

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.04.021

基于 FLUENT 软件的雨天轮胎 动水压强的影响因素研究

董斌¹, 陈明磊², 唐伯明³, 刘唐志³

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 无锡市政设计研究院有限公司, 江苏 无锡 214072;
3. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 动水压强是影响汽车雨天滑水的直接因素。通过建立纵横向花纹轮胎有限元模型, 利用 Fluent 软件模拟不同行驶条件下轮胎所受的动水压强大小以及轮胎不同部位水流速度的分布规律, 并根据数据结果回归得出了行车速度、水膜厚度和轮胎花纹深度与动水压强的关系式。结果表明: 轮胎所受到的动水压强取决于水膜厚度、胎纹深度及行车速度; 随着水膜厚度的增加, 动水压强与车速的关系逐渐由非线性向线性转变; 行车速度对动水压强的影响最为明显, 仅改变轮胎花纹深度不能完全避免车辆滑水。

关键词: 交通工程; 动水压强; Fluent; 水膜厚度; 花纹深度; 车速

中图分类号: U491.2⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 04-0120-06

Influencing Factor of Hydrodynamic Pressure on Tire in Wet Weather Based on Fluent

DONG Bin¹, CHEN Minglei², TANG Boming³, LIU Tangzhi³

(1. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan Hubei 430056, China; 2. Wuxi Municipal Design Institute Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214072, China; 3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Hydrodynamic pressure is the major cause of vehicle hydroplaning in wet weather. By establishing finite element model of tire with longitudinal and transverse pattern, hydrodynamic pressure of tire under different driving conditions and distributing pattern of water velocity in different parts of tire were obtained through Fluent. Then the relations of hydrodynamic pressure with vehicle velocity, water film thickness, depth of tire pattern depth were gained based on data regression. The results show that (1) the hydrodynamic pressure of tire depends on water film thickness, tread pattern depth and vehicle speed; (2) with the water film thickness increases, the relation between hydrodynamic pressure and vehicle speed gradually shifts from non-linear to linear; (3) the influence of vehicle speed on hydrodynamic pressure is the most obvious, changing the tread pattern depth alone cannot completely avoid hydroplaning.

Key words: traffic engineering; hydrodynamic pressure; Fluent; water film thickness; tread pattern depth; vehicle speed

0 前言

汽车在具有一定水膜厚度的道路上行驶时, 如果轮胎与地面之间不能完全排除路面积水而产生的

动水压强使得轮胎上浮甚至与地面完全脱离称为滑水现象。该现象一旦发生, 会导致车辆骤然偏离正常行驶路线, 由此造成事故的危险性也随之增大。因此, 通过加强对滑水的直接影响因素——轮胎动

收稿日期: 2011-09-02

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目 (2008318000034)

作者简介: 董斌 (1984-), 男, 河南许昌人, 硕士. (dbind@sina.com)

水压强的研究以减少雨天行车风险是非常必要的。

20 世纪 60 年代, NASA Langley 研究中心的 Horne 和 Leland 通过试验建立了最早的滑水方程^[1], 并广泛应用于轮胎、航空、汽车等行业:

$$V_p = 6.36 \sqrt{P}, \quad (1)$$

式中, V_p 为临界滑水速度; P 为轮胎气压。

20 世纪 70 年代, Pelloli^[2] 提出临界滑水速度还与水膜厚度、路面摩擦系数、轮胎花纹类型有关。此后, 对于轮胎滑水现象的研究逐渐应用数值模型和有限元的方法。但是由于轮胎是一种复合材料, 主要由橡胶和帘线组成, 具有高度的非线性、非压缩性、各项异性和粘弹性特点, 再加上水流状态的复杂性以及不同路面类型的性能差别使得数值模型发展缓慢。

21 世纪初, 新加坡的 Fwa 等^[3] 通过建立三维有限元模型, 并运用 Fluent 软件研究轮胎以减少滑水风险。

关于车辆滑水方面的研究国内很少涉及, 东南大学的季天剑^[4-7] 在推导水膜产生动水压力的计算方法时, 假设通过花纹沟槽的水分能以原有的速度排除, 不发生动能损失, 故认为将动水压力乘以花纹的密度系数就可得到轮胎胎面单元受到的平均动水压力; 佳木斯大学的栾锡富、周俊^[8] 以 Adams 软件为平台, 创建了滑水现象的动态仿真模型; 二者都没有考虑轮胎花纹对水流的影响。基于上述文献发现: 车速、轮胎花纹深度、水膜厚度是引起行车滑水的主要影响因素, 因此本文通过建立有纵横向花纹的轮胎三维有限元模型, 使用 Fluent 软件, 计算并研究轮胎在不同速度行驶时受到的动水压强, 以确定雨天降低滑水风险的措施。

1 仿真试验设置

1.1 轮胎参数的确定

根据国外研究成果, 小轿车发生滑水事故的概率最大: 一方面由于小轿车行驶速度较高, 另一方面小轿车的重量较轻, 使得车辆发生滑水时动水压强较小。结合对武汉市交通量的调查, 本仿真试验选择桑塔纳 Gli 作为代表车型, 选用回力 195/60R14 型轮胎作为代表轮胎, 轮胎上施加的荷载为 3 430 N (350 kg), 轮胎内压为 250 kPa, 平均花纹深度为 7 mm, 花纹尺寸参数见表 1。

1.2 轮胎压缩变形量的确定

由于轮胎是多种材料组成的复合体, 在较小应

力作用下具有高度变形的能力, 匈牙利学者 Komandi 提出轮胎变形 δ (cm) 的经验公式^[9]:

表 1 回力 195/60R14 型轮胎花纹尺寸参数

Tab. 1 Tread pattern sizes of tire about Warrior195/60R14 tire

直径/ mm	胎冠宽度/ mm	纵向花纹			横向花纹		
		数量	宽度/mm	深度/mm	数量	宽度/mm	深度/mm
589.6	195	4	8	7	65	3.5	3

$$\delta = c_1 \frac{W^{0.85}}{S_o^{0.7} D^{0.43} P^{0.6}} K_o, \quad (2)$$

式中, δ 为轮胎压缩变形量; c_1 为与轮胎设计有关的参数, 对于斜交轮胎 $c_1 = 1.15$, 而对于子午线轮胎 $c_1 = 1.5$; W 为轮胎上荷载 (10 N); D 为轮胎外径; S_o 为轮胎宽度; P 为轮胎内压 (100 kPa); $K_o = 15 \times 10^{-3} \times S_o + 0.42$ 。

根据式 (2), 本仿真试验中轮胎变形量为:

$$\delta = 1.5 \times \frac{343^{0.85}}{19.5^{0.7} \times 29.48^{0.43} \times 2.5^{0.6}} \times 0.7125 \approx 1.71 \text{ cm}.$$

1.3 试验工况设计

本文仿真试验目的是获得更多的样本数据, 用以回归分析动水压强与车速、轮胎花纹深度、水膜厚度的关系。参考 Janajreh^[10-11] 博士对轮胎试验项目的设置成果, 本仿真试验设计项目 189 组, 按不同行车速度分别进行 ($V = 60 \sim 120$ km/h, 每次以 10 km/h 递增), 以测得该行驶条件下轮胎所受的动水压强。

2 轮胎模型的建立

2.1 计算范围的确定

根据 Janajreh^[10-11] 博士的研究成果, 计算区域和轮胎模型的不同会使仿真结果产生 5% ~ 10% 的差异。笔者为更能接近现实中轮胎的外形, 建立了有纵横向排水花纹的三维有限元轮胎模型 (图 1), 并依据垂直应力及轮胎接地尺寸变形的特性, 确定模型计算范围 x 、 z 边界尺寸为 80 cm × 100 cm, y 方向尺寸为 5 cm, 轮胎模型位于计算范围中心位置, 呈对称分布; 该轮胎模型的 3 种花纹深度分别为 7、4、1 mm, 代表新胎、中度磨损的轮胎和严重磨损的轮胎 (表 2)。

2.2 边界条件及初始值的确定

由于本模型是空气和水共同作用的两相流动, 因此在模型前端分别设置了空气和水的速度入口 (water-inlet 和 air-inlet), 二者边界的高度随模型中

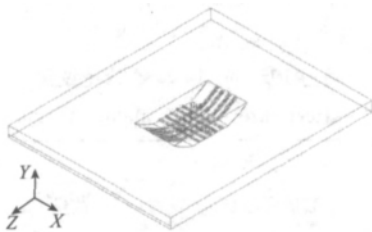


图 1 有纵横向花纹的轮胎模型图

Fig. 1 Model of tyre with longitudinal and transverse tread pattern

表 2 仿真试验工况表

Tab. 2 Working condition table of simulated test

水膜厚度/ 花纹深度/		水膜厚度/ 花纹深度/		水膜厚度/ 花纹深度/	
mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	7	8	7	15	7
	4		4		4
	1		1		1
2	7	10	7	18	7
	4		4		4
	1		1		1
5	7	12	7	20	7
	4		4		4
	1		1		1

水膜厚度的变化而改变。模型后部和顶部设置为压力出口（pressure outlet 和 pressure outlet-top），下部作为路面被定义为可移动墙体边界（wall-ground），其移动速度的大小和方向与水与空气相同。为避免对整体流动造成影响，模型的 2 个侧面设置为绝对光滑的静止墙体边界（frictionless wall）。整个模型设置呈对称分布，如图 2 所示。本试验分别对模型中

$y=0.1、0.4、0.5\text{ cm}$ 处进行流速和压强分布的研究。

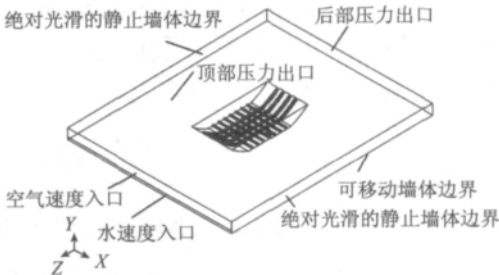


图 2 轮胎模型边界类型的设置图

Fig. 2 Set-up of borderline type of the tyre model

积水在路面上流动，由于路面摩擦系数的影响使其发生湍流状态。由于湍流现象是高度复杂的，因此本试验通过设置 VOF 模型中几何重构（Geo-Reconstruct）的方法，定义目标水流体积与模型网格体积的比值以实现对水流界面的追踪。然后对流体流相、速度、紊流类型等参数进行模型初始化设置。最后对轮胎模型进行迭代计算直至收敛。模型中水和空气的相关参数见表 3。

表 3 试验材料参数取值表

Tab. 3 Parameters of test materials

材料	温度/℃	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力粘度/ [$\text{N} \cdot \text{s}$] $\cdot \text{m}^{-3}$]	运动粘度/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
水	25	998.2	1.002×10^{-3}	1.004×10^{-6}
空气	25	1.204	1.82×10^{-5}	1.51×10^{-5}

3 仿真试验数据分析

将轮胎模型导入，通过 Fluent 软件进行仿真得到不同行驶条件下轮胎所受的动水压强^[2]。

表 4 不同行驶条件下轮胎模型受到的动水压强

Tab. 4 Hydrodynamic pressures on tyre model under different conditions

速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	3 种花纹深度在不同水膜厚度(mm) 下的动水压强/kPa														
	1			2			5			8			10		
	7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1
60	107.2	108.0	108.1	108.0	108.1	108.8	119.3	119.5	120.9	132.9	133.0	137.2	141.2	147.7	149.0
70	110.2	110.2	110.3	110.8	111.2	111.3	126.1	126.7	126.9	146.4	149.5	151.8	159.5	162.6	168.4
80	112.7	112.8	113.0	113.2	114.2	114.3	132.9	134.5	136.5	162.7	167.6	168.3	178.5	179.1	187.4
90	115.3	115.4	116.3	116.7	117.2	118.1	142.9	144.1	145.1	182.6	186.0	188.1	197.2	203.1	206.6
100	120.2	120.7	121.9	121.4	122.0	123.8	152.2	152.2	156.5	204.2	206.5	208.2	219.8	229.0	231.3
110	125.8	128.4	130.9	131.5	134.8	138.1	163.7	164.8	167.9	228.3	229.4	230.2	247.7	258.2	259.2
120	141.0	143.6	146.0	151.5	155.0	158.4	176.9	183.8	184.1	254.9	258.3	272.2	289.5	291.5	310.2
速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	12			15			18			20					
	7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1			
	7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1			
60	150.5	158.8	159.8	172.5	172.5	172.7	178.2	181.0	181.6	185.4	187.1	187.7			
70	171.6	177.8	179.5	199.9	200.4	201.7	206.8	210.3	212.2	216.8	218.7	218.9			
80	196.9	197.1	204.1	227.3	227.3	231.1	239.9	241.6	243.4	252.5	253.2	255.9			
90	220.1	225.5	233.1	250.2	262.3	262.4	278.8	279.8	282.4	294.6	294.9	296.8			
100	247.3	257.1	262.2	286.2	301.5	301.7	321.0	323.7	327.9	341.7	341.9	342.4			
110	279.2	293.2	293.9	326.9	346.3	346.3	369.1	373.2	377.2	393.7	395.9	396.0			
120	334.3	340.1	355.4	371.6	391.2	393.9	422.6	425.9	427.2	450.6	455.0	456.0			

3.1 水膜厚度对动水压强的影响

3 种花纹深度的轮胎在不同水膜厚度的路面上分别以 60、90、120 km/h (低、中、高速) 速度行驶时所受到的动水压强见图 3。从图 3 中可以看出: (1) 随着水膜厚度的增加, 轮胎所受的动水压强持续增长。(2) 当水膜厚度小于花纹深度时, 动水压

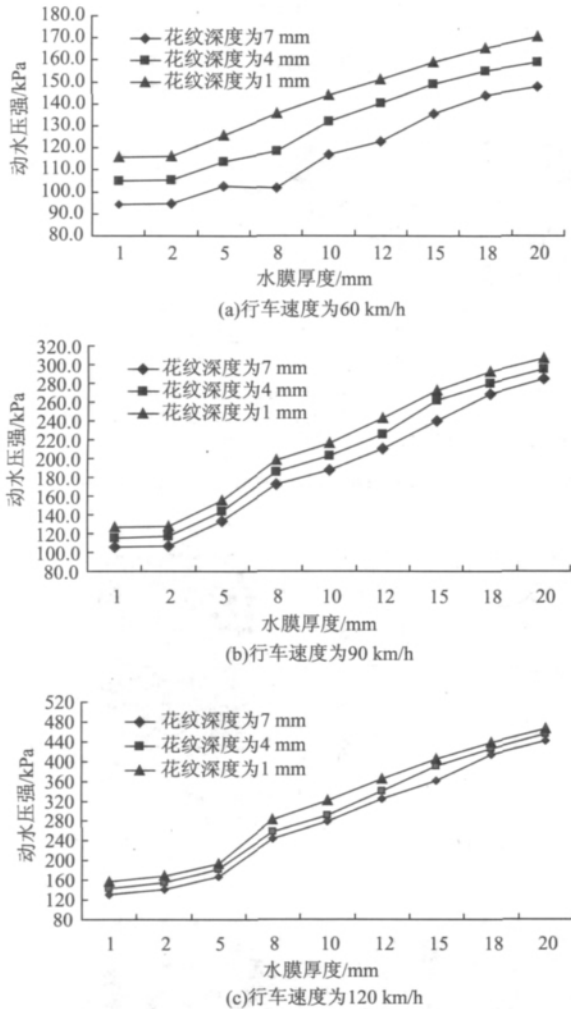


图3 3种车速下动水压强与水膜厚度的关系

Fig. 3 Relation between hydrodynamic pressure and water film thickness at three velocities

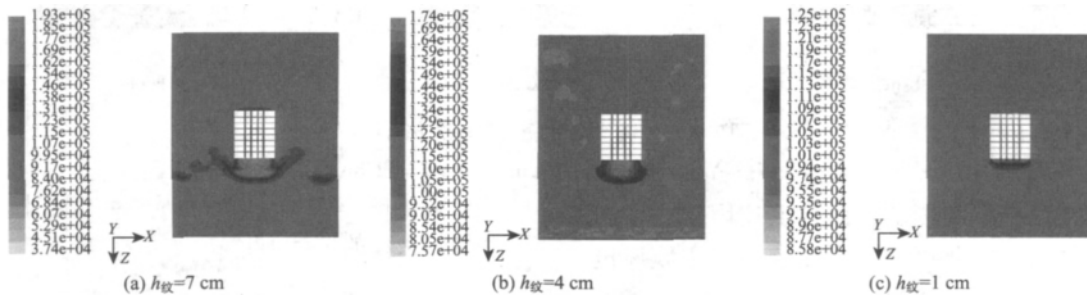


图4 不同花纹深度动水压强分布图

Fig. 4 Hydrodynamic pressure distribution at different tyre tread pattern depths

强增长缓慢, 当水膜厚度大于花纹深度时, 动水压强与水膜厚度近似为线性关系。

随着水膜厚度的增加, 轮胎花纹不能及时将积水排出而产生雍水, 并在轮胎的前部形成一个高压区域 (图 4 (a) 中轮胎下部浅色区域)。该高压区域的压力数值由中间向两侧递减, 大致呈对称分布。水膜较浅时, 轮胎花纹的排水作用没有完全丧失, 高压区域对轮胎的作用范围会延伸至轮胎底部; 随着水膜厚度的提高, 轮胎花纹逐渐丧失排水能力, 高压区域对轮胎的作用逐渐移至轮胎前端, 轮胎前端动水压强逐渐增大; 当动水压强等于轮胎内部压强时, 轮胎与路面完全脱离接触, 即出现临界滑水状态。

3.2 行驶速度对动水压强的影响

(1) 水膜厚度远小于轮胎花纹深度 ($h_w = 2$ mm), 车辆以正常速度 ($V \leq 120$ km/h) 行驶时, 动水压强增长缓慢 (图 5 (a)), 轮胎花纹排水效果明显 (图 6)。

(2) 水膜厚度与轮胎花纹深度差别不大时 ($h_w = 5$ mm), 由于轮胎的阻挡, 轮胎前段形成一条与行驶方向几乎平行的速度界限, 从而影响轮胎后部排水速度 (图 7 (a)), 轮胎花纹已不能完全将积水排出, 轮胎前端发生雍水现象, 使得动水压强增大、沟槽内水流速度下降, 花纹较浅的轮胎已经丧失排水能力导致动水压强增长幅度加快 (图 5 (b))。

(3) 水膜厚度远大于轮胎花纹深度时 ($h_w = 10$ 、15 mm), 轮胎前端的雍水现象更加明显, 动水压强迅速增大, 轮胎前端的速度界限由于轮胎的阻挡则向后偏移, 其偏移量随着速度的增大而增大, 动水压强与车速已近似成为线性关系 (图 5 (c)); 当车速达到 75 km/h 左右时, 中度磨损的轮胎也丧失排水能力, 3 种花纹轮胎的排水性能差异更为显著 (图 5 (d))。

3.3 动水压强影响因素的多元回归分析

由上文可见, 行车速度、水膜厚度和轮胎花纹

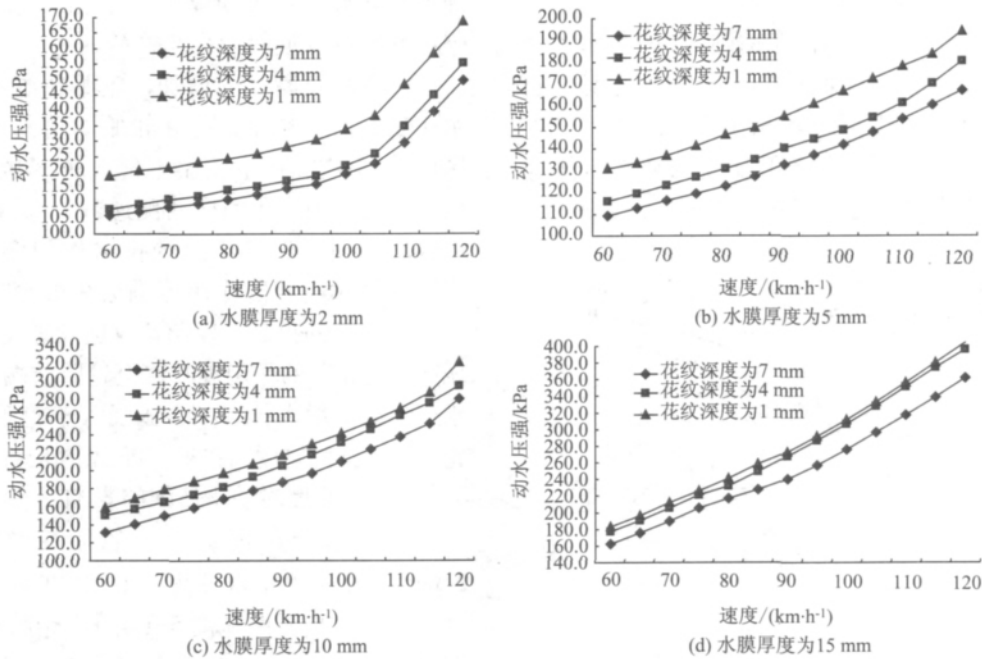
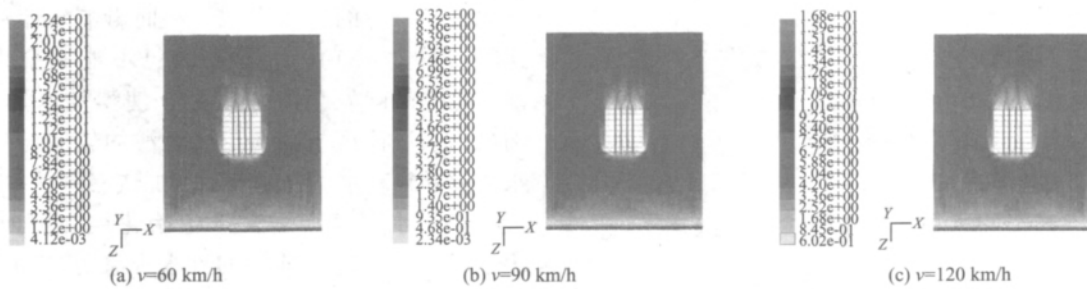
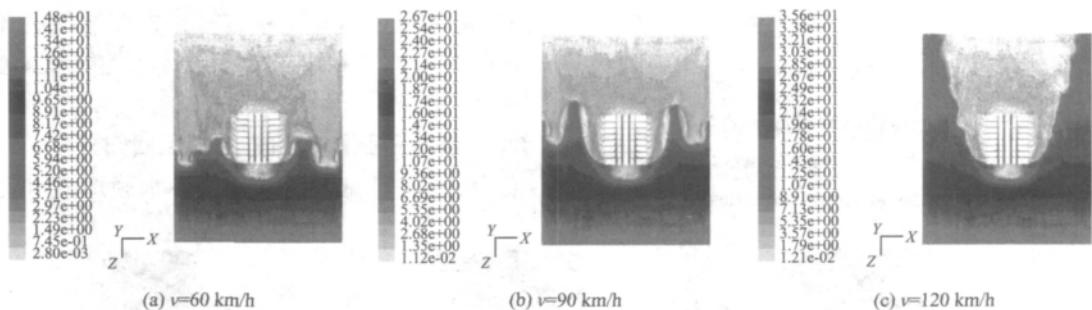


图5 不同水膜厚度下动水压强与车速的关系

Fig. 5 Relation between hydrodynamic pressure and vehicle speed under different thicknesses of water film

图6 水流速度分布图 ($h = 2$ mm)Fig. 6 Water velocity distribution ($h = 2$ mm)图7 水流速度分布图 ($h = 12$ mm)Fig. 7 Water velocity distribution ($h = 12$ mm)

深度对动水压强有很大影响,而且上述因素之间有很好的相关关系。因此可通过行车速度、水膜厚度和轮胎花纹深度与动水压强之间的关系建立四者的多元回归模型。

假设上述3个因素与动水压强呈线性关系,通

过对试验中的189组数据进行多元线性回归分析,求得回归系数的估计值:

$$\hat{\beta}^T = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = (-84.686, 2.26, 9.437, -0.9996)。$$

故有:

$$P = -84.686 + 2.26V + 9.437h_{\text{水}} - 0.9996h_{\text{胎}},$$

$$R^2 = 0.9329, \quad (3)$$

式中, P 为动水压强; v 为行车速度; $h_{\text{水}}$ 为道路水膜厚度; $h_{\text{胎}}$ 为轮胎花纹深度。

取显著性水平 $\alpha = 0.01$ 对式 (3) 进行显著性检验, 查 F 分布表可求得行车速度、水膜厚度、轮胎花纹深度对动水压强的线性影响在 $\alpha = 0.01$ 下是显著的。

通过对仿真试验数据进行分析, 当轮胎花纹深度为 7 mm 时, 发生临界滑水的车速与水膜厚度的关系约以 3.5 (km/h) /mm 递减; 当轮胎花纹深度为 4 mm 时, 临界滑水车速与水膜厚度的关系约为 4.083 (km/h) /mm。由此可知, 旧胎发生滑水的临界车速约为新胎的 85% ~ 90%。

对上述 3 个因素进行主成分分析评价, 结果表明行车速度对动水压强的影响最为明显 (贡献率为 48.43%), 水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压强的影响几乎相同 (贡献率分别为 25.82% 和 24.07%)。因此, 仅靠改变轮胎花纹深度以避免滑水的方法效果不理想。

5 结论

本文通过使用 Fluent 软件模拟纵横向花纹轮胎模型在不同行驶条件下所受到的动水压强, 得到以下结论:

(1) 车速一定时, 轮胎动水压强大小由水膜厚度、胎纹深度决定。

当水膜厚度小于轮胎花纹深度时 ($h_{\text{水}} < 5$ mm), 轮胎的排水作用并未丧失, 动水压强增长速度较慢, 与水膜厚度近乎为非线性缓慢增长, 其关系曲线在花纹深度值附近形成拐点; 当水膜厚度大于花纹深度时, 轮胎排水作用丧失, 导致轮胎前端产生雍水, 动水压强与水膜厚度呈线性快速增长。因此加强路面排水, 保持胎纹深度, 可以起到降低完全滑水风险的作用。

(2) 随着水膜厚度的增加, 动水压强与车速的关系逐渐由非线性向线性转变。

当水膜厚度远小于轮胎花纹深度时, 动水压强与车速近乎呈非线性关系, 动水压强增长速度十分缓慢; 水膜厚度与轮胎花纹深度差别不大时, 轮胎的阻挡作用影响其排水速度, 车速的增大导致轮胎前端发生雍水现象, 动水压强与车速已逐渐转化为线性关系; 当车速达到 75 km/h 左右时, 中度磨损的轮胎也丧失排水能力, 3 种花纹轮胎的排水性能差

异更为显著。

(3) 回归得出动水压强 (P) 与车速 (V)、水膜厚度 ($h_{\text{水}}$)、轮胎花纹深度 ($h_{\text{胎}}$) 的关系函数:

$$P = -84.686 + 2.26V + 9.437h_{\text{水}} - 0.9996h_{\text{胎}}, R^2 = 0.9329。$$

3 个影响因素中, 行车速度对动水压强的影响最为明显, 因此雨天采取必要措施降低行驶速度, 能够有效减少汽车发生完全滑水的风险。

参考文献:

References:

- [1] HORNE W B, LELAND T J W. Influence of Tire Tread Pattern and Runway Surface Condition on Braking Friction and Rolling Resistance of a Modern Aircraft Tire [M]. Washington, DC: NASA, 1962.
- [2] PELLOLI R. Road Surface Characteristics and Hydroplaning [J]. Transportation Research Record, 1976, 624: 27-32.
- [3] FWA T F, KUMARS S, ONG G P, et al. Study of Effect of Rib Tire on Hydroplaning by Analytical Modeling [C] // TRB 2008 Annual Meeting. Washington D. C.: TRB, 2008: 109-118.
- [4] 季天剑. 降雨对轮胎与路面附着系数的影响 [D]. 南京: 东南大学, 2004.
JI Tianjian. Effect of Rainfall on Adhesion Coefficient of Tire-pavement Interface [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [5] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉. 部分滑水对路面附着系数的影响 [J]. 交通运输工程学报, 2003, 3 (4): 10-12.
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan. Part hydroplaning Effect on Pavement Friction Coefficient [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3 (4): 10-12.
- [6] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 等. 道路表面水膜厚度预测模型 [J]. 交通运输工程学报, 2004, 4 (3): 1-3.
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan, et al. Prediction Model of Rain Water Depth on Road Surface [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4 (3): 1-3.
- [7] 季天剑, 安景峰, 何深明, 等. 基于人工神经网络的道路表面雨水深度预测 [J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 23 (2): 115-119.

(下转第 131 页)

- 1979, 47 (2): 263 – 291.
- [2] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty [J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5 (4): 297 – 323.
- [3] AVINERI E, BOVY P H L. Parameter Identification of Prospect Theory Model for Travel Choice Analysis [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2082: 141 – 147.
- [4] SCHUL Y, MAYO R. Searching for Certainty in an Uncertain World: The Difficulty of Giving Up the Experiential for the Rational Mode of Thinking [J]. Journal of Behavioral Decision Making, 2003, 16 (2): 93 – 106.
- [5] AVINERI E. The Fuzzy Meaning of Reference – based Perceptions in Travel Choice Modeling [C/DVD] // TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers DVD. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2009.
- [6] AVINERI E, PRASHKER J N. Sensitivity to Uncertainty: The Need for a Paradigm Shift [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1854: 90 – 98.
- [7] AVINERI E, PRASHKER J N. The Impact of Travel Time Information on Travelers' Learning under Uncertainty [J]. Transportation, 2006, 33 (4): 393 – 408.
- [8] JOU R C, KITAMURA R, WENG M C, et al. Dynamic Commuter Departure Time Choice under Uncertainty [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008, 42 (5): 774 – 783.
- [9] SCHWANEN T, ETTEMA D F. Coping with Unreliable Transportation when Collecting Children: Examining Parents' Behavior with Cumulative Prospect Theory [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2009, 43 (5): 511 – 525.
- [10] SENBIL M, KITAMURA R. Reference Points in Commuter Departure Time Choice: A Prospect Theoretic Test of Alternative Decision Frames [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2004, 8 (1): 19 – 31.
- [11] VAN WEE G P. Prospect Theory and Travel Behavior: A Personal Reflection Based on a Seminar [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2010, 10 (1): 385 – 394.
- [12] DE PALMA A, BEN AKIVA M, LEFEVRE C, et al. Stochastic Equilibrium Model of Peak Period Traffic Congestion [J]. Transportation Science, 1983, 17 (4): 430 – 453.
- [13] SENBIL M, KITAMURA R. Valuing Expressways under Time Pressures [C/CD] // TRB 85th Annual Meeting Compendium of Papers CD – ROM. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2006.
- [14] TIMMERMANS H. On the (Ir) relevance of Prospect Theory in Modeling Uncertainty in Travel Decisions [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2010, 10 (4): 368 – 384.
- [15] VAN DE KAA E J. Prospect Theory and Choice Behavior Strategies: Review and Synthesis of Concepts from Social and Transport Sciences [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2010, 10 (4): 299 – 329.
- [16] 赵凇, 张星臣. 基于“前景理论”的路径选择行为建模及实例分析 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (7): 82 – 86.
- ZHAO Lin, ZHANG Xinchun. A Traveler Route Choice Model Based on Prospect Theory and Case Study [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (7): 82 – 86.

(上接第125页)

- [8] 栾锡富, 周俊. 滑水现象的 ADAMS 仿真 [J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2006, 24 (3): 388 – 389.
- LUAN Xifu, ZHOU Jun. ADAMS Simulation on the Phenomenon of water Slippery [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2006, 24 (3): 388 – 389.
- [9] 庄继德. 汽车轮胎学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- ZHUANG Jide. Automotive Tires Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999.
- [10] JANAJREH I, REZGUI A, ESTENNE V. Tire Tread Pattern Analysis for Ultimate Performance of Hydroplaning [C] // Computational Fluid and Solid Mechanics Proceedings. Kidlington: Elsevier, 2001: 264 – 267.
- [11] JANAJREH I, REZGUI A, ESTENNE V. Towards Free Surface Hydroplaning Over a loaded Tire [C] // Computational Fluid and Solid Mechanics Proceedings. Kidlington: Elsevier, 2001: 1250 – 1253.
- [12] 董斌. 部分滑水条件下高速公路车辆行驶安全性研究 [J]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- DONG Bin. Research on Partly Hydroplaning of Safety Drive in Expressway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.