

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.10.018

汽车轮胎与路面接触应力分布特点及力学模型

宋 勇¹, 梁彦龙², 马学军³, 张 垚²

(1. 河南省交通运输厅公路管理局, 河南 郑州 450016; 2 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;
3 北京交科公路勘察设计研究院有限公司, 北京 100191)

摘要: 为分析重载交通对沥青路面使用性能的影响, 研究了汽车轮胎与路面接触应力的分布特点。轮胎与路表的接触影响因素可分为两类: 轮胎相关因素与路面相关因素, 文章从力学的角度出发, 综合考虑汽车轮胎结构类型、轮胎花纹、轮胎气压、轮胎竖向荷载、行驶速度、轮胎工作状态和路面表面几何特征与干湿状况等影响因素, 分析了汽车轮胎在路面上的轮迹接触面形状、接触应力方向组合、接触应力分布特点, 通过数学推导, 简化荷载模型, 在车辆匀速行驶情况下, 假设轮胎-路表接触面为矩形, 考虑轮胎-路表接触力修正系数, 建立了轮胎-路表三向接触应力模型, 该模型有利于分析竖向接触应力、水平纵向和横向接触应力分布特征及影响因素。

关键词: 交通工程; 沥青路面; 力学模型; 力学分析; 接触应力

中图分类号: U491.2⁺51

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2014) 10-0112-07

Distribution Characteristics of Contact Stress between Vehicle Tire and Road Surface and Mechanical Model

SONG Yong¹, LIANG Yan-long², MA Xue-jun³, ZHANG Yao²

(1. Highway Administration Bureau, Henan Provincial Department, Zhengzhou Henan 450016, China;
2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;
3. Beijing Jiaoke Transport Consultants Ltd., Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the effect of heavy traffic on asphalt pavement performance, we researched the distribution characteristics of the contact stress between tire and road surface. The contact is impacted by situation of tire and road surface. Using the mechanical method, and comprehensively considering the tire structure type, tire tread, tire pressure, tire vertical load, vehicle speed, tire working status, pavement surface texture, and dry and wet conditions, we analysed tire-pavement contact shape, contact stress direction combination and contact stress distribution characteristics, and simplified the load model through mathematical derivation. Assuming that the contact surface is rectangle when the vehicle speed is steady, considering the correction factor of tire-pavement contact stress, we established a new 3D tire-pavement contact stress mode, which is advantageous to analyse the distribution characteristics and influencing factors of contact stresses in vertical, horizontal longitudinal and horizontal transverse directions.

Key words: road engineering; asphalt pavement; mechanical model; mechanical analysis; contact stress

0 引言

重交通引发的沥青路面损害现象已引起人们的

广泛关注, 但由于问题的复杂性和技术手段的相对落后, 该问题的研究尚处初级阶段^[1]。要分析该问题的本质, 必须从实际交通车载状况出发, 进行重

收稿日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378006, 51008075)

作者简介: 宋勇 (1978-), 男, 河南郑州人, 高级工程师. (pattaya1978@163.com)

载交通车辆对路面的力学作用与相应条件下的路面结构响应分析^[2-4]。根据河南交通状况实际调查结果, 分析了轮胎与路面接触应力情况, 并根据重载交通特征, 分别进行路面结构静、动力学计算分析, 全面掌握沥青路面结构在重交通车载作用下的力学响应, 提出对沥青路面的性能要求^[5]。

汽车轮胎-路面的相互作用, 是通过轮胎-路表作用界面的接触应力来实现的^[6], 因此对轮胎与路表面接触面上荷载分布的合理描述是正确分析路面结构力学响应的基础^[7-8]。轮胎-路表接触三维(竖向、纵向与横向)应力如图1所示。

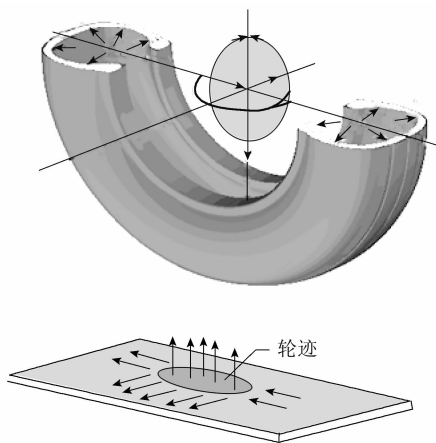


图1 汽车轮胎在路面上轮迹及接触应力分布

Fig.1 Vehicle tire print and distribution of contact stress on pavement

对轮胎-路面相互作用机理的研究是近年来科技工作者研究的热点课题。但应指出, 由于问题的复杂性, 即使是车辆行驶在理想的水平路面上时, 轮胎和路面接触面的结构也是高度动态化的^[9]。轮胎可以看成是由许多小的单元组成, 这些单元本身的特征是各向异性的, 且它们排列在一个三维曲面里。接地印迹面的水平力实际上是这个面里剪应力分布的总和, 这些剪应力源于各个微观点的压力和摩擦系数值。此外, 路面的不平整, 又会使车辆产生振动, 振动也会造成轮胎-路面接触应力的动态随机性^[10]。

由此可知, 要想将接地印迹面里发生的情况作物理模式化较难。就目前的技术手段, 还无法建立精确的模型来描述, 其中还有许多问题有待进一步研究。因此, 立足于国内外已有的轮胎-路面作用机理研究成果出发, 并将从中选取适用于沥青路面结构力学响应分析的模型作为本文轮胎-路面接触应力模型的侧重点。

1 轮胎-路表接触应力影响因素分析

影响轮胎-路表接触应力的大小与分布的因素众多, 可以归结为汽车轮胎和路面两个方面。

1.1 汽车轮胎因素

车辆轮胎相关因素主要包括: 轮胎结构类型、轮胎花纹、轮胎气压、轮胎竖向荷载、车辆行驶速度、轮胎工作状态。

轮胎按结构特点主要分为: 斜交轮胎和子午线轮胎两种。斜交轮胎采用复合角织物帘布层的结构, 并在胎冠部位使用复合角织物护胎带; 子午线胎采用单一放射形钢带帘布层结构, 并在胎冠部位使用复合式钢带护胎带。上述的结构特点, 使斜交轮胎的胎体容易变形, 轮胎的包络特性大, 平顺性好, 曲面状轮胎胎体的一部分在与平坦路面接触时变平, 轮胎因膨胀使路面产生水平方向的摩擦。而子午线轮胎, 胎体不易伸缩, 包络性小, 同时具有加速性、制动性和操作性强的特点。

轮胎通过其胎面的花纹与路表直接接触, 花纹的主要作用是确保轮胎与路面之间有足够的摩擦系数, 不同的花纹形状必然带来接触界面的不同性质, 对界面接触应力大小和分布带来显著的影响, 实践中常根据路面条件和汽车使用要求加以选用。常用的胎面花纹主要有纵沟花纹、横沟花纹、混合花纹、砌块花纹和非对称花纹五种, 纵向花纹轮胎是研究问题中最为常用的轮胎胎面花纹类型。

轮胎胎压的大小直接影响轮胎垂直刚度的大小。充气压力增加, 轮胎的垂直刚度增大, 轮胎变形减小, 使轮胎-路表的接触面积减小, 平均接地应力增大。就对接地应力分布的影响而言, 一般认为, 中部的接地应力集度随胎压的变化而变化, 而轮迹边缘的接地应力受胎压影响较小。轮胎气压是影响轮胎-路面接触应力大小与分布的关键因素之一。

轮胎承受的竖向荷载直接影响竖向接触应力的分布。当充气压力一定, 轮胎印迹随垂直载荷的增加而增大; 当垂直载荷增加到某一定值时, 轮胎印迹宽度达到行驶面宽度; 垂直载荷再继续增加, 轮胎印迹宽度不变, 印迹长度增加, 面积增大; 荷载与接地面积的增大, 也引起接地压力大小分布的复杂变化。竖向接地应力大小与分布的变化, 必然引起接触界面上水平摩擦力的响应变化。轮胎竖向荷载是影响轮胎-路面接触应力大小与分布的关键因素之一。

1.2 公路路面因素

路面相关因素主要包括路面表面几何特征和路表干湿状态。路面表面的几何特征,与路表凹凸或起伏不平有关。由于路面是由混合料铺筑而成,表面存在着凹凸不平。国际道路协会常设委员会以路面凹凸或起伏不平的纵向波长表征其几何特征,并将它分为四类:细构造、粗构造、宏构造和平整度,不同类型的路面几何特征对路表轮胎接触应力有不同的影响。

另外,路表干湿状态的不同直接使界面摩擦系数发生变化。在路面潮湿的情况下,有水膜介于轮胎-路表接触部之间,使界面的摩擦系数显著降低,从而减小摩擦力。

2 轮胎与路表接触应力数学模型

轮胎-路面接触应力受多种因素的影响,其物理力学模型的建立异常复杂,根据所研究问题的目的和现有的技术手段,进行合理简化,抓住主要影响因素建立轮胎-路表接触应力模型,是当前研究车辆荷载下路面结构力学响应工作中可行的方法。

2.1 轮胎-路表接触面特征分析

轮胎-路表接触面上力学特征的描述可以用三种方面要素来描述:接触面形状、接触应力方向组合、接触应力大小分布。

轮迹接触面的形状和大小与车辆竖向荷载的大小相关。在实际路面结构力学响应计算中,常用的接触面形状有圆形、椭圆形、跑道形(中间为矩形,两边为弧形)、矩形等,对上述四种形式的接触面形状中,圆形与矩形是最为常用的形式。圆形图示简单,多在力学解计算时使用;矩形模拟较符合实际,且图示较为简单,便于在力学数值求解时使用。

轮胎-路表接触面上存在竖向、横向(垂直行车方向)和纵向(行车方向)三向接触应力,然而目前许多工况条件下的三向接触应力的函数或数值关系还无法全部得到。因而,实际进行力学计算时,常常选取较理想条件,采用如下不同方向接触应力的组合形式。分别是仅考虑竖向接触力,考虑垂直和横向接触力以及考虑垂直、横向以及纵向接触力。其中,仅考虑竖向接触应力是当前应用最多的情况,而纵向接触应力准确分布大小较难确定。

进行路面结构力学响应计算所需要的接触应力大小分布形式多是在一些假设条件下或试验数据分析的基础上得到的。试验研究数据表明,竖向接触应力与水平向接触应力表现形式不同:竖向应

力在整个接触面上是单向应力(只有压应力,无拉应力);而水平方向上横向和纵向接触应力一般为双向应力(有正有负)。因而,接触应力大小分布形式的数学处理上应分别讨论。

对于竖向接触应力分布形式一般通过下述三种方式:(1)整个接触面上用平均值描述,即假设为均布垂直应力;(2)接触面上分不同区域,各个区域内用各自平均值描述;(3)试验数据连接曲面或折面描述,这种方法需要较多试验测试数据,且在结构分析时较为复杂,一般不采用。

对于水平向的接触应力一般通过下述两种方式描述:(1)接触面上划分为不同区域,将试验数据在这些区域统计分析描述;(2)试验数据连接曲面或折面描述。

2.2 荷载模型简化及其数学描述

在进行路面结构力学响应计算中,最常用的是圆形或矩形垂直均布接触模型。

对于圆形垂直均布模型,假设原点在圆形中心,在此情况下圆形垂直均布接触模型可用式(1)表示:

$$p_{\text{圆}}(x, y) = H(R^2 - x^2 - y^2) \cdot \frac{P_z}{\pi \cdot R^2}, \quad (1)$$

式中, $p_{\text{圆}}(x, y)$ 为 (x, y) 点的垂直竖向接触应力; P_z 为该车轮承受的垂直竖向轮载; R 为圆形接地面的半径; $H(\cdot)$ 为 Heaviside 阶跃函数,函数关系式如下:

$$H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

对于矩形垂直均布模型,假设原点在矩形中心,在此情况下矩形垂直均布接触模型可用式(3)表示:

$$p_{\text{矩}}(x, y) = H(w^2 - y^2) \cdot H(l^2 - x^2) \cdot \frac{P_z}{4 \cdot w \cdot l}, \quad (3)$$

式中, $p_{\text{矩}}(x, y)$ 为 (x, y) 点的垂直竖向接触应力; w 为接地面矩形宽度的一半; l 为接地面矩形长度的一半。

当车辆沿 x 轴正方向匀速行驶时,不考虑车辆振动,车辆荷载为移动恒载;这时,垂直均布接触面也是沿 x 轴正方向移动的,其模型可以在原有模型基础上通过 x 坐标的变换来表达,则式(2)、式(3)变为:

$$p_{\text{圆}}(t, x, y) = H[R^2 - (x - v \cdot t)^2 - y^2] \cdot \frac{P_z}{\pi \cdot R^2}, \quad (4)$$

$$p_{\text{矩}}(t, x, y) = H(w^2 - y^2) \cdot H[l^2 - (x - v \cdot t)^2] \cdot \frac{P_z}{4 \cdot w \cdot l}, \quad (5)$$

式中, v 为车辆行驶速度; t 为时间。

圆形和矩形垂直均布接触模型形式较为简单, 对于力学计算带来数学上的简化, 因而得到广泛的应用, 但没有考虑水平方向上接触应力, 无法描述接触应力大小空间分布的真实情况。车辆随着载重的增加, 轮胎-路面接触面上水平方向的接触应力越来越大, 且接触应力的空间分布也越来越不均匀, 因而垂直均布接触模型也就无法全面考虑重交通车辆下轮胎-路表接触应力的实际情况。

2.3 轮胎-路表三向接触应力模型

在借鉴已有研究成果基础上, 假设所研究的轮胎为斜交和子午线纵向花纹轮胎; 假设接触面为矩形, 矩形宽度为轮胎接地宽度代表值, 长度由计算得到; 不同类型轮胎竖向接触应力大小根据 Ronald Blab 的公式确定^[11]; 水平向接触应力大小与空间分布由 Groenendijk 公式确定^[12], 并根据 Ronald Blab 水平接触应力峰值对比研究成果, 对上述公式在不同类型轮胎情况下进行修正。

竖向接触应力的大小分布采用在矩形接触面上分不同区域, 各个区域内用各自平均值描述。接触面在宽度方向上将整个面积分为三个区域: 两边 20% 宽度范围的边缘区和中间 60% 宽度范围内中心区, 如图 2 所示。

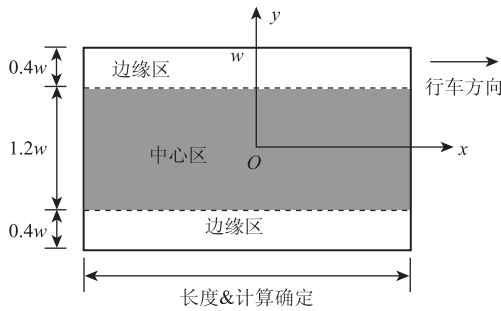


图 2 接触面区域划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of contact surface zoning

中心区与边缘区内竖向接触应力平均值用下述的回归方程表达:

$$q_{zc} = a_0 + a_1 \cdot p_i + a_2 \cdot P_z, \quad (6)$$

$$q_{ze} = b_0 + b_1 \cdot p_i + b_2 \cdot P_z, \quad (7)$$

式中, q_{zc} 为中心区平均竖向压应力; q_{ze} 为边缘区平均竖向压应力; p_i 为轮胎内压力; P_z 作用于轮胎的竖向荷载; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 为回归系数, 数值见表 1。

表 1 接触面竖向应力回归系数表

Tab. 1 Regression coefficients of contact surface vertical stress

轮胎 类型	回归系数					
	中心区平均压应力			边缘区平均压应力		
	参数			参数		
	a_0/kPa	a_1	a_2	b_0/kPa	b_1	b_2
斜交胎	-15.588	0.541	4.179	379.532	0.026	4.629
子午线胎	190.230	0.438	0.864	185.205	0.046	10.789

注: 边缘区平均应力公式根据全部接触面上平均压应力与中心区压应力公式推算得到。

根据各区域平均压应力与面积乘积总和等于竖向荷载, 可以求得接触面长度计算公式如下:

$$q_{zc} \cdot (1.2w \times 2l) + q_{ze} \cdot (0.8w \times 2l) = P_z, \quad (8)$$

将式 (6) 和式 (7) 代入式 (8) 得到:

$$l = \frac{5 \cdot P_z}{4w \cdot [(3a_0 + 2b_0) + (3a_1 + 2b_1) \cdot p_i + (3a_2 + 2b_2) \cdot P_z]}, \quad (9)$$

式中, l 表示接地面矩形长度的一半; w 表示接地面矩形宽度的一半。

假设车辆在平直的路面上匀速行驶时, 轮胎近似自由滚动状态, 这时水平纵向接触应力沿接触面长度方向上近似为正弦函数形状, 且沿宽度方向分接触面中心区和边缘区 (图 2), 各区内沿宽度大小不变; 随着轮载的变化, 正弦函数形状会发生偏移, 接触面边缘区和中心区变化趋势不同, 如图 3 所示。

水平纵向接触应力峰值可用下述公式求得:

$$q_{xc, \max} = K_x \cdot (10.3 + 2.56 \cdot P_z - 1.15 \cdot 10^{-3} \cdot P_z \cdot p_i + 2.50 \cdot v), \quad (10)$$

$$q_{xc, \min} = K_x \cdot (-30.4 - 1.55 \cdot P_z - 8.68 \cdot 10^{-4} \cdot P_z \cdot p_i - 2.02 \cdot v), \quad (11)$$

$$q_{xe, \max} = K_x \cdot (29.6 + 2.12 \cdot P_z - 1.19 \cdot 10^{-3} \cdot P_z \cdot p_i + 1.96 \cdot v), \quad (12)$$

$$q_{xe, \min} = K_x \cdot (18.0 - 3.61 \cdot P_z + 1.12 \cdot 10^{-3} \cdot P_z \cdot p_i + 0.0394 \cdot p_i - 3.21 \cdot v), \quad (13)$$

式中, $q_{xc, \max}, q_{xc, \min}$ 分别为中心区平均水平纵向接触应力最大值和最小值; $q_{xe, \max}, q_{xe, \min}$ 分别为边缘区平均水平纵向接触应力最大值和最小值; K_x 为水平纵向接触应力峰值轮胎类型修正系数, 见表 2; v 为车辆匀速行驶速度。

由上述公式可以得到中心区和边缘区平均水平纵向接触应力公式如下:

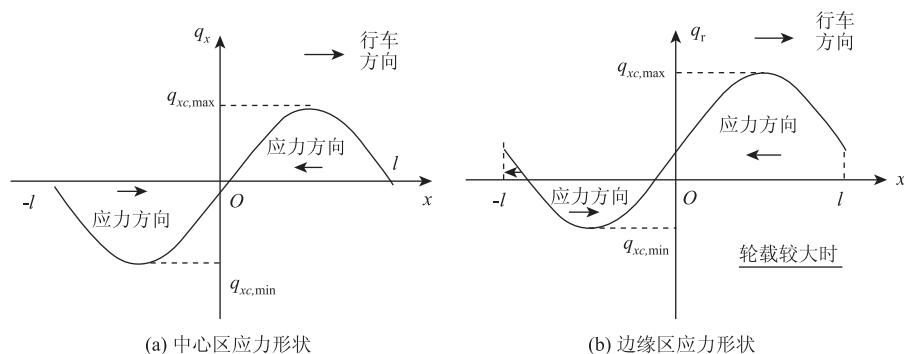


图3 水平纵向接触应力大小分布图

Fig. 3 Distribution of horizontal longitudinal contact stresses

$$q_{xc}(x) = \frac{q_{xc,max} + q_{xc,min}}{2} + \frac{q_{xc,max} - q_{xc,min}}{2} \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{l}\right) - l \leq x \leq l, \quad (14)$$

$$q_{xe}(x) = \frac{q_{xe,max} + q_{xe,min}}{2} + \frac{q_{xe,max} - q_{xe,min}}{2} \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{l}\right) - l \leq x \leq l, \quad (15)$$

式中 q_{xc} , q_{xe} 分别为中心区和边缘区平均水平纵向接触应力。

表2 水平接触应力峰值计算轮胎类型修正系数表

Tab. 2 Tire type correction coefficients for calculating peak horizontal contact stresses

轮胎类型	纵向接触应力 修正系数 K_x	横向接触应力 修正系数 K_y	备注
斜交轮胎	0.79	1.86	本修正系数根据相关文献不同轮胎水平向接触应力峰值对比结果求得
子午线轮胎	1.00	1.30	

对于常用的纵向花纹轮胎,接触面上水平横向接触应力大小分布除了与轮胎胎面宽度、纵向花纹条数及宽度、花纹间隙宽度等因素有关外,轮胎的结构类型特征是影响其应力分布形式的关键因素。当轮胎受荷载作用时,轮胎接触面横向由外凸变平,

并随轮载增大逐渐内凹,这种变化引起横向剪切应力有将路面向轮胎中心拉动的趋势,这种作用称为胎面效应,子午线轮胎由于其胎面较硬,故胎面效应较小;另外,当轮载受压时,轮胎面上各个橡胶肋条横向膨胀受路面阻碍,而使路面受到自各肋条带中心向外拉的趋势,这种作用称为泊松效应。

子午线轮胎-路面水平横向接触应力沿轮胎面宽度方向呈现近似锯齿形分布,正负峰值绝对值的大小近似相等,且沿接触面长度方向大小不变。为了研究的方便,将锯齿形分布近似描绘为正弦函数的形式,如图4所示,可以得到水平横向接触应力在宽度方向的数学表达式如下:

$$q_{cey}(y) = -q_{y,max} \cdot H(w^2 - y^2) \cdot \sin\left(\frac{5\pi}{w} \cdot y\right), \quad (16)$$

式中, q_{cey} 为水平横向接触应力; $H(\cdot)$ 为 Heaviside 阶跃函数。

斜交轮胎-路面水平横向接触应力的分布形式较为复杂,为研究描述的方便,采用一定简化假设,忽略轮胎花纹间隙的影响,近似描述水平横向接触应力,见图4;相应的水平横向接触应力在 y 方向的数学描述形式如下:

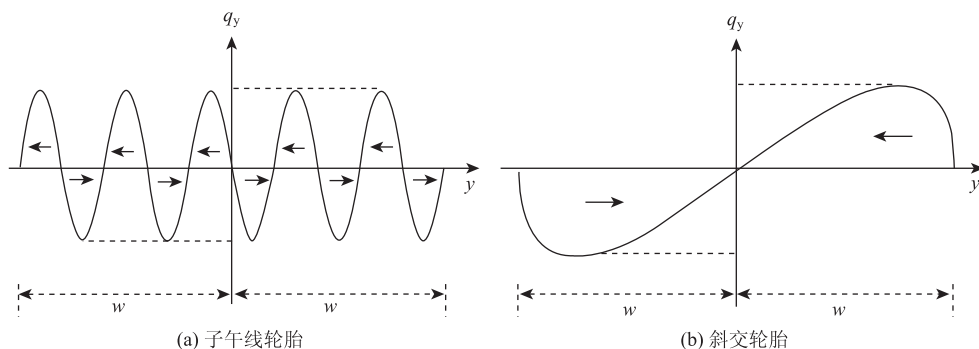


图4 水平横向接触应力大小分布图

Fig. 4 Distribution of horizontal lateral contact stresses

$$q_{cy}(y) = q_{y,\max} \cdot H(w^2 - y^2) \cdot \frac{3}{\sqrt{5}} \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^{0.8} \cdot \left(\frac{y}{w}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{w}\right)^2\right]^{0.4}, \quad (17)$$

水平横向接触应力的峰值大小可用下述公式计算:

$$q_{y,\max} = K_y \cdot (114 - 0.682 \cdot P_z + 2.05 \cdot 10^{-3} \cdot P_z \cdot p_i), \quad (18)$$

式中, $q_{y,\max}$ 为水平横向接触应力的峰值; K_y 表示水平横向接触应力峰值轮胎类型修正系数, 见表2。

轮胎-路面三向接触应力非常复杂, 尽管采用了大量合理假设, 仅考虑较理想的情况, 前面的数学描述仍较烦杂零散; 为此, 对前述三向接触应力的描述进行了数学总结, 提出相应条件下的数学通用表达式, 以便于力学分析应用。

$$\begin{cases} q_z(x, y) = -H(l^2 - x^2) \cdot [H(y^2 - 0.36w^2) \cdot H(w^2 - y^2) \cdot q_{ze} + H(0.36w^2 - y^2) \cdot q_{ze}] \\ q_x(x, y) = H(l^2 - x^2) \cdot [H(y^2 - 0.36w^2) \cdot H(w^2 - y^2) \cdot q_{xe}(x) + H(0.36w^2 - y^2) \cdot q_{xe}(x)] \\ q_y(x, y) = H(l^2 - x^2) \cdot q_{cy}(y) \end{cases} \quad (19)$$

当车辆沿 x 轴正方向匀速 v 行驶时, 不考虑车辆振动 (车辆荷载为移动恒载), 考虑接触面沿 x 轴正方向匀速移动时, 式 (19) 可以通过 x 坐标的变换来表达, 即令 $x - v \cdot t$ 代替 x 代入式 (19) 即可。应该指出, 式 (6) ~ 式 (19) 的获得, 很大程度上不是取决于严格的物理和力学推导, 而是来自试验测试数据的数学统计回归得到。因而, 对接触应力较为敏感的因素 (如轮载 P_z 和胎压 p_i), 其实用取值范围应限定在试验测试时的相应范围内 (单轮轮载 10 ~ 75 kN, 轮胎内压 390 ~ 990 kPa); 超出这一范围可能导致较大的误差或错误。

3 结论

(1) 根据汽车轮胎结构类型、轮胎花纹、轮胎气压、轮胎竖向荷载、车辆行驶速度、轮胎工作状态和路面表面几何特征与干湿状况, 分析了汽车轮胎在路面上的轮迹接触面形状、接触应力方向组合、接触应力分布特点。

(2) 分析了汽车轮胎荷载在路表作用轮迹形状特征及相应的简化数学模型, 抓住所研究问题关键影响因素, 经合理简化, 建立了轮胎-路表三向接触应力模型, 有利于分析竖向接触应力、水平纵向接触应力、水平横向接触应力分布特征及影响因素,

为研究汽车荷载作用下路面结构力学响提供了新的思路。

参考文献:

References:

- [1] PRIEST A L, TIMM D H. A Full-scale Pavement Structural Study for Mechanistic-empirical Pavement Design [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2005, 74 (1): 519-556.
- [2] 牛玺荣, 韩萍, 张晓燕. 车轮荷载下路基和基底竖向应力计算 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31 (1): 26-30.
NIU Xi-rong, HAN Ping, ZHANG Xiao-yan. Calculation of Vertical Stress in Subgrade and Foundation Base under Wheel Load [J]. Journal of Chang'an University: Natural Sciences Edition, 2011, 31 (1): 26-30.
- [3] 董城, 岳志平, 李志勇, 等. 基于路基路面协调变形的路基回弹模量设计 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (1): 38-42.
DONG Cheng, YUE Zhi-ping, LI Zhi-yong, et al. Design of Subgrade Resilient Modulus Based on Coordinate Deformation of Subgrade and Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (1): 38-42.
- [4] 赵小洁. 天津滨海新区重载沥青路面结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
ZHAO Xiao-jie. Study on Heavy-duty Asphalt Pavement in Tianjin Binhai New Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [5] 伍祥松. 重载交通下不同基层类型沥青路面结构应力分析 [J]. 公路交通技术, 2012 (1): 19-22.
WU Xiang-song. Analysis for Structural Stress of Asphalt Pavement of Different Types of Basecourses under Heavy Load Traffic [J]. Technology of Highway and Transport, 2012 (1): 19-22.
- [6] 聂忆华, 张起森. 长寿命沥青路面力学分析及其层位划分 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (5): 13-17.
NIE Yi-hua, ZHANG Qi-sen. Mechanical Analysis and Asphalt Layer Subdivision of Long Life Asphalt Pavement (LLAP) Structures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (5): 13-17.
- [7] FERNANDO E, LIU Wen-ting, LEIDY J. Analysis Procedure for Load Zoning Pavements [J]. Transportation Research Record, 2003, 1860: 117-125.
- [8] 张庆明. 超载车辆对道路使用寿命影响的研究 [J]. 交通标准化, 2007, 170 (10): 68-69.
ZHANG Qing-ming. Impact on Road Service Life of Over-

- load Vehicles [J]. Communications Standardization, 2007, 170 (10): 68-69.
- [9] 陈锋锋, 黄晓明, 单景松. 重载下不同基层沥青路面的力学分析 [J]. 上海公路, 2008 (2): 11-15.
CHEN Feng-feng, HUANG Xiao-ming, SHAN Jing-song. Mechanics Analysis of Different Asphalt Pavements under Heavy Load [J]. Shanghai Highways, 2008 (2): 11-15.
- [10] 乔英娟. 重载交通柔性基层沥青路面结构力学响应及设计指标 [J]. 中国市政工程, 2013 (2): 91-95.
QIAO Ying-juan. On Mechanical Response & Design Index of Flexible Base Asphalt Pavement Structure of Heavy Traffic [J]. China Municipal Engineering, 2013 (2): 91-95.
- [11] BLAB R, HARVEY J T. Modeling Measured 3D Tire Contact Stresses in a Viscoelastic FE Pavement Model [J]. International Journal of Geomechanics, 2002, 2 (3): 271-290.
- [12] GROENENDIJK J, VOGELZANG C H, MOLENAAR A A A, et al. Linear Tracking Response Measurements: Determining Effects of Wheel-load Configurations [J]. Journal of Transport Research Board, 1997, 1570: 1-9.

(上接第96页)

- YOU Guang-ming, LIU Xue-zeng, WANG Cheng-bing. Application of Ground Penetration Radar to Geological Forecast for Expressway Tunnel Construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (8): 92-95.
- [8] 汪成兵, 卞其, 由广明. 隧道超前地质预报技术及应用 [J]. 水文地质工程地质, 2007 (1): 120-122.
WANG Cheng-bing, BIAN Qi, YOU Guang-ming. Technology and Application of Tunnel Geological Predication [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007 (1): 120-122.
- [9] 王振宇, 程围峰, 刘越, 等. 基于掌子面编录和地质雷达的综合超前预报技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增2): 3549-3557.
WANG Zhen-yu, CHENG Wei-feng, LIU Yue, et al. Synthetic Advanced Forecast Technology Based on Geological Logging for Tunnel Face and Ground Penetrating Radar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 3549-3557.
- [10] 高阳, 张庆松, 原小帅, 等. 地质雷达在岩溶隧道超前预报中的应用 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2009, 39 (4): 82-86.
GAO Yang, ZHANG Qing-song, YUAN Xiao-shuai, et al. Application of Geological Radar to Geological Forecast in Karst Tunnel [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2009, 39 (4): 82-86.
- [11] 李大心. 探地雷达方法与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
LI Da-xin. Method and Application of Ground Penetrating Radar [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [12] 曾昭发, 刘四新, 冯晖, 等. 探地雷达原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
ZENG Zhao-fa, LIU Si-xin, FENG Xuan, et al. Theory and Application of Ground Penetrating Radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

(上接第103页)

- [11] 王晶, 苏光大. 确定区域的人脸彩色传递 [J]. 光子·激光, 2010, 21 (1): 116-119.
WANG Jing, SU Guang-da. Face Color Transfer for Specified Image Region [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21 (1): 116-119.
- [12] CHAVES-GONZÁLEZ J M, VEGA-RODRÍGUEZ M A, GÓMEZ-PULIDO J A, et al. Detecting Skin in Face Recognition Systems: A Colour Spaces Study [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20 (3): 806-823.
- [13] 符拯, 王书满, 刘丙杰. 自适应卡尔曼滤波的最新进展 [J]. 战术导弹技术, 2009 (6): 62-66.
FU Zheng, WANG Shu-man, LIU Bing-jie. An Overview of the Development of Adaptive Kalman Filtering [J]. Tactical Missile Technology, 2009 (6): 62-66.
- [14] VENKATARAMAN V, FAN Guo-liang, HAVLICEK J P, et al. Adaptive Kalman Filtering for Histogram based Appearance Learning in Infrared Imagery [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21 (11): 4622-4635.
- [15] 李文光, 韩萍, 吴仁彪. 一种改进的卡尔曼滤波背景减除方法 [J]. 信号处理, 2009, 25 (8A): 274-279.
LI Wen-guang, HAN Ping, WU Ren-biao. An Improved Background Subtraction Algorithm Based on Kalman Filtering [J]. Signal Processing, 2009, 25 (8A): 274-279.