

轮胎外轮廓对气动阻力影响的研究

翟辉辉¹, 周海超², 张铃欣³

(1. 镇江高等专科学校 电气电竞与交通学院, 江苏 镇江 212000; 2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013;

3. 风神轮胎股份有限公司, 河南 焦作 454003)

摘要: 针对185/65R14乘用车轮胎, 采用流体动力学计算方法, 研究轮胎外轮廓对轮胎气动阻力的影响。结果表明: 轮胎外轮廓对轮胎气动阻力因数影响明显, 轮胎气动阻力因数的差异最大可达14.51%; 通过改进影响气流分离的轮胎外轮廓, 可以减小气流尾涡以降低轮胎气动阻力。本研究结果可为低气动阻力轮胎结构设计奠定基础。

关键词: 轮胎; 外轮廓; 气动阻力; 气流分离; 湍流动能

中图分类号: TQ336.1; U463.341

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)12-0894-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.12.0894



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

在全球环境日益恶化与汽车保有量持续剧增的矛盾下, 节能、环保和安全成为未来汽车发展的三大主题。据报道, 传统动力汽车气动阻力因数降低10%, 燃油经济性提升3%, 电动汽车气动阻力因数降低2%, 续航里程延长10 km^[1]。当车速为60 km·h⁻¹时, 动力汽车气动阻力约占汽车阻力的50%, 轮胎气动阻力占汽车气动阻力的30%^[2], 而电动汽车气动阻力在汽车阻力中的占比是动力汽车的4.4倍^[3], 这意味着轮胎气动阻力在电动汽车阻力中占比较大。

目前, 绝大多数乘用车阻力降低研究都是针对车身、后视镜等, 当车身设计达到瓶颈时, 轮胎气动阻力的减小问题就变得十分重要。轮胎花纹和外轮廓对气流的分离作用将会直接影响轮胎及其周围的流动旋涡的尺寸和大小, 从而对整车气动特性产生影响。研究^[4]得出, 205/55R16轮胎在宽度方向存在10 mm的差异将会导致汽车气动阻力发生2%的变化, 并且轮胎气动特性与其安装的汽车具有相互独立的关系, 这说明独立轮胎流场分析具有重要意义。B. Schnepf等^[5]通过风洞试验

分析了独立轮胎尾涡流场结构, 指出花纹结构的不同会影响胎侧气流分离和尾涡结构。杨志刚等^[6]研究了轮胎宽度对周围流场结构特性的影响, 得出轮胎宽度每减小5%, 独立轮胎气动阻力减小9.2%, 整车模型气动阻力减小2%。E. Mercker等^[7]分别测试了不同宽度和花纹的轮胎气动特性, 结果发现光面轮胎气动阻力最低。但是, G. Wickern等^[8]采用封闭轮辋的光面轮胎和花纹轮胎进行对比试验, 结果却表明花纹轮胎具有更低的气动阻力。T. Hobeika等^[9]对不同花纹的轮胎与光面轮胎进行气动特性试验对比, 结果发现纵沟会减小轮胎气动阻力, 而侧沟则会增大轮胎气动阻力。

已有研究表明, 通过降低轮胎气动阻力可有效改善汽车气动特性并减小其阻力, 但轮胎外轮廓对轮胎气动特性影响的研究鲜有报道。为分析轮胎外轮廓对气动阻力的影响, 本工作选取185/65R14乘用车轮胎(3种外轮廓)作为研究对象, 通过数值分析研究轮胎外轮廓对气动阻力的影响, 并结合流场特性分析3种外轮廓轮胎下气动阻力因数差异的原因。

1 数值仿真计算

1.1 轮胎模型

对185/65R14乘用车轮胎进行简化, 半胎外轮廓结构参数如图1所示, 其中 H 为上胎侧高, R_1 为胎面弧度半径, R_2 为胎肩弧度半径, R 为胎肩与胎侧

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072156, 51675240); 江苏省青年基金项目(KB20160528); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(JXQC-011)

作者简介: 翟辉辉(1986—), 女, 河南洛阳人, 镇江高等专科学校讲师, 硕士, 主要从事轮胎结构设计与性能优化分析的教学研究工作。

E-mail: 594894364@qq.com

过渡圆弧半径, L_1 为胎肩纵沟距胎面中心距离, L_2 为轮胎行驶面宽。此外, 轮胎断面宽、外直径和轮辋直径均由所选轮胎型号决定。T. Hobeika 等^[9]采用风洞试验开展了轮胎结构和轮辋对轮胎气动阻力的影响, 结果表明二者对轮胎气动阻力的影响是相互独立的。为提高计算效率, 本工作将轮辋进行封闭式处理。根据 GB/T 2978—2008, 结合上述参数绘制的轮胎模型如图 2 所示。

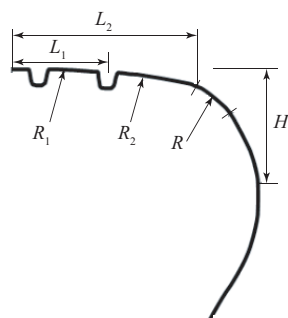


图1 半胎外轮廓结构参数

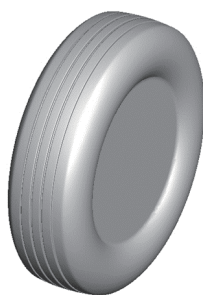


图2 轮胎模型

选取 3 种外轮廓研究其对轮胎气动阻力因数的影响, 外轮廓具体参数如表 1 所示。

表1 3种外轮廓的结构参数

外轮廓类型	H	R_1	R_2	R	L_1	L_2
外轮廓1	57	956	240	30	40	82
外轮廓2	72	573	224	32	40	72
外轮廓3	64	469	187	25	40	88

依据表 1 进行 3 种外轮廓绘制, 结果如图 3 所示。文献^[9]表明接地地区花纹的连通对气动阻力因数影响显著, 为了保证接地地区前后的连通, 本工作轮胎模型保留了纵沟, 纵沟的宽度和深度均为 6 mm。

1.2 计算域及网格划分

围绕轮胎模型, 本工作建立长方形计算域(虚

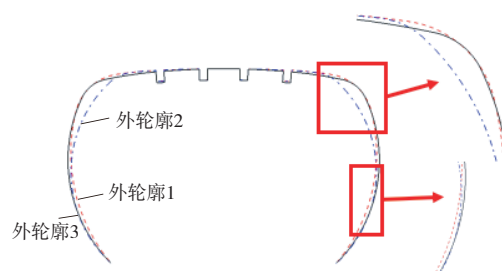


图3 3种外轮廓示意

拟风洞), 如图 4 所示。虚拟风洞入口与轮胎模型的距离为 3 倍的轮胎直径, 虚拟风洞出口与轮胎模型的距离为 7 倍的轮胎直径, 左右两侧边界距离轮胎模型各为 5 倍的轮胎宽度, 顶部边界距离轮胎模型为 5 倍的轮胎直径。本工作中虚拟风洞的阻塞比为 1.6%, 满足小于 2% 的要求, 可消除风洞阻塞效应的影响。

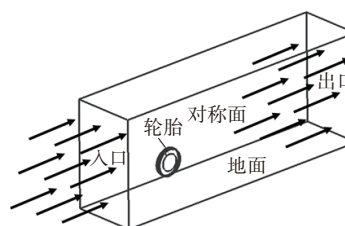


图4 虚拟风洞模型

网格划分是数值仿真计算的第 1 阶段, 网格的类型、数量和质量在很大程度上决定了计算效率和准确性。由于轮胎模型存在曲率较大的边角, 因此本工作选择对复杂外形适应性较强的四面体网格进行划分, 如图 5 所示。其中第 1 层边界层厚度为 0.05 mm, 保证无量纲壁面函数值 $y^+ < 5$, 共计 10 层, 总网格数为 289 万。

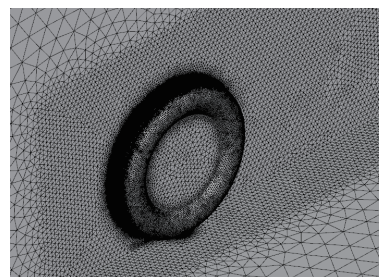


图5 轮胎表面网格

1.3 计算条件设置

由于轮胎外轮廓曲率变化明显, 且外形复杂, 轮胎周围易产生气流分离现象。为了更好地描述

该现象,本工作使用剪切应力输运湍流模型(SST $k-\omega$)进行计算。根据以往的研究,该模型对轮胎流场的数值仿真与试验结果吻合较好,具有较高的可信度^[10]。

采用旋转壁面法模拟轮胎滚动,将坐标系原点设在轮胎中心。边界条件设置如下:虚拟风洞入口为速度入口,速度为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;虚拟风洞出口为压力出口,压力为0;地面为移动壁面,移动方向和速度与入口气流相同;轮胎表面亦设为移动壁面,转动角速度为 $48.27 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;其余各面均设为对称面。

2 结果与讨论

2.1 气动阻力因数

为分析外轮廓不同区域对轮胎气动阻力的影响,将外轮廓分为胎面、胎肩、胎侧3个区域,如图6所示。

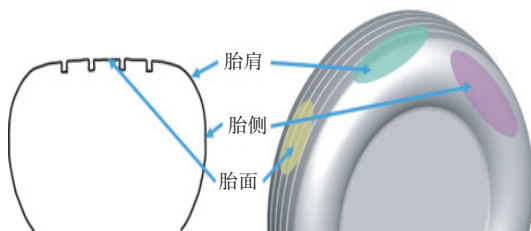


图6 轮胎外轮廓分区

3种外轮廓的轮胎气动阻力因数如表2所示。

表2 3种外轮廓的轮胎气动阻力因数

外轮廓类型	轮胎整体	胎面	胎肩	胎侧
外轮廓1	0.422 535	0.392 721	0.161 448	-0.131 634
外轮廓2	0.361 227	0.357 923	0.094 165	-0.093 835
外轮廓3	0.419 694	0.384 143	0.177 045	-0.138 781

从表2可以看出,不同外轮廓对轮胎气动阻力因数产生显著影响,外轮廓1的轮胎气动阻力因数最大,外轮廓2的轮胎气动阻力因数最小,两者间的差异高达14.51%。此外,从轮胎表面各区域的气动阻力因数对轮胎整体气动阻力因数的贡献还可以发现,胎面贡献最大,胎肩贡献次之,胎侧贡献为负。也就是说,气体流过胎侧时,该区域的流速会增大,胎侧起着导流的作用,可以降低轮胎整体气动阻力。产生这种现象的主要原因是:胎侧表面凸起,在相等的时间内,胎侧表面气流流动

路程增长,即速度变大,这样就造成了胎侧迎风面处压力小,背风面处压力大,整体上降低了气动阻力。这也说明,若适当调整胎侧曲率,一定程度上可以降低轮胎气动阻力。

综上所述,外轮廓对轮胎气动阻力有着显著影响,外轮廓不同区域对轮胎气动阻力的贡献不同,因此,外轮廓的各结构参数与轮胎气动阻力息息相关。

2.2 流场

为了更好地描述轮胎区域空间涡系结构,本工作采用 Q 准则(Q 为描述湍流流场的标量)研究轮胎周围的湍流流场。 Q 准则是目前识别三维涡系结构的最佳方法,广泛应用于研究大范围旋转结构变化^[11],有如下公式:

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}) = \frac{1}{4}(\omega^2 - S_{ij}S_{ij}) = \frac{1}{2} \frac{\nabla^2 p}{\rho}$$

式中, Ω_{ij} 和 S_{ij} 分别为速度梯度的反对称和对称部分,在物理意义上分别为旋转和变形, i 和 j 为坐标系方向, p 是流体压力, ρ 是流体密度。因此, Q 反映了流场中微团旋转和变形的平衡。 $Q > 0$ 时,旋转结构在流场中占据主导地位。

3种外轮廓轮胎的 Q 准则等值面如图7所示。一般来说,流体在物体表面会形成边界层,如果边界层扰动过大,气流就会脱离物体表面,形成湍流,从而损耗更多能量。

从图7可以看出,气流流过轮胎时,在轮胎最前端产生绕流,受到外轮廓曲率和壁面摩擦力的影响,流体流动不能很好地贴合轮胎外表面,破坏了流体本来的流动方向,从而导致了边界层分离,在轮胎尾部形成了大范围尾涡。轮胎外轮廓对流场的影响十分显著,从轮胎涡旋结构分布可以推测外轮廓2的轮胎气动阻力较小,外轮廓1的轮胎气动阻力较大,这与表1中的轮胎气动阻力因数结果一致。这主要是因为外轮廓2胎面更窄,轮胎受到正面气流的冲击相对更小,圆滑的胎肩也更有利于气流顺畅地流过。

涡的产生伴随着能量损耗,能量损耗与气动阻力密切相关。湍流动能是湍流强度的度量,也是空气动力学中一个重要的变量。3种外轮廓轮胎的湍流动能如图8所示。

从图8可以看出:外轮廓1的轮胎尾流区域中,

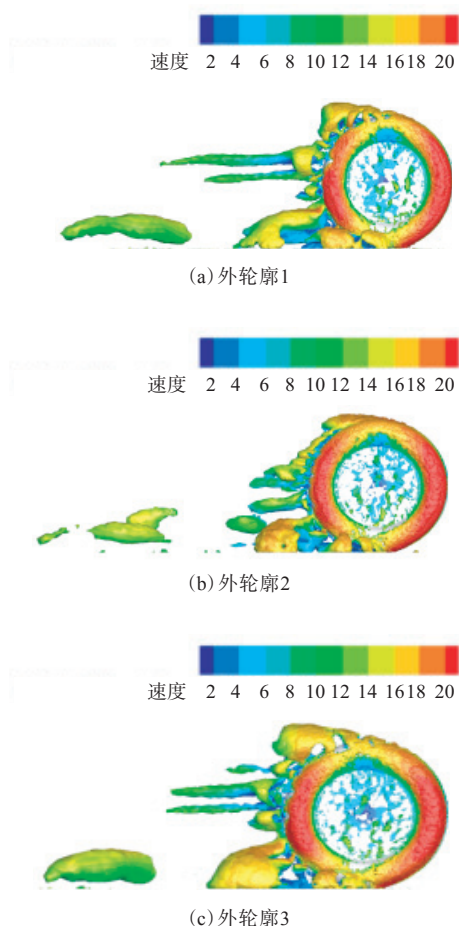


图7 3种外轮廓轮胎的 Q 准则等值面(速度标量着色)
上中下均出现了明显的湍流区域;外轮廓2的轮胎尾流脉动是3者中最小的,只有近地面区域存在一处明显的湍流;外轮廓3的轮胎虽然近地面处的湍流脉动减小,但是尾流中部和上部存在强劲的湍流脉动。轮胎尾涡与能量耗散紧密联系在一起,故尾流结构的改善能够减小能量耗散,从而有益于降低气动阻力。轮胎外轮廓曲率影响着气流的平稳性,进而导致气流分离产生尾涡,因此外轮廓是影响轮胎流场的重要因素。

3 结论

本工作采用SST $k-\omega$ 湍流模型,研究了3种轮胎外轮廓对轮胎气动阻力的影响,结论如下。

(1) 外轮廓对轮胎气动阻力因数影响明显,轮胎气动阻力因数的差异最大可达14.51%;外轮廓表面各区域对轮胎整体阻力因数贡献不同,胎面贡献最大,胎肩贡献次之,胎侧贡献为负。

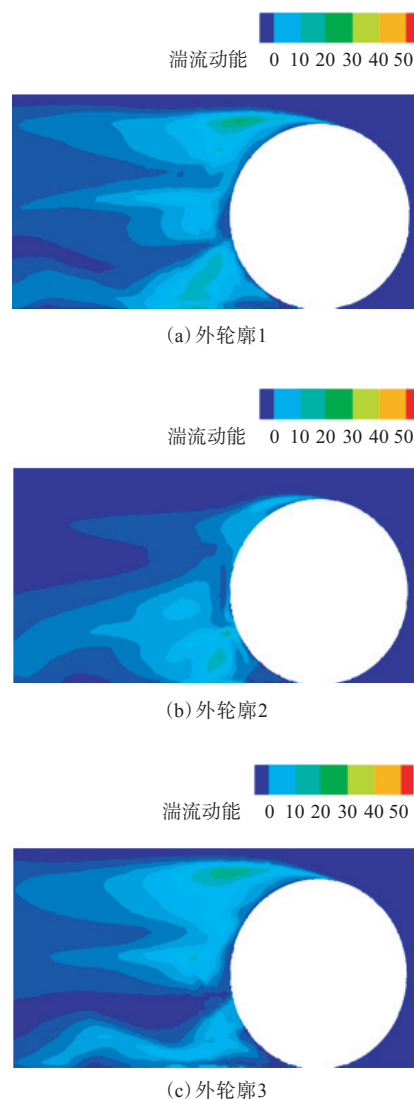


图8 3种外轮廓轮胎的湍流动能

(2) 轮胎外轮廓曲率影响气流的平稳性,进而导致气流分离而产生尾涡。减小尾涡可降低尾流湍流脉动强度,从而降低轮胎气动阻力因数。减小胎面宽度,保证胎肩圆滑,使外轮廓整体趋近于流线型,有助于降低轮胎气动阻力,提升轮胎的气动性能。

参考文献:

- [1] 于潇.探秘荣威I6风洞实验室,对标Model S的风阻因数如何炼成[OL].<http://www.cheyun.com/content/14783/>,2017-02-16.
- [2] Kawamata H, Kuroda S, Tanaka S, et al. Improvement of Practical Electric Consumption by Drag Reducing under Cross Wind[R]. USA: Society of Automotive Engineers,2016.
- [3] Cavusoglu Ö F. Aerodynamics Around Tires and Tirehouses[D].

- Gothenburg:Chalmers University of Technology,2017.
- [4] Wittmeier F, Kuthada T, Widdecke N, et al. Model Scale Based Process for the Development of Aerodynamic Tire Characteristics[R]. USA:Society of Automotive Engineers,2014.
- [5] Schnepf B,Indinger T,Schütz T.Further Investigations on the Flow Around a Rotating, Isolated Tire with Detailed Tread Pattern[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2015,8(1):261-274.
- [6] 杨志刚,沙潇,贾青. 轮胎宽度对轿车风阻的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(11):1682-1686.
- [7] Mercker E, Breuer N, Berneburg H, et al. On the Aerodynamic Interference due to the Rolling Tires of Passenger Cars[R]. USA: Society of Automotive Engineers,1991.
- [8] Wickern G,Zwicker K,Pfadenhauer M. Rotating Tires—Their Impact on Wind Tunnel Test Techniques and on Vehicle Drag Results[R]. USA:Society of Automotive Engineers,1997.
- [9] Hobeika T, Sebben S. Tyre Pattern Features and Their Effects on Passenger Vehicle Drag[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems,2018,11(5):1-12.
- [10] McManus J,Zhang X. A Computational Study of the Flow Around an Isolated Tire in Contact with the Ground[J]. Journal of Fluids Engineering,Transactions of the ASME,2006,128(3):520-530.
- [11] Kolář V. Vortex Identification: New Requirements and Limitations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2007, 28(4):638-652.

收稿日期:2020-06-12

Study on Influence of Tire Outer Contour on Aerodynamic Resistance

ZHAI Huihui¹,ZHOU Haichao²,ZHANG Lingxin³

(1. Zhenjiang College,Zhenjiang 212000,China;2. Jiangsu University,Zhenjiang 212013,China;3. Aeolus Tyre Co.,Ltd,Jiaozuo 454003, China)

Abstract: For the 185/65R14 passenger car radial tires, the influence of the tire outer contour on the aerodynamic resistance was studied by using fluid dynamics calculation method. The results showed that the tire outer contour had a significant influence on the aerodynamic resistance coefficient, and the difference of the aerodynamic resistance coefficient could be up to 14.51%. By improving the tire outer contour which affected the air flow separation, the flow vortex was reduced to lower the aerodynamic resistance. The research results could lay the foundation for the structural design of low aerodynamic resistance tire.

Key words: tire; outer contour; aerodynamic resistance; air flow separation; turbulent kinetic energy

大橡塑成立院士专家工作站 日前,大连橡胶塑料机械有限公司(简称大橡塑)与华南理工大学签订合作协议,聘请中国工程院院士、华南理工大学教授瞿金平科研团队在大橡塑成立院士专家工作站。

合作协议签订仪式上,大橡塑党委书记、董事长王元江介绍了企业在科技创新、科研团队建设和国家重大装备研制等方面的成就,同时对研发奖励机制快速推动企业科技研发发展进行了阐述。

王元江表示,大橡塑试验中心承担了瞿金平教授主导的拉伸流变技术国家重点课题的部分试验工作,并取得了良好成果。此次聘请瞿金平科研团队成立专家工作站,是双方进一步深化校企合作,对推动科技成果转化、助推企业科技长

远发展、加强企业科技人才队伍建设将起到重要作用。

瞿金平教授介绍了该团队近年来在科研成果方面的概况,并就双方前期合作项目进展情况进行了说明,对双方未来在拉伸流变及智能化试验平台搭建、橡塑机械仿真分析技术应用、智能及智能检测技术应用以及院士团队其他科技成果转化等进行了展望。他表示,大橡塑作为我国大型挤压造粒机组研制企业和橡塑机械摇篮,多年来双方在校企合作方面取得了令人瞩目的成绩,希望此次在大橡塑成立专家工作站,能更好地推动双方合作,为科技成果转化和科技人才队伍培养增添新的动力。

(摘自《中国化工报》,2020-10-19)