

## 积水路面轮胎部分滑水数值模拟\*

黄晓明<sup>1†</sup>, 刘修宇<sup>1</sup>, 曹青青<sup>1</sup>, 闫天昊<sup>1</sup>, 朱晟泽<sup>1</sup>, 周兴林<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**为揭示部分滑水状态下轮胎路面作用机理,采用有限元数值模拟方法,分别建立了175-70-R15型轮胎模型和水-空气复合水膜模型,并基于耦合欧拉-拉格朗日法建立了三维充气花纹轮胎滑水数值模型.探讨了水膜厚度和轮胎速度对汽车轮胎受力状态的影响,分析了轮胎所处运动状态对部分滑水过程的影响.计算结果表明:随着水膜厚度的增加,水流竖向托举力增加,纵向附着力减小,轮胎更早地进入完全滑水状态;随着轮胎行驶速度的增加,水流纵向拖拽力大幅增加,同时随着水膜的增厚,这种增加趋势更加明显;回归得到了轮胎受到的水流竖向托举力与水膜厚度和行驶速度的关系式;相比于自由滚动,轮胎处于ABS状态时,更早进入完全滑水状态.

**关键词:**道路工程;轮胎滑水数值模型;耦合欧拉-拉格朗日法;部分滑水;水流竖向托举力

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

## Numerical Simulation of Tire Partial Hydroplaning on Flooded Pavement

HUANG Xiaoming<sup>1†</sup>, LIU Xiuyu<sup>1</sup>, CAO Qingqing<sup>1</sup>, YAN Tianhao<sup>1</sup>,  
ZHU Shengze<sup>1</sup>, ZHOU Xingling<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** To investigate the mechanism of tire-pavement partial hydroplaning, finite element numerical method was applied to establish 175-70-R15 tire model and water-air composite model. Coupled Eulerian-Lagrangian method was applied to establish the three-dimensional numerical model of patterned inflation tire hydroplaning. The simulation investigated the influence of water film thickness and tire velocity on the mechanical responses of tire and discussed the impact of tire motion state on the partial hydroplaning process. The results show that, with the thicker water film, the water lifting force increases, while the longitudinal force provided by pavement decreases, which means that the tire enters into the complete hydroplaning earlier. With the increase of tire velocity, the longitudinal water drag force increases, which occurs more obviously when the water film becomes thicker. The relationship between water lifting force and water film thickness and tire velocity is regressed into an equation. It is determined that tire with ABS en-

\* 收稿日期:2017-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378121), National Natural Science Foundation of China(51378121)

作者简介:黄晓明(1963-),男,江苏南京人,东南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: huangxm@seu.edu.cn

ters complete hydroplaning earlier than that in free rolling statement.

**Key words:** pavement engineering; tire hydroplaning numerical model; coupled Eulerian-Lagrangian method; partial hydroplaning; water flow vertical lifting force

汽车行经积水路面,流体在轮胎与路面之间起到润滑和隔离作用,引起轮胎与路面部分脱离,减弱轮胎路面附着性能,造成轮胎制动与转弯性能的下降.当汽车行驶速度到达临界值,动水压力增大至完全托起轮胎,轮胎路面脱离接触,汽车行驶操纵稳定性受到极大干扰.前者为部分滑水现象,后者为完全滑水现象,临界的汽车行驶速度即临界滑水速度.

目前对滑水研究主要聚焦在完全滑水上,为了求解不同条件下临界滑水速度,并定量分析多种因素对临界滑水速度的影响,国内外学者进行了大量试验研究、解析计算和数值模拟. NASA 率先进行光滑轮胎现场滑水试验<sup>[1]</sup>,并总结得到临界滑水速度和轮胎内压的经典经验公式;在此基础上, Horne<sup>[2]</sup>、Gengenbach<sup>[3]</sup>和 Gallaway<sup>[4]</sup>等开展的一系列轮胎滑水试验考虑了轮胎类型、水膜厚度和路面纹理等因素的影响,对公式进行了修正;季天剑等<sup>[5]</sup>基于弹流润滑理论求解了轿车轮胎动力滑水临界速度;作为轮胎滑水数值模拟工作的代表, Fwa 等<sup>[6-8]</sup>分析了轮胎临界滑水速度和水泥路面刻槽、沥青路面纹理、路面车辙深度之间的关系.

实际上,在湿滑路面上行驶,司机通常会采取谨慎的驾驶行为,汽车行驶速度往往不会很高,即汽车轮胎处于部分滑水状态<sup>[9]</sup>.此时,由于轮胎路面接触面积减少,附着力下降,交通事故发生的概率也会大大增加.部分滑水已逐渐引起人们足够的重视,为揭示部分滑水现象发生时轮胎路面作用机理,现场试验<sup>[10]</sup>和有限元分析方法<sup>[11]</sup>成为主要研究方法.然而,现场试验普遍费用高,得到的数据准确度不高.另外,现有的部分滑水有限元研究缺乏对轮胎花纹、充气压力、ABS控制的总体考虑,同时,研究结果大多是对轮胎滑水过程的定性描述,缺乏定量数据以指导工程实际.因此,有必要对轮胎部分滑水过程精确建模,确定部分滑水过程中胎路相互作用.探究部分滑水情况下,轮胎路面抗滑性能衰减状况,有助于确保车辆行驶稳定性<sup>[12]</sup>,对建设部门路面材料选择、交管部门交通速度管制、雨天司机驾驶策略决断具有极强的指导意义.

本文利用三维有限元分析方法,分别建立了175-70-R15 充气花纹轮胎模型、水膜模型,并基于

耦合欧拉-拉格朗日法,建立充气花纹轮胎滑水有限元模型.模拟计算了部分滑水情况下,随着轮胎速度的增加,汽车轮胎受力状态变化,并分析了轮胎所处运动状态对部分滑水过程的影响.

## 1 充气花纹轮胎滑水有限元模型

### 1.1 三维轮胎有限元模型

在轮胎路面滑水有限元模拟中,最重要的组成部分是轮胎模型,本文采用175-70-R15 充气花纹轮胎模型作为研究对象.在构筑三维花纹轮胎模型并模拟充气、加载、滚动的过程中,主要考虑胎体、轮辋、路面3个主要部件.考虑轮胎滚动过程中轮辋与路面的小变形特征,其中轮辋与路面均由刚性面构成,胎体则考虑橡胶和帘线-橡胶的复合材料.首先在 AutoCAD 中建立轮胎截面的二维几何模型,网格划分后导入 ABAQUS 并赋予材料参数.对于橡胶材料,采用 Yeoh 模型<sup>[13]</sup>描述材料的超弹性材料特性,对于含有加强筋材的复合材料,使用嵌入 Rebar 单元的面单元模拟这种复合材料,并设置好 Rebar 层的初始角度、截面积和加强筋间距.轮胎各材料组成如图1所示,具体的材料参数获取方法及取值见文献<sup>[14]</sup>.

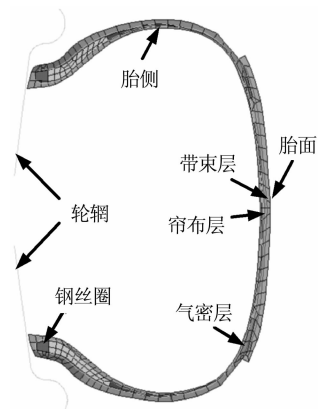


图1 轮胎横截面图

Fig. 1 Cross section of tire profile

轮胎的纵横向花纹构造对其滑水性能存在巨大影响,因此在轮胎滑水有限元分析中,必须对轮胎花纹进行考虑.如图2所示,首先将二维模型旋转一定

角度,将在 CATIA 中建立好的花纹贴片固结在部分三维轮胎模型表面,形成带花纹的部分三维轮胎模型.轮胎选用的花纹包含纵向沟槽和横向花纹两部分,纵向沟槽的宽度分别为 5.5 mm 和 6.5 mm.然后将此部分三维轮胎进行旋转阵列,最终得到带表面花纹的三维有限元轮胎模型.在模拟中,建立轮胎的尺寸与实际尺寸相同.建立的三维充气花纹轮胎部分滑水模型中包括 1 115 576 个节点,其中轮胎部件包括 734 156 个节点,水膜模型中包括 381 420 个节点.

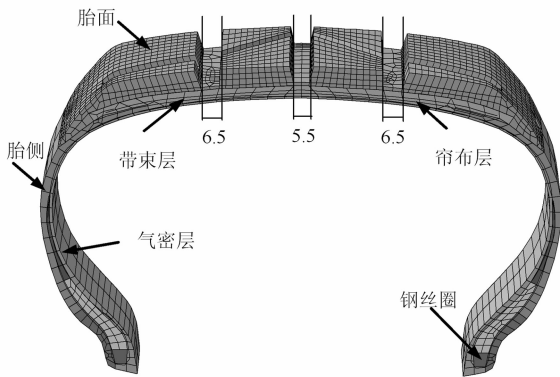


图 2 部分三维轮胎  
Fig. 2 Partial three dimensional tire

轮胎的精确建模是轮胎滑水分析的基础,在轮胎处于工作状态时,轮胎滚动大变形引起几何非线性,橡胶帘线材料复合造成物理非线性,轮胎路面呈现接触非线性,这种复杂的三维非线性有限元模型的建立需要对其准确性进行评估与验证<sup>[15]</sup>.在模型建立后,针对轮胎径向、侧向、纵向、扭转及包覆进行虚拟刚度试验,并与轮胎五刚试验机得到的数据进行对比.轮胎的径向、侧向、纵向刚度试验,固定轮辋,分别通过轮胎底面刚性板施加荷载,测量加载过程中刚性板位移.轮胎的包覆刚度试验,采用带有表面凸起的刚性板径向加载.轮胎的扭转试验,固定轮辋,绕对称轴旋转刚性板,记录旋转过程中轮胎所受力矩和对应的扭转角.在模拟轮胎径向刚度试验中,需要固定轮辋,通过轮胎底面刚性板施加荷载,模拟结束后,通过后处理,将轮胎-刚板接触面上轮胎节点的应力(CPRESS)输出,绘制得到轮胎接地印痕,如图 3 所示.通过图 4,全面对比轮胎虚拟五刚特性曲线与实际五刚特性测试数据,验证了本文所建立的三维有限元轮胎模型的精确性.

1.2 欧拉流体水膜模型

通过 ABAQUS/CAE 建立水膜模型,模型由空单元、水单元构成,空单元用来表征轮胎冲击作用下

水膜的可能流经范围.为避免过于复杂的水膜建模,并减少计算复杂度,本文采用水流冲击轮胎表面的水流模型.现实中,轮胎高速滚过积水路面,水膜覆盖整个道路表面,模拟中采用高速水流冲击代替此过程.如图 5 所示,通过欧拉边界条件的指定,使得水流从图中所示水流入口进入,流经整个水膜模型后从对面一侧冲出.

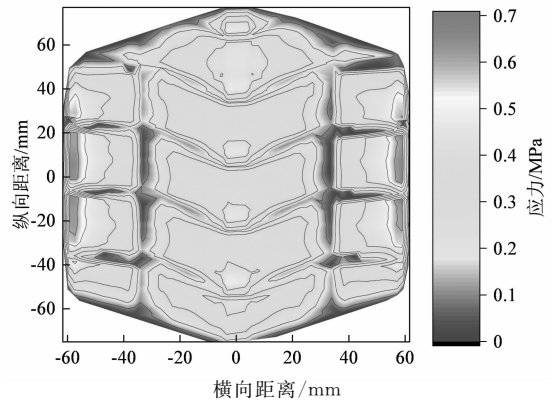


图 3 轮胎接地印痕  
Fig. 3 Footprint at tire pavement interface

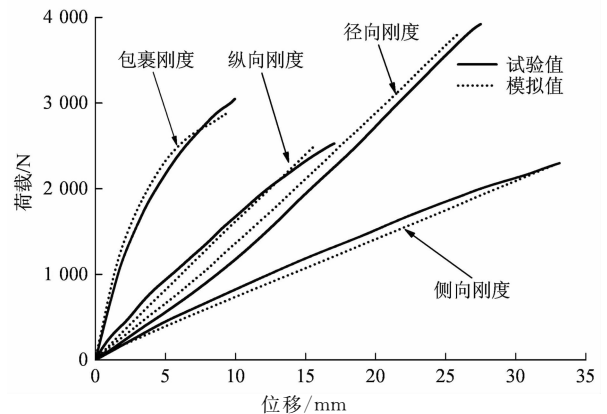


图 4 轮胎刚度试验  
Fig. 4 Tire stiffness test

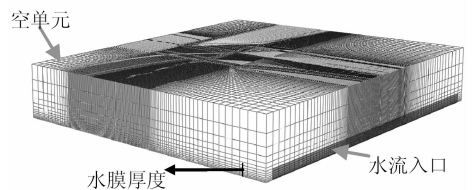


图 5 欧拉流体水膜模型  
Fig. 5 Water film model of Euler element

求解水膜在轮胎高速转动冲击下的力学响应和水流特性,主要包括 2 种基本方法:用计算流体力学的方法描述粘性流体随时间而变得非定常运动,通过求解纳维-斯托克斯方程得到流场的离散化定量表述,从而预测流体运动规律;用状态方程形式描述

水流的冲压特性,通过求解冲击影响下液体质点运动方程获得水体动力响应.考虑轮胎高速冲击作用下水膜高速流动特性,结合状态方程在模拟冲击、爆炸等方面的优越性,对于这种凝聚态的液体材料冲击高压问题的探究,采用固体形式的高压状态方程.本文使用 Mie-GRUNEISEN 状态方程,描述水流的密度与压力之间的关系,冲击曲线的一般形态如图 6 所示,其基本形式为:

$$p = p_H(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (1)$$

式中:  $p$  为水流受到的压力;  $p_H$  为 Hugoniot 冲击压力;  $\Gamma_0$  为材料常数;  $\eta = 1 - \rho_0/\rho$ ,  $\rho_0$  为水体初始密度,  $\rho$  为水体受冲击作用后的密度;  $E_m$  为水的比内能.

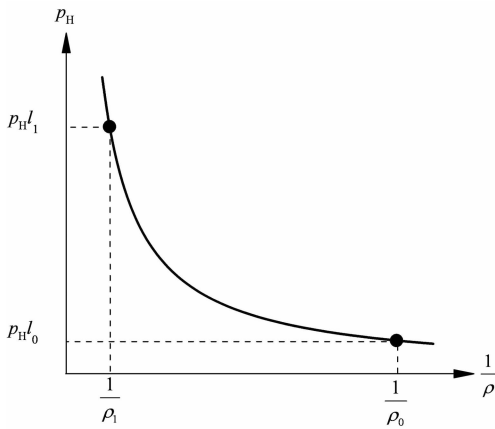


图 6 标准的 Hugoniot 冲击曲线  
Fig. 6 Standard Hugoniot impact curve

假定水体中冲击波速  $U_s$  与质点速度  $U_p$  之间为线性关系:

$$U_s = c_0 + sU_p \quad (2)$$

式中:  $c_0$  为常温常压下水中声速;  $s$  为材料常数.

同时由质量守恒定律和动量守恒定律,水体中存在式(3)、式(4)所示的冲击波关系式:

$$\rho_0 U_s = \rho(U_s - U_p) \quad (3)$$

$$\rho_H = \rho_0 U_s U_p \quad (4)$$

结合式(2)~(4),水体 Hugoniot 冲击曲线可用以下关系式进行拟合:

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (5)$$

从而得到 Mie-Gruneisen 状态方程的表达形式:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} (1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (6)$$

利用以上推导得到 Mie-Gruneisen 状态方程一般形式,结合水体受冲击作用的 Hugoniot 试验数据<sup>[16]</sup>,如图 7 所示,拟合材料参数  $s$  与  $\Gamma_0$ . 最终本文选用的 Mie-GRUNEISEN 状态方程材料参数如表 1 所示.

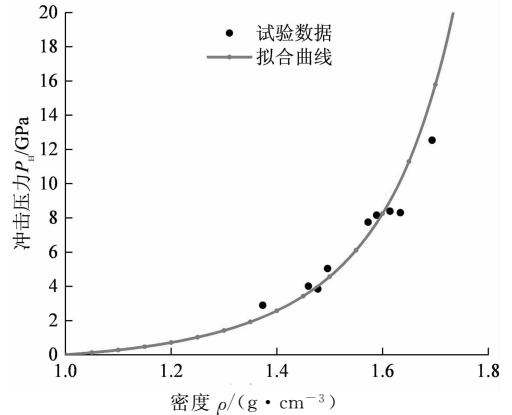


图 7 水的拟合 Hugoniot 冲击曲线  
Fig. 7 Hugoniot impact fitting curve of water

表 1 Mie-Gruneisen 状态方程参数  
Tab. 1 Parameters of Mie-Gruneisen equation of state

材料	$\rho_0$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c_0$ /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$s$	$\Gamma_0$
水	998.203	1480	1.92	1.2

### 1.3 耦合欧拉-拉格朗日法

滚动轮胎受到地面与动水压力作用产生较大应力应变,轮胎与水流呈现复杂的耦合动力变形.这种复杂的动力流固耦合问题需要选择合适的网格与单元划分技术,以提高模拟的准确性并减少计算的复杂度.耦合欧拉-拉格朗日法在解决这方面问题上天然具有优越性,通过耦合欧拉-拉格朗日法,将一个流体力学问题进行拆解,就变成了一个流体力学问题和固体力学问题,设置成相同的坐标、合适的流-固接触面以及相同的求解步就可以在耦合面上完成参数传递,由此完成模型计算复杂度的简化.

如图 8 所示,在 ABAQUS 中的显式动力分析模块中进行滑水分析,使用耦合欧拉-拉格朗日技术<sup>[14]</sup>进行网格划分,即在此过程中轮胎模型和流体模型分别使用拉格朗日单元和欧拉单元进行表示.对于拉格朗日单元,材料附于网格上,物质的形状变化与有限元网格的形状变化保持完全一致.对于欧拉单元,网格保持不变,材料在一个固定的计算域中自由移动.拉格朗日单元和欧拉单元之间的接触使用广义接触进行定义,使得拉格朗日单元表面与欧

拉单元表面能够进行有效接触. 对于两者之间的耦合,按照如下步骤进行:①根据水体积分数求解水流自由液面并确定轮胎与水流的接触面;②根据动力学方程和边界条件求解轮胎各物理量;③通过求解得到的轮胎各物理参量更新水流的边界条件和物理参量,更新水流的体积分数函数;④更新接触面各物理参量,更新轮胎边界条件. 以上轮胎与流体间物理参量的传递通过加权余量法完成,重复以上步骤直至计算收敛.

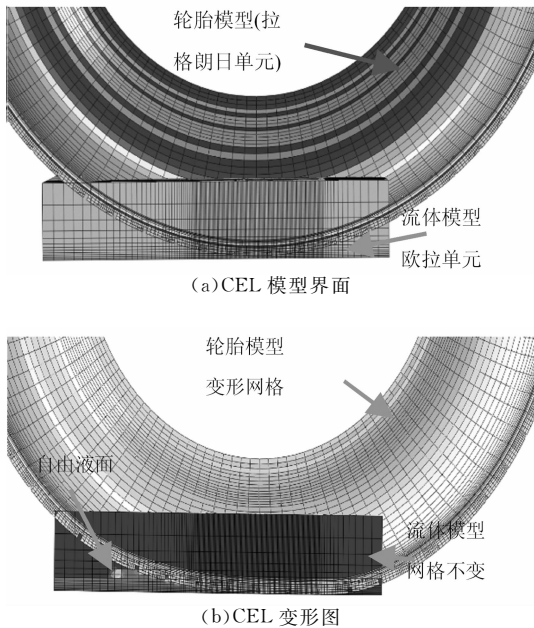


图 8 用于轮胎滑水的 CEL 方法  
Fig. 8 CEL method used in tire hydroplaning simulation

## 2 模拟结果与验证

通过以上步骤,如图 9 所示,建立了 175-70-R15 充气花纹轮胎滑水模型,并通过 VOF 液面追踪技术观察到汽车滚动行经有水路面时的水花四溅效果(图 10). 在进行轮胎滑水数值仿真过程中,为模拟轮胎在有水路面上的滚动过程,将轮胎的运动分为两部分,即轮胎绕轴心的旋转速度  $r\omega$  和轮胎轴心处相对地面向前运动的直线速度  $V$ ,后者使用路面反方向的角速度代替. $\omega$  为转动角速度, $r$  为轮胎轴心离地面距离即轮胎的转动半径. 轮胎的驱动、制动、滚动过程,通过控制  $r\omega$  和  $V$  来实现. 在本文的模拟分析中,轮胎充气压力和轮轴荷载固定为 240 kPa 和 3 922 N.

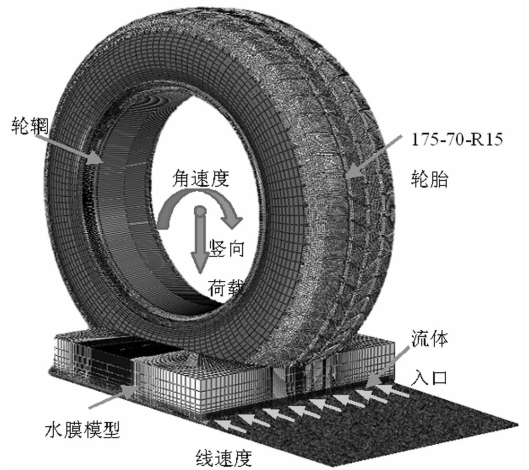


图 9 轮胎滑水模型  
Fig. 9 Tire hydroplaning model

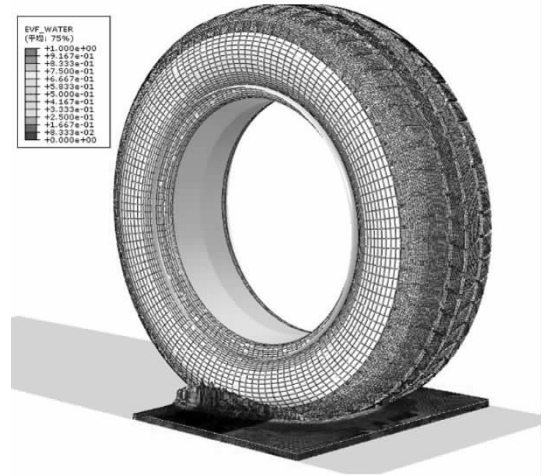


图 10 轮胎滑水云图  
Fig. 10 Tire hydroplaning contour

汽车轮胎从纯滚动到抱死拖滑的制动过程是一个渐进的过程<sup>[17]</sup>,为了评价汽车车轮滑移成分所占比例的多少,使用滑移率  $S$  进行表示:

$$S = (V - r\omega) / V \times 100\% \quad (7)$$

基于建立的三维轮胎滚动有限元模型,固定竖向荷载,通过控制不同滑移率,模拟在汽车制动过程中车轮所受到的纵向附着力. 从图 11 中可以看出,当地面对车轮法向作用力一定时,滑移率在 15% 左右时,制动纵向附着系数最大,意味着车轮与路面之间的附着力达到最大,此时的制动效果最好,这就是 ABS 防抱死系统能够使得汽车刹车距离最短的原理.

基于建立的充气花纹轮胎滑水模型,设定水膜厚度为 10 mm,控制轮胎滑移率处于 ABS 控制区范围的情况下,将轮胎滑水速度从 0 km/h 逐渐提高,直至轮胎完全被水流托起. 如图 12 所示,记录在此过程中轮胎-路面接触面上的竖向接触力、水流提供

的竖向托举力,并与无水膜状态下的轮胎路面接触力进行比较.观察发现,在部分滑水过程中,随着轮胎行驶速度的增加,轮胎路面接触力逐渐增大,水流托举力逐渐减小.当轮胎行驶速度增大到 79.2 km/h 时,路面接触力达到最大值,水流托举力变为 0,此时轮胎与路面完全脱离接触,处于完全滑水状态.

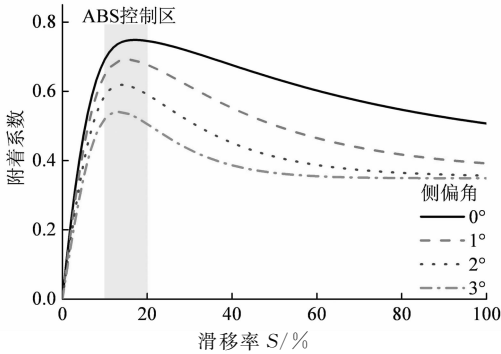


图 11 附着系数和滑移率的关系

Fig. 11 Friction coefficient and slip ratio

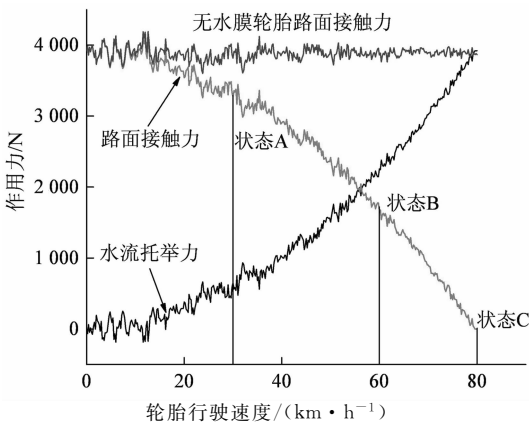


图 12 干湿路面上速度与力的关系

Fig. 12 Force and speed on dry and wet pavement

如图 13 所示,观察水流冲击轮胎沟槽流迹,记录轮胎滚动速度分别为 20 km/h、40 km/h、60 km/h 和 80 km/h 时的部分滑水水膜流迹分布.图中颜色的深浅表征对应单元内流体体积分数,最深色表示该单元完全被流体充满,白色表示该单元为空.随着轮胎行驶速度的提升,轮胎-路面接触面积逐渐减小,水流覆盖面积逐渐增大,同时轮胎对水面的影响范围逐渐减小.与图 12 中状态 A、状态 B、状态 C 对比,不同速度下水流流迹变化与轮胎路面接触力变化存在高度一致性.可以认为,本文建立的三维充气花纹轮胎滑水模型在模拟部分滑水状态下是可行的.

同时,采用 NASA 经验公式中计算得到的轮胎滑水临界速度作为初始速度,逐渐改变轮胎滚动速度,使得轮胎行经水膜路面时竖向接触力刚好为零,将这一速度视为沥青路面轮胎滑水模型模拟得到的

临界滑水速度.将 NASA 经验公式计算得到的滑水速度和模拟得到的滑水速度绘制于图 14 中.当轮胎充气压力为 100 kPa 时,模拟与计算得到的滑水速度分别为 70 km/h 和 63.6 km/h;当轮胎充气压力为 250 kPa 时,模拟与计算得到的滑水速度分别为 107.6 km/h 和 100.56 km/h.模拟的偏差分别为 10.01% 和 7%,这种偏差的产生源于轮胎花纹.可以认为,本文建立轮胎滑水模型的模拟结果具有一定精确性.

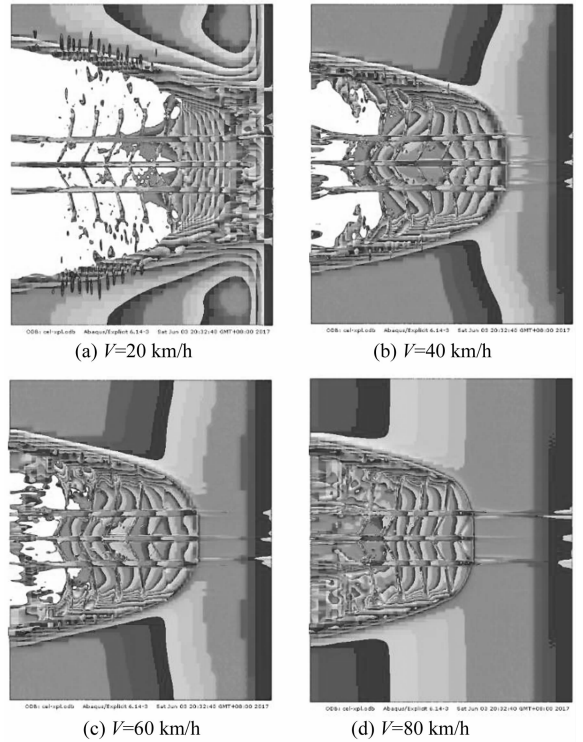


图 13 不同速度下部分滑水水膜流迹  
Fig. 13 Water flow trace with different speed

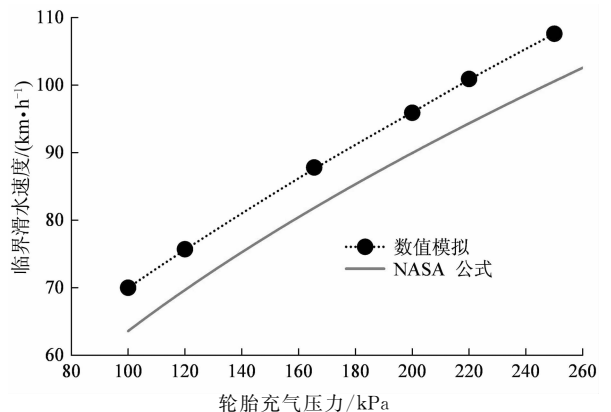


图 14 2种方法得到的滑水临界速度  
Fig. 14 Critical tire hydroplaning speed in two methods

### 3 分析与讨论

轮胎行经积水路面,受到水膜提供的竖向托举力,竖向托举力的大小表征了水膜对轮胎路面接触的阻碍,是衡量部分滑水发生程度的重要指标.同时,在轮胎行驶方向,轮胎还受到路面提供的纵向附着力和水流提供的纵向拖拽力,两者之和构成总附着力,探究轮胎行驶总附着力的变化,为计算轮胎加速、制动、转弯时的运动状态提供依据.因此,下面选取部分滑水过程中轮胎受到的竖向托举力、路面附着力、水流拖拽力和总附着力为研究对象,分析水膜厚度和轮胎运动状态对轮胎部分滑水过程的影响.

#### 3.1 水膜厚度对部分滑水性能的影响

设定水膜厚度分别为 0.5 mm、2 mm、5 mm 和 10 mm,控制处于 ABS 状态下的轮胎从 0 km/h 逐渐提速直至进入完全滑水状态.记录部分滑水过程中流体对轮胎的竖向托举力,以及部分滑水过程中路面提供给轮胎的纵向附着力,绘于图 15 和图 16 中.

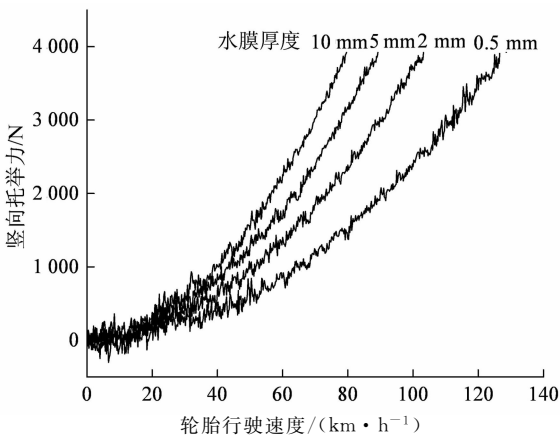


图 15 不同水膜厚度下水流竖向托举力  
Fig. 15 Water lifting force with different water film thickness

通过对图 15 和图 16 的观察发现,随着水膜厚度的增加,轮胎行驶过程中受到的水流竖向托举力大大增加,受到的路面纵向附着力大大减小,并且更早地进入完全滑水状态.水膜厚度从 0.5 mm 增加到 10 mm 时,对应的临界滑水速度从 126.6 km/h 减小到 79.2 km/h,速度 80 km/h 对应的路面附着力从 1 937.94 N 减小到 0.

同样地,记录部分滑水过程中水流对轮胎施加的纵向拖拽力和轮胎受到的总附着力,绘于图 17 和图 18.如图 17 所示,随着轮胎行驶速度的增加,轮

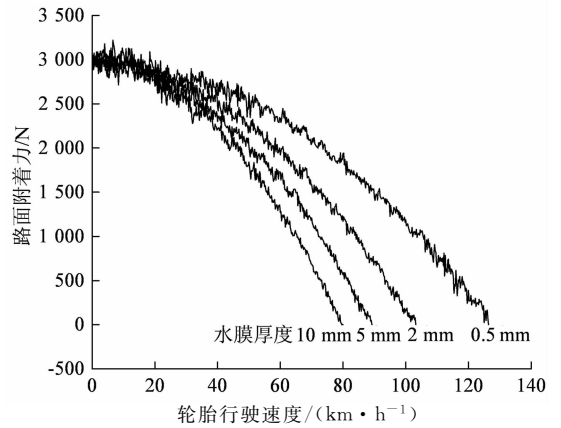


图 16 路面纵向附着力  
Fig. 16 Longitudinal force of pavement

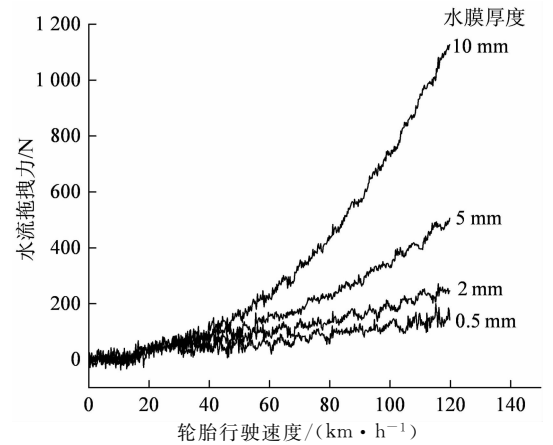


图 17 水流纵向拖拽力  
Fig. 17 Longitudinal water drag force

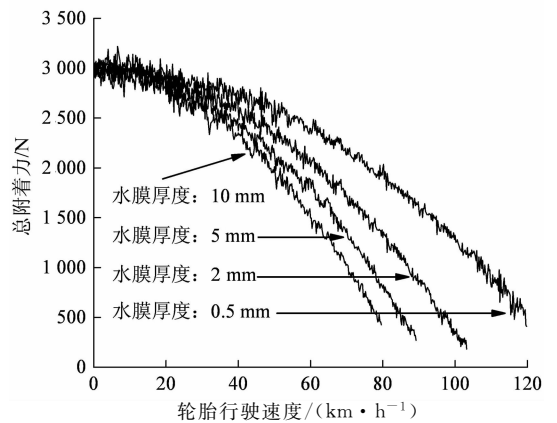


图 18 总附着力  
Fig. 18 Total force in the longitudinal direction

胎受到的水流纵向拖拽力大幅增加,同时随着水膜的增厚,这种增加趋势更加明显.当轮胎行驶速度为 120 km/h 时,对应于水膜厚度分别为 0.5 mm、2 mm、5 mm 和 10 mm 的水流拖拽力分别达到

142.4 N、246.2 N、505.9 N 和 1126.5 N. 随着水膜厚度的增加,轮胎行驶速度的增大,轮胎受到的水流纵向拖拽力变得不容忽视. 如图 18 所示,轮胎受到的总附着力是由轮胎受到路面的纵向附着力和水流的纵向拖拽力的总和,考虑了 2 种力的叠加后,轮胎的总附着力的变化相比路面的纵向附着力的变化更加平缓. 当水膜厚度从 0.5 mm 增加到 10 mm 时,轮胎受到的总附着力从 425.5 N 增加到 1 949.4 N.

### 3.2 水流竖向托举力预估公式

通过充气花纹轮胎滑水的有限元分析,确定了部分滑水过程中轮胎的受力状况. 但是对轮胎的分析只是积水路面车辆抗滑分析的基础工作,通过在 CarSim/Simulink 进行整车滑水分析,可以建立路面抗滑与汽车加速、转弯、制动、变道的联系. 为了将有限元软件中计算得到的轮胎部分滑水计算结果导入整车多体动力学软件中,需要对计算结果进行公式化. 由于部分滑水过程中竖向托举力的大小是衡量部分滑水发生程度的主要指标,也是工程人员主要关心的物理量,下面力求建立水流竖向托举力的预估公式.

汽车滑水在固定轮胎充气压力和轮轴荷载的情况下,轮胎部分滑水过程中水流竖向托举力的大小仅和水膜厚度和行驶速度有关. 假定竖向托举力  $F$  与水膜厚度  $h$  和轮胎行驶速度  $v$  存在指数关系. 通过对图 14 中的曲线进行回归,得到式(8),回归曲线拟合的  $R^2$  为 0.96,由此得到的式(8)可以用于预测部分滑水过程中轮胎受到的水流竖向托举力变化.

$$F = 0.285h^{0.313}v^{2.01} \quad (8)$$

### 3.3 轮胎运动状态对部分滑水性能的影响

基于文中所述的充气花纹轮胎滑水模型,设定水膜厚度为 10 mm,轮胎滑水速度从 0 km/h 逐渐提高直至进入完全滑水状态. 在此过程中,首先将轮胎设定为 ABS 控制状态,即滑移率固定为 17.5%; 然后,将轮胎设定为自由滚动状态,在此过程中轮胎滚动的角速度与线速度符合  $V = r\omega$  的关系. 对于两种情况,分别记录轮胎部分滑水状态下受到水流竖向托举力的变化,绘于图 19. 通过对两种情况下水流竖向托举力变化的分析发现,在轮胎处于低速运行状态时( $V < 35$  km/h),轮胎所处运动状态的不同对所受到的水流竖向托举力基本没有影响. 当轮胎运行速度较高时( $V > 35$  km/h),处于 ABS 控制下的轮胎受到的竖向托举力明显要大于处于自由滚动状态下的情况,这一趋势随着轮胎行驶速度的提高更加明显. 通过对轮胎进入完全滑水状态的临界速

度分析发现,ABS 控制下的轮胎的临界滑水速度(79.2 km/h)显著小于自由滚动状态的临界滑水速度(88.1 km/h). 这一现象表明,轮胎处于刹车状态时,更容易进入完全滑水状态.

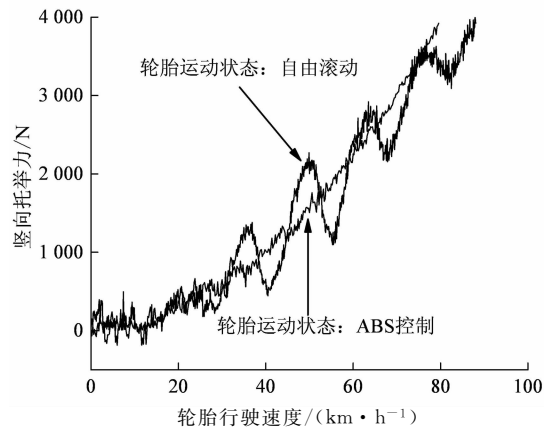


图 19 不同轮胎运动状态下水流竖向托举力  
Fig. 19 Water lifting force under different tire motion conditions

## 4 结 论

本文建立的轮胎滑水有限元模型由 175-70-R15 充气花纹轮胎模型和水膜模型组成,基于耦合欧拉-拉格朗日法,模拟了轮胎部分滑水过程,得到如下结论:

1) 随着水膜厚度的增加,轮胎行驶过程中受到的水流竖向托举力大大增加,受到的路面纵向附着力大大减小,并且更早地进入完全滑水状态. 水膜厚度从 0.5 mm 增加到 10 mm 时,对应的临界滑水速度从 126.6 km/h 减小到 79.2 km/h,速度 80 km/h 对应的路面附着力从 1 937.94 N 减小到 0.

2) 随着轮胎行驶速度的增加,轮胎受到的水流纵向拖拽力大幅增加,同时随着水膜的增厚,这种增加趋势更加明显. 当轮胎行驶速度为 120 km/h 时,对应于水膜厚度分别为 0.5 mm、2 mm、5 mm 和 10 mm 的水流拖拽力分别达到 142.4 N、246.2 N、505.9 N 和 1 126.5 N.

3) 在固定轮胎充气压力和轮轴荷载的情况下,本文得到竖向托举力与水膜厚度和轮胎行驶速度的指数关系式,可以用于预测部分滑水过程中轮胎受到的水流竖向托举力变化.

4) 在轮胎处于低速运行状态时,轮胎所处运动状态的不同对所受到的水流竖向托举力基本没有影响. 当轮胎运行速度较高时,处于 ABS 控制下的轮胎受到的竖向托举力明显要大于处于自由滚动状态



下的情况,这一趋势随着轮胎行驶速度的提高更加明显。轮胎处于 ABS 状态时,更容易进入完全滑水状态。

## 参考文献

- [1] HORNE W B, JOYNER U T. Pneumatic tire hydroplaning and some effects on vehicle performance [R]. Hampton: NASA, 1965:1-55.
- [2] HORNE, W B, YAGER T J, IVEY D L. Recent studies to investigate effects of tire footprint aspect ratio on dynamic hydroplaning speeds[J]. American Society for Testing and Material, 1986, 929(1):26-46.
- [3] GENGENBACH W. Experimental investigation of tires on wet pavements[J]. Automotive Technology Magazine, 1968, 70(1):310-316.
- [4] GALLAWAY B M. Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1979:1-296.
- [5] 季天剑,高玉峰,陈荣生. 轿车轮胎动力滑水分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 57-60.
- JI T J, GAO Y F, CHEN R S. Dynamic hydroplaning analysis of car tire [J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering, 2010, 10(5): 57-60. (In Chinese)
- [6] FWA T F, RASINDU H R, ONG G P, *et al.* Analytical evaluation of skid resistance performance of trapezoidal runway grooving[C]//Proceedings of Transportation Research Board 93<sup>rd</sup> Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2014:1-24.
- [7] CHU L, FWA T F. Incorporating pavement skid resistance and hydroplaning risk considerations in asphalt mix design[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(10):1-11.
- [8] FWA T F, PASINDU H R, ONG G P. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(4):423-429.
- [9] 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):9-12.
- JI T J, HUANG X M, LIU Q Q. Part hydroplaning effect on pavement friction coefficient [J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering, 2003, 3(4): 9-12. (In Chinese)
- [10] LU D, GUO K H, CHEN P. Comparison and analysis of tire driving slip property on dry and wet road [C]//Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application. Hong Kong: International Industrial Electronic Center, 2010:13-16.
- [11] 董斌,唐伯明,刘唐志. 基于 Fluent 软件的雨天潮湿路面滑水现象研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(4):710-713.
- DONG B, TANG B M, LIU T Z. Hydroplaning research of wet highway pavement based on Fluent[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(4):710-713. (In Chinese)
- [12] 周兵,田晨,宋义彤. 基于路面附着系数估计的 AFS 控制策略研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(4):16-22.
- ZHOU B, TIAN C, SONG Y T. Control strategy of AFS based on estimation of tire-road friction coefficient[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(4):16-22. (In Chinese)
- [13] ZHOU H, WANG G, DING Y, *et al.* Effect of friction model and tire maneuvering on tire-pavement contact stress[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2015(1):632-647.
- [14] ZHU S, LIU X, CAO Q, *et al.* Numerical study of tire hydroplaning based on power spectrum of asphalt pavement and kinetic friction coefficient[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017(1):1-11.
- [15] 臧孟炎,许玉文,周涛. 三维非线性轮胎的五刚特性仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(1):129-133.
- ZANG M Y, XU Y W, ZHOU T. Numerical simulation of rigid characteristics of three dimensional nonlinear tire[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(1):129-133. (In Chinese)
- [16] 李晓杰,张程娇,王小红,等. 水的状态方程对水下爆炸影响的研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8):46-52.
- LI X J, ZHANG C J, WANG X H, *et al.* Numerical study on the effect of equations of state of water on underwater explosions[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8):46-52. (In Chinese)
- [17] SRIRANGAM S K, ANUPAM K, SCARPAS A, *et al.* Safety aspects on wet asphalt pavement surfaces through field and numerical modeling investigations [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014(2446): 37-51.