

不同流固耦合方法进行轮胎滑水性能仿真研究的对比分析

苑 阳¹, 刘从臻^{1*}, 钱 浩²

(1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:对比不同流固耦合方法对轮胎滑水性能进行仿真分析的结果。在Workbench平台中分别采用单向、双向流固耦合方法,对轮胎滑水模型在相同工况下的胎面动水压力分布和轮胎变形进行计算,并将两种方法仿真预测的临界滑水速度与经验公式计算值进行比对。结果表明,相对于单向流固耦合方法,双向流固耦合方法计算的相同时刻的动水压力峰值和轮胎变形量峰值较低,压力分布更均匀,临界滑水速度精确度较高,表明双向流固耦合方法更适用于轮胎滑水性能仿真研究。

关键词:轮胎;单向流固耦合;双向流固耦合;滑水;仿真;动水压力

中图分类号:TQ336.1⁺1;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2020)06-0329-06

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2020.06.0329



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

流固耦合方法涉及到流体与固体间的相互影响,其对流体域和固体域分别求解的特性可更加真实地模拟滑水现象的规律。近年来其在模拟轮胎滑水及深入解析滑水性能方面得到广泛应用。董斌等^[1-3]使用混合花纹轮胎仿真模型,采用大型有限元仿真软件Fluent计算获得了不同工况下胎面所受的水流动压力及胎面接触区域的水流速度分布。王国林等^[4-6]采用计算流体力学(CFD)的气-液二相流数值模型将轮胎滑水过程简化为流体动压力作用使轮胎产生附加变形,并将临界滑水速度仿真预测值与已有的经验公式计算值进行对比分析。

从计算原理上看,单向耦合算法仅建立在水流压力场对轮胎结构场影响的情况下,与实际滑水现象有差异,从本质上存在误差。

随着多场耦合技术和计算机软、硬件技术的发展,双向流固耦合算法的应用逐渐受到各行各业人士和学者的青睐。在轮胎滑水双向流固耦

合计算方面,臧孟炎等^[7]建立了基于Ls-Dyna软件的轮胎滑水模型,通过分析轮胎接地前缘形成的楔状水层逐渐被转动的车轮挤压进胎面排水沟槽的状态及其沿纵向排水沟槽喷出的状态等研究不同水膜厚度下车辆临界滑水速度的变化。H. Grogger等^[8]以光面轮胎和纵向花纹轮胎为研究对象,在考虑结构、大变形和与路面相互作用等因素的基础上,提出一种基于弱耦合流体-结构相互作用的集成软件工具,建立了有效且准确传递基本变量的耦合模块和处理流体域网格以匹配轮胎外表面的变形模块,将流体压力分布与轮胎仿真模型相结合,重复迭代运算,获得准确的流体压力分布和上浮力。

目前部分仿真分析方法未考虑轮胎与水层流固耦合的双向作用,而且很少通过流体域分析轮胎的滑水特性。因此,通过单向、双向流固耦合方法进行仿真对比,并基于流体域分析轮胎的滑水特性,从而明晰单向耦合算法的不足是很有必要的。

本研究以某厂家提供的185/60R15轮胎为例,基于Workbench平台的轮胎滑水流固耦合仿真分析方法,建立精确的轮胎滑水水流模型,在相同工况下进行单向、双向流固耦合算法的仿真对比。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875327);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018LE010)

作者简介:苑阳(1992—),男,山东淄博人,山东理工大学在读硕士研究生,主要从事汽车动力学方面的研究。

*通信联系人(lcz200811@163.com)

1 理论背景

1.1 流固耦合研究简介

随着计算科学以及数值分析方法的不断发展,流固耦合或流固交互作用研究从20世纪80年代以来受到了广泛关注,从数据传递角度出发,其可以分为单向流固耦合和双向流固耦合^[9]。一般来说,对于大多数耦合作用现象,如果只考虑静态结构性能,单向流固耦合分析已经足够,但是如果要考虑结构的动力学特性,双向流固耦合分析就必不可少。双向流固耦合同时考虑流体与固体,计算精度高,但是设置复杂,计算周期长。相比之下,单向流固耦合计算所需时间短、资源较少,仅适用于固体结构形变量不足以显著影响流体域的情况。单向流固耦合方法将流体域计算所得结果作为负荷施加到结构域中,而没有将结构域分析结果传递给流体域,设置相对简单,计算周期较短。

1.2 水流控制方程

本研究轮胎滑水固耦合模型中的水流流动满足质量守恒、能量守恒和动量守恒定律,这3个物理量守恒构成了水流的基本控制方程^[10]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_w u_i) = 0 \quad (1)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w E) = \sigma_w \varepsilon_w + \rho_w \dot{Q} \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_w u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_w u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_w g_i + F_i \quad (3)$$

式中 ρ_w ——流体密度;

t ——时间;

u_i, u_j ——速度张量;

x_i, x_j ——坐标张量;

E ——动能;

σ_w, ε_w ——流体柯西应力、应变;

$\dot{Q}$ ——能量耗散率;

p ——流体静压;

τ_{ij} ——应力张量;

$\rho_w g_i$ ——重力体积力;

F_i ——其他体积力。

1.3 湍流模型

适合湍动能(k)-耗散率(ε)模型的流动类型比较广泛,包括旋均匀剪切流、自由流(射流和混合层)、腔道流动和边界层流动。该模型 k 和 ε 的方程^[10]为

$$\rho_w \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho_w \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\rho_w \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}] + \rho_w C_1 S \varepsilon - \rho_w C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (5)$$

其中 $C_1 = \max[0.43, \eta/(\eta+5)]$, $\eta = Sk/\varepsilon$

式中 μ ——动力粘性系数;

μ_t ——湍流粘性系数;

G_k ——由于平均速度梯度引起的湍动能;

G_b ——由于浮力引起的湍动能;

Y_M ——可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响;

η ——用户修正系数;

S ——长度;

$C_{1\varepsilon}, C_2, C_{3\varepsilon}$ ——在Fluent软件中为默认值常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.90$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —— k 和 ε 的湍流普朗特数, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.20$ 。

1.4 滑水经验公式

一般而言,有限元模型建立及计算结果有效性最合适的验证方法是与试验结果进行对比,然而滑水试验对测试场地条件和设备要求很高,因此本仿真采用滑水经验公式对轮胎滑水模型的合理性进行验证。W. B. Horne等^[11]通过分析大量轮胎滑水的试验结果,提出了著名的NASA滑水经验公式:

$$v_p = 6.35 \sqrt{P} \quad (6)$$

式中 v_p ——临界滑水速度;

P ——轮胎充气压力。

NASA滑水经验公式只适合于积水较薄且被水覆盖的路面状况,为此,D. Dunlap等^[12]在公式(6)的基础上,提出了滑水速度与胎面花纹深度、

胎面宽度和水膜厚度之间关系的滑水预测公式:

$$v'_p = v_p + \frac{D_T}{D_w} + 60 \exp\{-3[D_w - (3 + \frac{D_T}{T})]\} \quad (7)$$

式中 v'_p ——预测临界滑水速度;

D_T ——胎面花纹深度, 一般情况下取值范围为1.6~10.0 mm;

D_w ——水膜厚度;

T ——胎面宽度。

本仿真分析中, $P=220$ kPa, $D_T=7$ mm, $D_w=10$ mm, $T=185$ mm, 代入公式(7)中, 计算 v'_p 为 $102.59 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($28.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

2 滑水物理模型

以某厂家提供的185/60R15轮胎为例, 通过参考文献[13]获得花纹沟排列方向及花纹类型等对滑水性能的影响, 进而建立垂直花纹轮胎和路面三维壳体模型, 并赋予轮胎和路面材料属性, 定义轮胎-路面接触算法, 进行网格划分及边界条件定义; 在CFD模块中建立流体域模型并进行网格划分和边界条件定义^[3]。

2.1 结构模型与边界条件设置

结构场计算的对象为轮胎和刚性路面。轮胎胎面与胎侧分开建模、划分网格, 共产生64 783个单元和36 483个节点, 如图1所示。

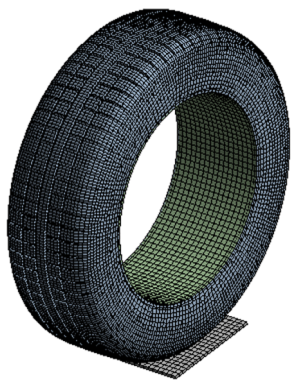


图1 轮胎网格模型

网格划分完成后对模型设置边界条件, 边界条件包括结构负荷和约束, 如图2所示。

2.2 流体域模型与边界条件设置

对分析水层建立六面体模型并与轮胎进行布尔减操作, 剔除两者相交部分, 而剩余部分即为流体域模型。然后进行网格划分和边界条件定义。

c: Transient Structural
Fluid Solid Interface
Time: 0.55 s
2019/4/10 17:24
A Fixed Support
B Displacement
C Pressure: -2.1e+005 Pa
D Force: 3920 N
E Fluid Solid Interface

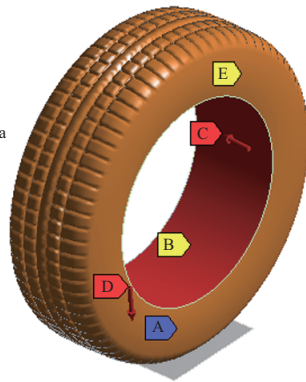


图2 轮胎边界条件

在Fluent软件中对流体域采用补片协调方法的四面体网格划分, 共产生196 350个四面体单元和40 333个节点, 如图3所示。流体域模型的边界条件定义为速度入口、压力出口以及壁面3种形式, 并且在速度入口施加Profile文件定义水的运动, 如图4所示。

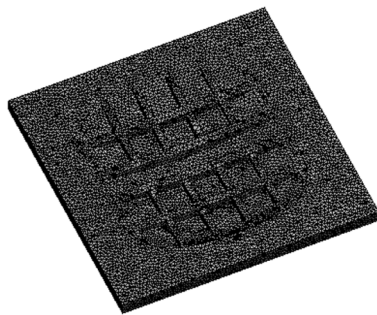


图3 流体域模型

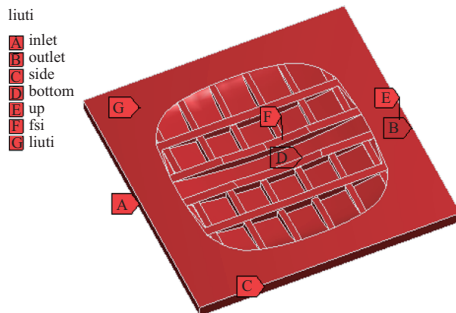


图4 流体域边界条件

2.3 求解器设置

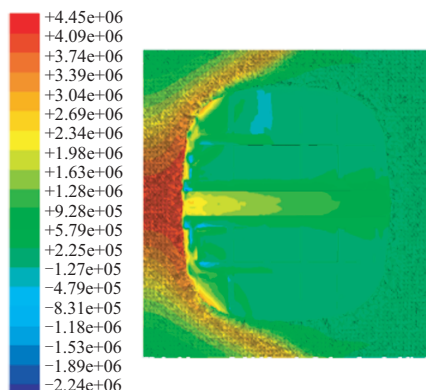
为了使单向、双向两种流固耦合算法的计算结果具有可比性, 不仅两种算法的边界条件设置、网格划分完全一致, 流体域、结构域对应的求解器设置也完全一致。其中, 流体域求解器设置项目

较多,主要设置项如下:基于压力传递求解,采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型、平顺可重塑的动网格和半隐式方法求解压力耦合方程组。

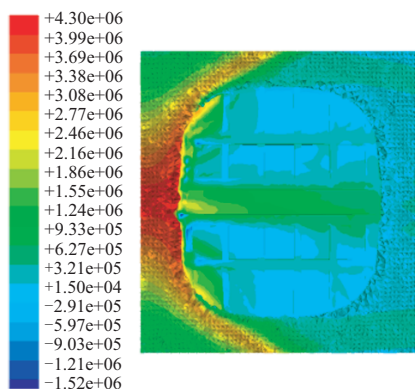
3 结果与分析

3.1 流体域

$t=1.5$ s时的单向、双向流固耦合流体域的动水压力分布如图5所示。



(a) 单向流固耦合



(b) 双向流固耦合

图5 流体域动水压力云图

由图5可见,两种方法的压力峰值位置分布情况基本一致,但在单向流固耦合流体域中接地前端胎面最大动水压力作用区域比较集中,说明该处水流动能大部分转化为作用于胎面的压力能,容易对轮胎产生明显的径向抬升作用,而双向流固耦合模拟轮胎变形改变了周围水流的压力场,正、负压力均降低,使压力分布相对较为均匀,难以对胎面形成集中有效的径向抬升作用,从而降低了轮胎发生滑水现象的几率。

将流体域流固耦合面处的动水压力等于或大于轮胎所受负荷时定义为轮胎发生完全滑水的时刻。在相同工况下轮胎-干路面法向接触力及单向、双向流固耦合动水压力随时间的变化曲线如图6所示。

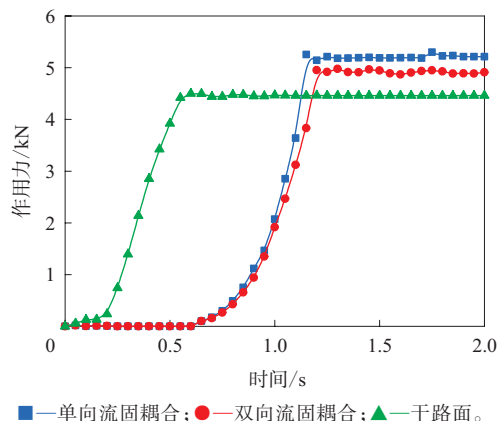


图6 在相同工况下轮胎-干路面法向接触力及单向、双向流固耦合动水压力随时间的变化曲线

由图6可见,单向流固耦合计算发生完全滑水时刻为 $t=1.1$ s,而双向流固耦合计算发生完全滑水时刻为 $t=1.2$ s。

从图6可直观地看出不同耦合方法模拟整个滑水过程流固耦合面处动水压力变化的异同,动水压力曲线变化趋势基本一致,动水压力变化大致分为3个阶段。

(1) 充气加载阶段。该阶段流速设置为零。

(2) 水流冲击阶段。待轮胎充气加载稳定后,水逐渐加速冲击轮胎,由于垂直花纹沟槽的排水能力有限,两种算法的胎面所受动水压力都呈现迅速增大的趋势,而双向流固耦合模拟轮胎变形改变了周围水流的压力场,正、负压力均降低,使相同时刻动水压力较小,因此该阶段单向流固耦合计算的动水压力先与轮胎所受法向负荷平衡,即单向流固耦合模拟轮胎滑水发生先于双向流固耦合模拟。

(3) 完全滑水阶段。该阶段轮胎动水压力大于或等于所受法向负荷,轮胎处于完全滑水状态。

3.2 轮胎结构性能分析与对比

以接触面中心为参考点, $t=1.5$ s时轮胎的变形云图如图7所示。

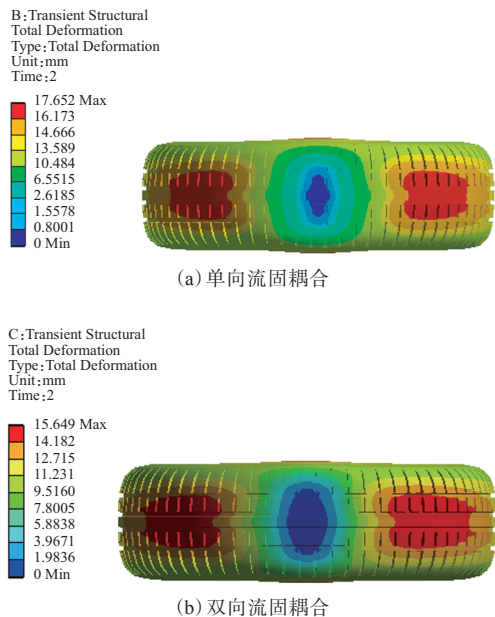


图7 轮胎变形云图

由图7可见,该时刻单向、双向流固耦合计算的轮胎最大变形分别为17.652和15.649 mm。轮胎最大变形发生在接地区域前后两侧,并且变形量分布具有对称性;由于轮胎接地前缘楔形区域的存在,轮胎与流体互相挤压,使该区域水流出现滞留,从而使胎面中间区域动水压力高于胎侧区域;相同时刻下,双向流固耦合计算的最大动水压力和最大变形量小于单向流固耦合计算结果。

为了方便对两种流固耦合方法的计算结果进行对比,生成相同工况下轮胎变形随时间的变化曲线,如图8所示。

由图8可见,轮胎发生变形也可大致分为3个

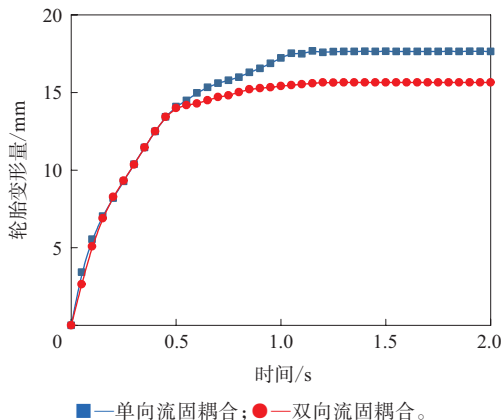


图8 轮胎变形量随时间的变化曲线

阶段。

(1) 充气加载阶段。该阶段两种算法的边界条件设置、网格划分完全一致,结构域对应求解器设置也完全一致,因此轮胎发生的变形量也趋于一致。

(2) 水流冲击阶段。该阶段是轮胎充气加载稳定后水逐渐加速冲击轮胎导致动水压力升高的过程。两种耦合方法都表现出轮胎的非线性变形。同时,相同时刻下单向流固耦合计算的变形量逐渐超过双向流固耦合,因而提前达到变形量的稳态值,即单向流固耦合计算先发生完全滑水现象。

(3) 完全滑水阶段。该阶段轮胎的垂直负荷完全由流体动水压力来平衡,轮胎的变形量也趋于稳定。

3.3 误差分析

在流体域模型的边界条件设定速度入口,并且在速度入口导入水流运动速度与时间的关系文件。通过单向、双向流固耦合仿真分析得到的轮胎临界滑水速度分别为25.80和27.50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (分别对应 $t=1.1$ s和 $t=1.2$ s时刻)。

将仿真分析得到的临界滑水速度与经验公式计算值(28.50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)进行对比,单向、双向流固耦合计算临界滑水速度的相对误差分别为9.47%和3.51%,由此在一定程度上说明了双向流固耦合模拟轮胎滑水性能比单向流固耦合模拟更可靠。

4 结论

为了比较轮胎滑水单向、双向流固耦合两种方法计算结果的差异,本研究以185/60R15轮胎为例,基于Workbench平台进行轮胎滑水流固耦合仿真分析,得到如下结论。

(1) 采用单向、双向流固耦合方法计算的动水压力分布迥异,双向流固耦合方法计算的表面正、负压力峰值均降低,压力分布更均匀。

(2) 轮胎最大变形发生在接地区域前后两侧,并且变形量分布具有对称性;由于轮胎接地前缘楔形区域的存在,轮胎与流体互相挤压,使该区域水流出现滞留,从而使胎面中间区域动水压力高于胎侧区域;相同时刻下,双向流固耦合计算的

最大动水压力和最大变形量小于单向流固耦合计算结果。

(3) 相对经验公式计算值, 单向、双向流固耦合仿真预测的临界滑水速度的相对误差分别为9.47%和3.51%, 可见双向流固耦合方法的计算结果更真实合理, 从原理上提高了计算精度, 在一定程度上可说明双向流固耦合方法模拟轮胎滑水过程的可靠性。

参考文献:

- [1] 董斌, 唐伯明, 刘唐志, 等. 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.
- [2] 董斌, 陈明磊, 唐伯明, 等. 基于FLUENT软件的雨天轮胎动水压强的影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(4): 120-125.
- [3] 吴琦, 杨军. 基于FLUENT软件轮胎滑水现象模拟研究[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(2): 104-109.
- [4] 王国林, 邓元, 金梁, 等. 轮胎滑水特性的CFD分析[J]. 橡胶工业, 2013, 30(7): 417-422.
- [5] 王国林, 金梁. 轮胎滑水的CFD计算方法研究[J]. 计算力学学报, 2012, 29(4): 594-598.
- [6] 周海超, 陈磊, 翟辉辉, 等. 基于CFD的轮胎滑水及其性能影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 110-116.
- [7] 臧孟炎, 朱林培, 应卓凡. 3-D轮胎模型滑水仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(11): 2999-3002.
- [8] Grogger H, Weiss M. Calculation of the Hydroplaning of a Deformable Smooth-shaped and Longitudinally-grooved Tire[J]. Tire Science and Technology, 1997, 25(4): 265-287.
- [9] 宋学官, 蔡林, 张华. ANSYS流固耦合分析与工程实例[M]. 北京: 中国水利与水电出版社, 2012: 5-135.
- [10] 江帆, 徐勇程, 黄鹏. FLUENT高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 8-19.
- [11] 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.
- [12] Dunlap D, Fancher P S. Pavement Skid-Resistance Requirements[J]. Transportation Research Record, 1976(584): 15-21.
- [13] Wies B, Roeger B, Mundl R. Influence of Pattern Void on Hydroplaning and Related Target Conflicts[J]. Tire Science and Technology, 2009, 37(3): 187-206.

收稿日期: 2019-12-30

Comparative Analysis of Different FSI Methods for Simulation Study of Tire Hydroplaning Performance

YUAN Yang¹, LIU Congzhen¹, QIAN Hao²

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The simulation analysis results of tire hydroplaning performance by using different flow solid interaction (FSI) algorithms were compared. The hydrodynamic pressure distribution on tire tread and tire deformation in hydroplaning were obtained by one-way and two-way FSI methods in the Workbench platform under the same working conditions. The critical hydroplaning speeds predicted by the two algorithms were compared with that calculated by the empirical formula. The results showed that, compared with one-way FSI, the peak hydrodynamic pressure and maximum tire deformation calculated by two-way FSI were lower at the same stage, the pressure distribution was more uniform and the critical hydroplaning speed was more accurate, indicating that two-way FSI algorithm was more suitable for the simulation study of tire hydroplaning performance.

Key words: tire; one-way FSI; two-way FSI; hydroplaning; simulation; hydrodynamic pressure

声明 《轮胎工业》《橡胶工业》《橡胶科技》期刊刊登的一切内容未经许可不得擅自使用和转载, 经许可转载的必须注明来源, 否则将追究法律责任。欢迎一切诚信友好的合作。