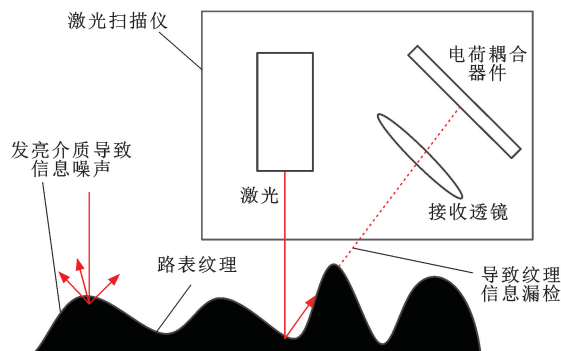


图5 路表纹理激光检测

Fig. 5 Road surface texture laser detection

差将会特别大^[31],因此,需要进行数据清洗,以有效识别与处理这些异常点。

异常点识别的首要问题是有效测量值的分布,一旦分布确定,不属于该分布的测量值则为异常点^[32]。例如,中国《公路路面技术状况自动化检测规程》(JTG/T E 61—2014)中采用移动平均滤波方法来剔除超出检测范围的无效数据。学者一般以正态分布中的 3σ 原则来判别尖峰,因为数值分布在此区间的概率达 0.997 4。然而,对于大型的数据集使用固定阈值的缺点是,一些完全正常的观测值将会被标记为异常值。一些通过调整观察次数的方法,如 Bonferroni 校正和 Grubbs 方法(2 种方法对于正态分布的大数据集是等效的),一般效率很低^[33-34]。为了提高效率,Benjamini 等^[33]提出了控制错误发现率(False Discovery Rate, FDR)方法。FDR 方法的优点是无论异常值存在与否均适应,并且不受高斯分布的限制,可以应用于任何概率分布,同时不存在固定阈值的缺点。Katicha 等^[32]发现纹理测量明显偏离高斯分布,广义高斯分布(Generalized Gaussian Distribution, GGD)适合表示宏观纹理测量,提出使用 GGD 和 FDR 控制是处理宏观纹理测量中尖峰的有效方法。在不考虑诸如潮湿等因素情况下,受异常值污染的数据百分比要低于 3%。表面纹理幅度的广义的高斯概率分布函数可表示为

$$p(h) = \frac{\beta}{2\alpha\Gamma(1/\beta)} e^{-\frac{|h-\bar{h}|}{\alpha}^\beta} \quad (1)$$

式中: $p(h)$ 为路表纹理样本幅度 h 的概率分布函数; β 为形状参数,当 β 为 2 时,函数为高斯(正态)分布,当 β 为 1 时,函数为拉普拉斯(双指数)分布; α 为与样本方差相关的尺度参数; $\bar{h}$ 为位置参数(样本平均值); $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。

在处理测量数据的漏点上,只有当所评估长度的漏点率不超过 10%,且使用邻近有效点线性插值替换无效样本,路面上的纹理测量才视为有效^[35]。Dong 等^[36]采用线激光扫描仪获取了表面纹理,发现存在明显的漏点现象,针对这一问题,采用漏点前或后 5 点平均方法处理了表面纹理漏点数据。由于纹理凹陷内部无法通过视觉直接测量,目前还难以实现数据插值方法的验证。

3 抗滑性能预估方法

虽然抗滑性能检测有助于研究人员直接掌握路面的摩擦水平,但在使用试验方法时仍存在一些局限性。例如,准确检测胎-路接触行为,如接触面积、

界面应力的分布,通常是困难和耗时的,这也缺乏对抗滑形成机理的理解。此外,试验的精度和重复性也不可避免地受到操作条件变化的影响。由于抗滑性能影响因素众多,也使得路表抗滑性能准确预估变得十分复杂,因此,抗滑性能模型化方法也一直是不断发展与改进的热点问题。

3.1 经验统计模型

3.1.1 传统经验模型

早在 20 世纪 30 年代,学者就观察到了路面抗滑性能依赖轮胎滑动速度大小。1965 年,美国材料试验协会以滑动指数作为摩擦因数。随后,美国州公路及运输协会采用了 ASTM E 274 的试验方法,将术语滑动指数改为摩擦指数。直至 20 世纪 90 年代初,有学者提出了 2 种常用的双参数抗滑模型,即 Penn-State 抗滑模型和国际摩阻系数(International Friction Index, IFI)模型。

根据实测抗滑数据的统计拟合,Penn-State 模型通过 2 个参数来表示速度-抗滑性能关系:零车速下的抗滑值截距 N_0 和描述曲线形状的梯度项 ∇ 。这一关系表示为^[37]

$$N_v = N_0 e^{-\nabla v} \quad (2)$$

式中: N_v 为在试验速度 v 下测得的抗滑值; N_0 为根据英国摆锤试验换算得到的抗滑值。

式(2)中常数 ∇ 是通过拟合曲线 3 个(48、64、80 km·h⁻¹)或更多速度下的抗滑值获得的^[38]; N_0 与路面微观纹理相关;常数 ∇ 与路面宏观纹理相关^[39]。

为了协调不同摩擦测量装置测试结果,世界道路协会委托来自 16 个国家的参与者进行了一项实地试验。采用 47 种测试装置测量了 54 种不同的路面的摩擦因数,同时也测定了路表宏观纹理。在建立国际摩阻系数模型^[40]时采用了 Penn-State 摩擦模型的概念。其主要思想是将不同装置测得的摩擦值转换成统一标准。不同的试验装置和试验方法可在多个试验条件下变化:试验速度、水膜厚度、轮胎尺寸、轮胎压力、滑移角和滑移率等^[41]。IFI 模型包含 2 个参数:摩擦指数 F_{60} 和速度系数 s ,计算得到的 IFI 报告为 IFI(F_{60}, s), F_{60} 为试验速度 60 km·h⁻¹时湿路面摩擦因数。 s 与测量的平均纹理深度^[42]或平均断面深度^[43] T 存在如下关系

$$s = a + bT \quad (3)$$

式中: a 和 b 均为回归系数,ASTM E 1960^[44]统计确定了回归系数 a 和 b 分别为 14.2、89.7。

摩擦指数 F_{60} 回归方程表示为

$$F_{60} = m + nF_v e^{\frac{60-v}{s}} \quad (4)$$

式中: m 和 n 均为回归系数; F_v 为试验速度 v 下测量的摩擦因数。

可见,IFI模型将不同摩擦测量装置的摩擦因数数值转换为标准IFI尺度,可以预估在任何指定测试速度下的抗滑性能。然而,这2个参数的抗滑模型仍然无法给出不同水膜厚度试验条件下的抗滑性预估结果。它们对抗滑性能的预估仅适用于特定的水膜厚度。

3.1.2 基于纹理特征参数的统计模型

在公路抗滑性能检测规范中,常采用构造深度(铺沙法测得)或平均断面深度(激光纹理扫描)来衡量表面抗滑性能水平。但该类参数仅仅只能反映表面纹理的宏观纹理水平。图6分析了中国足尺环道2017年6月与2018年4月各路段表面抗滑性能的检测结果^[45-46],其中包括横向摩擦因数(Side Friction Coefficient, SFC)及平均断面深度(Mean Profile Depth, MPD)两类参数。变化较为明显的是横向摩擦力数均呈现衰减的趋势,而表面断面深度却并没有明显的下降趋势。两次检测结果拟合分析如图7所示,图中平均断面深度(因变量 y)与横向摩擦因数(自变量 x)的拟合关系并没有表现一致,而且决定系数 R^2 较低。造成此现象的原因,一方面可能由于两参数并不具备较好的相关性;另一方面现场测试条件的差异造成,如温度、路表洁净程度等等,而现场这些因素也是极难控制的。

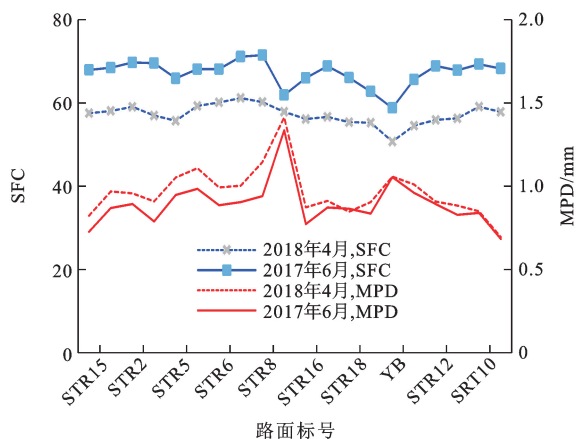


图6 足尺环道横向摩擦因数与平均断面深度

Fig. 6 SFC and MPD of full-scale track

基于纹理特征参数的统计模型主要的分析思路可总结如图8所示。一方面,通过统计几何分析方法,可得到一些常见的统计类参数(幅度、间距以及形状等参数^[44,47]。另一方面,借助信号处理分析方法,如傅里叶变换、小波变换、希尔伯特黄变换

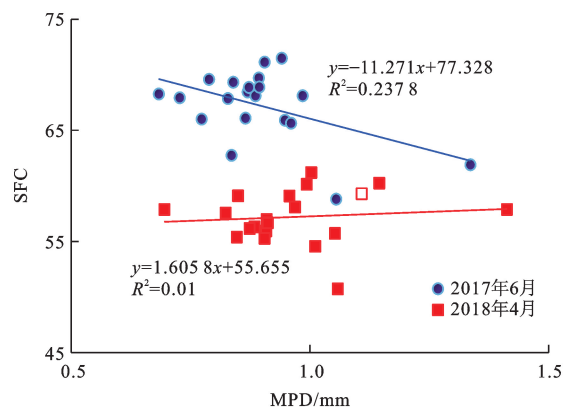


图7 横向摩擦因数与平均断面深度的关系

Fig. 7 Relationship between SFC and MPD

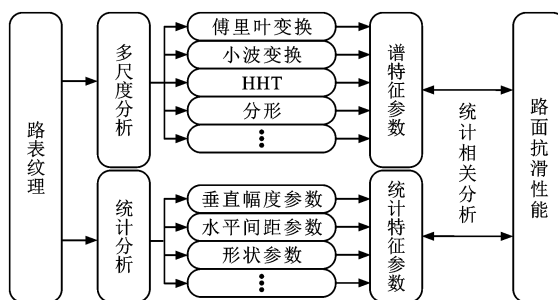


图8 基于路表纹理的抗滑性能预估方法

Fig. 8 Prediction methods of skid resistance performance

based on pavement surface texture

(Hilbert-Huang Transform, HHT)以及分形等方法,也形成了表面纹理多尺度特征参数,例如功率谱、频谱、分形谱等^[48-53]。最终通过数学统计相关性分析,以达到预估路面抗滑性能的目的。这类通过纹理特征参数来表征路面抗滑性能的模型,缺乏实际的物理含义,而且也缺乏影响抗滑性能其他因素的考虑,预估效果并不理想。

3.2 力学模型

3.2.1 有限元模拟方法

经验模型的研究可以对湿滑阻力的机理及其影响因素提供有益认识,但一旦其中一个相关因素发生变化,经验关系的适用性就会受到限制,因此,通过仿真手段来分析各种影响因素对胎-路抗滑性能的影响更加具有扩展性,而且比大规模的现场试验更加经济与高效。当建立的模型具备较高的预估精度时,则可以快速准确地得到模拟结果,并且能从理论上进一步揭示轮胎与路面的相互作用机理。

自19世纪80年代子午线轮胎问世以来,轮胎雨天滑水一直是轮胎和汽车制造商面临的巨大挑战性课题。目前,路面抗滑性能有限元分析大量集中在轮胎与湿滑路面接触的有限元模型上^[54]。20世纪70年代以来,Browne等^[55-59]相继提出了轮胎湿

滑阻力的理论模型;Cho 等^[60]采用有限体积法和有限元法研究了轮胎在湿滑路面上的滑水特性,采用通用耦合方法处理了复杂花纹的轮胎胎面与水流之间的流-固耦合问题,通过数值仿真,分析了轮胎沟槽内的水流、动水压力和接触力,验证了花纹轮胎比三槽轮胎模型产生的水动力更小,表明花纹轮胎的雨天抗滑性能更好。然而,由于假设水是无黏性体以及轮胎忽略变形等,这些模型运用受到一定限制。

为了克服现行路面抗滑性能表征和抗滑阈值的局限性,Fwa 等^[61-62]在轮胎潮湿路面建模做了大量工作,建立了胎-路-水膜三维数值模型,研究了不同水膜厚度下速度对湿滑阻力的影响,并用于路面管理及雨天行车路网安全评估中。此外,路表车辙也是雨天抗滑安全驾驶考虑的重要因素。通过输入车辙断面的三维扫描数据,对任意水膜厚度的车辙断面进行网格划分和有限元分析。采用流体力学分析方法,计算得出车辆行驶的摩擦因数。由于两侧轮胎摩擦因数之间的差异,车辆滑行方向发生了改变,从而增加了轮胎侧滑的风险^[63]。

然而,这些模型主要集中于轮胎花纹优化与流-固耦合的接触问题,并没有较好地考虑路表纹理以及路面内部空隙连通导致的渗透性作用。针对这一问题,Anupam 等^[64-67]相继开展了一系列仿真研究,采用 X-ray CT 切片重构的方法,建立了路表三维模型,分析了温度、纹理以及轮胎花纹对胎-路摩擦的影响;Tang 等^[68]进一步考虑路面的表面特性和多孔结构,提出了一种新的轮胎-流体-路面相互作用有限元模型,如图 9 所示,轮胎-流体-路面有限元模型旨在综合考虑路面几何设计、轮胎胎面设计和各种轮胎工况的影响,评价不同降雨强度下的湿滑阻力。该有限元模型不仅能够模拟水在路面表面的流动,而且能够捕捉水渗入路面多孔结构的过程,从而更真实地模拟了轮胎-水-路面相互作用过程,得到了更准确的抗湿滑性能结果。但是这种路面纹理及近表层结构的建模都会极大影响模型的计算效率。

目前,路面抗滑性能研究采用的数值仿真方法主要有计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)以及流-固耦合欧拉-拉格朗日(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)法^[8]。CFD 法通过反复迭代得出轮胎在路面压力以及水流冲击作用下的力学响应,其收敛性较高,但并未实现完全流-固耦合。CEL 法通过欧拉单元直接让流体作用于网格,

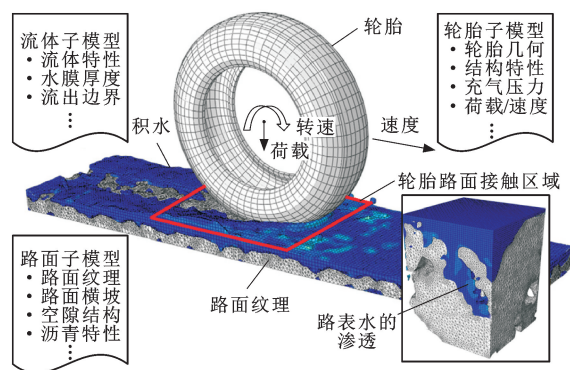


图 9 轮胎-流体-路面有限元模型

Fig. 9 Finite element model of tire-fluid-pavement

能够解决计算中出现的大变形问题,但是对网格划分的要求高。

3.2.2 力学解析方法

胎-路接触抗滑性能的力学解析模型能够直接揭示材料各项参数与抗滑性能之间的关系,从而直接为选材设计提供指导。为了得到轮胎橡胶与粗糙路表的摩擦力学模型,不少学者将轮胎简化成橡胶滑块进行分析。2001 年,Persson^[69-70]根据橡胶在粗糙表面不同尺度(从微观到宏观)的黏弹性行为,提出了一种橡胶粗糙表面多尺度接触的摩擦模型(Persson 摩擦理论)。该理论的核心思想是基于橡胶与粗糙表面接触的分形特性,如图 10 所示,当接触区域以不同尺度去观察,真实接触区域面积越来越小于名义接触面积。该现象可以表述为

$$P(\xi) = A(\lambda)/A(L) \quad \xi = L/\lambda \geq 1 \quad (5)$$

式中: $P(\xi)$ 为尺度放大倍数 ξ 下实际的接触面积与名义接触面积 $A(L)$ 之比; $A(\lambda)$ 为 λ 对应的实际接触面积, λ 为在尺度放大倍数 ξ 下纹理的水平波长; L 为接触区域名义长度。

基于能量守恒定律,假设摩擦力是由橡胶振荡

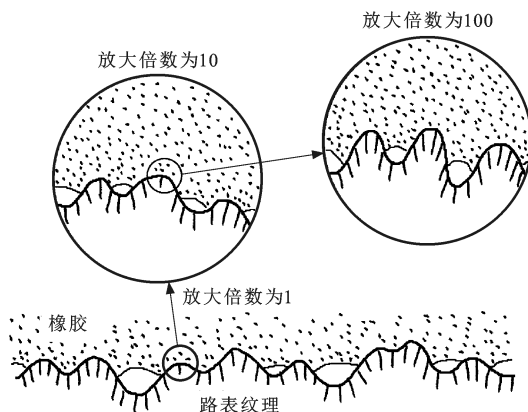


图 10 橡胶粗糙表面多尺度接触

Fig. 10 Multi-scale contact between rubber and rough surface

引起的黏滞内耗所导致,则可得到不同尺度下速度 v 和波矢 q 的黏滞摩擦因数

$$\mu_H = \frac{1}{2} \int_{q_0}^{q_1} q^3 C(q) P(q) dq \int_0^{2\pi} \cos(\varphi) \cdot \frac{E''[qv \cos(\varphi), T_q]}{(1 - \nu^2) \sigma_0} d\varphi \quad (6)$$

式中: μ_H 为黏附摩擦因数; $C(q)$ 为波矢 q 的表面粗糙度功率谱密度函数; $P(q)$ 为在波矢 q 下胎-路真实接触面积与名义接触面积之比,其中 $q = \xi q_0$; 积分的下限 q_0 为参考波矢,与测量范围的尺寸相关; 上限波矢 q_1 在粗糙表面洁净时与轮胎的材料性能有关,否则与污染颗粒的大小有关; $E''[qv \cos(\varphi), T_q]$ 为橡胶的损耗模量,是与施加于路表微凸体的荷载频率 $qv \cos(\varphi)$ 和闪点温度 T_q 相关的函数; φ 为速度与波矢之间的夹角; ν 为橡胶材料泊松比; σ_0 为轮胎名义接触压力。

随后, Lorenz 等^[11]在此基础上加入了半经验的摩擦黏附模型,进一步完善了橡胶低速下的摩擦模型

$$\mu_A = \frac{\tau_0}{\sigma_0 P(q_1)} e^{-c \lg^2(v/v_0)} \quad (7)$$

式中: μ_A 为黏附摩擦因数; $P(q_1)$ 为波矢 q_1 下的真实接触面积与名义接触面积之比; τ_0 为界面剪切应力参考值; v_0 为速度参考值; c 为常数。

式(7)中 τ_0 、 v_0 以及 c 均通过试验数据拟合得到。

Kluppel 等^[71-72]基于能量守恒原理,将粗糙表面上的橡胶摩擦做功与橡胶在宽频带滑动随机激励下的耗散能量联系起来,也提出了类似的摩擦模型,由此频率 ω 替代了 Persson 模型中的波矢 q

$$\mu_H = \frac{\delta}{2\sigma_0 v} \int_{\omega_0}^{\omega_c} \omega E''(\omega) S_1(\omega) d\omega + \int_{\omega_c}^{\omega_1} \omega E''(\omega) S_2(\omega) d\omega \quad (8)$$

式中: δ 为轮胎激发厚度,与橡胶平均渗透深度相关^[73]; $S_1(\omega)$ 和 $S_2(\omega)$ 分别为在不同频率空间范围 $\omega_0 \sim \omega_c$ 、 $\omega_c \sim \omega_1$ 的功率谱密度函数, ω_0 、 ω_1 分别对应波矢 q_0 及 q_1 下的频率, ω_c 为不同功率谱密度函数 $S_1(\omega)$ 和 $S_2(\omega)$ 的交点对应的频率; $E''(\omega)$ 为与频率 ω 相关的橡胶的损耗模量。

与完全三维形式下的 Persson 模型相比, Kluppel 模型以一种平均的方式考虑了表面粗糙度的三维分布。Motamedi^[74]将 Kluppel 的宏观和微观 2 种尺度与 Persson 理论模型相结合,将理论结果与室内试验结果进行比较,验证了理论模型的准确性; Persson 等^[69]在上述干燥摩擦模型的基础上,还进一步考虑了表面存在薄层水膜以及冰面的摩擦

力学行为,并将摩擦系统各部分计算形成了软件模块; Alhasan 等^[75]采用上述橡胶摩擦理论建立了摆式摩擦仪的力学计算模型; Kane 等^[76]以动态摩擦因数仪为研究对象,建立了基于接触应力的 DFT 湿滑路表摩擦力学模型,并通过迭代数值求解与试验结果进行了验证; Tan 等^[77-78]结合 Persson 摩擦理论,借助改进的动态摩擦测试仪,进一步建立并验证了冰雪路面抗滑性能的力学模型。这些研究也扩展了橡胶与粗糙路表接触摩擦力学解析模型的实际应用。

总体而言,由于这些模型都是基于滑动橡胶块的机理而发展起来的,它们没有提供轮胎摩擦的完整描述。例如,以摆式摩擦仪建立的力学模型,降维成滑动橡胶块(宽为 76 mm,滑动速度约为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)与粗糙表面线接触问题;而以 DFT 仪器建模的力学模型,考虑了较小尺寸($20 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$)的橡胶块三维接触问题。但是这些模型在一定程度上相对有效揭示了胎-路摩擦与速度、温度、荷载等因素的力学关系,并且对路表纹理的设计具有一定的指导意义。

3.3 机器学习预估模型

3.3.1 基于图像数据的路面状态机器学习识别方法

近些年,机器学习成为人工智能中最具智能特征、最前沿的研究领域之一。使用计算机模拟实现类似人类学习活动,目前已在图像识别、自动语音识别、网站搜索等领域得到了广泛的应用。图 11 说明了深度学习的概念及其与机器学习的关系,机器学习是实现人工智能的一种方法,深度学习是机器学习的一种技术。深度学习是一种使用深度神经网络的机器学习技术。深层神经网络是包含 2 个或更多隐藏层的多层神经网络。

基于图像分析的路面病害检测始于 1990 年,历经 30 年不断发展成熟。图像分析方法主要面临 3 个挑战^[79]: 背景复杂多变、斑点噪声强、目标信噪比低; 目标与背景之间对比度低; 目标像素的空间连续性差。可见,一般的病害特征提取方法只能得到路面病害的部分信息,很难获得全面的结果。由于卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)对于目标几何形状的缩放、倾斜具备高度的鲁棒性,足以应对具有复杂形态的裂缝、坑槽等病害。此外, CNN 具备强大的背景噪声滤波能,足以克服路面检测图像中的斑点噪声及低对比度问题。

为此,近年来国内外提出了各种目标检测方法。

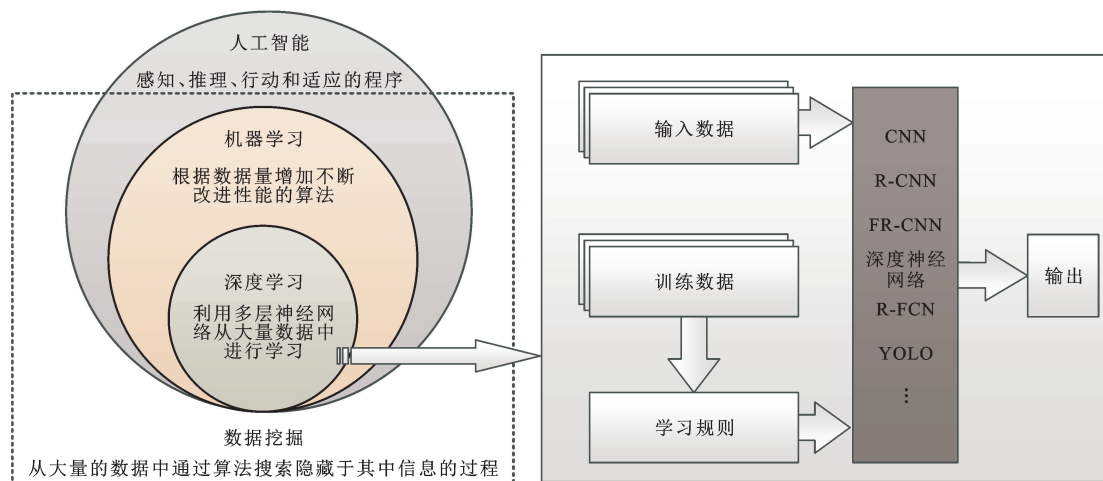


图 11 人工智能方法及深度学习框架

Fig. 11 Artificial intelligence methods and deep learning framework

沙爱民等^[79-80]以图像为分析对象,将 CNN 用于路面裂缝、探地雷达图谱以及路面病害图像识别,均取得较好预估效果。此外还包括 R-CNN、FR-CNN、R-FCN、YOLO 以及 SSD 等基于 CNN 发展起来的大量图像检测算法^[81]。

3.3.2 路面抗滑性能预估的机器学习方法

由于获取的路表纹理能作为图像分析数据,尤其近 5 年来,上述机器学习算法也逐渐用于抗滑性能预估中。Najafi 等^[82]利用神经网络预估基于表面摩擦水平、交通水平和速度限制的道路干湿状态下车辆碰撞率。人工神经网络容易出现过度拟合现象,当模型在训练集上的误差很小,而在测试集(新数据)上的误差很大时,就会发生过度拟合。这意味着人工神经网络已经记住了训练的例子,但还没有学会推广到新的预估中。由于机器学习的核心挑战是建立在新的(看不见的)输入上表现良好的模型,而不仅仅是在那些用来训练模型的输入上,所以过度拟合是人工神经网络的一个重要限制。为了应对神经网络很容易过拟合的问题,Srivastava 等^[83]提出了一种 Dropout 方法,关键思想是在训练过程中从神经网络中随机丢弃层,这就防止了单元之间的过度协同,在训练期间,从不同的稀释网络中以指数级的数量丢失样本,在测试时,只需使用一个权重较小的网络,就可以很容易地近似出所有这些细化网络的预估平均值的效果。这大大减少了过度拟合,并且比其他正则化方法有了很大的改进。

Marcelino 等^[84]利用 Python 机器学习库 Scikit-Learn 对沥青路面摩擦进行预估,建立了 2 个有效的摩擦预估机器学习模型——线性回归及正则回归,随后考虑模型的泛化能力,用于路面管理系统

中,基于随机森林算法,利用长寿命路面性能计划的路面结构、气候以及历史国际摩阻系数等数据预估了未来 5、10 年的国际摩阻系数;Tong 等^[85]根据采集的路表三维纹理样本,建立了表面纹理粗糙度的卷积神经网络预估模型,采用的卷积神经网络的基本结构如图 12 所示,其层级结构一般包括数据输入层、卷积层、激励层、池化层、全连接层。

针对网络深度加深而产生的学习效率变低,准确率无法有效提升的问题(也称为网络退化),在前期的基础上进一步构建了摩擦因数的深度残差网络结构^[86],如图 13 所示,与卷积神经网络不同,摩擦因数的深度残差网络是一种具有跳跃连接的残差学习框架,可以显著地降低梯度,并且能够有效地训练更深层次的网络,以提高分类精度。该算法优于 4 种传统机器学习方法(高斯朴素贝叶斯、 k 近邻、支持向量机和随机森林)。

卷积网络在本质上是一种输入到输出的映射,它能够学习大量的输入与输出之间的映射关系,而不需要任何输入和输出之间的精确的数学表达式,只要用已知的模式对卷积网络加以训练,网络就具有输入输出对之间的映射能力。上述这一系列研究成果初步实现了基于非接触纹理测量技术的路面摩擦自动化评估。然而,尽管机器学习抗滑性能预估模型能够取得一定的效果,但是这一应用也存在明显的不足之处。例如,机器学习前期需要大量的学习训练样本,这意味着不仅需要采集纹理信息,同时还需要配套获取表面的抗滑性能水平。此外,机器学习基本上只考虑了路表纹理情况,对于一些复杂接触条件下(如潮湿、冰面)的抗滑性能,目前鲜见报道相关成果。

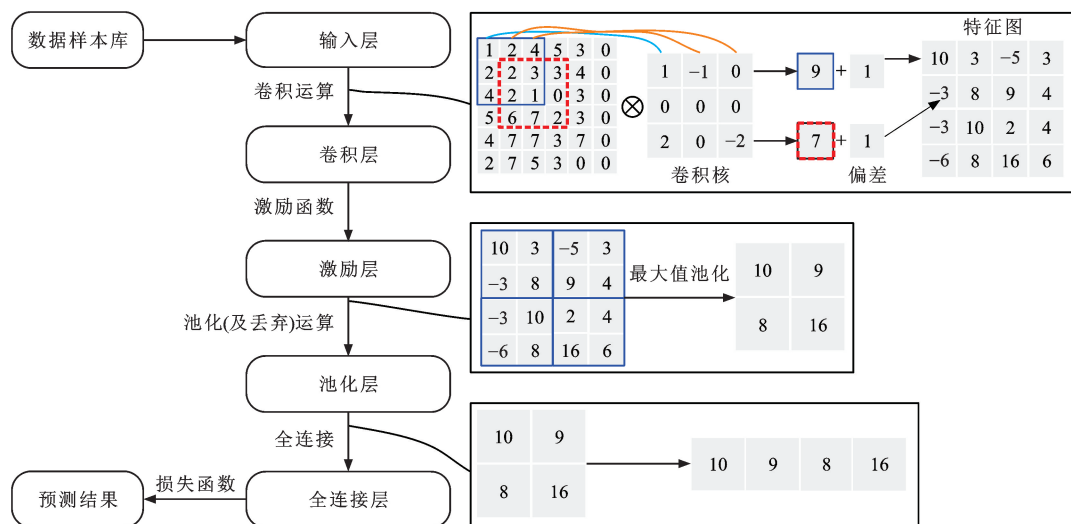


图12 卷积神经网络基本框架及运算示意

Fig. 12 Basic framework and operation illustration of CNN

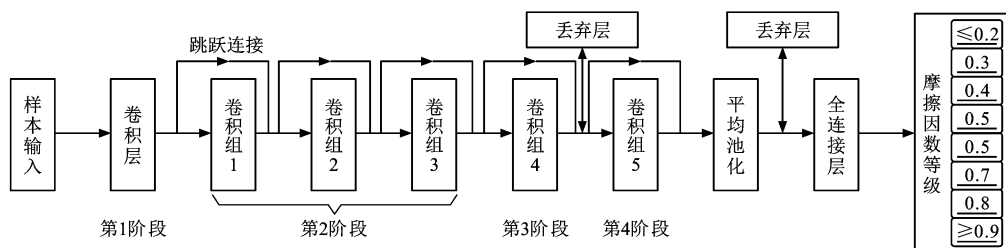


图13 摩擦因数的残差网络结构

Fig. 13 Structure of friction-residual networks

4 研究展望

目前,关于路面抗滑性能的研究大量涌现,这一定程度推动了摩擦机理到性能检测,再到模型预估的发展。但其中的关键环节仍有较大的完善空间。

首先,轮胎与路面的接触界面是摩擦机理的载体,传统的胎-路摩擦机理着力于描述橡胶与粗糙表面之间的交互作用,但是接触界面介质(如雨水冰雪、灰尘、颗粒等)的润滑效应描述不够,这也导致理论摩擦模型与实际测量结果存在差异,因此,为了更准确揭示真实状态下的胎-路摩擦机理,有必要向更加复杂的橡胶-介质-路表三体接触摩擦理论进一步发展。

其次,路表纹理是影响路面抗滑性能的重要因素,提取与抗滑性能相关的有效纹理是值得研究的课题。一方面,路表纹理的重构效果受限于仪器测试精度及量程,有必要升级开发高效、智能集成化检测设备;另一方面,无论是测试还是理论解析,均体现出胎-路接触仅发生于顶部部分纹理^[87-89]。进一步地,通过已知的接触条件,结合数理统计及力学解析的方法,提取表面的有效接触纹理特征,这对路表

混合料设计、现场施工及管理是极具指导意义的。

最后,路面抗滑性能经验统计模型难以准确预估且缺乏力学理论基础。预估方法逐步向数值化、智能化转型。随着计算机数值仿真技术的不断发展,基于有限元模拟或力学解析的抗滑性能力学模型体现出较大应用前景。与此同时,虽然基于机器学习图像识别方法的抗滑性能预估符合人工智能时代发展,但目前仍然处于起步阶段,性能的预估考虑的因素较为单一,路面深度学习的网络结构中需要纳入更多工况来完善。在模型化基础上,以数据驱动方法建立新的路网级抗滑预估模型、分析和管理方法,推动数据开放共享是未来道路状态智能感知、安全性能检测、养护及管理的发展方向。

5 结语

(1)胎-路接触摩擦机理主要考虑了橡胶与粗糙表面接触的黏滞与黏附分量。但由于轮胎、路面以及环境等因素多样性,实际的接触系统表现更加复杂。特别是在环境影响因素方面,接触界面摩擦需要进一步考虑润滑介质的影响,从而揭示润滑介质状态下的路面摩擦力学机理。

(2)在抗滑性能检测方面,随着检测技术更加智能化,未来高精度非接触一体化检测将会逐步取代传统的抗滑性能单一检测。满足恶劣环境下的路表多源信息检测需求,由此导致的数据缺失或畸变等问题需要形成统一的数据清洗处理方法。

(3)在抗滑性能预估方面,有限元数值计算仿真较传统的统计预估模型更具发展潜力,但是其力学理论背景需要进一步完善,面向未来海量测试数据,合理优化计算效率,以数据驱动方法建立路域抗滑预估模型,实现路网级安全状态智能化感知与管理。

参考文献:

References:

- [1] 邝宏柱,廖志高,柳本民. 高速公路隧道路面抗滑性能评价标准研究[J]. 公路, 2007, 4(9): 85-88.
KUANG Hong-zhu, LIAO Zhi-gao, LIU Ben-min. A study on evaluation standard of skid resistance performance for expressway tunnel pavement [J]. Highway, 2007, 4(9): 85-88. (in Chinese)
- [2] NAJAFI S, FLINTSCH G W, MEDINA A. Linking roadway crashes and tire-pavement friction: a case study[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(2): 119-127.
- [3] KOKKALIS A G, PANAGOULI O K. Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. I: surface wetting[J]. Chaos Solitons and Fractals, 1998, 9(11): 1875-1890.
- [4] AHAMMED M A, TIGHE R L. Early-life, long-term, and seasonal variations in skid resistance in flexible and rigid pavements[J]. Transportation Research Record, 2009(2094): 112-120.
- [5] HALL J W, SMITH K L, TITUS-GLOVER L, et al. Guide for pavement friction[R]. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program, 2009.
- [6] 王旭东. 足尺路面试验环道路面结构与材料设计[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6): 30-37.
WANG Xu-dong. Design of pavement structure and material for full-scale test track[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6): 30-37. (in Chinese)
- [7] ZHANG Jun-ning, YANG Shao-pu, LI Shao-hua, et al. Influence of vehicle-road coupled vibration on tire adhesion based on nonlinear foundation[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2021, 42: 607-624.
- [8] 黄晓明,郑彬双. 沥青路面抗滑性能研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 32-49.
HUANG Xiao-ming, ZHENG Bin-shuang. Research status and progress for skid resistance performance of asphalt pavements[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 32-49. (in Chinese)
- [9] GROSCH K. Visco-elastic properties and the friction of solids; relation between the friction and visco-elastic properties of rubber[J]. Nature, 1963, 197: 858-859.
- [10] LORENZ B, PYCKHOUT-HINTZEN W, PERSSON B N J. Master curve of viscoelastic solid: using causality to determine the optimal shifting procedure, and to test the accuracy of measured data[J]. Polymer, 2014, 55(2): 565-571.
- [11] LORENZ B, OH Y R, NAM S K, et al. Rubber friction on road surfaces: experiment and theory for low sliding speeds[J]. Journal of Chemical Physics, 2015, 142(19): 194701.
- [12] SCARAGGI M, PERSSON B N J. Rolling friction: comparison of analytical theory with exact numerical results[J]. Tribology Letters, 2014, 55(1): 15-21.
- [13] MATAEI B, ZAKERI H, ZAHEDI M, et al. Pavement friction and skid resistance measurement methods: a literature review[J]. Open Journal of Civil Engineering, 2016, 6(4): 537-565.
- [14] LEI Yong, HU Xiao-di, WANG Hai-nian, et al. Effects of vehicle speeds on the hydrodynamic pressure of pavement surface: measurement with a designed device[J]. Measurement, 2017, 98: 1-9.
- [15] ANUPAM K. Numerical simulation of vehicle hydroplaning and skid resistance on grooved pavement[D]. Singapore: National University of Singapore, 2012.
- [16] KOGBARA R B, MASADE A, KASSEM E, et al. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 602-617.
- [17] TAN Tan, FAN Ze-peng, XING Chao, et al. Evaluation of geometric characteristics of fine aggregate and its impact on viscoelastic property of asphalt mortar[J]. Applied Sciences, 2019, DOI: 10.3390/app10010130.
- [18] KANE M, EDMONDSON V. Long-term skid resistance of asphalt surfacings and aggregates' mineralogical composition: generalisation to pavements made of different aggregate types[J]. Wear, 2020, 454/455: 203339.
- [19] DE LUCA M, ABBONDATI F, PIROZZI M, et al. Preliminary study on runway pavement friction decay using data mining[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3751-3760.
- [20] COUTERMARSH B A, SHOOP S A. Tire slip-angle force measurements on winter surfaces[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(4): 157-163.
- [21] WAMBOLDJ C, KULAKOWSKI B T. Limitations of using skid number in accident analysis and pavement management [J]. Transportation Research Record, 1991(1311): 43-50.
- [22] GROSCH K A. Rubber abrasion and tire wear[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2008, 81(3): 470-505.
- [23] WANG Shao-wei, VENEZIANO D, HUANG Jiang, et al. Estimating wet-pavement exposure with precipitation data: final report[R]. Sacramento: California Department of Transportation (Caltrans) Division of Research and Innovation, 2006.
- [24] AL-QADI I L, FLINTSCH G W, ROOSEVELT D S, et al. Feasibility of using friction indicators to improve winter

- maintenance operations and mobility[R]. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program, 2002.
- [25] HAN Sen, LIU Meng-mei, FWA T F. Testing for low-speed skid resistance of road pavements[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(5): 1312-1325.
- [26] CHEN Bo, ZHANG Xiao-ning, YU Jiang-miao, et al. Impact of contact stress distribution on skid resistance of asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 330-339.
- [27] KHALEGHIAN S, EMAMI A, TAHERI S. A technical survey on tire-road friction estimation[J]. Friction, 2017, 5(2): 123-146.
- [28] PERERA R W, KOHN S D. NCHRP web document 42: issues in pavement smoothness[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2002.
- [29] MASAD E, REZAEI A, CHOWDHURY A, et al. Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics[R]. Canyon: Texas Transportation Institute, 2009.
- [30] SAYERS M W, KARAMIHAS S M. Interpretation of road roughness profile data[R]. McLean: Federal Highway Administration, 1996.
- [31] GOUBERT L, BERGIERS A. About the reproducibility of texture profiles and the problem of spikes[C]// VTTI. 7th Symposium on Pavement Surface Characteristics: SURF 2012. Norfolk: VTTI, 2012: 1-14.
- [32] KATICHA S W, MOGROVEJO D E, FLINTSCH G W, et al. Adaptive spike removal method for high-speed pavement macrotexture measurements by controlling the false discovery rate[J]. Transportation Research Record, 2015(2525): 100-101.
- [33] BENJAMINI Y, HOCHBERG Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B: Methodological, 1995, 57(1): 289-300.
- [34] STOREY J D, TIBSHIRANI R. Statistical significance for genomewide studies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(16): 9440-9445.
- [35] RICHARD C, SOHANEY, ROBERT O R. Three dimensional pavement texture evaluation at Mn/ROAD[R]. Austin: Minnesota Department of Transportation Research Services Section, 2012.
- [36] DONG N, PROZZI J A, NI F. Reconstruction of 3D pavement texture on handling dropouts and spikes using multiple data processing methods[J]. Sensors, 2019, DOI: 10.3390/s19020278.
- [37] CHU L J, FWA T F. Pavement skid resistance consideration in rain-related wet-weather speed limits determination[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(2): 334-352.
- [38] WASILEWSKA M, GARDZIEJCZYK W, GIERASIMIUK P. Comparison of measurement methods used for evaluation the skid resistance of road pavements in Poland—case study[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(13): 1662-1668.
- [39] LEU M C, HENRY J J. Prediction of skid resistance as a function of speed from pavement texture[J]. Transportation Research Record, 1978(666): 7-13.
- [40] FUÜLÖP I A, BOGÁRDI I, GULYÁS A, et al. Use of friction and texture in pavement performance modeling[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(3): 243-248.
- [41] ANDRIEJAUSKASA T, VOROBOVASA V, MIELONASB V. Evaluation of skid resistance characteristics and measurement methods[C]// VGTU. 9th International Conference on Environmental Engineering. Vilnius: VGTU, 2014: 1-8.
- [42] SENGOZ B, TOPAL A, TANYEL S. Comparison of pavement surface texture determination by sand patch test and 3D laser scanning[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2012, 56(1): 73-78.
- [43] UECKERMAN A, WANG D, OESER M, et al. Calculation of skid resistance from texture measurements[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2015, 2(1): 3-16.
- [44] LI Lin, WANG K C P, LI Q J. Geometric texture indicators for safety on AC pavements with 1 mm 3D laser texture data[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2016, 9(1): 49-62.
- [45] 王旭东,张 蕾,周兴业,等. RIOHTRACK 足尺路面试验环道 2017 年试验研究概况[J]. 公路交通科技, 2018, 35(4): 1-13.
- WANG Xu-dong, ZHANG Lei, ZHOU Xing-ye, et al. Review of researches of RIOHTRACK in 2017[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(4): 1-13. (in Chinese)
- [46] 廖亦源. 基于足尺环道的沥青路面抗滑性能衰变规律的研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
- LIAO Yi-yuan. Research on regularity of skid resistance regradation of asphalt pavement based on full-scale pavement loop[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [47] LI Q, YANG G, WANG K C P, et al. Novel macro- and microtexture indicators for pavement friction by using high-resolution three-dimensional surface data[J]. Transportation Research Record, 2017(2641): 164-176.
- [48] 陈 德. 沥青混合料表面构造图像评价方法及抗滑降噪性能预测研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- CHEN De. Study on image-based texture analysis method and prediction of skid-resistance and tire/pavement noise reduction of HMA[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [49] RADO Z, KANE M. An initial attempt to develop an empirical relation between texture and pavement friction using the HHT approach[J]. Wear, 2014, 309(1/2): 233-246.
- [50] ZELELEW H, KHASAWNEH M, ABBAS A. Wavelet-based characterisation of asphalt pavement surface macro-texture[J]. Road Materials and Pavement Design, 2014, 15(3): 622-641.
- [51] 周兴林,肖神清,刘万康,等. 沥青路面表面纹理的多重分形特征及其磨光行为[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018,

- 48(1):175-180.
- ZHOU Xing-lin, XIAO Shen-qing, LIU Wan-kang, et al. Multifractal characteristics and polishing behaviors of surface texture on asphalt pavement[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(1): 175-180. (in Chinese)
- [52] 周兴林,肖神清,肖旺新,等.粗集料表面纹理粗糙度的多重分形评价[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(2): 29-33.
- ZHOU Xing-lin, XIAO Shen-qing, XIAO Wang-xin, et al. Multi-fractal evaluation on roughness of coarse aggregate surface texture[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 29-33. (in Chinese)
- [53] XIAO Shen-qing, TAN Yi-qiu, XING Chao, et al. Scale demarcation of self-affine surface of coarse aggregate and its relationship with rubber friction[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, DOI: 10.1080/14680629.2020.1728365.
- [54] YU Miao, YOU Zhan-ping, WU Guo-xiong, et al. Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: a review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119878.
- [55] BROWNE A, CHENG H, KISTLER A. Dynamic hydroplaning of pneumatic tires[J]. Wear, 1972, 20(1):1-28.
- [56] GROGGER H, WEISS M. Calculation of the three-dimensional free surface flow around an automobile tire[J]. Tire Science and Technology, 1996, 24(1): 39-49.
- [57] MARTIN C. Hydroplaning of tire hydroplaning: final report[R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1966.
- [58] STOCKER A J, DOTSON J T, IVEY D L. Automobile tire hydroplaning: a study of wheel spin-down and other variables[R]. Canyon: Texas Transportation Institute, 1974.
- [59] DINESCU C, HIRSCH C, LEONARD B, et al. Fluid-structure interaction model for hydroplaning simulations[J]. SAE International, 2006, DOI: 10.4271/2006-01-1190.
- [60] CHO J, LEE H, SOHN J, et al. Numerical investigation of hydroplaning characteristics of three-dimensional patterned tire[J]. European Journal of Mechanics A: Solids, 2006, 25(6): 914-926.
- [61] FWA T F. Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2017, 6(3): 217-227.
- [62] CHU L, FWA T F. Incorporating pavement skid resistance and hydroplaning risk considerations in asphalt mix design[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(10): 0401603.
- [63] FWAT F, PASINDU H R, ONG G P. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(4): 423-429.
- [64] ANUPAM K, SRIRANGAM S K, SCARPAS A, et al. Influence of temperature on tire-pavement friction: analyses[J]. Transportation Research Record, 2013(2369): 114-124.
- [65] SRIRANGAM S K, ANUPAM K, KASBERGEN C, et al. Analysis of asphalt mix surface-tread rubber interaction by using finite element method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2017, 4(4): 395-402.
- [66] SRIRANGAM S K, ANUPAM K, SCARPAS A, et al. Development of a thermomechanical tyre-pavement interaction model[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 16(8): 721-729.
- [67] SRIRANGAM S K, ANUPAM K, SCARPAS A, et al. Safety aspects of wet asphalt pavement surfaces through field and numerical modeling investigations[J]. Transportation Research Record, 2014(2446): 37-51.
- [68] TANG T, ANUPAM K, KASBERGEN C, et al. A finite element study of rain intensity on skid resistance for permeable asphalt concrete mixes[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 464-475.
- [69] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics[J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 115(8): 3840-3861.
- [70] PERSSON B N J. Rubber friction: role of the flash temperature[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2006, 18(32): 1-22.
- [71] KLÜPPEL M, HEINRICH G. Rubber friction on self-affine road tracks[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 73(4): 578-606.
- [72] LEGAL A, KLÜPPEL M. Investigation and modelling of rubber stationary friction on rough surfaces[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2007, 20(1): 015007.
- [73] LORENZ B, CARBONE G, SCHULZE C. Average separation between a rough surface and a rubber block: comparison between theories and experiments[J]. Wear, 2010, 268(7/8): 984-990.
- [74] MOTAMEDI M. Road surface measurement and multi-scale modeling of rubber road contact and adhesion[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2015.
- [75] ALHASAN A, SMADI O, BOU-SAAB G, et al. Pavement friction modeling using texture measurements and pendulum skid tester[J]. Transportation Research Record, 2018(2672): 440-451.
- [76] KANE M, CEREZO V. A contribution to tire/road friction modeling: from a simplified dynamic frictional contact model to a "dynamic friction tester" model[J]. Wear, 2015, 342/343: 163-171.
- [77] TAN Tan, XING Chao, TAN Yi-qiu, et al. Safety aspects on icy asphalt pavement in cold region through field investigations[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 21-31.
- [78] TAN Tan, XING Chao, TAN Yi-qiu, et al. Rubber friction on icy pavement: experiments and modeling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 174: 103022.
- [79] 沙爱民,童 峥,高 杰.基于卷积神经网络的路表病害识别与测量[J].中国公路学报,2018,31(1):1-10.
- SHA Ai-min, TONG Zheng, GAO Jie. Recognition and

- measurement of pavement disasters based on convolutional neural networks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 1-10. (in Chinese)
- [80] CHEN Wei-wei, WANG Wei-xing, WANG Kevin, et al. Lane departure warning systems and lane line detection methods based on image processing and semantic segmentation: a review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(6): 748-774.
- [81] MAEDA H, SEKIMOTO Y, SETO T, et al. Road damage detection and classification using deep neural networks with smartphone images[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33(12): 1127-1141.
- [82] NAJAFI S, FLINTSCH G W, KHALEGHIAN S. Pavement friction management-artificial neural network approach[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 20(2): 125-135.
- [83] SRIVASTAVA N, HINTON G, KRIZHEVSKY A, et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting[J]. Journal of Machine Learning Research, 2014, 15(1): 1929-1958.
- [84] MARCELINO P, LURDES A M, FORTUNATO E, et al. Machine learning for pavement friction prediction using scikit-learn[C] // Springer. 18th EPIA Conference on Artificial Intelligence. Berlin: Springer, 2017: 331-342.
- [85] TONG Zheng, GAO Jie, SHA Ai-min, et al. Convolutional neural network for asphalt pavement surface texture analysis[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33(12): 1056-1072.
- [86] ZHAN Y, LI J Q, YANG G W, et al. Friction-ResNets: deep residual network architecture for pavement skid resistance evaluation[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2020, 146(3): 04020027.
- [87] KANAFI M M, TUONONEN A J. Top topography surface roughness power spectrum for pavement friction evaluation[J]. Tribology International, 2017, 107: 240-249.
- [88] KOGBARA R B, MASAD E A, WOODWARD D, et al. Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to grip-tester pavement friction measurements[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 227-240.
- [89] DING S, WANG K, YANG E, et al. Influence of effective texture depth on pavement friction based on 3D texture area[J]. Construction and Building Materials, 2021, 287(5/6): 123002.