

文章编号:1001-7372(2022)04-0108-09

用于公路车-桥系统振动分析的精细化轮胎模型

邓 露^{*1,2}, 凌天洋², 何 维², 孔 烜²

(1. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 土木工程
学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了解决当前公路车桥耦合振动模型中轮胎模型过于简化、车轮-路面接触力与桥梁响应计算结果不够精确的问题,提出了一种精细化轮胎模型。首先基于车辆橡胶轮胎的几何、力学特征,建立了径向弹簧力学模型并进行了理论推导;然后考虑轮胎与路面接触面的刚度分布特征和高速状况下轮胎的惯性力,提出了轮胎接触面分布刚度的计算方法,保证了轮胎接触面的变形协调和力学平衡关系。通过与现有研究结果进行对比,验证了轮胎模型的准确性和可靠性。研究表明:车辆轮胎惯性力引起的不平衡离心力会随车轮荷载和轮胎刚度的降低及车速的增加而增大,当车速达到 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,不平衡离心力可能超过车轮荷载的 10% 并对轮胎的变形产生影响,进而改变车辆、桥梁 2 个子系统的接触关系,因此在车桥耦合振动分析中有必要考虑轮胎的质量及其产生的不平衡离心力;基于不同轮胎模型获得的接触力计算结果不同,从而引起车辆、桥梁动态响应计算结果的显著差异,且这种差异可能会随车速和车轮荷载的增加及路况的恶化而显著增大,因此实际运用中应尽可能选择精度较高的轮胎数值模型;采用不考虑面接触的单点模型可能明显高估车辆、桥梁的动态响应,而应用未考虑刚度重分布的改进弹性滚子模型在车速较高时会低估车辆的动态响应,与这 2 种模型相比,基于所提的刚度重分布模型进行车-桥系统振动分析时,其计算响应与实测结果更为接近,且对于桥梁动力冲击系数的估计更加准确。

关键词:桥梁工程;车桥耦合振动;数值模拟;轮胎模型;动态响应

中图分类号:U441.3 文献标志码:A

Refined Tire Model for Analysis of Highway Vehicle-bridge System Vibration

DENG Lu^{*1,2}, LING Tian-yang², HE Wei², KONG Xuan²

(1. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province, Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: This paper proposed a refined tire model to improve the applicability and accuracy of the numerical simulation on highway vehicle-bridge coupling vibration problems. Firstly, the radial spring tire model was established based on the typical truck tire's main geometric and mechanical characteristics. Then, considering the distribution characteristics over the tire-road contact patch and the influence of the tire inertia force at high speed, the function of the contact patch's distribution stiffness was developed per the principles of deformation coordination and mechanical equilibrium. Finally, the proposed tire model was verified by comparing it with some existing

收稿日期:2020-06-02

基金项目:湖南省科技领军人才项目(2021RC4025);湖南省重点研发计划项目(2017SK2224);
湖南省研究生科研创新项目(CX2018B159)

* 作者简介:邓 露(1984-),男,湖南双峰人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengl@hnu.edu.cn.

research. Results show that the unbalanced centrifugal force caused by tire inertia force can exceed 10% of the wheel load. It will increase with the decreasing wheel load, tire stiffness, and the increasing vehicle speed. As the unbalanced centrifugal force may further affect the tire behavior, the mass and dynamic characteristics of the truck tire should be fully considered. Different tire models can cause significant differences in the simulation results of the vehicle and bridge dynamic response. The difference will increase with higher vehicle speed, heavier wheel load and the deterioration of road roughness condition, so an appropriate tire numerical model should be selected if conditions permit. Using the single point contact model may overestimate the dynamic response of vehicles and bridges, while adopting the revised flexible roller contact model without considering the redistribution stiffness over the contact patch will underestimate the dynamic response of vehicles at high speed. Based on the proposed redistributive tire model, the simulated dynamic responses of the bridge-vehicle system are closer to the field data, which can predict a safer and more accurate impact factor (IM) for the bridge.

Keywords: bridge engineering; vehicle-bridge coupling vibration; numerical simulation; tire model; dynamic response

Received 02 June 2020

Funding: Leading Talent in Science and Technology of Hunan Province (2021RC4025); Key Research Project of Hunan Province (2017SK2224); Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (CX2018B159)

*Corresponding author. *E-mail address:* denglu@hnu.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.008>

0 引言

随着计算机技术的快速发展,数值模拟已成为车-路(桥)耦合振动问题的高效求解方法并得到广泛运用^[1-2],与现场试验相比,它具有计算成本低、不受场地条件限制等诸多优势^[3]。然而,受限于计算条件,现有的数值模拟分析方法在建模中通常会采用较多的简化与假设,虽然达到了计算简便的目的,但可能导致实际应用中存在精度不足的问题。因此,提出合理的建模方法对于提高车桥耦合振动分析结果的精度和计算效率具有重要的意义。

公路车桥耦合振动仿真系统可分为车辆模型、桥梁模型和车桥接触(轮胎)模型3个部分。目前,车辆和桥梁已实现精细化的三维建模^[2,4-5],并可以较好地反映车辆、桥梁的实际动力特性^[2]。而由一组弹簧-阻尼单元并联的单点接触模型由于理论简单、求解方便,仍然是当前车-桥耦合振动分析中应用最广的车轮数值模型。该模型最初由Yang等^[6]引入铁路车桥耦合动力分析,随后被广泛运用于公路车桥耦合振动问题的研究。近年来,越来越多的学者对该模型的准确性提出质疑,认为该模型过于简化且具有明显的局限性^[7-8],尤其当路面情况较复

杂时,有可能会高估车辆及桥梁的动力响应^[3,8]。轮胎是车辆与桥梁等基础设施的唯一接触、传力部件,轮胎模型的准确性不仅关系到车辆动力行为分析的准确性,还会直接影响道路桥梁等结构动力响应分析结果的可靠性^[6]。已有研究表明,轮胎与路面的相互作用关系非常复杂,其二者之间是不规则的面接触模式,且接触面上的作用力呈现非均匀分布^[9-10],当车辆高速运动时,接触模式又会进一步发生变化^[11]。

目前,已有许多的学者对轮胎模型进行了深入研究。在车辆领域,出现了许多物理模型^[12]、经验模型^[13]以及有限元模型。这些模型主要关注车辆或轮胎自身的响应,为研究操控性能还考虑了多向接触力的计算,虽然计算精度较高,但是往往涉及到复杂积分运算和依赖较多的试验参数且大多基于小型汽车轮胎测试得到,因此对于公路重载车辆作用下的车桥耦合振动分析并不一定适用。通过对不平整路面上的轮胎行为进行分析,Guo^[14]首次考虑了轮胎的几何滤波特征并提出弹性滚子模型。随后Yang等^[15]对其进行改进,提出一种改进弹性滚子模型并用于车路耦合分析,但是分析结果在车速较高时与实测结果出现明显偏差。针对车桥耦合振动

问题,Chang等^[1]和Yin等^[8]分别提出了一种圆盘模型,用于分析路面不平整状况下的桥梁动力响应。但是前者并未考虑轮胎的变形,而后者则未给出实际运用时轮胎模型刚度的确定方法。Deng等^[3]提出了一种固定印迹的多点模型,该模型基于规范^[16]中的简化方法,但未能反映轮胎接触印迹的动态变化特性。丁勇等^[17]针对模数式伸缩缝的动力分析建立了一种分布式弹簧模型,但该模型需要分情况建模,应用不方便。综上研究发现,当前车桥耦合振动分析中复杂轮胎模型的建模过程过于繁琐,而简化模型过于简单不能充分反映公路车辆轮胎的力学特性,因而现有轮胎数值模型难以同时满足车辆耦合振动分析的高效性和准确性。

本文提出了一种适用于公路车桥耦合振动分析的精细化轮胎建模方法。首先基于橡胶轮胎的几何、力学特征,建立了径向弹簧轮胎模型;然后考虑轮胎接触面的力学特性和高速状况下轮胎惯性力的影响,提出了接触面分布刚度的计算方法,保证了接触面的变形协调和力学平衡关系;最后,通过与相关文献中的实测结果对比,对该轮胎建模方法的准确性和可靠性进行了验证。

1 现有轮胎数值理论

1.1 点接触理论

以车辆行驶方向为 X 方向,竖直向上为 Z 方向建立坐标系。车桥竖向振动以向上为正,接触力以受压为正。取轮胎竖向刚度为 K_t ,竖向阻尼为 C_t ,记轮胎竖向压缩量为 Δz ,则轮胎竖向接触力 F 的广义计算公式为

$$\Delta z(x, x_a) = \begin{cases} [w(x+x_a) + r(x+x_a) - R_0 + \sqrt{R_0^2 - x_a^2} - z(x)] & \Delta z > 0 \\ 0 & \Delta z \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta \dot{z}(x, x_a) = \begin{cases} [\dot{w}(x+x_a) + \dot{r}(x+x_a) + \frac{x_a v}{\sqrt{R_0^2 - x_a^2}} - \dot{z}(x)] & \Delta z > 0 \\ 0 & \Delta z \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$F(x) = \int_a [k_t(x_a) \cdot \Delta z(x, x_a) + c_t(x_a) \cdot \Delta \dot{z}(x, x_a)] dx_a \quad (6)$$

式中: R_0 为轮胎半径; a 为轮胎接触面长度; x_a 为轮胎接触面上各接触点与轮毂中心的纵向相对位移,以行车方向为正; $k_t(x_a)$ 为轮胎接触面上的竖向刚度分布函数; $c_t(x_a)$ 则为轮胎接触面上的竖向阻尼分布函数。

为了充分体现行驶过程中受荷载作用的轮胎的变形特征,以上研究对轮胎压缩量 Δz 的计算做出了重要改进。然而,轮胎模型的刚度取值对于满足

$$F = K_t \Delta z + C_t \Delta \dot{z} \quad (1)$$

取 r 、 w 和 z 分别代表桥面不平整度、桥面竖向位移和轮毂中心的竖向位移, x 代表车轮中心的纵向坐标,则轮胎垂直方向的压缩量和压缩率计算式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta z &= r(x) + w(x) - z(x) \\ \Delta \dot{z} &= \dot{r}(x) + \dot{w}(x) - \dot{z}(x) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

刚度和阻尼是反映轮胎动力特性的主要参数^[3,18]。当前研究^[19]表明,静态加载试验中,轮胎的挠度(轮毂中心的竖向位移)与车轮竖向荷载之间存在良好的线性关系,因此通常将轮胎的竖向刚度视为常数 K_t ,同时也假设轮胎阻尼 C_t 不会发生改变。将试验得到的竖向刚度、阻尼代入式(1)后连同式(2)便构成了单点接触模型的基本理论。

为了反映实际中车辆轮胎与桥面的面接触特征,Deng等^[3]基于美国桥梁设计规范^[16]提出了一种固定印迹的多点模型,将轮胎接触面定义为 n 个接触点,单个接触点的竖向压缩量和竖向压缩率计算式与式(2)相同,则轮胎的竖向接触力计算式为

$$F = \frac{K_t}{n} \sum_{i=1}^n (r_i(x) + w_i(x) - z_i(x)) + \frac{C_t}{n} \sum_{i=1}^n (\dot{r}_i(x) + \dot{w}_i(x) - \dot{z}_i(x)) \quad (3)$$

1.2 动态面接触理论

为了体现轮胎接触面的动态变化特性,Guo^[14]基于轮胎的几何特征提出了弹性滚子模型。Yang等^[15]进一步考虑了桥(路)面的变形以及轮胎阻尼的影响,建立了如图1所示的改进弹性滚子模型,其计算公式为

运动过程中整个车桥系统在接触面上的力学平衡及位移协调关系同样重要。当前所有面接触模型^[3,8,15]均采用了将轮胎竖向刚度常数在接触面上取平均值的简化处理方法。对于动态面接触模型,这样处理的缺陷主要体现在2个方面:一是无法体现接触点间靠胎面纤维连接的关系;二是不满足接触面的变形协调关系。因为如果将 $k_t(x_a) = K_t/a$ 代入式(6),由于静态轮胎竖向刚度 K_t 为常数,本

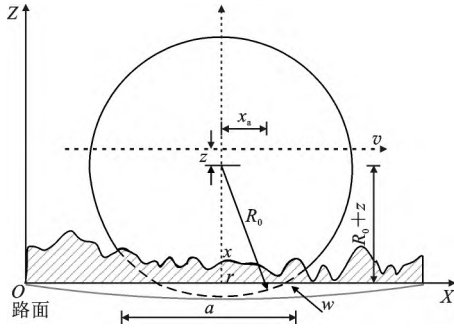


图 1 改进弹性滚子模型计算图示

Fig. 1 Diagram of Revised Flexible Roller Contact Model

质上是对所有接触点压缩量在接触面 a 上取平均, 这会导致迭代过程中得到的实际平衡位置与车辆初始的静平衡位置不一致。这不仅会直接导致车辆的初始振动, 甚至还可能造成求解不收敛。

此外, 上述模型的建立皆基于静态荷载-挠度试验得到的轮胎竖向刚度, 同时均忽略了轮胎的质量, 因而在运用时未能体现运动状态下轮胎的动力特性以及轮胎自身惯性力的影响。

2 轮胎精细化建模方法

2.1 径向弹簧力学模型

橡胶轮胎在胎内气压作用下会出现均匀的径向膨胀, 且当前广泛使用的子午线轮胎其胎壁内的钢束均呈径向排布, 因此许多轮胎模型的建立均基于含径向弹簧的物理模型^[20]。本文也将以径向弹簧物理模型为基础对公路车桥耦合系统中的车辆轮胎进行精细化建模。

轮胎静态加载试验中, 轮毂中心的竖向位移 z 与接触面上的最大径向压缩量的竖向分量相等, 如图 2 中的几何关系所示。然而从力学关系来看, 竖向车轮荷载需要由整个轮胎接触面提供的竖向合力来平衡, 因此需要重新建立变形协调、力学平衡关系。

变形协调条件为

$$\Delta z_r(x_a) = \Delta z(x_a) \cdot \cos(\theta) \quad (7)$$

力学平衡关系为

$$F = \int_a k_r \cdot \Delta z_r(x_a) \cdot \cos(\theta) dx_a = K_t \cdot z \quad (8)$$

式中: Δz_r 为接触面的径向压缩量, 而接触面的竖向压缩量 Δz 的计算式同式(4); k_r 为接触面上的径向刚度分布函数; θ 为接触面上接触点处径向弹簧与轮胎对称轴的夹角。

由于轮胎静态加载试验中普遍采用缓慢加载或分级加载, 因此以上力学平衡关系中未体现阻尼力

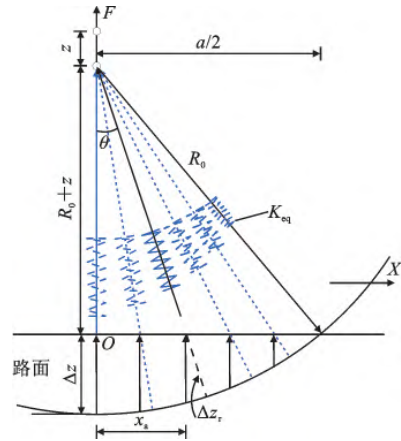


图 2 径向弹簧模型计算图示

Fig. 2 Diagram of Radial Spring Model

的作用。

2.2 径向刚度重分布

轮胎不受外荷载作用时径向均匀膨胀, 因此可假设一个初始的基础径向刚度 K_{eq} , 其与轮胎静态竖向刚度 K_t 有关。当轮胎与路面接触且发生变形时, 径向刚度在动态变化的接触面上发生重分布。接触面上各点与轮毂中心相对位置 x_a 以及 θ 的不同会导致竖向、径向压缩量的差异, 同时也因为 θ 的不同使得各接触点径向弹簧对竖向接触力的贡献程度不一样, 这些关系已在式(7)、(8)中体现。

实际中胎面各接触点通过纵向受拉径向受气压作用的橡胶纤维(胎面橡胶及内部筋束)连接。Xiong 等^[11]研究发现轮胎接触点的压缩量越大, 该点附近的纤维纵向拉应力越大, 因而可根据预应力效应推断出该接触点处的径向刚度得到增强, 即轮胎接触点处的径向刚度可间接通过径向压缩量 Δz_r 的大小反映。因此, 本文定义如下公式

$$k_r(x_a, x_a, \theta, \Delta z_r) = K_{eq} \cdot H_1(x_a) \quad (9)$$

$$H_1(x_a) = 1 + \frac{\Delta z_r(x_a)}{\max \Delta z_r(x_a)} \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(8)可得到

$$H_2 = \frac{aK_{eq}}{K_t} = \frac{z}{\int_a \Delta z(x_a) \cos^2(\theta) H_1(x_a) dx_a} \quad (11)$$

式中: K_{eq} 为轮胎基础径向刚度; H_1 为压缩量分布系数; H_2 为基础径向刚度转换系数。

当轮毂中心竖向位移 z 确定时, 轮胎压缩量 Δz 以及接触面长度 a 皆可求出, 从而可根据式(10)、(11)求出 H_1 和 H_2 , 并结合式(9)、(11)进一步建立轮胎模型刚度分布函数 k_r 和实测刚度常数 K_t 的关系, 而基础径向刚度 K_{eq} 作为中间变量也可通过式(11)求出。

2.3 轮胎不平衡离心力分析

米其林公司的研究数据表明,相比于静态加载模式,当车速达到 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时轮胎的竖向挠度将减少 2%,达到 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时将减少 6%。Garcia-Pozuelo 等^[21] 通过将传感器安装在轮胎内壁,发现随着速度的增加,胎面应变受离心力影响明显增大。基于以上研究可以发现,当轮胎高速旋转时,轮胎惯性力作用会直接影响轮胎的行为,进而可能影响到车辆或桥梁的响应。然而轮胎传统建模理论^[3,5,14,17,22],直接采用静态参数,通常忽略轮胎质量以及其产生的惯性力,进而在高速状况下可能会降低分析结果的精度。

为了分析轮胎转动过程中的不平衡离心力,本文将轮胎简化为图 3 所示的二维滚动圆环。当轮胎不受荷载作用自由旋转时,轮胎各部分产生的离心力相互平衡。当荷载作用导致轮胎压缩量较大时,与地面接触的 B 区部分胎面单元受路面约束沿路面平动,不构成圆周运动条件,无法与顶部 T 区轮胎单元产生的离心力相平衡,此时 T 区轮胎单元会对轮毂产生一个向上的升力。这种升力作用的结果是在相同的车轮荷载作用下轮毂中心的竖向位移 Δz 更小,等同于轮胎刚度增大。

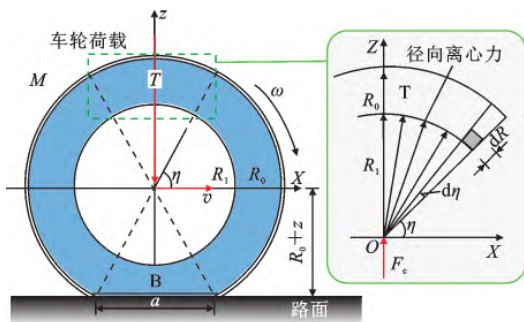


图 3 轮胎不平衡离心力计算图示

Fig. 3 Diagram of Calculating Unbalanced Centrifugal Force for a Tire

设轮胎的质量为 M (不包括轮毂质量),参考典型的卡车轮胎 235/80 R22.5,轮胎的扁平率(轮胎内外半径差与胎面宽度的比值)为 0.8。①忽略胎壁与胎面的厚度差异,将轮胎质量根据表面积均匀分布到整个圆环,得到轮胎的分布密度;②由车轮荷载和轮胎竖向刚度确定轮胎的接触区域(B区)大小,进而确定出需要计算离心力的 T 区大小;③根据①中得到的分布密度对②中确定的计算区域(T区)考虑转动角速度进行离心力积分计算,分为胎面和胎壁两部分进行积分,最后再将两部分离心力叠加。

经过简单的理论推导,T区轮胎的离心力可由

如下公式计算

$$F_c = \frac{16M\omega^2 z(1-\beta^2)}{39\pi(1-\beta^2)} \sqrt{\frac{2WR_0}{K_t} - \left(\frac{W}{K_t}\right)^2} + \frac{5M\omega^2 R_0}{13\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - \frac{W}{K_t R_0}\right) \right] \quad (12)$$

式中: F_c 为不平衡离心力; W 为作用在轮毂中心处的瞬时车轮动荷载; R_1 为轮毂半径; β 为轮胎内外半径比; ω 为轮胎转动的角速度。

直接以重载型卡车轮胎 235/80 R22.5 作为分析对象,其胎面宽度为 235 mm,扁平率为 0.8,其内外直径分别为 571.50 mm,947.50 mm。取其重量为 50 kg,然后分别取刚度范围 $1\ 000 \sim 3\ 000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[5],车轮荷载范围 $15 \sim 40 \text{ kN}$,车速范围 $0 \sim 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 代入式(12)进行计算,结果如图 4 所示。

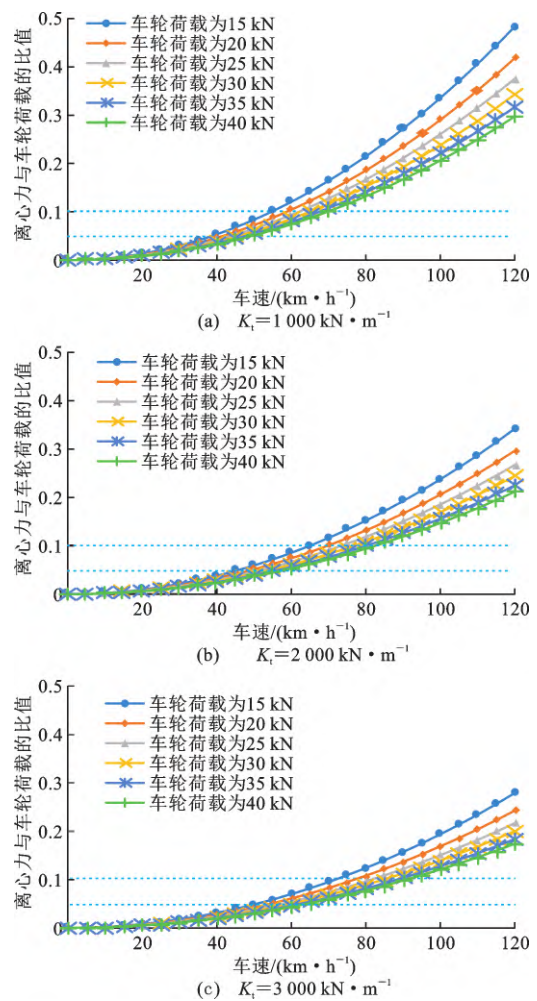


图 4 轮胎不平衡离心力分析结果

Fig. 4 Analysis Results of Unbalanced Centrifugal Force for a Truck Tire

由图 4 可以看出,重载货车的动态车轮荷载受车轮不平衡离心力的影响显著,具体表现为轮胎刚

度越小(气压越低),车速越高,车轮荷载越小,其不平衡离心力占车轮荷载的比例越大。一般通行状况(平均车速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,标准车轮荷载 25 kN)下,车轮非对称离心力与轮载的比例可达 $5 \sim 10\%$ 。因此,在车桥耦合振动分析的轮胎建模中,有必要考虑运动状况下轮胎的自身惯性力引起的不平衡离心力影响。

由于不平衡离心力作用的结果等同于轮胎刚度增大,因此定义一个刚度调整系数 H_3 ,其表达式为

$$H_3 = \frac{W}{W - F_c} = \left(1 - \frac{F_c}{W}\right)^{-1} \quad (13)$$

3 车桥耦合振动精细化建模与求解

3.1 精细化轮胎模型

本文中轮胎模型的建模流程如图 5 所示。轮胎接触面上的径向压缩量和压缩率计算式如下

$$\Delta z_r(x, x_a) = \Delta z(x, x_a) \cos(\theta) \quad (14)$$

$$\Delta \dot{z}_r(x, x_a) = \Delta \dot{z}(x, x_a) \cos(\theta) \quad (15)$$

式中: Δz 、 $\Delta \dot{z}$ 的计算参照式(4)、(5)。

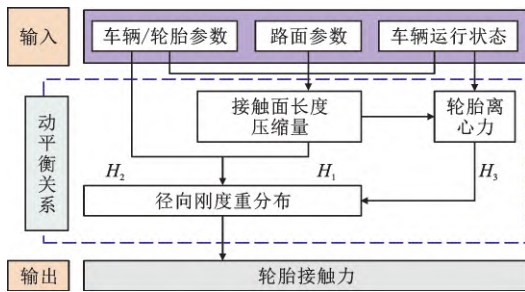


图 5 轮胎建模流程

Fig. 5 Tire Modeling Flow Chart

接触力计算式如下

$$F = \int_a [k_r \Delta z_r \cos(\theta) + c_r(x_a) \cdot \Delta \dot{z}_r \cos(\theta)] dx_a \quad (16)$$

$$k_r = H_1 H_2 H_3 K_t / a$$

其中,当轮胎竖向刚度 K_t 已知时,接触面上的刚度分布函数 k_r 由 H_1 、 H_2 、 H_3 和接触面长度 a 共同确定, H_1 、 H_2 、 H_3 的计算式分别见式(10)、(11)、(13)。考虑到阻尼特性一般只与材料的(黏弹)特性和激振频率有关,不受变形程度的影响,因此本模型假设接触面上的分布阻尼 $c_r(x_a)$ 为阻尼常数 C_t 在接触面上均匀分布。

3.2 路面不平整度模型

路面不平整度是车桥耦合振动系统的主要激励源,在数值仿真中一般模拟成零均值的高斯随机过

程,可通过功率谱密度函数的傅里叶逆变换生成,其公式如下

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2\varphi(n_k) \Delta n} \cos(2\pi n_k x + \theta_k) \quad (17)$$

式中: θ_k 为 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机相位角; Δn 和 N 分别为空间频率离散采样间距和采样数; n_k 为波的个数; $\varphi(\cdot)$ 为路面高程的功率谱密度函数。

参考国际标准化组织(ISO)关于路面等级分类的最新标准^[23],根据功率谱密度参数可将路面不平整度由好到差分为 A~H 八个等级,本文依据实际中较大概率出现的路面情况选取了其中的 B、C、D、E 四个等级进行分析,具体分类标准和路面等级参数可参考文献^[23]。

3.3 车桥耦合振动分析理论

以轮胎模型为分界,可将车辆-桥梁视为 2 个振动子系统,分别建立动力学方程,二者通过轮胎模型耦合。将桥梁、车辆分别离散为多结点有限元模型,记桥梁、车辆的结点位移向量分别为 Y 、 Z ,则由 D'Alembert 原理可得其动力学方程:

$$\left. \begin{aligned} M_b \ddot{Y} + C_b \dot{Y} + K_b Y &= F_{b-v} \\ M_v \ddot{Z} + C_v \dot{Z} + K_v Z &= F_{v-b} + F_{vg} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: M_b 、 M_v 、 C_b 、 C_v 、 K_b 、 K_v 分别为桥梁和车辆系统的质量、阻尼、刚度矩阵; \ddot{Y} 、 \ddot{Z} 、 \dot{Y} 、 \dot{Z} 为加速度、速度向量; F_{b-v} 和 F_{v-b} 互为反作用力,分别为将本文第 3.1 节中轮胎模型得到轮胎接触力通过形函数分配到桥梁、车辆各节点上的节点荷载列向量; F_{vg} 为车辆自重引起的等效节点荷载列向量。

本文采用 Newmark- β 法对以上车桥耦合动力方程进行迭代求解,根据上一时间步的等效刚度以及等效节点荷载矩阵可依次得到当前时间步车桥系统的所有节点位移和节点速度,结合当前时间步的桥面位移以及路面不平整度,即可求得当前时间步的轮胎压缩量和轮胎接触力。该动力学方程及具体求解过程详见文献^[24]。

4 模型验证

4.1 车辆动力响应验证

为了验证本文提出的重分布轮胎模型的可靠性,本文首先对文献^[25]中的试验进行仿真并通过实测数据对模拟结果进行验证。文献^[25]的试验为车辆通过路面三角形凸块的激励试验,本文与文献^[15]的做法一致,对车辆的较重的后轴建立了四分之一车模型,将路面模拟成水泥混凝土路面,关于车

辆模型和路面模型的详细参数见文献[15]。考虑了B、C、D、E四个路面等级,将路面上底长40 cm,高6 cm的等腰三角形凸块模拟成凸起的三角形路面轮廓,并设于路面中心位置处。本文模拟保证了车辆模型在通过三角形凸块前已处于平稳状态,而车辆经三角形凸块激励产生竖向振动后将继续行驶一段足够长的距离,直至车辆由剧烈振动状态基本恢复到平稳行驶状态。

动荷载系数是当前广泛采用的道路破坏评价指标,其定义为动态车轮荷载的均方差与静态车轮荷载的比值。本节首先对不同速度(10~80 km·h⁻¹)下车辆通过不同路面等级的动荷载系数进行了分析,并将分析结果同单点模型计算结果进行了对比,结果如图6所示。车体最大加速度是衡量车辆舒适性能的重要参数,为了进一步验证模型,对车辆通过路面上的等腰三角形凸块时的车辆最大加速度进行了分析,将车体分析结果与文献[25]中实测数据的对比绘于图7,同时还与文献[26]中的模拟结果进行了对比。

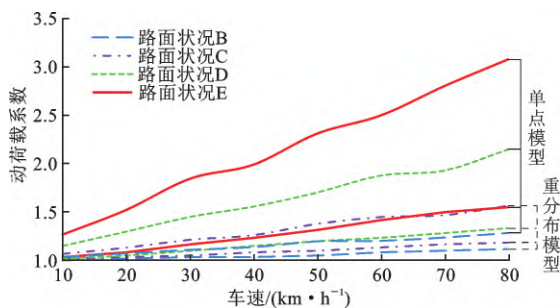


图6 不同路面状况下的车辆动荷载系数

Fig. 6 Dynamic Load Coefficients of Vehicle Under Different Road Roughness

从图6可看出,即便是路面状况较好(B级)时,单点模型与重分布模型计算得到的动荷载系数仍存在明显差异。随着路面状况的恶化以及车速的增大,模型之间的差异进一步扩大。采用本文的重分布模型计算得到的车轮接触力始终远小于单点模型计算结果。

从图7可看出:针对本文所选算例对车体最大加速度的分析结果,当车速较低时3种模型结果之间的差异较小,随着车速增大差异进一步增大。单点模型未考虑滤波特性其计算结果始终远高于实测结果,采用该模型进行动力分析会远远高估车辆的动态响应。改进弹性滚子模型未考虑不平衡离心力引起的刚度变化,当车速较高时其计算结果明显偏离且始终低于实测结果。按本文方法所建立的重分布模型,其计算结果始终与实测车辆响应更加接近。

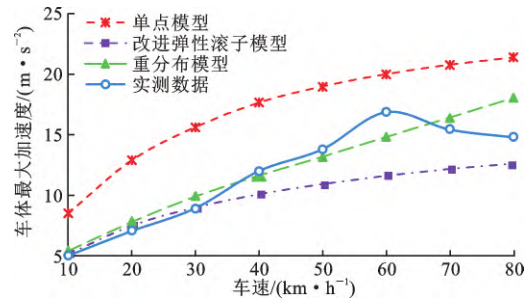


图7 不同车速下的车体最大加速度

Fig. 7 Maximum Acceleration of the Vehicle Body Under Different Speeds

4.2 桥梁动力响应验证

为了进一步验证本文模型在桥梁动力响应分析中的有效性,基于文献[3]中的现场试验,对一辆三轴货车以64.40 km·h⁻¹的速度通过一座三跨简支梁桥的过程进行了动力分析。试验车辆的前中后三轴的单侧轮重依次为40、47.8、47.8 kN,其中后两轴组成轴距为1.2 m的二轴组。试验桥梁由7根间隔2.13 m的I形主梁组成,每跨均长为16.76 m,取第3跨为研究对象,其桥头位置设有约3.80 cm高的木棒。试验中对车辆过桥时最不利主梁跨中位置梁底的竖向挠度,竖向加速度以及纵向应变进行了采集。其余分析参数详见文献[3]。车辆过桥时动态车轮荷载模拟结果如图8,桥梁动态响应验证结果如图9,动力冲击系数的计算结果见表1。

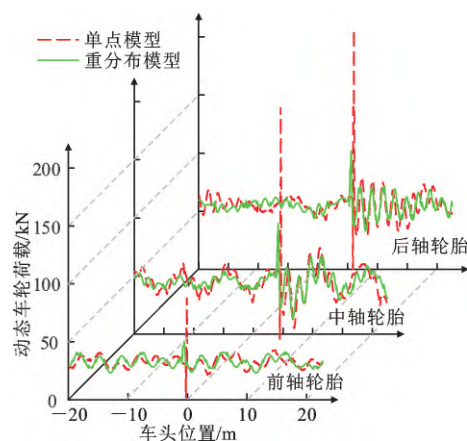


图8 车辆动态车轮荷载模拟结果

Fig. 8 Simulation Results of Dynamic Wheel Load

从图8可发现,单点模型与重分布模型对于动态车轮荷载的计算存在显著的差异,尤其当路面状况较差或存在明显的凸起或凹陷时,前者得到的瞬时轮胎接触力可能是后者计算结果的数倍,这与第4.1节中的规律相符。较重的2个后轴轮胎相比于前轴轮胎过桥时其动态车轮压力波动明显更大。

从图 9 可看出:通过数值模拟得到的桥梁动力响应与实测响应具有良好的一致性,在一定程度上验证了本文模型对现场试验具有较高的还原度;单点模型对各项桥梁动态响应的模拟结果均远大于实测结果;本文重分布模型的计算结果始终与实测桥梁响应更加接近。综合图 9 和表 1 可以看出重分布模型对挠度响应和纵向应变响应的最大值估计均略大于实测响应,对于动力冲击系数的估计精度远高于单点模型。

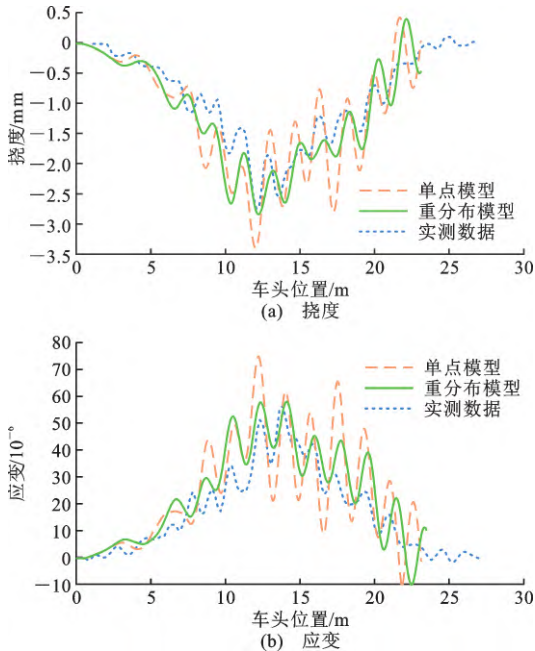


图 9 桥梁动态响应验证结果

Fig. 9 Verification Results of Bridge Dynamic Response

表 1 动力冲击系数计算结果

Table 1 Analysis Results of Impact Factor

最大 响应 类型	实测结果		模拟结果		动力冲击系数 (IM)		
	静态	动态	重分布 模型	单点 模型	实测值	重分布 模型	单点 模型
挠度	2.3 mm	2.7 mm	2.8 mm	3.4 mm	0.17	0.22	0.48
应变	42.8×10^{-6}	55.7×10^{-6}	58.0×10^{-6}	74.5×10^{-6}	0.30	0.35	0.74

综合上述分析,数值模拟中采用不同轮胎模型获得的轮胎接触力计算结果不同,其可能引起车辆、桥梁动态响应计算结果的显著差异,这种差异会随车速的增大、车轮荷载的增加以及路况的恶化进一步扩大。不考虑面接触的单点模型会明显高估车辆和桥梁的动态响应,未考虑刚度重分布的改进弹性滚子模型在车速较高时会低估车辆的动态响应。本文的重分布模型对于车辆、桥梁的动态响应模拟结果均与实测结果更加接近,对桥梁(挠度/应变)动力

冲击系数的估计略保守且更加准确。

5 结 语

当前用于公路车桥耦合振动分析的数值模拟方法中对于车辆轮胎的建模过于简化,计算结果精度不足。基于实际轮胎的几何、力学特征并结合径向弹簧力学模型本文建立了一种三维的精细化轮胎模型。通过与现有研究成果对比,验证了所提出模型的准确性和可靠性。基于本文研究,可得出以下结论:

(1)不同轮胎模型对接触力计算结果的不同会引起车辆、桥梁动态响应计算结果的显著差异,且这种差异会随车速的增大、车轮荷载的增加及路况的恶化进一步扩大。因此,实际运用中需要重视轮胎的建模问题,在计算条件允许的情况下应考虑精度较高的轮胎模型。

(2)不考虑面接触的单点模型可能会明显高估车辆、桥梁的动力响应。未考虑刚度重分布的改进弹性滚子模型在车速较高时会低估车辆的动态响应。本文的重分布模型计算结果介于单点模型和改进弹性滚子模型之间且与实测结果更加接近,因而可以提高车桥耦合振动分析的精度。

(3)提出的刚度重分布轮胎模型对桥梁(挠度/应变)动力冲击系数的计算结果略高于实测结果,因此,将该模型用于桥梁设计和安全评估时会略偏于保守和安全。

(4)研究所基于的 2 个算例,基本证明了本文模型的有效性和可靠性。本文的方法和结论可为后续开展轮胎模型在不同工况下的适用性研究做铺垫,也可为后续研究中基于更多的试验数据改进轮胎模型进而提高车桥耦合振动仿真精度提供借鉴。

参考文献:

References:

[1] CHANG K C, WU F B, YANG Y B. Disk Model for Wheels Moving over Highway Bridges with Rough Surfaces [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330 (20): 4930-4944.

[2] 邓 露,何 维,俞 扬,等.公路车-桥耦合振动的理论和应用研究进展[J].中国公路学报,2018,31(7):38-54.
DENG Lu, HE Wei, YU Yang, et al. Research Progress in Theory and Applications of Highway Vehicle-bridge Coupling Vibration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (7): 38-54.

[3] DENG L, CAO R, WANG W, et al. A Multi-point Tire Model for Studying Bridge-vehicle Coupled Vibration [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics,

- 2016, 16 (8): 1-22.
- [4] 李小珍,张黎明,张洁,等.公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势[J].工程力学,2008,25(3):230-240.
LI Xiao-zhen, ZHANG Li-ming, ZHANG Jie, et al. State-of-the-art Review and Trend of Studies on Coupling Vibration for Vehicle and Highway Bridge System [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (3): 230-240.
- [5] 邓露,段林利,何维,等.中国公路车桥耦合振动车辆模型研究[J].中国公路学报,2018,31(7):92-100.
DENG Lu, DUAN Lin-li, HE Wei, et al. Study on Vehicle Model for Vehicle-bridge Coupling Vibration of Highway Bridges in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (7): 92-100.
- [6] YANG Y B, WU Y S. A Versatile Element for Analyzing Vehicle-bridge Interaction Response [J]. Engineering Structures, 2001, 23 (5): 452-469.
- [7] ZHANG N, TIAN Y, XIA H. A Train-bridge Dynamic Interaction Analysis Method and Its Experimental Validation [J]. Engineering, 2016, 2 (4): 528-536.
- [8] YIN X F, CAI C S, FANG Z, et al. Bridge Vibration Under Vehicular Loads: Tire Patch Contact Versus Point Contact [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2010, 10 (3): 529-554.
- [9] XIONG Y, YANG X. A Review on In-tire Sensor Systems for Tire-road Interaction Studies [J]. Sensor Review, 2018, 38 (2): 231-238.
- [10] WANG Y, LU Y J, SI C D, et al. Tire-pavement Coupling Dynamic Simulation Under Tire High-speed-rolling Condition [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2016, 15 (2): 236-248.
- [11] XIONG Y, TUONONEN A. A Multi-laser Sensor System to Measure Rolling Deformation for Truck Tyres [J]. International Journal of Vehicle Performance, 2017, 3 (2): 115-126.
- [12] GUO K H, LU D. UniTire: Unified Tire Model for Vehicle Dynamic Simulation [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(1): 79-99.
- [13] ZEGELAAR P W A, PACEJKA H B. Dynamic Tyre Responses to Brake Torque Variations [J]. Vehicle System Dynamics, 1997, 27 (1): 65-79.
- [14] GUO K H. Tire Roller Contact Model for Simulation of Vehicle Vibration Input [J]. Society of Automotive Engineers, 1993, 991 (1): 45-51.
- [15] YANG S P, LI S H, LU Y J. Dynamics of Vehicle-pavement Coupled System Based on a Revised Flexible Roller Contact Tire Model [J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2009, 52 (3): 721-730.
- [16] AASHTO LRFD 2017, Bridge Design Specifications [S].
- [17] 丁勇,俞丹波,邹毓颖,等.车辆模数式伸缩缝耦合振动与冲击荷载分析[J].中国公路学报,2018,31(7):167-178.
DING Yong, YU Dan-bo, ZOU Yu-ying, et al. Analysis of Impact Load and Coupling Vibration of Vehicle and Modular Bridge Expansion Joint [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (7): 167-178.
- [18] KALISKE M. Numerical Modeling in Tire Mechanics [C] // DYNAMore GmbH. 9th LS-Dyna Forum. Stuttgart: DYNAMore GmbH, 2010: 27-35.
- [19] XIONG Y, TUONONEN A. A Laser-based Sensor System for Tire Tread Deformation Measurement [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(11): 115103.
- [20] 管迪华,范成建.用于不平路面车辆动力学仿真的轮胎模型综述[J].汽车工程,2004,26(2):162-167.
GUAN Di-hua, FAN Cheng-jian. A Review of Tire Models for Vehicle Dynamics Simulation on Uneven Road [J]. Automotive Engineering, 2004, 26 (2): 162-167.
- [21] GARCIA-POZUELO D, OLATUNBOSUN O, YUNTA J, et al. A Novel Strain-based Method to Estimate Tire Conditions Using Fuzzy Logic for Intelligent Tires [J]. Sensors, 2017, 17 (2): 1-16.
- [22] 邓露,陈雅仙,韩万水,等.中小跨径公路混凝土简支梁桥冲击系数研究及建议取值[J].中国公路学报,2020,33(1):69-78.
DENG Lu, CHEN Ya-xian, HAN Wan-shui, et al. Studying Impact Factors for Short-and Medium-span Simply Supported Concrete Highway Bridges and Its Suggested Values [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (1): 69-78.
- [23] ISO 8608—2016, Mechanical Vibration-road Surface Profiles-reporting of Measured Data [S].
- [24] 邓露,何维,王芳.不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J].动力与冲击,2015,34(14):70-75.
DENG Lu, HE Wei, WANG Fang. Dynamic Impact Factors for Simply Supported Bridges with Different Cross-section Types [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (14): 70-75.
- [25] 陈黎卿,王启瑞.基于ADAMS的脉冲路面输入平顺性仿真分析[J].计算机仿真,2006,23(12):212-215.
CHEN Li-qing, WANG Qi-rui. Simulation and Analysis of Ride Comfort on Pulse Road Based on ADAMS [J]. Computer Simulation, 2006, 23 (12): 212-215.
- [26] YANG S P, CHEN L Q, LI S H. Dynamics of Vehicle-road Coupled System [M]. Berlin: Springer Jointly Published with Science Press, 2015.