

轿车子午线轮胎滚动阻力仿真计算及验证

付新华, 李昊, 荣英飞, 刘肖英, 李栋林

(三角轮胎股份有限公司, 山东威海 264200)

摘要:介绍一种基于ABAQUS软件计算滚动阻力的方法。首先提取轮胎静载工况下的应变、应力等接地信息,再结合胶料的损耗因子计算轮胎温度场分布及滚动阻力。对185/65R14轿车子午线轮胎仿真结果进行了验证。结果表明,有限元分析与试验测得的滚动阻力数值有差距,但是变化趋势及幅度基本吻合。该仿真方法可以有效预测结构、胶料调整对轮胎滚动阻力的影响。

关键词:轿车子午线轮胎;能量损失;滚动阻力;有限元分析

中图分类号:U463.341⁺.4/.6;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2016)08-0451-04

轮胎滚动阻力是由空气阻力、摩擦以及轮胎内部的能量损失等组成的一个虚拟力。其中在滚动过程中由于材料的滞后特性产生的能量损失占绝大部分。目前获得轮胎滚动阻力最有效的方法是通过滚动阻力试验机进行测试,不过测试必须要制作样胎,如果有多个方案进行验证,那么得到结果的周期会很长。

滚动工况下的轮胎在有限元中可以看作是热-构耦合模型,如果建立合适的有限元分析模型,通过仿真计算得到想要调整的各个方案的滚动阻力结果,那么很快就可以优选出合适的调整方案,不仅缩短开发周期,还可以降低研发成本。

本工作基于ABAQUS软件进行静载分析,然后获得稳态滚动工况下能量损失,最终得到滚动阻力数据,考察仿真结果与试验数据的可比性。

1 试验测试

本工作按照ISO 28580《轮胎滚动阻力测试方法》和GB/T 29040—2012《汽车轮胎滚动阻力试验方法 单点试验和测量结果的相关性》标准应用测力法进行测试。转鼓直径 2 m;工况 210 kPa/4 000 N,测试速度 80 km·h⁻¹。

首先将试验轮胎充气,在滚动阻力试验室停放3 h以上,然后将气压调整到210 kPa后把轮胎放置在转鼓外表面,如图1所示。

作者简介:付新华(1985—),男,山东莘县人,三角轮胎股份有限公司工程师,硕士,主要从事轮胎性能仿真及材料性能研究测试工作。



图1 滚动阻力测试示意

转鼓以80 km·h⁻¹的速度带动轮胎匀速滚动,约30 min后轮胎达到稳定滚动状态,即热稳定状态。此时轮胎动半径保持不变,仪器通过传感器获得此时的动半径,从而得到正转的滚动阻力(F_r),并在正转结束时输出附加损失(F_{pi}),接着进行反方向滚动10 min,轮胎达到稳定状态后输出反转的 F_r 和 F_{pi} ,最后将结果相加取均值作为该轮胎的滚动阻力值,并将进行温度修正的结果作为最终的试验数据。

$$C_r = F_r / F_1$$

$$F_r = F_1 \left(1 + \frac{r_1}{R} \right) - F_{pi}$$

式中, C_r 为滚动阻力系数; F_1 为加载负荷; F_r 为轮轴力; R 为轮辋直径; r_1 为动半径,即稳定状态下轮轴中心到转鼓外表面的距离,不是滚动半径。

滚动阻力测试要获得的是轮胎行驶单位距离的能量损失,但是在实际测试时转鼓轴承力、转鼓的空气阻力及轮胎轮辋组合体的空气阻力等都会对结果造成影响,这些力统称为附加损失。因此

在滚动阻力计算时要将附加损失考虑在内。

由于选择测力法进行滚动阻力计算,因此要选择分离法计算附加损失,即将施加于轮胎的负荷减小到保持轮胎按照规定的速度滚动而不滑动的状态,仪器根据该工况下的轮轴力、动半径等来计算附加损失,公式如下:

$$F_{pi} = F_i \left(1 + \frac{r_i}{R}\right)$$

2 有限元分析原理

2.1 滞后损失

轮胎滚动阻力是一个综合力,其中材料滞后损失贡献90%左右。本工作所用的仿真分析方法其实就是计算由滞后损失产生的滚动阻力^[1]。

轮胎在以一定的气压、负载下滚动过程中会产生变形,在接触到离开地面的瞬间会伴随压缩、剪切、弯曲等变形。由于橡胶材料的滞后特性,在周期的变形-恢复过程中会产生滞后损失,这部分能量一部分释放到轮胎外部、一部分以气体的形式留在轮胎腔体内,其余的会通过传热的方式使轮胎内部的温度重新分布。如果以恒定的速度滚动,随着滚动时间的延长,轮胎内部的温度场会达到平衡,此时轮胎内部不再进行热传递,称为热稳定状态。

通过上述的试验测试介绍,可以认为滚动阻力测试时就是计算达到热稳定状态之后的能量损失。同样仿真分析也是先计算得到轮胎在一定工况下的稳定温度场,然后计算此时的能量损耗,再根据滚动距离等计算得到滚动阻力结果^[2]。

2.2 计算原理

有限元分析滚动阻力计算流程如图2所示。其中能量损失(E)计算公式为

$$E = \sigma_0 \varepsilon_0 \tan \delta$$

式中, σ_0 和 ε_0 为负载后的应力、应变; $\tan \delta$ 为损耗因子,随温度变化。

通过充气半径和静载半径近似得到动半径,计算轮胎滚动1周的距离,然后由稳定状态下每周的能量损失除以滚动距离就可以得到其滚动阻力结果^[3],计算公式如下:

$$F_r = E/L$$

$$L = 2\pi[k(r_L - r_1) + r_1]$$

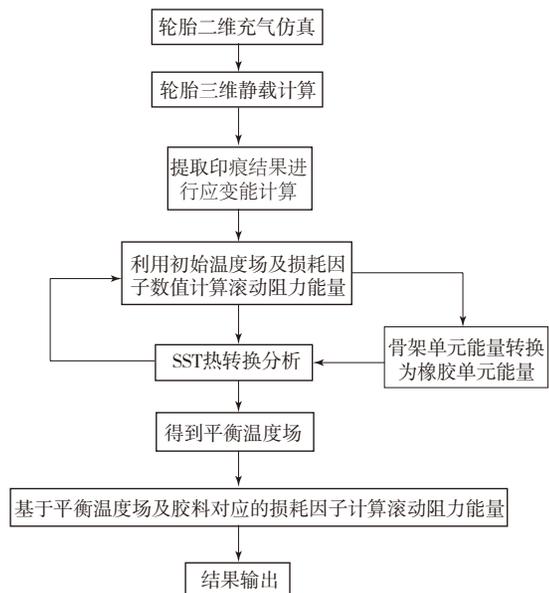


图2 有限元分析滚动阻力计算流程

式中, L 为轮胎滚动1周的距离; k 为滚动半径的修正系数; r_L 为轮胎充气后半径; r_1 为轮胎静载时轮轴中心到接触面的距离。

2.3 滚动阻力仿真计算

本工作以185/65R14轿车子午线轮胎为例进行滚动阻力计算,其二维和三维模型见图3和4。



图3 轮胎二维有限元模型



图4 轮胎三维有限元模型

首先对有限元分析模型进行二维充气、三维静载分析,加载工况为210 kPa/4 000 N。然后调用计算结果进行热分析,最终得到滚动阻力结果。橡胶材料单元类型为CGAX3H和CGAX4H,应用Yeoh本构模型表征其超弹性,骨架材料假设为各向同性,通过rebar单元嵌入橡胶模型中,仿真模型及计算信息如表1所示。

表1 有限元分析模型信息

模 型	节点数	单元数	自由度	迭代次数
二维	3 967	2 277	8 793	266
三维	775 442	440 462	1 674 552	91

以静载计算的应力、应变结果近似代替稳态滚动时的数据,然后进行滚动阻力计算。首先进行热分析,得到“热稳定”状态时的轮胎内部温度场分布,如图5所示;然后根据各节点温度及该温度下的损耗因子值得到表征滚动阻力的能量损失结果,如图6所示。

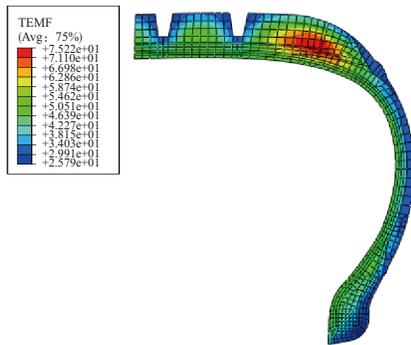


图5 轮胎温度场分布

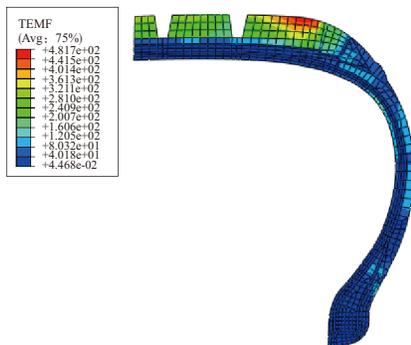


图6 轮胎能量损失分布

根据动半径计算出轮胎滚动1周的距离,进而得到滚动阻力结果及各部件对滚动阻力的贡献量。 $F_r=44.90$ N。各部件对滚动阻力的贡献率(%)如下:胎面 42.79,胎面基部 11.27,冠带层

5.38,胎侧 7.23,胎体 5.28,气密层 5.79,带束层 2.88,趾口 3.58,三角胶 1.5,冠带帘线 8.25,胎体帘线 5.39;带束层帘线 0.26;胎圈 0.21。

2.4 仿真误差分析

计算得到滚动阻力系数 $C_r=11.224$,而试验得到的 $C_r=10.453$ (见表2),仿真与试验得到的结果相差明显,这是因为仿真分析时对轮胎模型进行了简化。

首先,该方法没有考虑胎面花纹、空气阻力等因素对结果的影响;再者,滚动阻力计算模型是热-构耦合模型,因此基于温度、应变等因素对材料参数设置得合适与否会对仿真结果产生影响,而目前该模型中定义的超弹性材料参数没有考虑温度的影响,而 $\tan\delta$ 也只是基于一种应变幅度得到的,不能精确地表征轮胎实际滚动状态,从而导致仿真与试验结果相差较大。

同时根据上述分析可见,该方法可以得到轮胎温度场信息、滚动阻力结果及各部件的贡献量。如果改变轮胎结构、胶料配方等,通过该仿真计算可以体现出差异并与试验结果变化趋势具有可比性,则该方法对轮胎设计也具有应用价值。

3 结果验证分析

为了验证仿真与试验趋势能否一致,本工作基于185/65R14轮胎设计了3种结构S01,S02和S03,并配以3种胎面胶T01,T02和T03,共制定6个方案分别进行仿真分析及试验测试,具体信息见表2(方案1即为原方案)。

表2 不同方案描述及结果统计

方 案	方案描述		C_r 及变化幅度			
	胎面配方	结构	有限元分析	变化幅度/%	试验	变化幅度/%
方案1	T01	S01	11.224	—	10.453	—
方案2	T02	S01	10.117	-9.86	9.365	-10.41
方案3	T03	S01	9.136	-18.60	8.523	-18.46
方案4	T02	S02	9.023	-19.61	8.372	-19.91
方案5	T03	S02	8.241	-26.68	7.583	-27.46
方案6	T02	S03	10.032	-10.62	9.298	-11.05

其中结构S02与S01相比,在冠带条、三角胶高度、反包端点等进行了调整,调整幅度较大;而结构S03在S01基础上只改变带束层角度。

将上述6个方案分成相同结构改变胎面胶(方

案1—3)、相同胶料改变结构(方案2,4,6)、同时改变结构和胎面胶(方案2—6)3种变化趋势,分别进行对比。

3种胎面胶60℃下损耗因子排序为:T01>T02>T03。对比方案1—3的仿真及试验结果均可发现,调整胎面胶(损耗因子)对滚动阻力影响明显,此外仿真得到的 C_r 均比试验结果大,不过变化趋势及幅度与试验结果一致,因此可以用仿真结果预测调整胶料配方后滚动阻力的变化趋势。

同样,方案2,4,6的仿真结果比试验结果偏大,变化趋势及幅度基本一致,该仿真方法可以预测结构调整,包括较大幅度调整和微调后滚动阻力的变化趋势。

在S01和S02结构上分别用T01和T02胎面胶进行对比,即方案2—5,滚动阻力的仿真与试验结果变化趋势一致。此外,将胎面胶T01更换成T02后在S01和S02结构上的下降幅度不同,仿真结果与试验结果均是如此。

用方案1试验轮胎来验证滚动阻力随气压的变化趋势,结果如表3所示。

试验数据表明,随气压改变,仿真与试验结果变化趋势一致。此外,随气压增大,滚动阻力呈下降趋势,且降幅逐渐减小。

以上分析表明,该仿真方法无论对改变胶料还是改变结构,得到的变化趋势均与试验一致且变化幅度也基本吻合,同时仿真得到的随气压变

表3 不同气压下轮胎滚动阻力系数对比

初始气压/kPa	有限元分析	试验
210	11.221	10.453
190	12.451	11.523
230	10.515	9.866
250	10.187	9.569
280	9.958	9.363

化的滚动阻力趋势及幅度也保持一致。

4 结语

介绍了一种基于ABAQUS分析软件快速计算轮胎温度场及滚动阻力的方法,并对该方法的准确性进行了验证。结果表明,该方法得到的滚动阻力数值虽然与实测结果相差较大,但是能很好地预测结构、胶料等调整的变化趋势及幅度。

该方法没有考虑温度对材料超弹性的影响及应变幅度对胶料损耗因子的影响,这导致了目前仿真结果误差较大。下一步希望解决这方面的问题,进一步完善仿真模型,从而提高仿真结果的精度。

参考文献:

- [1] Gent A. N, Walter J D. The Pneumatic Tire[M]. USA: NHTSA, 2005: 475-501.
- [2] 龚科嘉,危银涛,叶进熊. 基于热力学有限元分析的轮胎滚动阻力仿真[J]. 中国机械工程, 2009, 20(5): 626-629.
- [3] 危银涛,刘宇艳,杜星文,等. 子午线轮胎滚动阻力与温度场非线性有限元分析[J]. 轮胎工业, 1998, 18(6): 330-335.

收稿日期: 2016-02-18

Calculation and Verification on Rolling Resistance of Passenger Car Radial Tire

FU Xinhua, LI Hao, RONG Yingfei, LIU Xiaoying, LI Donglin

(Triangle Tire Co., Ltd, Weihai 264200, China)

Abstract: In this study, a method of calculating the rolling resistance of tires based on ABAQUS software was developed. Basically, the rolling resistance and temperature field of tire were calculated by using the dissipation factor of material and simulation results of tire ground contact, such as stress and strain, under static loading condition. The simulation results of 185/65R14 passenger car radial tire were verified by experimental results. It was found that the experimental results showed some difference from the simulation results. However, the changing trend and extent were similar. The simulation method was effective to predict the influence of structure and compound adjustment on the rolling resistance of tires.

Key words: passenger car radial tire; energy dissipation; rolling resistance; finite element analysis