

轿车轮胎水滑现象仿真技术的研究

冯希金,朱作勇,王亦菲,周 进

(赛轮金宇集团股份有限公司,山东 青岛 266045)

摘要:以轿车轮胎为研究对象,采用Abaqus软件CEL技术,研究带花纹轮胎和光面轮胎稳态自由滚动和瞬态滚动的建模技术,实现轮胎水滑现象仿真。分别对不同行驶速度、不同积水深度下带花纹轮胎的水滑现象进行仿真,通过对比不同情况下轮胎与路面的垂直接触力以及带花纹轮胎与光滑轮胎的水滑现象表明,该仿真技术可靠,适用于带花纹轮胎和光面轮胎水滑现象的研究。

关键词:轿车轮胎;带花纹轮胎;光面轮胎;水滑现象;仿真技术

中图分类号:TQ336.1;U461.5⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-5448(2017)08-19-06

随着轮胎标签法的实施,轮胎的湿抓着力受到广泛关注。轮胎的湿抓着力既与胎面胶配方有关,又与胎面的花纹结构有关,能快速排出水的胎面花纹有利于提高轮胎的湿抓着力。胎面花纹水滑特性的研究一方面可以在光面轮胎上刻花,然后通过湿抓着力试验考察花纹的排水能力,另一方面可以通过轮胎水滑现象仿真技术考察花纹的排水能力。水滑现象仿真技术在花纹设计阶段利用计算机技术进行,该方法周期短、费用少。

A. L. Browne^[1]最早开展轮胎水滑特性的试验研究。S. K. Agrawal等^[2]研究了轮胎变形与水滑现象的关系。H. Grogger等^[3]采用自编的有限元程序进行了光面轮胎和带有纵沟光面轮胎的水滑现象仿真计算。K. S. Lee^[4]采用有限元方法计算了花纹刀槽对瞬态水滑现象的影响。E. Seta等^[5]利用MSC Dytran软件进行了轮胎水滑现象的研究,该研究轮胎采用拉格朗日网格,流体区域采用欧

拉网格,分别对光面轮胎和带花纹轮胎的水滑现象进行了对比研究。T. Okano等^[6]利用Dytran软件进行了轮胎排水性能仿真,分别计算了光面轮胎不同宽度纵沟对排水性能的影响。M. Koishi等^[7]采用LS-Dyna软件进行了简单花纹水滑特性仿真的研究。M. Donatellis等^[8]采用Abaqus软件的CEL技术实现了轮胎水滑现象的仿真。李兵等^[9]采用Abaqus软件进行了轮胎水滑现象的仿真,实现了对不同花纹轮胎湿抓着力预测。王长建等^[10]采用LS-Dyna的ALE技术实现了轮胎水滑现象的仿真。

综上所述,大型的有限元仿真软件可进行轮胎水滑现象仿真的研究。轮胎水滑现象仿真可由Abaqus软件一系列的仿真过程实现,既用到Abaqus软件Standard功能,也用到Explicit功能,集Abaqus软件仿真功能大成,其仿真计算流程示意如图1所示。



图1 Abaqus软件轮胎水滑现象仿真的计算流程示意

本工作以轿车轮胎为研究对象,采用Abaqus软件的CEL技术,研究带花纹轮胎和光面轮胎稳态自由滚动和瞬态滚动的建模技术,实现轮胎水滑

现象仿真。

1 带花纹轮胎的有限元建模

带花纹轮胎有限元建模采用花纹和光面轮胎组合的建模方法,将轮胎材料分布分成花纹部分和光面轮胎部分。首先在三维设计软件中生成单

作者简介:冯希金(1970—),男,山东青岛人,赛轮金宇集团股份有限公司高级工程师,博士,主要从事轮胎力学、噪声仿真技术的研究。

节距花纹实体图;然后导入Abaqus CAE,进行单节距花纹的有限元网格划分,光面轮胎部分按照常规方法进行网格划分,骨架材料仍采用SFMGAX1型的Rebar单元;再然后采用Abaqus软件的轴对称模型旋转生成功能形成单节距轮胎;最后采用Abaqus软件的周期性模型生成功能形成三维完整轮胎,并进行静态加载仿真,其流程如图2所示。

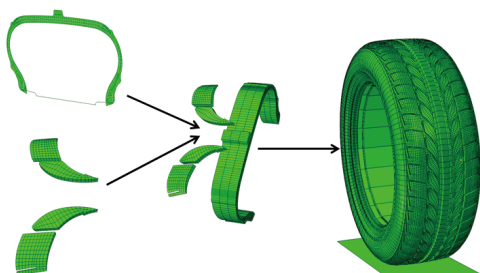


图2 带花纹轮胎的建模流程示意

2 驱动制动和自由滚动仿真

进行水滑现象仿真之前,轮胎必须具有一定的行驶速度并在该速度下达到动态平衡,因此轮胎需要在一定速度下进行驱动制动和自由滚动仿真,其主要的计算目的是求解轮胎的自由滚动角速度。文献[11]中轮胎自由滚动角速度的求解采用子程序方法,方法简单易行,完全由软件自动进行。

3 水滑现象仿真建模

水滑现象仿真建模采用Abaqus软件CEL技术,即耦合的拉格朗日-欧拉流固耦合技术,该技术中轮胎采用拉格朗日网格,流体区域采用欧拉网格。欧拉网格的单元类型是EC3D8R,也是一种减缩积分单元。欧拉网格单元为流体区域,理论上为更好地表现水与轮胎之间的相互作用,网格越细越好,但这会大幅增加单元数量,导致计算运行速度缓慢,因此网格的疏密需合理。

带花纹轮胎水滑现象仿真模型如图3所示。图3中路面的空间位置、欧拉网格区域的空间位置以及轮胎的空间位置需要根据自由滚动状态计算得到的路面与轮胎相互空间位置确定。

水滑现象仿真需导入轮胎自由滚动状态的结果,也就是要实现Standard模块功能向Explicit功能

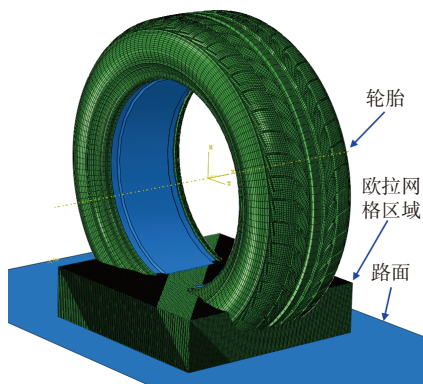


图3 带花纹轮胎水滑现象仿真模型

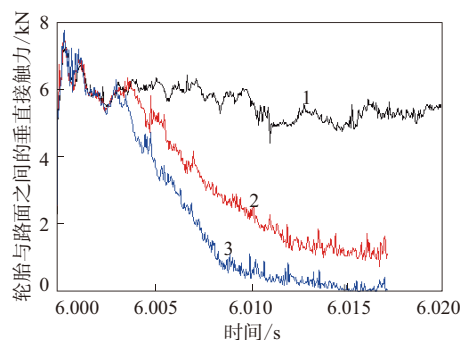
的转换,通过Abaqus软件提供的关键词*import实现此转换。

4 带花纹轮胎水滑现象仿真

4.1 行驶速度对轮胎水滑现象的影响

通过路面与轮胎之间的垂直接触力判断轮胎是否发生水滑。相同胎面花纹和积水深度下,不同行驶速度导致路面与轮胎之间的垂直接触力不同,轮胎与路面之间的摩擦力不同。当轮胎行驶速度增大,水的动压力增大,路面与轮胎的垂直接触力减小,易发生水滑现象。本研究分别对40,80和100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶速度下带花纹轮胎水滑现象进行仿真,积水深度均为10 mm。

行驶速度对轮胎与路面之间垂直接触力的影响如图4所示。从图4可以看出:行驶速度为40 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,轮胎与路面之间的垂直接触力下降不明显,这说明轮胎与路面之间的接触保持良好,即轮胎的湿抓着力较大,不会发生水滑;当行驶速度达到100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,轮胎与路面的垂直接触力降至0,轮胎发生水滑。



轮胎行驶速度 ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$): 1—40; 2—80; 3—100。

图4 行驶速度对轮胎与路面之间垂直接触力的影响

不同行驶速度下的轮胎接地印痕照片如图5—7所示。从图5—7可以看出,当行驶速度为100 km·h⁻¹时,轮胎被水完全抬起,与路面无接触。

不同行驶速度下水膜分布情况如图8—10所示,行驶速度为100 km·h⁻¹时轮胎与水膜的相互关系示意如图11所示。从图8—10可以看出:当行驶速度为40 km·h⁻¹时,进入路面与轮胎之间的水较少;当行驶速度为80 km·h⁻¹时,进入路面与轮

胎之间的水增多;当行驶速度达到100 km·h⁻¹时,水已完全进入路面与轮胎之间,轮胎与路面无接触,即无湿抓着力。

4.2 积水深度对轮胎水滑现象的影响

积水深度对轮胎水滑现象影响较大,本研究分别对4, 10和16 mm积水深度下带花纹轮胎水滑现象进行仿真,轮胎行驶速度均为80 km·h⁻¹。

积水深度对轮胎与路面之间垂直接触力的影

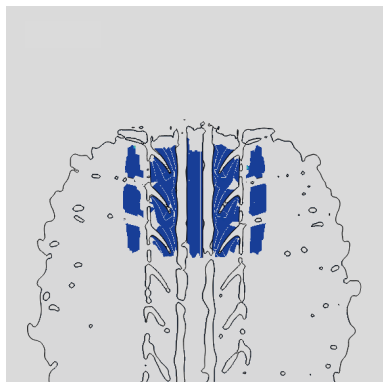


图5 行驶速度为40 km·h⁻¹时的接地印痕照片

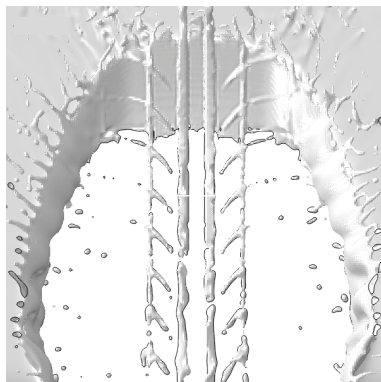


图8 行驶速度为40 km·h⁻¹时的水膜分布

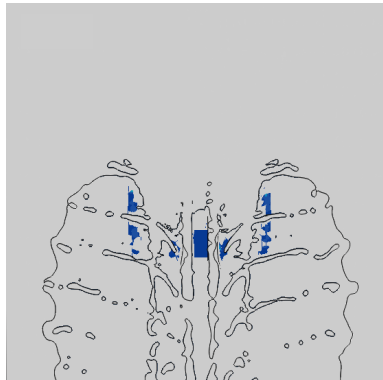


图6 行驶速度为80 km·h⁻¹时的接地印痕照片

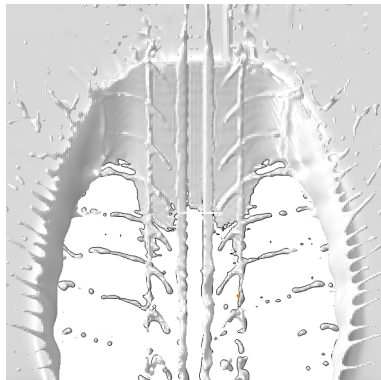


图9 行驶速度为80 km·h⁻¹时的水膜分布

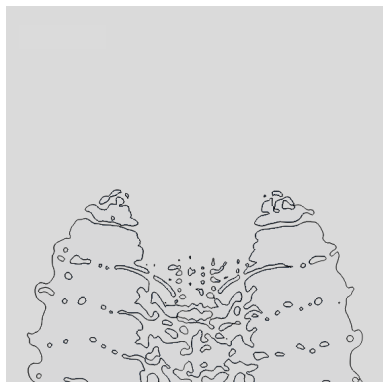


图7 行驶速度为100 km·h⁻¹时的接地印痕照片

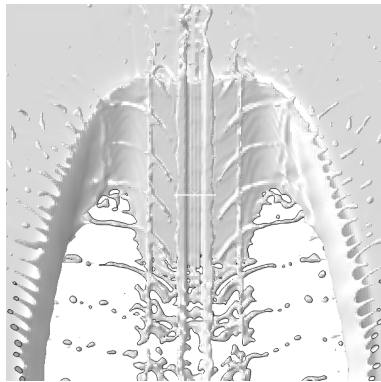


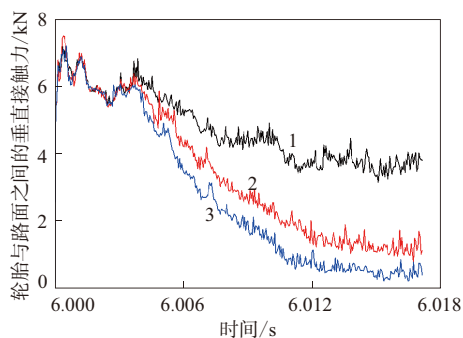
图10 行驶速度为100 km·h⁻¹时的水膜分布



图11 行驶速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时轮胎与水膜的相互关系示意

响如图12所示。从图12可以看出:随着积水深度增大,轮胎与路面之间的垂直接触力减小;当积水深度为16 mm时,轮胎与路面之间的垂直接触力几乎为0,这表明此时的轮胎已脱离路面。

不同积水深度下的轮胎接地印痕照片如图13—15所示。从图13—15可以看出:随着积水深度增大,接地印痕减小;当积水深度为16 mm时,几



积水深度(mm): 1—4; 2—10; 3—16。

图12 积水深度对轮胎与路面之间垂直接触力的影响

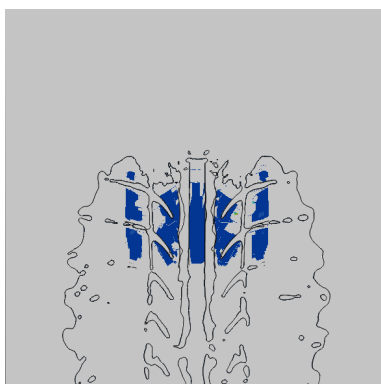


图13 积水深度为4 mm时的接地印痕照片

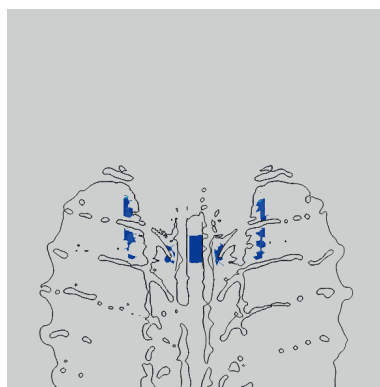


图14 积水深度为10 mm时的接地印痕照片

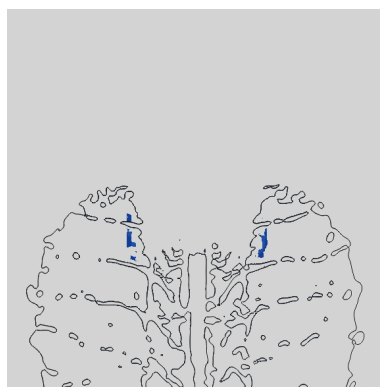


图15 积水深度为16 mm时的接地印痕照片

乎无接地印痕,这表明此时轮胎已经被水抬起,脱离路面,丧失了湿抓着力。

不同积水深度下水膜分布情况如图16—18所示,积水深度为16 mm时轮胎与水膜的相互关系示意如图19所示。从图16—18可以看出:随着积水深度增大,进入路面与轮胎之间的水越来越多;当积水深度为16 mm时,路面与轮胎之间完全被水充满,轮胎被抬起,脱离地面,失去湿抓着力。

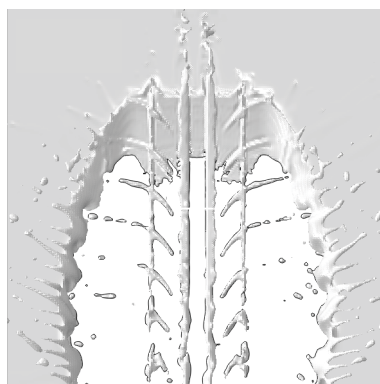


图16 积水深度为4 mm时的水膜分布

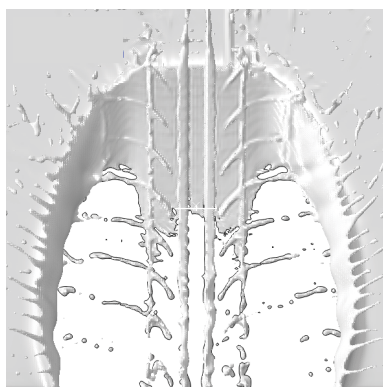


图17 积水深度为10 mm时的水膜分布

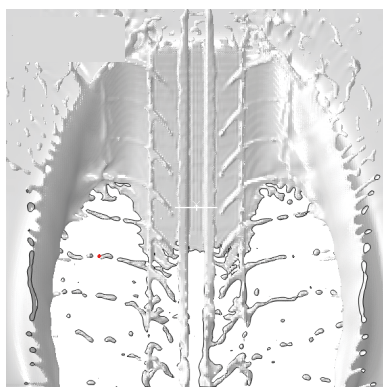


图18 积水深度为16 mm时的水膜分布

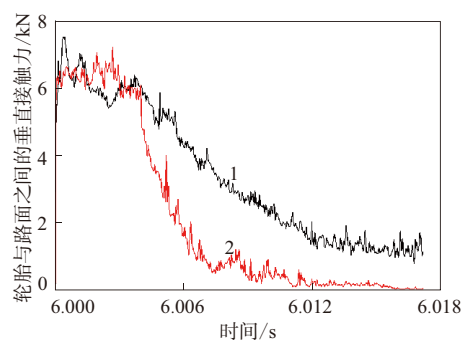


图19 积水深度为16 mm时轮胎与水膜的相互关系示意

5 带花纹轮胎与光面轮胎水滑现象对比

为进一步验证轮胎水滑现象仿真技术的可靠性,本研究选取相同规格的带花纹轮胎和光面轮胎进行水滑现象仿真,轮胎行驶速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,积水深度为10 mm。

在相同行驶速度和积水深度下,光面轮胎和带花纹轮胎与路面之间的垂直接触力如图20所示。从图20可以看出:光面轮胎进入积水区后,轮胎与



1—带花纹轮胎;2—光面轮胎。

图20 光面轮胎和带花纹轮胎与路面之间的垂直接触力
路面之间的垂直接触力降至0,轮胎呈水滑状态;带花纹轮胎与路面之间的接触力仍保持在1 kN左右。

光面轮胎接地印痕照片如图21所示。从图21可以看出,轮胎已脱离路面。

光面轮胎和带花纹轮胎的水膜分布情况如图22和23所示。从图22和23对比可知,光面轮胎比带花纹轮胎更快进入水滑状态。

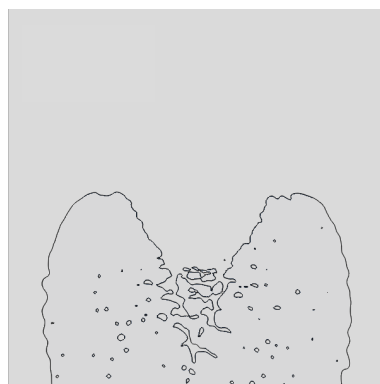


图21 光面轮胎接地印痕照片

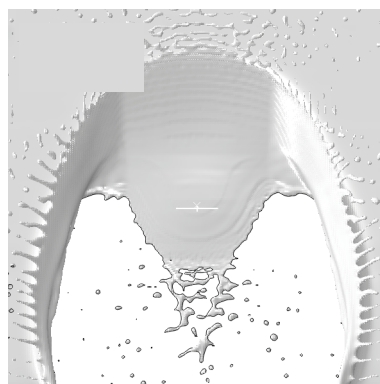


图22 光面轮胎的水膜分布

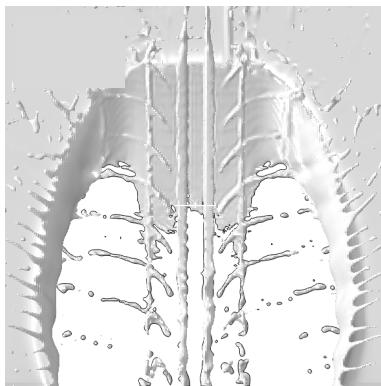


图23 带花纹轮胎的水膜分布

6 结语

本工作所采用轮胎水滑现象的仿真方法可较好地模拟仿真轮胎在各种条件下的水滑现象。试验中轮胎与路面之间的垂直接触力可评价轮胎的排水能力,从而评价轮胎的湿抓着力。在今后不同轮胎花纹设计方案的对比试验中可不断验证和完善此技术。

参考文献:

- [1] Browne A L. Tire Deformation during Dynamic Hydroplaning[J]. TSTCA, 1975, 3 (1): 16-28.

- [2] Agrawal S K, Henry J J. A Simple Tire Deformation Model for the Transient Aspect of Hydroplaning[J]. TSTCA, 1980, 8 (3-4): 23-36.
- [3] Grogge H, Weiss M. Calculation of the Hydroplaning of a Deformable Smooth-shaped and Longitudinally-grooved Tire[J]. TSTCA, 1997, 25 (4): 265-287.
- [4] Lee K S. Effects of Sipes on the Viscous Hydroplaning of Pneumatic Tires[J]. TSTCA, 1998, 26 (1): 23-35.
- [5] Seta E, Nakajima Y, Kamegawa T, et al. Hydroplaning Analysis by FEM and FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning[J]. TSTCA, 2000, 28 (3): 140-156.
- [6] Okano T, Koishi M. A New Computational Procedure to Predict Transient Hydroplaning Performance of a Tire[J]. TSTCA, 2001, 29 (1): 2-22.
- [7] Koishi M, Okano T, Olovsson L, et al. Hydroplaning Simulation Using Fluid-structure Interaction in LS-Dyna[A]. 3rd European LS-Dyna User Conference. 2001.
- [8] Donatellis M, Gelosa E, Sangalli R. Virtual Treaded Tire Simulation as a Design Predictive Tool: Application to Tire Hydroplaning[A]. Simulia Customer Conference. London: 2009.
- [9] 李兵, 李炜, 吴福麒. 基于Abaqus CEL方法的轮胎滑水仿真[A]. Simulia中国区用户大会. 苏州: 2010.
- [10] 王长建, 臧孟炎. 复杂花纹子午线轮胎水滑特性仿真研究[J]. 橡胶工业, 2011, 58 (10): 620-624.
- [11] 冯希金, 危银涛, 郑小刚, 等. 论轮胎的自由滚动力学[J]. 橡胶工业, 2013, 60 (9): 517-526.

收稿日期: 2017-02-09

Research on Simulation Technology of Hydroplaning of Passenger Car Tire

FENG Xijin, ZHU Zuoyong, WANG Yifei, ZHOU Jin

(Sailun Jinyu Group, Qingdao 266045, China)

Abstract: Taking a passenger car tire as the research object, the models of tire with tread pattern and smooth tire under steady-state free rolling and transient rolling were studied by using Abaqus software and CEL technology, and the simulation of tire hydroplaning was achieved. The hydroplaning of tires with tread pattern was simulated under different driving speed and different water depth. The vertical contact forces between tires and pavement under different rolling status, and the hydroplaning results of tire with tread pattern and smooth tire were studied and compared. The results indicated that the simulation technology was reliable and suitable for studying the hydroplaning of tires with and without tread pattern.

Key words: passenger car tire; tire with tread pattern; smooth tire; hydroplaning; simulation technology

欢迎参加“华工佛塑杯”第8届全国橡胶制品
技术研讨会(2017年11月 广州)征文活动