

# 基于胎一路有效接触构造与抗滑性能的研究综述

司友强<sup>1</sup>, 吕润华<sup>2\*</sup>, 李梦茹<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 清华大学 土木工程系)

**摘要:**道路抗滑性能影响因素众多,一直是国内外道路研究工作者亟待解决的难题。该文介绍了国内外在抗滑性能方面的研究现状,总结了基于 Rado 和压力胶片系统的胎一路有效接触构造模型,并提出 Rado 接触模型在三维数据中的应用;提出依靠传感器的压力胶片系统在智能铺面中的应用前景,并指出有限元模拟在胎一路接触构造具有很大的研究意义。

**关键词:**胎一路有效接触构造; 抗滑性能; Rado 接触模型; 压力胶片系统

车辆、轮胎、路面和环境等因素对沥青路面的抗滑性能以及设计方法具有重要影响,目前国内外对抗滑性能的研究主要集中在轮胎与路面间。尤其胎一路接触情况与抗滑能力直接相关。黄晓明等分析了胎一路接触力学模型和附着特性原理。通过研究发现胎一路有效接触构造和抗滑性能具有良好的相关性。橡胶轮胎虽然具有良好的弹性和变形性能,但是也有一定的刚度。在与沥青路面接触时,二者有效接触面积并不是完全按照路面集料形成的表面纹理构造紧密接触,特别是当集料间夹角为尖锐角时,轮胎与路面的有效接触仅为顶点周围部分。如何精确地提取胎一路有效接触构造得到与抗滑性能的关系是近几年研究的热点问题。

## 1 胎一路有效接触构造

### 1.1 Rado 有效接触构造模型

Rado 和 Cho 等提出利用希尔伯特—黄变换(Hilbert—Huang Transform, 简称 HHT)对二维纹理信号进行处理。HHT 的基本原理主要是对任意原始数据  $s(t)$  的局部极大值和极小值,分别用三次样条插值连接产生上、下包络线,得到对应数据点  $m$  的均值,定义  $s(t)$  与  $m$  的差值为第一个分量  $h$ :  $h = s(t) - m$ 。将  $h$  视为新的原始数据  $s(t)$ ,重复以上步骤,直到  $h$  满足以下条件时:

(1) 在整个时程过程中,极值点数目和过零点数目相等最多相差 1 个。

目相等最多相差 1 个。

(2) 在任意点,由局部极大值点和局部极小值点构成的两条包络线平均值为零,则视为 IMF(Intrinsic Mode Function, 简称 IMF)分量;记  $c_1 = h$  为 IMF1。

$s(t) - c_1 = r_1(t)$ ,将  $r_1(t)$  视为新的  $s(t)$ ,重复以上过程依次得到 IMF2、 $c_2$ 、 $r_2(t)$ 、 $\dots$ 、IMFn、 $c_n$ 、 $r_n(t)$  等。

$$s(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中: $r_n(t)$  为余项。

将分解的信号进行希尔伯特变换,对于任意时间序列  $x(t)$ :

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

解析信号为:

$$v(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (3)$$

瞬时振幅为:

$$a(t) = [x^2(t) + \hat{x}^2(t)]^{1/2} \quad (4)$$

相位为:

$$\theta(t) = \arctan[\hat{x}(t)/x(t)] \quad (5)$$

瞬时频率为:

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6)$$

由式(2)可知:在希尔伯特变换解析信号中有实部  $x(t)$  和虚部  $\hat{x}(t)$ ,  $x(t)$  表示的是原信号,  $\hat{x}(t)$  表示的是希尔伯特变换。式(3)、(4)、(5)是求得信号的瞬时

收稿日期:2019-11-17

基金项目:国家自然科学基金—地区科学基金资助项目(编号:E080703)

作者简介:司友强,男,硕士研究生。E-mail:siyouqiang2017@163.com

\* 通信简介:吕润华,男,博士,副教授,博士生导师。E-mail:guorh@tsinghua.edu.cn

物理特征。

Rado 等首先对信号进行经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称 EMD)得到频率由高到低排列的固有模态函数。取前 15 个 *IMFs*,每 4 个为一组,最后一组 3 个为一组,得到 4 组联合固有模态函数 *BIMF*。通过希尔伯特变换得到 *BIMF* 瞬时频率和瞬时振幅,最后提取峰值包络线并求均值研究与抗滑性能间的相关性,将瞬时幅值上包络线作为胎一路有效接触构造线。

路面纹理包含宏观纹理和微观纹理,其中宏观纹理的波长范围为 0.5~50 mm,微观纹理波长范围为 0.000 1~0.5 mm,宏观纹理对应的频率为低频部分,微观纹理对应高频部分。

Rado 等得到的 4 个 *BIMF* 包含高频和低频部分,能充分表示沥青路表面构造与其抗滑性能密切相关的宏观构造和微观构造部分。通过采集二维纹理信息能够快速的研究信号幅值与频率的关系,建立不同速度下路面抗滑性能与幅值频率的相关性。

Rado 模型虽然能有效地反映轮胎与路面接触构造,但同时存在局限性:

(1) 只是从二维信号的角度评价了路面宏观构造,缺乏对轮胎有效接触区域三维纹理形貌的评价。

(2) 其应用假设轮胎是刚性的,忽略了轮胎的柔性变形。

(3) 微观纹理对路面抗滑性能具有重要影响,受仪器采集精度的限制,获取的构造曲线难以达到微观纹理尺度。

1.2 数据采集方法

通过激光传感器测量方法采集纹理数据是目前国内外新兴的一种快速非接触式检测方法,通常用纵断面平均构造深度 *MPD* 和平均构造深度 *MTD* 作为抗滑性能评价指标。而目前的评价方法只是从二维数据得到的结果,不能真实反映三维纹理空间形态。李伟等通过线激光与双目相机技术采集路面三维纹理信息,通过双向标准差滤波与形态学滤波方法对数据进行清洗,最后通过点面映射与指数加权方法计算纹理构造深度大小。结果表明:该方法能够准确地计算纹理构造深度;丁世海等采用三维激光扫描技术采集路面纹理数据,通过 Matlab 对处理后的数据三维重构。用四连通区域多种子组合填充算法模拟人工铺砂法计算 *MTD*;刘林等的多功能检测车纹理测量系统数据高程分辨率可达 10  $\mu\text{m}$ ,不受行车速度影响,可对采集的纹理数据实现精确的三维重构。将 Rado 胎一路有

效接触构造计算方法从简单的二维数据应用到三维数据中,分析胎一路有效接触面的构造与抗滑性能间的关系,为研究者提供了新的研究路径。

1.3 压力胶片系统

陈搏等通过压力胶片系统采集轮胎与路面的接触痕迹,主要应用压力传感器采集轮胎与路面接触部分压力  $p>0$  的点。并且将医学上影像处理技术应用到胶片印痕图像处理中,采用基于进化算法的压力胶片图像配准与融合,得到三维接触应力分布和有效接触面积。通过分析轮胎有效接触区域内的沥青路面纹理三维形态分布,结果表明使用轮胎有效接触构造指标能够有效地表征路面抗滑水平。

由于需要应用压敏薄片与路面接触采集纹理痕迹,目前在实际应用中不能快速高效地完成检测需求。但是,随着智能化技术的进步,智能铺面的发展可以促进压力胶片系统的广泛应用。“人—车—路—环境”之间智能网联交互的智能交通运输系统将成为中国道路交通建设的重点。智能铺面具有主动感知、自动辨析、自主适应、动态交互、持续供能等优点。压力胶片系统主要通过压力传感器接收轮胎与路面的压力大小采集接触痕迹,智能铺面同样依靠传感器接收路面状况进行自主分析和数据动态交互。未来胎一路接触纹理构造智能化水平见表 1。

表 1 未来胎一路接触纹理构造智能能力

智能能力	智能化技术	智能化技术内涵
主动感知	铺面传感器性能主动感知	胎一路接触纹理识别
自动辨析	信息集成分析管理	信号处理与模型重构; 抗滑性能评估
动态交互	与管理者交互	纹理模型推送、性能 预估、事件决策
持续供能	能量补给	太阳能;胎一路摩擦 产生机械能等

1.4 有限元法

近几年,有限元方法在道路工程领域得到广泛应用,对轮胎与路面的接触模型研究也不断深入,但是主要集中在接触应力模型分析中。舒春建等研究了轮胎与路面接触摩擦力学的内容。通过多重分形理论研究沥青道路表面纹理的自相似性。通过有限元软件建立轮胎与路面接触应力模型,分析纹理磨损规律;Kenta Nishiyama 等采用有限元法对轮胎下方和附近区域以外的土样进行有限元建模,利用离散元法分析轮胎与

土壤接触界面附近的影响区域;Ding Han 等为了分析不同工况下的轮胎压痕,计算汽车制动时沥青路面的动力响应,建立了考虑温度依赖性的沥青混凝土黏弹本构模型的轮胎—路面耦合仿真系统,分析不同温度沥青混凝土层静态和动态条件下的轮胎印迹。

虽然胎一路真实接触构造影响因素较多,有限元方法能够最接近实际地模拟接触状况,为接触构造分析提供数据支持。

### 1.5 其他方法

针对胎一路有效接触构造的问题,国内外学者根据不同的状况做了很多研究。周刚等使用复写纸采集轮胎与路面的接触面积;Liang 等利用 Tekscan 压力测量系统研究了子午轮胎与路面有效接触构造的规律;Kriston 等应用计算机 CT 断层扫描技术,研究橡胶与表面之间的接触。该方法可以直接显示真实接触面积,而不改变原有的特点。对于胎路有效接触构造的提取主要是基于计算机技术进行分析研究。从最初的复写纸采集纹理印迹并通过图像技术处理,到激光传感器技术和 CT 技术等都需要交叉学科知识处理胎一路接触问题。

## 2 结论

(1) 沥青路面的抗滑性能与轮胎和路面相互作用具有重要的关系,文中对胎一路有效接触构造的研究现状进行了分析与展望。

(2) Rado 接触模型能很好地表征纹理与抗滑性能间的相关性,将模型应用于三维数据中,可为研究真实三维形态提供新的思路。

(3) 压力胶片系统能精确地提取轮胎与路面的接触痕迹,通过图像处理技术提取三维纹理结构。在中国智能化技术快速发展趋势下,智能铺面技术将会使压力胶片原理得到进一步的应用和发展。

(3) 随着有限元软件的发展,胎一路接触应力模型研究较多,对有效接触构造的研究较少,通过理论模型对胎一路有效接触构造进行模拟具有重要的意义。

### 参考文献:

[1] J. W. Hall, K. L. Smith, L. Titus—Glover, et al., Guide for Pavement Friction Contractor's Final Report for National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 01—43, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C.,

2009.

- [2] 李菁若,谭巍,谢忠,等.不同因素对沥青混合料抗滑能力的影响[J].中外公路,2017(2).
- [3] 熊依筱,黄维蓉,杨东来.基于分形理论的沥青混合料比表面积与相关性能研究[J].中外公路,2018(4).
- [4] 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(4).
- [5] 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: 233—246.
- [6] Choongwoo C. Application of Hilbert Huang Transformation to Analyze Pavement Texture—Friction Relationship[D]. The Pennsylvania State University, 2010: 20—60.
- [7] Huang N. E., Shen Z., Long S. R. The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum for Non—Linear and Non—Stationary Time Series Analysis[J]. Proceeding of the Royal Society of London, Series A, 1998, 454: 903—995.
- [8] 李伟,孙朝云,呼延菊,等.基于激光 3D 数据的沥青路面构造深度检测方法[J].中外公路,2016(5).
- [9] 丁世海,阳恩慧,王郴平,等.沥青路面表面纹理三维高精度激光非接触式检测[J].西南交通大学学报,2020(4).
- [10] 刘林,吕润华,李梦茹,等.沥青路面三维纹理构造特征研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019(4).
- [11] Bo Chen, Xiaoning Zhang, Jiangmiao Yua, et al. Impact of Contact Stress Distribution on Skid Resistance of Asphalt Pavements[J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 330—339.
- [12] 陈搏.基于胎/路有效接触特性的沥青路面抗滑性能评价方法研究[D].华南理工大学博士学位论文,2018.
- [13] 赵鸿铎,朱兴一,涂辉招,等.智能铺面的内涵与架构[J].同济大学学报(自然科学版),2017(8).
- [14] 舒春建.基于胎一路相互作用的沥青道路表面纹理损伤研究[D].东南大学硕士学位论文,2015.
- [15] Kenta Nishiyama, Hiroshi Nakashima, Taiki Yoshida, et al. FE—DEM with Interchangeable Modeling for Off—Road Tire Traction analysis[J]. Journal of Terramechanics, 2018, 78: 15—25.
- [16] Ding Han, Guodong Zhu, Huimin Hu, et al. Dynamic Simulation Analysis of the Tire—Pavement System Considering Temperature Fields[J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 261—272.
- [17] LIANG Chen, WANG Guolin, AN Dengfeng, et al. Tread Wear and Footprint Geometrical Characters of Truck Bus Radial Tires[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 506—511.