DOI: 10.3901/JME.2020.16.193

胎压载荷耦合效应下复合工况 UniTire 轮胎模型*

许男¹ 周健锋¹ 郭孔辉¹ 阳超² 李飞³

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130022;

2. 广汽研究院 广州 511400;

3. 中国汽车技术研究中心有限公司 天津 300300)

摘要: 胎压的变化会显著地影响轮胎力学特性,进而影响车辆的操纵稳定性,而当前关于胎压对复合工况轮胎力学特性影响的研究还较为匮乏。为描述不同胎压下的复合工况轮胎力学特性,建立考虑胎压影响的 UniTire 复合工况轮胎模型。通过试验观察和理论模型分析相结合的方法,揭示胎压和载荷耦合效应对轮胎侧纵向滑移刚度等关键力学特性的影响规律及其机理。进一步通过分析胎压载荷耦合影响下复合工况轮胎接地印迹内总切力方向的变化规律,完善总切力方向因子表达式,建立考虑胎压载荷耦合影响的复合工况轮胎模型。利用轮胎试验数据对模型进行广泛验证,结果表明所建立的 UniTire 复合工况模型能精确地描述大范围胎压和载荷变化下的轮胎力学特性。

关键词: 轮胎模型; UniTire; 胎压; 载荷; 复合工况

中图分类号: TG156

UniTire Model under Combined Slip Conditions with the Coupling Effect of Inflation Pressure and Vertical Load

XU Nan¹ ZHOU Jianfeng¹ GUO Konghui¹ YANG Chao² LI Fei³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022;

2. GAC R&D CENTER, Guangzhou 511400;

3. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300)

Abstract: The change of inflation pressure and vertical load will significantly affect the mechanical characteristics of tires, and then affect the handling stability of vehicles. However, the current research on the effect of inflation pressure on the mechanical characteristics of tires under combined slip conditions is still insufficient. In order to describe the mechanical characteristics of tires under different inflation pressures, the UniTire combined slip model considering inflation pressure effects is established. By means of experimental observation and theoretical model analysis, the influence and mechanism of the coupling effect of inflation pressure and vertical load on the key mechanical characteristics such as cornering and longitudinal slip stiffness of tires are revealed; Furthermore, by analyzing the change of the resultant shear force direction in the contact patch under combined slip conditions and the influence of the coupling effect of inflation pressure and vertical load, the expressions of the direction factor are improved, and a combined slip tire model is established considering the influence of the coupling effect of inflation pressure and vertical load. The model is extensively validated using tire test data, and the results show that the UniTire combined slip model can accurately describe the tire mechanical characteristics under a wide range of inflation pressure and vertical load changes.

Key words: tire model; UniTire; tire inflation pressure; vertical load; combined slip

0 前言

轮胎是汽车上唯一与地面接触的部件,汽车在

驱动、制动、转向等工况行驶时,地面对汽车的力和力矩都直接作用于轮胎上^[1]。因此轮胎力学的研究对车辆动力学来说至关重要。轮胎气压和载荷的变化会改变其力学特性,进而影响车辆性能^[1-3],并且,胎压是轮胎在使用中最易调节的参数^[4],载荷又是随车辆行驶过程不断变化的参数,因此胎压和载荷对轮胎力学特性的影响具有重要的研究意义。

近年来,在胎压和载荷对轮胎力学特性的影响

* 国家自然科学基金(51875236, 61790561)和中国汽车产业创新发展联合基金(U1664257, U1864206)资助项目。20190912 收到初稿,20200331 收到修改稿

方面国内外学者从事了诸多研究。KASPRZAK 等^[4-6]研究了胎压对轮胎力和力矩的影响,发现其影响主要表现在刚度、摩擦因数、峰值回正力矩系数和峰值形状;并利用低阶的响应面方法拟合这些特性与胎压的关系,成功地将胎压作为输入变量引入 Radt/Milliken 量纲一轮胎模型。卢荡等^[7]研究了胎压对 UniTire 中侧向力和回正力矩参数的影响,采用内插值的方法对胎压影响进行高精度预测。HÖPPING 等^[8]通过研究发现纵滑刚度随胎压的变化主要是因为胎压变化改变了轮胎接地印迹长度,峰值摩擦因数对应的纵向滑移率随胎压增大而增大的原因是,接地印迹长度的减小导致了胎面单元平均切应力的减小,此外还对峰值摩擦因数等特性进行了研究并将胎压作为输入变量引入到魔术公式中。阳超等^[9-11]前期重点针对胎压和载荷的耦合因素对轮胎力学特性的影响进行了深入研究,并建立了考虑胎压载荷耦合效应的 UniTire 侧偏模型。

然而目前大部分研究仅关注胎压(及其与载荷的耦合)对侧偏或纵滑的单一工况的影响,对复合工况下轮胎力学特性影响的研究还较为缺乏,尤其是缺乏对胎压和载荷的耦合效应对轮胎各向异性和印迹内总切力方向影响的分析。因此,本文将结合轮胎建模理论与试验分析,研究胎压载荷耦合效应对轮胎力学特性的影响,分析其对纵滑刚度、侧偏刚度以及复合工况下轮胎总切力方向的影响机理,并建立能够表征胎压载荷耦合效应的 UniTire 复合工况轮胎模型。

1 UniTire 模型基本方程

UniTire 模型是由郭孔辉院士于 1986 年首次提出,经过 30 余年发展逐渐形成的轮胎模型体系。模型始终坚持量纲一表达的基本思想,在不同工况下都有统一的表达式,公式简洁。并且兼顾理论模型与经验表达,在保证高精度的同时又具有较强的预测能力^[12-15]。

1.1 轮胎坐标系和滑移率

图 1 为 UniTire 模型采用的轮胎印迹接触过程(Contact process, CP)坐标系。坐标原点 O_t 为轮胎接地印迹中心, X_t 轴为车轮平面与地平面的交线,前进方向为正, Y_t 轴为车轮旋转轴于地面的投影,向左为正, Z_t 轴垂直于地面,向上为正。图中还规定了轮胎运动速度 v 、轮胎滚动角速度 Ω 、侧偏角 α 、外倾角 γ 、纵向力 F_x 、侧向力 F_y 、垂向力 F_z 、翻倾力矩 M_x 、滚动阻力矩 M_y 、回正力矩 M_z 等物理量及其正方向。

图1 UniTire 轮胎 CP 坐标系

UniTire 模型的纵向滑移率 S_x 和侧向滑移率 S_y 定义如式(1)所示

$$\begin{cases} S_x = \frac{-v_{sx}}{\Omega R_e} = -\frac{v \cos \alpha - \Omega R_e}{\Omega R_e} & S_x \in (-\infty, +\infty) \\ S_y = \frac{-v_{sy}}{\Omega R_e} = -\frac{v \sin \alpha}{\Omega R_e} & S_y \in (-\infty, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

式中, R_e 为有效滚动半径, v_{sx} 和 v_{sy} 分别为轮胎相对于地面的纵向和侧向滑动速度。复合工况下,纵向和侧向滑移率之间满足如式(2)所示

$$S_y = -\tan \alpha \cdot (1 - S_x) \quad (2)$$

UniTire 轮胎模型纵向滑移率 S_x 与 TYDEX 纵向滑移率 κ 之间的关系为

$$S_x = \frac{\kappa}{1 - \kappa} \quad (3)$$

相对纵向滑移率 ϕ_x , 相对侧向滑移率 ϕ_y , 相对综合滑移率 ϕ 分别为

$$\phi_x = \frac{K_x S_x}{\mu_x F_z}, \quad \phi_y = \frac{K_y S_y}{\mu_y F_z}, \quad \phi = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} \quad (4)$$

式中, K_x 和 K_y 是纵滑刚度和侧偏刚度, μ_x 和 μ_y 是纵向和侧向动态摩擦因数。

1.2 UniTire 模型基本方程

UniTire 模型定义量纲一纵向力、量纲一侧向力、量纲一总切力如式(5)所示

$$\bar{F}_x = \frac{F_x}{\mu_x F_z}, \quad \bar{F}_y = \frac{F_y}{\mu_y F_z}, \quad \bar{F} = \frac{F}{\mu F_z} \quad (5)$$

UniTire 模型的基本方程为

$$\begin{cases} \bar{F} = 1 - \exp \left(-\phi - E \phi^2 - \left(E^2 + \frac{1}{12} \right) \phi^3 \right) \\ \bar{F}_x = \bar{F} \cdot \frac{\phi_x}{\phi}, \quad \bar{F}_y = \bar{F} \cdot \frac{\phi_y}{\phi} \end{cases} \quad (6)$$

式中, E 为总切力曲线的曲率因子, 调整曲线在过渡区的弯曲程度, 表达式为

$$E = \sqrt{\left(\frac{\phi_x}{\phi} \cdot E_x\right)^2 + \left(\frac{\phi_y}{\phi} \cdot E_y\right)^2}$$

(7)

式中， E_x 和 E_y 分别为纵向和侧向曲率因子。

2 胎压载荷耦合影响下纯工况轮胎模型

纯工况模型是复合工况建模的基础，本节首先探究纯侧偏和纯纵滑工况下胎压与载荷的相互耦合关系，分析胎压载荷对轮胎关键力学特性——轮胎滑移刚度(侧偏刚度和纵滑刚度)的影响，并基于UniTire 基础模型，建立胎压载荷耦合效应下纯工况UniTire 半经验模型。

2.1 胎压载荷对侧偏刚度的影响

为更好地分析胎压和载荷的耦合效应，轮胎试验中将胎压和载荷都作为参变量。试验设备为 MTS 平带式高速轮胎试验台，如图 2 所示。该试验台可实时改变胎压、载荷、侧偏角、滑移率、侧倾角以及速度，并输出轮胎运行中所受的六分力。试验轮胎型号为 Yokohama 205/60R16 92V。

图 2 MTS Flat Trac plus 平带式高速轮胎试验台

试验对稳态侧偏、纵滑以及复合工况下的轮胎力学特性进行了测试，试验路面为砂纸路面，采样频率为 256 Hz，具体试验工况及参数如表 1 所示。

侧偏刚度取轮胎纯侧偏特性曲线(侧向力-侧偏角曲线)原点处斜率，进一步处理后得到的侧偏刚度与胎压和载荷的关系曲线如图 3、4 所示。

从图 3 可以看出，侧偏刚度随胎压变化呈现出明显的非线性变化，并且与载荷有强烈的耦合效应。在试验胎压范围内(150~350 kPa)，中等载荷下，侧偏刚度随胎压的增大先增大后减小，在小载荷下(如图中 $F_z = 2.480$ kN)，轮胎侧偏刚度呈现出单调

表 1 轮胎力学特性试验工况

工况	参数	数值
侧偏工况	胎压/kPa	150、200、250、300、350
	垂直载荷/kN	2.480、3.720、4.960、6.200、7.440
	侧偏角/(°)	-15~+15(连续三角波 2 d°/s)
	纵向滑移率	0
	速度/(km/h)	60
纵滑工况	胎压/kPa	150、200、250、300、350
	垂直载荷/kN	2.480、3.720、4.960、6.200、7.440
	侧偏角/(°)	0
	纵向滑移率	-0.3~+0.3(连续变化 0.1/s)
	速度/(km/h)	60
纵滑侧偏复合工况	胎压/kPa	150、200、250、300、350
	垂直载荷/kN	2.480、3.720、4.960、6.200、7.440
	侧偏角/(°)	±1、±2、4、8
	纵向滑移率	-0.3~+0.3(连续变化 0.1/s)
	速度/(km/h)	60

图 3 不同载荷下侧偏刚度-胎压曲线

图 4 不同胎压下侧偏刚度-载荷曲线

递减趋势，而在大载荷下(图 3 中 $F_z = 7.440$ kN)，侧偏刚度随胎压单调递增。综合图 3 中侧偏刚度整体变化趋势，可以推测：若胎压和载荷的试验范围足够宽(假定轮胎为理想状态，能够承受该试验条件)，每个工况的侧偏刚度都会随着胎压的增大呈现

出先增大后减小的非线性变化趋势,只是峰值点出现的大小和位置不同。在图4中,侧偏刚度随载荷变化的曲线中也可发现类似的规律。

下面以作者前期所建立的线性区理论模型^[10-11]为指导,分析侧偏刚度随胎压和载荷变化的机理并建立半经验模型。在考虑胎体复杂变形的轮胎理论模型中,侧偏刚度有如式(8)所示

$$K_y = \frac{2a^2 k_t}{(1 + \varepsilon_b)(1 + \varepsilon_\theta)} = \frac{2a^2 k_t}{\left(1 + \frac{2ak_t}{K_{cb}}\right) \cdot \left(1 + \frac{2a^3 k_t}{3N_\theta}\right)} \quad (8)$$

式中, ε_b 为弯曲特征比, ε_θ 为扭转特征比, a 为轮胎接地印迹半长, k_t 为胎面单元切向刚度, K_{cb} 为胎体弯曲刚度, N_θ 为胎体扭转刚度。

胎压和载荷主要影响轮胎物理参数中的轮胎接地印迹半长 a , 胎体侧向平移刚度 K_{cy} , 胎体弯曲刚度 K_{cb} , 胎体扭转刚度 N_θ 。胎压和载荷对以上参数的影响规律如式(9)所示^[10]

$$\begin{cases} a = a_0 \cdot \sqrt{F_{zn}} / \sqrt{P_n} \\ K_{cy} = K_{cy0} \cdot \sqrt{P_n} \\ K_{cb} = K_{cb0} \cdot \sqrt{P_n} \\ N_\theta = N_{\theta 0} \cdot \sqrt{P_n} \end{cases} \quad (9)$$

式中, a_0 , K_{cy0} , K_{cb0} , $N_{\theta 0}$ 分别为标称胎压和标称载荷下对应的参数, P_n 为标准化胎压, F_{zn} 为标准化载荷。二者定义如式(10)所示

$$\begin{cases} F_{zn} = F_z / F_{z0} \\ P_n = P / P_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, F_{z0} 为标称载荷, P_0 为标称胎压。带入理论模型表达式得到考虑胎压和载荷的侧偏刚度表达式如式(11)所示

$$K_y = \frac{2a_0^2 k_t \cdot \sqrt{P_n}}{\left(\frac{\sqrt{P_n^3}}{F_{zn}} + \varepsilon_{b0} \varepsilon_\theta \frac{F_{zn}}{\sqrt{P_n^3}}\right) + \left(\varepsilon_b \frac{\sqrt{P_n}}{\sqrt{F_{zn}}} + \varepsilon_\theta \frac{\sqrt{F_{zn}}}{\sqrt{P_n}}\right)} \quad (11)$$

通过式(11)可分析胎压和载荷耦合效应下侧偏刚度的变化机理。胎压的增大会引起胎体刚度增大,以及轮胎接地印迹长度变小,而这两者对轮胎侧偏刚度的影响是相互制约的,前者导致侧偏刚度增大,后者导致侧偏刚度减小。胎压较低时胎体刚度增大对侧偏刚度的影响占主导地位,胎压较高时,接地印迹半长减小的影响占主导地位。由于胎压和载荷的耦合效应,二者共同决定侧偏刚度的峰值。由于载荷增大趋向于使接地印迹长度变大,抑制由胎压增大使接地印迹半长减小的影响,所以载荷越高,侧偏刚度的峰值便会出现在越高的胎压下。

结合理论分析与试验现象,构建胎压载荷耦合影响下 UniTire 侧偏刚度半经验公式如式(12)所示

$$K_y = \frac{F_{z0}}{\left(\frac{s_1}{P_n} + s_2 \cdot P_n\right) \frac{1}{F_{zn}} + \left(\frac{s_3}{P_n} + s_4 \cdot P_n\right) F_{zn} + s_5} \quad (12)$$

式中, $s_1 \sim s_5$ 为待辨识参数。侧偏刚度仿真验证结果如图5、6所示。

图5 不同载荷侧偏刚度仿真对比曲线

图6 不同胎压侧偏刚度仿真对比曲线

2.2 胎压载荷对纵滑刚度的影响

纵滑刚度表征轮胎纯纵滑(驱动和制动)在线性区的力学特性,由试验数据处理后得到纵滑刚度随胎压和载荷变化的曲线如图7、8所示(图中数据点为试验结果)。可以看出,轮胎纵滑刚度随胎压载荷的变化规律与侧偏刚度变化迥异,整体上纵滑刚度的变化基本呈现出线性和单调的变化趋势,这是因为轮胎胎体在纵向上的刚度相对较大,由胎体弹性所引起的耦合效应不明显,主要力学特性的变化来自于轮胎接地印迹区域的变化。

因而忽略纵向上轮胎的伸缩变形,只考虑胎体纵向平移变形以及轮胎接地印迹长度的变化,可建立理论模型分析胎压和载荷对纵滑刚度的影响机

理。理论模型中纵滑刚度如式(13)所示^[9]

$$K_x = 2a^2 k_t = 2a_0^2 k_t \frac{F_{zn}}{P_n} \quad (13)$$

由式(13)可知, 当不考虑轮胎胎体的纵向复杂弹性变形时, 轮胎的纵滑刚度主要决定于轮胎接地印迹长度的变化, 当胎压增大时, 接地印迹变短, 轮胎纵滑刚度减小; 而载荷增大时, 导致接地印迹变长, 则纵滑刚度增大。结合机理分析和试验现象, 构建纵滑刚度半经验表达式如式(14)所示

$$K_x = \frac{F_{z0}}{l_1 + l_2 \cdot F_{zn} + l_3 \cdot P_n + l_4 \cdot \frac{P_n}{P_{zn}}} \quad (14)$$

式中, $l_1 \sim l_4$ 为待辨识参数。

纵滑刚度仿真验证效果如图 7、8 所示, 模型能够对变化规律进行很好的表达。

图 7 不同载荷纵滑刚度仿真对比曲线

图 8 不同胎压纵滑刚度仿真对比曲线

2.3 胎压载荷耦合影响下纯工况轮胎模型

前文分析了线性区轮胎侧偏和纵滑特性的变化机理, 并建立了半经验模型。针对轮胎非线性区力学特性, 轮胎模型中主要体现在过渡区曲率的变化以及饱和区摩擦因数的变化。对于轮胎特性非线性

区的变化机理, 尤其是摩擦特性的变化难以通过简单通用的机理模型进行阐述, 往往直接建立经验表达描述试验现象来满足工程实际应用需求。

根据试验现象, 构建胎压载荷变化下 UniTire 摩擦特性及曲率表达式如式(15)~(17)所示

$$\mu_m = p_1 + p_2 \cdot F_{zn} + p_3 \cdot P_n + p_4 \cdot \left(\frac{F_{zn}}{P_n} \right)^2 \quad (15)$$

$$\mu_s = p_5 + p_6 \cdot F_{zn} + p_7 \cdot P_n + p_8 \cdot \left(\frac{F_{zn}}{P_n} \right)^2 \quad (16)$$

$$E = p_9 + p_{10} \cdot \frac{F_{zn}}{P_n} + p_{11} \cdot \left(\frac{F_{zn}}{P_n} \right)^2 \quad (17)$$

式中, μ_m 为峰值摩擦因数, μ_s 为滑移摩擦因数, E 为曲率因子, $p_1 \sim p_{11}$ 为待辨识参数。动态摩擦因数表达式如式(18)所示

$$\mu_d = \mu_s + (\mu_m - \mu_s) \cdot \exp \left(-\mu_h^2 \cdot \lg^2 \left(\left| \frac{V_s}{V_{sm}} \right| + N \cdot \exp \left(-\left| \frac{V_s}{V_{sm}} \right| \right) \right) \right) \quad (18)$$

式中, V_{sm} 为峰值摩擦因数所对应的滑移速度, μ_h 和 N 共同决定了摩擦因数随滑移速度的变化趋势, 一般取 $N = 0.8$ 。

结合 UniTire 基本方程, 以及轮胎特性线性区和非线性区的关键参数表达, 可得到胎压载荷耦合效应下 UniTire 纯工况轮胎模型。将改进后考虑胎压的模型与未考虑胎压的模型进行对比, 结果如图 9、10 所示。图中对比了在 2 个载荷、3 个胎压下两种模型的拟合效果。在线性区, 考虑胎压的模型能较好地地区分出不同胎压导致的刚度差异。侧偏刚度方面, 与图 5 的结果一致, 在 2.480 kN 载荷下侧偏刚度随胎压增大而减小, 在 7.440 kN 荷下则随胎压增大而增大, 这体现了载荷与胎压之间的强烈

图 9 考虑胎压前后侧向力拟合效果

图10 考虑胎压前后纵向力拟合效果

的耦合效应(图9中A区域)。纵滑刚度方面,亦与前文分析一致,一定载荷下纵滑刚度主要受轮胎接地印迹长度影响,随胎压增大而减小。在过渡区,考虑胎压的模型确切描述了曲率随胎压增大而减小的特性。在滑移区,中、高胎压下侧向力具有明显峰值,低胎压下的侧向力随侧偏角的变化则趋于平缓,而不考虑胎压的模型则无法体现胎压对摩擦特性的这一影响(图9中B区域)。

更广泛的模型验证结果如图11~16所示。残差

图11 胎压150 kPa不同载荷下侧向力拟合效果

图12 胎压250 kPa不同载荷下侧向力拟合效果

计算公式为式(19), 计算得出侧向力残差为2.61%, 纵向力残差为3.05%。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,\text{sim}} - y_{i,\text{mea}})^2}{\sum_{i=1}^n y_{i,\text{mea}}^2}} \times 100 \quad (19)$$

式中, $y_{i,\text{sim}}$ 是模型计算值, $y_{i,\text{mea}}$ 是试验数据值, n 是试验数据点的个数。

图13 胎压350 kPa不同载荷下侧向力拟合效果

图14 胎压150 kPa不同载荷下纵向力拟合效果

图15 胎压250 kPa不同载荷下纵向力拟合效果

图 16 胎压 350 kPa 不同载荷下纵向力拟合效果

3 胎压载荷耦合效应下复合工况轮胎模型

对于轮胎侧偏纵滑复合工况力学特性的表达, 轮胎印迹内总切力方向是关键影响因素。由前文分析可知, 胎压与载荷的变化导致轮胎侧偏刚度和纵滑刚度产生了完全不同的变化趋势, 而正是由于这种迥异的变化趋势, 导致在复合工况下轮胎各向异性的剧烈变化, 进而影响轮胎印迹内总切力方向的动态变化。

3.1 轮胎印迹内总切力方向

定义轮胎接地印迹内总切力方向角为 θ_F , 其正切值为侧向力与纵向力的比值

$$\tan \theta_F = \frac{F_y}{F_x} \quad (20)$$

由于轮胎滑移刚度存在各向异性, 即纵滑刚度和侧偏刚度的差异, 在接地印迹的附着区内, 总切力的方向为切应力的方向, 在滑移区内, 总切力的方向为滑移方向。

$$\begin{cases} \tan \theta_{ad} = K_y S_y / (K_x S_x) & \text{附着区} \\ \tan \theta_s = S_y / S_x & \text{滑移区} \end{cases} \quad (21)$$

总切力方向随综合滑移率的增大逐渐从附着方向 θ_s 过渡到滑移方向 θ_s , 如图 17 所示。当综合滑移率较小时, 接地印迹内只存在附着区, 总切力的方向为附着方向, 如图中黑色曲线; 当综合滑移率较大时, 轮胎处于全滑状态, 接地印迹内都为滑移区, 总切力方向为滑移方向, 如图中黑色直线; 当接地印迹内同时存在附着区和滑移区时, 总切力的方向介于附着方向和滑移方向之间。

为描述总切力方向随滑移率的这种变化, 作者前期提出了总切力方向因子^[16]

图 17 不同侧偏角下总切力方向变化

($K_y/K_x=0.35$)

$$\lambda = \frac{1 + (\phi / \phi_c)^n \cdot K_y / K_x}{1 + (\phi / \phi_c)^n} \quad (22)$$

式中, ϕ_c 和 n 为控制曲线形状的参数。修正后的总切力方向为

$$\tan \theta_F = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{K_y S_y}{K_x S_x} \quad (23)$$

总切力方向的变化原因是轮胎滑移刚度存在各向异性。各向异性越强, 即侧偏刚度和纵滑刚度相差越大, 滑移方向与附着方向之间的偏差就会越大, 如图 18、19 所示。

图 18 弱各向异性下不同侧偏角下总切力方向变化

($K_y/K_x=0.54$)

图 19 强各向异性下不同侧偏角下总切力方向变化

($K_y/K_x=0.18$)

3.2 胎压载荷对总切力方向的影响

如前面所述,胎压增大导致侧偏刚度先增大后减小,纵滑刚度单调较小,载荷增大导致侧偏刚度先增大后减小,纵滑刚度单调增大。二者的变化会对轮胎的各向异性产生显著的影响,如表2所示。

表2 不同胎压和载荷下的侧偏纵滑刚度比

载荷/kN	胎压/kPa				
	150	200	250	300	350
3.720	0.352	0.454	0.548	0.609	0.663
4.960	0.248	0.333	0.432	0.537	0.620
6.200	0.173	0.242	0.336	0.444	0.542
7.440	0.129	0.187	0.258	0.356	0.462

根据不同胎压和载荷下的侧偏纵滑刚度比,将试验数据分别绘制为不同胎压、不同载荷和相同侧偏纵滑刚度比的总切力方向变化曲线,如图20~22所示。

图20 不同载荷下总切力方向变化($P=250$ kPa, $\alpha=1^\circ$)

图21 不同胎压下总切力方向变化($F_z=6.200$ kN, $\alpha=1^\circ$)

从图20~22中可以发现,胎压和载荷的改变都会使附着方向和总切力方向产生较大的差异。而当

图22 同一侧偏纵滑刚度比总切力方向变化
($K_y/K_x=0.54$, $\alpha=1^\circ$)

选取使侧偏纵滑刚度比一定的胎压和载荷组合时,尽管每组参数对应不同的胎压和载荷,而附着方向和总切力方向的变化趋势保持一致。

图20~22表明,虽然胎压和载荷会使总切力的方向发生改变,但本质在于胎压和载荷引起了轮胎各向异性(侧偏纵滑刚度比)的变化,最终导致了总切力方向的差异。当胎压载荷的匹配能够维持侧偏纵滑刚度比不变时,则总切力方向也不会发生变化。因此,将轮胎印迹内总切力方向表达为 K_y / K_x 的单因素函数,能够大大简化胎压载荷变化时复合工况轮胎力学特性的建模,构建总切力方向因子中的参数表达式如式(24)所示

$$\begin{cases} \phi_c = c_1 + c_3 \cdot \left(\frac{K_y}{K_x} \right) + c_5 \cdot \left(\frac{K_y}{K_x} \right)^2 \\ n = c_2 + c_4 \cdot \left(\frac{K_y}{K_x} \right) + c_6 \cdot \left(\frac{K_y}{K_x} \right)^2 \end{cases} \quad (24)$$

式中, $c_1 \sim c_6$ 为表达总切力方向因子变化趋势的待辨识参数。总切力方向的仿真结果如图23所示,能够较好地描述总切力方向的变化规律。

图23 总切力方向仿真对比图

4 模型验证

前文详细分析了胎压与载荷的耦合效应对轮胎印迹内总切力方向的影响, 结合 UniTire 模型基本方程和纯工况轮胎模型, 可以建立完整的可表征胎压载荷耦合效应的复合工况轮胎模型。

首先以强各向异性下的摩擦椭圆图(F_y 对 F_x)为例对比胎压改进前后两模型在复合工况下的表达能力(图 24)。一方面, 胎压会导致侧偏刚度的变化, 这在摩擦椭圆图中表现为同一侧偏角下纵向力原点处的侧向力不同(如图中箭头 A), 这反映的是轮胎纯侧偏的力学特性, 考虑胎压的模型能准确地拟合出纵向力原点处的侧向力, 而未考虑胎压的模型产生了较大的偏差; 另一方面, 不同胎压下, 随着驱动制动力的增大, 由于轮胎在侧纵向的各向异性导致印迹内总切力方向的变化, 使得轮胎侧向力会呈现不同的变化趋势, 这在强各向异性工况下更为明显。改进后的模型能准确表达总切力方向的变化, 从而更精确地分配各方向的轮胎力。

图 24 考虑胎压前后复合工况轮胎力拟合效果

($F_z=7.440$ kN, $P=150$ kPa, $K_y/K_x=0.13$)

下面进一步验证改进后模型的准确性, 如图 25~30 所示。图 25~30 中给出了 2 种载荷 3 种胎压下的模型验证结果, 实线为模型仿真结果, 数据点为试验数据。从图 25~30 中可以看出模型能够准确地表达复合工况不同载荷不同胎压下轮胎力学特性的变化规律。经计算复合工况下的侧向力残差为 8.18%, 纵向力残差为 5.10%

图 25~30 中同时给出了每个工况下轮胎各向异性滑移刚度比, 可以看出, 胎压载荷会引起轮胎各向异性的显著变化, 进而引起轮胎力学特性的变化。随着轮胎滑移刚度各向异性的增加,

轮胎摩擦椭圆图愈加“矩形化”, 如图 28 中, 此时轮胎的侧向力在制动边一侧不仅没有降低, 反而随制动力增加在很大范围内同时增加, 这种现象将有助于改善车辆在制动转弯时的方向稳定性。

图 25 中等载荷低胎压下复合工况轮胎力

($F_z=4.960$ kN, $P=150$ kPa, $K_y/K_x=0.25$)

图 26 中等载荷中等胎压下复合工况轮胎力

($F_z=4.960$ kN, $P=250$ kPa, $K_y/K_x=0.43$)

图 27 中等载荷高胎压下复合工况轮胎力

($F_z=4.960$ kN, $P=350$ kPa, $K_y/K_x=0.62$)

图 28 大载荷低胎压下复合工况轮胎力
($F_z=7.440$ kN, $P=150$ kPa, $K_y/K_x=0.13$)

图 29 大载荷中胎压下复合工况轮胎力
($F_z=7.440$ kN, $P=250$ kPa, $K_y/K_x=0.26$)

图 30 大载荷高胎压下复合工况轮胎力
($F_z=7.440$ kN, $P=350$ kPa, $K_y/K_x=0.46$)

5 结论

揭示了胎压和载荷的耦合效应对轮胎力学特性的影响机理,并将胎压作为输入变量引入 UniTire 轮胎模型。得出的主要结论如下。

(1) 随着胎压和载荷的变化,轮胎侧偏刚度表

现出强烈的非线性耦合变化趋势,而纵滑刚度呈现出较为线性和单调的变化趋势。其机理在于胎压和载荷的耦合对轮胎接地印迹长度和胎体刚度的复杂影响。

(2) 轮胎接地印迹内总切力方向是复合工况轮胎力学特性分析的关键因素。胎压和载荷变化所引起的轮胎侧偏/纵滑刚度的差异性变化导致轮胎产生强烈的各向异性,从而引起复合工况下轮胎印迹内总切力方向的动态变化。

(3) 经轮胎试验数据验证,引入胎压后的 UniTire 轮胎模型能够准确描述大范围胎压载荷变化下的轮胎复合工况力学特性,具有很高的精度。

参 考 文 献

- [1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2011.
GUO Konghui. Handling dynamics theory of automobiles[M]. Nanjing: Jiangsu Press of Science and Technology, 2011.
- [2] PACEJKA H B. Tyre and vehicle dynamics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [3] LUTZ A, RAUH J, REINALTER W. Developments in vehicle dynamics and the tire model performance test[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(S1): 7-19.
- [4] KASPRZAK E M, LEWIS K E, MILLIKEN D L. Inflation pressure effects in the nondimensional tire model[J]. SAE Transactions, 2006: 1781-1792.
- [5] KASPRZAK E M, LEWIS K E, MILLIKEN D L. Tire asymmetries and pressure variation in the Radt/Milliken nondimensional tire model[R]. SAE Technical Paper, 2006-01-1968, 2006.
- [6] KASPRZAK, E M. Extension of the nondimensional tire theory to general operating conditions[D]. Buffalo: The State University of New York, 2006.
- [7] 卢荡, 郭孔辉. 轮胎侧偏力学特性的胎压影响分析及预测[J]. 吉林大学学报, 2011, 41(4): 915-920.
LU Dang, GUO Konghui. Analysis and prediction of tire cornering property for different inflation pressure[J]. Journal of Jilin University, 2011, 41(4): 915-920.
- [8] HÖPPING K, AUGSBURG K, BÜCHNER F. Extending the magic formula tire model for large inflation pressure changes by using measurement data from a corner module test rig[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2018, 11(2): 103-118.
- [9] 阳超. 考虑胎压影响的轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉

- 林大学, 2017.
- YANG Chao. Study on steady-state tire model considering inflation pressure[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [10] YANG Chao, XU Nan, GUO Konghui. Incorporating inflation pressure into UniTire model for pure cornering[R]. SAE Technical Paper, 2016-01-8028, 2016.
- [11] CHEN Ping, XU Nan, YANG Chao, et al. Tire side force characteristics with the coupling effect of vertical load and inflation pressure[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2019, 3(1): 19-30.
- [12] 郭孔辉. 各向摩擦因数不同条件下轮胎力学特性的统一理论模型[J]. 中国机械工程, 1996, 7(4): 90-93.
- GUO Konghui. A unified theoretical model of tire dynamic properties under anisotropic frictions[J]. Chinese Mechanical Engineering, 1996, 7(4): 90-93.
- [13] GUO Konghui, LU Dang. UniTire: Unified tire model for vehicle dynamic simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(S1): 79-99.
- [14] GUO Konghui, XU Nan, LU Dang, et al. A model for combined tire cornering and braking forces with anisotropic tread and carcass stiffness[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2011, 4(1): 84-95.
- [15] XU Nan, GUO Konghui. Modeling combined braking and cornering forces based on pure slip measurements[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2012, 5(2): 470-482.
- [16] 许男. 复合工况下轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Xu Nan. Study on the steady state tire model under combined conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2012.

作者简介: 许男(通信作者), 男, 1988 年生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轮胎力学、车辆动力学与控制、智能汽车运动控制、节能与新能源汽车。

E-mail: xunan@jlu.edu.cn