

车轮宽度对轿车风阻的影响

杨志刚, 沙 潇, 贾 青

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 针对某三厢轿车, 采用计算流体动力学(CFD)数值计算方法, 研究车轮宽度对整车气动性能的影响. 通过综合分析不同宽度孤立车轮周围的流场结构变化及具有不同宽度车轮的整车周围流场的结构特性, 得到结论: 车轮宽度每减小 5%, 单车轮模型气动阻力约减小 9.2%, 整车模型气动阻力约减小 2%. 这是因为减小车轮宽度可以减小车轮两侧的气流分离, 缩小尾部涡流区域, 降低车轮及汽车尾部湍流强度, 从而有助于降低车轮及整车气动阻力.

关键词: 轿车; 车轮宽度; 气动阻力; 数值模拟

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

Influence of Wheel Width on Vehicle Aerodynamic Drag

YANG Zhigang, SHA Xiao, JIA Qing

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The computational fluid dynamics method was applied to an investigation of the influence of wheel width on vehicle aerodynamic performance for a general sedan car. After a comprehensive analysis and comparison of the changes in flow structure of isolated wheels and full scaled vehicle models with different wheel widths, the conclusion can be drawn that the aerodynamic drag of isolated wheel decreases approximately by 9.2% while the aerodynamic drag of whole car model decreases by about 2% when the wheel width reduces by every 5%. This is due to the reason that the reduction of wheel width can effectively decrease the flow separation beside the wheel and then the vortex zone in the wake, besides, it can also lower the turbulence intensity in the rear-ended area of the isolated wheel as well as the whole car model, which will help to reduce aerodynamic drag of the given models.

Key words: automobile; wheel width; aerodynamic drag; numerical simulation

在全球低碳化的大主题下, 降阻减排无疑是汽车研究首要热点之一. 研究表明, 一辆现代化的汽车, 其基本外形占总阻力的 45%, 底部结构和其他细节部分占 25%, 车轮和轮罩占 30%^[1], 车轮空气动力学减阻的问题已经成为当前研究的热点. 目前, 相关的研究多是针对轮拱罩与车轮的相对位置关系及旋转车轮条件下的整车空气动力学特性进行的研究^[2-4]. 针对车轮空气动力学特性的研究主要集中在车轮辐板、孔型上^[5-8]. 车轮宽度不仅对汽车的操控性、稳定性有重要的影响, 还对汽车的气动性能有重要的影响. 本文将从车轮宽度的角度出发, 首先分析不同宽度的独立车轮周围气流的变化, 接着结合整车分析了车轮宽度对于整车气动性的影响.

近年来, 随着计算机水平的不断提高, 计算流体动力学(CFD)技术迅速发展, 数值计算很好地克服以往试验条件不足的状况, 并能更精确地显示流场信息, 同时能有效避免试验中人为操作和设备条件所带来的误差.

1 数值仿真计算

1.1 几何模型的建立

根据 GB/T2978—2008, 选取 195/50 R16 型号轮胎为研究对象, 并对该车轮进行了简化, 建立数值模型, 如图 1 所示.

为比较车轮宽度对气动性能的影响, 本文保持胎厚和轮辋直径不变, 通过改变车轮宽度得到 6 组独立的轮及整车模型(保持轮距不变). 车轮宽度分别为 195, 185, 175, 165, 155, 145 mm.

本文主要研究不同车轮宽度对整车阻力系数的影响, 因此在建立模型时忽略了后视镜、门把手、雨刮器、雨水槽等部件, 整车模型如图 2 所示. 为便于

收稿日期: 2013-11-27

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203)

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为流体力学. E-mail: zhigang.yang@sawtc.com

通讯作者: 贾 青(1979—), 女, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为空气动力学. E-mail: Qing.jia@sawtc.com

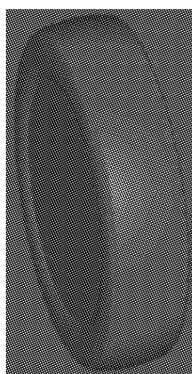


图 1 简化车轮模型

Fig.1 Simplified wheel model

分析比较,下文简称宽度为 195 mm 的独立车轮模型及相应整车模型 a1、a2,宽度为 145 mm 的独立车轮模型及整车模型为模型 b1、b2.

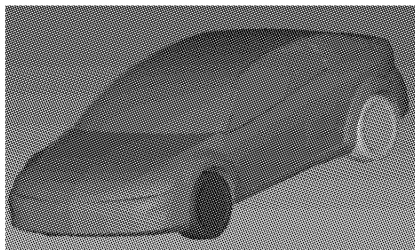


图 2 整车模型

Fig.2 Full scale vehicle model

1.2 网格划分及计算域

网格质量直接决定数值计算结果的准确性和可靠性. 本文采用混合网格划分方法有效加密关键部位网格,在车轮附近区域,采用曲面适应性较好的高密度四面体网格,在其余区域采用经济性的六面体网格,这样既能保证网格质量,又能提高运算速度. 考虑车轮的实际变形情况,对车轮接地区域进行修正^[9](图 3).

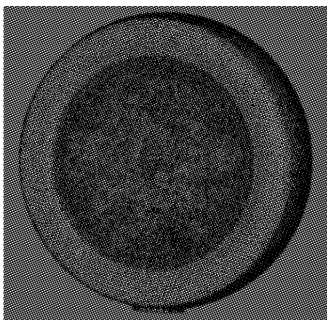


图 3 车轮表面网格

Fig.3 Mesh of wheel surface

为保证气流不产生堵塞现象,计算区域横截面积必须大于车轮迎风面积的 20 倍. 其中车轮的迎风

面积采用最大车轮宽度下的横截面积,计算域的长度必须大于车轮直径的 10 倍. 因此本文计算域长、宽、高分别设为 $11\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$, 网格总数量均保持在 131 万左右. 对于整车模型,计算域长、宽、高分别为 $60\text{ m} \times 12\text{ m} \times 10\text{ m}$, 同样在汽车附近局部区域采用高密度四面体网格,在外部大的区域采用六面体网格,以达到局部网格细化提高计算精度的目的. 以 $y^+ = 20 \sim 100$ 为标准控制第一层网格中心离壁面的法向高度,各算例网格数量均保持在 1 230 万左右. 整车在计算域的位置如图 4 所示.

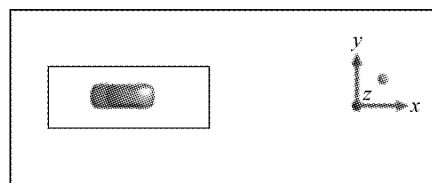


图 4 整车模型计算域示意图

Fig.4 Schematic computational domain of full scale vehicle model

1.3 边界条件的设置

通常状态下,汽车在开阔空间行驶,属于低马赫数的交通工具. 空气介质物性参数可视为常数. 汽车周围流场可考虑为不可压缩流体. 由于其外形复杂,车身周围容易引起气流分离. 因此汽车外流场属于黏性、不可压缩流,且具有典型的三维分离流动特性,所以按湍流处理. 在时均应变率特别大的情况下,标准 $K-\epsilon$ 模型有可能导致负的正应力,为了使流动符合湍流的物理定律,需要对正应力进行数学约束. 为了保证这种约束的实现,本文使用定常 Realizable $K-\epsilon$ 模型,根据以往研究的实验数据^[8,10],该模型对静止车轮进行数值仿真与试验结果较吻合,具有可行性.

入口边界条件设置为 $30\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度入口,出口边界条件为压力出口,计算域的侧壁面和顶壁面均采用对称边界条件,而地面和车轮设置为无滑移边界条件. 对静止车轮及整车模型进行计算,当残差达到 1×10^{-4} 以下,同时阻力系数及流场内一点的压强值基本保持不变时,认为计算收敛.

2 结果分析

2.1 单车轮模型

由图 5 可以发现车轮阻力系数与车轮宽度呈近似一次函数关系,以模型 a1 与模型 b1 为例阐释独立车轮阻力系数随宽度增大的原因.

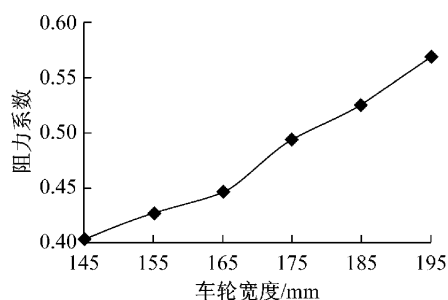


图 5 独立车轮阻力系数随宽度变化曲线

Fig. 5 Curve of aerodynamic drag coefficients change with wheel widths

2.1.1 车轮尾部涡量比较

涡的强弱可以从涡量图中表示出来. 在车轮尾部取一宽 0.3 m, 高 0.6 m 的平面, 其涡量图如图 6 所示. 从图 6 中可以发现模型 a1 的涡量明显大于模型 b1, 这是因为模型 a1 的宽度更大, 表面面积更大, 从而有更多的边界层涡进入到尾部集中涡, 导致涡的强度增强.

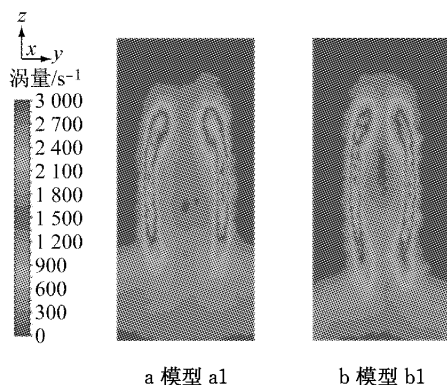
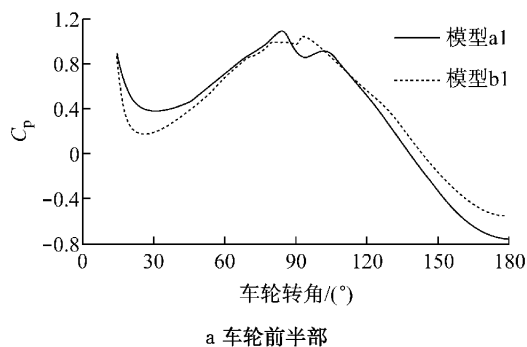


图 6 车轮尾部涡量图

Fig. 6 The vorticity magnitude contour on surface near the rear end of wheel

2.1.2 车轮表面压力系数

车轮转角示意图如图 7 所示, 其中 U 表示气流



来流速度, φ 表示转角. 车轮前、后半部中心线表面压力系数(C_p)随车轮转角变化曲线如图 8 所示. 由图 8 可知, 车轮表面滞点位于正对来流方向的 90° 附近. 当滞点靠近前端轮—地接触点时, 表面压力系数先减小后增大. 随着转角 φ 的增大, 气流流速加快, 表面压力系数逐渐减小, 在 140° 附近进入负压区, 并在 180° 时气流速度达到最大值, 此时表面压力系数达到最小值. 此后, 气流速度减慢, 压力系数回升并在 233° 达到极大值. 随着转角继续增大, 气流在逆压梯度的作用下出现分离, 在对称面处形成横向准二维漩涡, 造成尾部产生极低的负压, 压力系数下降. 同时, 各分离点之间构成一个分离、结合、再分离、再结合的过程, 解释了车轮尾部表面压力系数波动的原因. 当转角大于 330° 时, 由于气流遇到地面阻力, 流速降低, 压力系数回升. 由于模型 a1 尾部卷起的涡的能量强于模型 b1, 造成尾部产生更低的负压, 从而有更多的气流被卷吸到死区, 这解释了为何模型 a1 在转角大于 330° 时压力系数大于模型 b1.

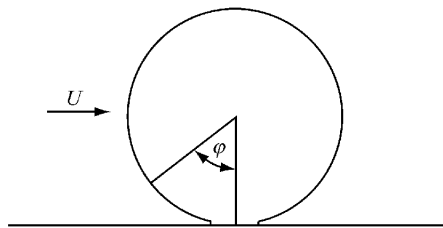


图 7 车轮转角示意图

Fig. 7 Schematic diagram of wheel steering angle

从图 8 中还可以看出车轮宽度对车轮后半部影响更为显著. 模型 b1 后部表面压力系数明显大于模型 a1 后部表面压力系数, 这是因为模型 a1 较大的宽度使得尾部气流速度提高, 根据伯努利方程可得, 气流的部分静压转变为动压, 此外, 由于模型 a1 尾部气流平均速度的提高, 尾部湍动能增大, 从而在车轮尾部产生了更低的负压区, 因而产生了更大的阻力系数.

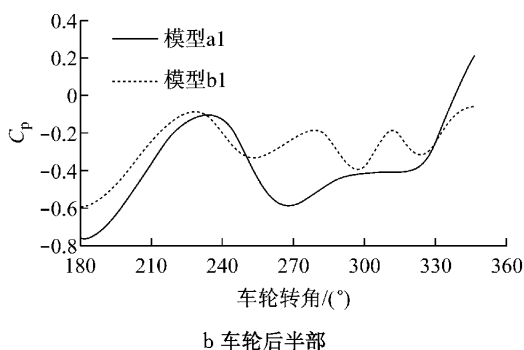


图 8 车轮表面压力系数图

Fig. 8 Pressure coefficients of wheel surface

2.1.3 车轮后部近表面涡流的变化比较

由图 9 可以清楚地看出车轮尾部近表面涡流的产生与变化,在分离线 1,1' 处,由于表面曲率变化较大,经车轮两侧流向尾部的气流在分离线 1,1' 之间发生分离形成尾迹,并在车轮中心线处形成再附,在车轮与地面接触区域,来流受阻速度减慢,在车轮底部形成正压区,气流在顺压梯度的作用下,向上卷起并与经车轮顶部流向底部的气流相互作用,从而在尾部底部形成了一对对称的剪切涡 1,1'.

涡是消耗能量的主要方式之一,也是产生阻力的因素,值得注意的是模型 a1 中两个对称的方向各异的涡,这说明形成涡的气流速度很大,气流的黏性作用不足以将涡相互融合,从图 9b 中可以看到涡的尺度明显降低,而且整体上气流流向更趋于一致,因而车轮的阻力有所降低.除了剪切涡之外,图 9a 和 9b 都产生了两个明显的分离面,在这个位置上气流产生了类似于汽车 c 柱一样的三维分离,这也是消耗能量的主要方式,尽管图 9a 与 9b 产生分离面的位置相似,但由于图 9a 轮胎更宽,因而包含了更大的尾迹区域,尾迹中充满了更多不规则的运动着的漩涡,漩涡的强烈运动将流体的机械能转化为热能,因此尾迹区中的压强较低,从而产生更大的压差阻力,这也是宽胎产生更大的车轮阻力的原因之一.

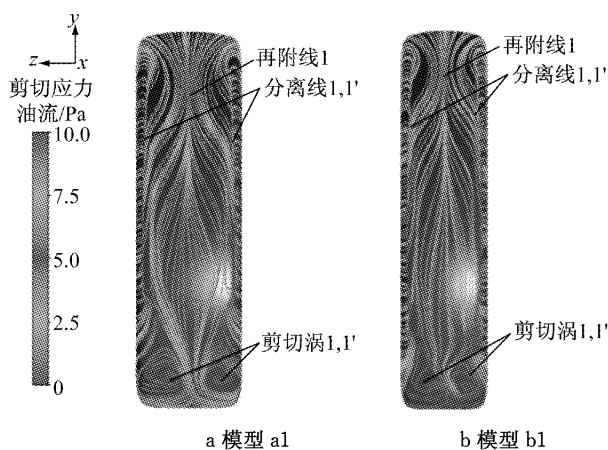


图 9 车轮尾部表面流线图

Fig.9 Oil flow on rear part of the wheel surface

2.2 整车模型

2.2.1 气动阻力

从图 10 中可以发现,随着车轮宽度的减小,整车下降的阻力值要大于车轮下降的阻力值,这说明轮胎宽度不仅对轮胎本身的气动阻力有影响,而且对车身的气动性能也有一定的影响,随着车轮宽度减小到一定程度时,车身的气动阻力变化趋于平缓.本文将从车轮与车身两个方面对整车气阻的变化加

以诠释.

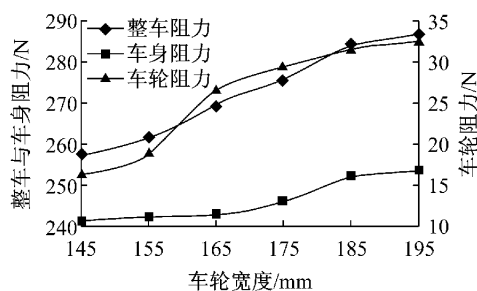


图 10 气动阻力随车轮宽度变化曲线

Fig.10 Curves of aerodynamic drag versus wheel width

2.2.2 左前轮尾部平面总压云图和流线图比较分析

研究结果表明,前轮气动阻力约占车轮总气动阻力 65% 左右^[11].由于汽车周围流场的近似对称性,本文将以左前轮为例加以阐释.图 11 为 $X=1.1$ m(距离车轮横向对称面 0.22 m)截面上总压图和流线图.从图 11 中可以看出,车轮两侧与轮腔之间沿 Y 方向的距离随车轮宽度的变化发生相应的变化,这导致车轮尾部剪切涡的位置、结构、强度都发生了相对变化.由于车轮宽度的增大,车轮表面面积增大,从而有更多的边界层涡进入到尾部集中涡,导致涡的强度增强,Sarmast 等^[12]认为随着车轮宽度的增大,打到前轮的气流偏转角发生了相应的变化,气流的不稳定度上升,更为重要的是,车轮宽度的增加使得车轮底部喷射涡的强度大大增强,这导致宽车轮的尾部形成了更低的负压区,从而产生了更大的前后压差,气动阻力增大.

此外,随着车轮宽度增大,被轮腔覆盖的车轮体积增大,在轮腔体积保持不变的情况下,轮腔覆盖的车轮体积与轮腔体积的比值增大.以往研究表明^[13],这个比值越大,车轮阻力越大,这也证实了本文的结论.

2.2.3 汽车尾部表面压力比较

从图 12 中可以发现,车轮宽度对车身尾部压力有着较为明显的影响.模型 a2 与模型 b2 相比,虽然尾部涡流区域(低压区)面积没有减小,但是低压区的压强更小(具体原因见 2.2.4),因而产生了更大的前后压差,从而产生了更大的气动阻力.

2.2.4 汽车尾部湍动能比较分析

涡的形成和破碎可以在湍动能图上表现出来,涡流动越复杂,湍动能越剧烈,能量消耗就越多,阻力系数随之增大.在垂直于汽车对称面且距离汽车尾部 0.3 m 处,分别取一宽 1.8 m,高 1 m 的平面

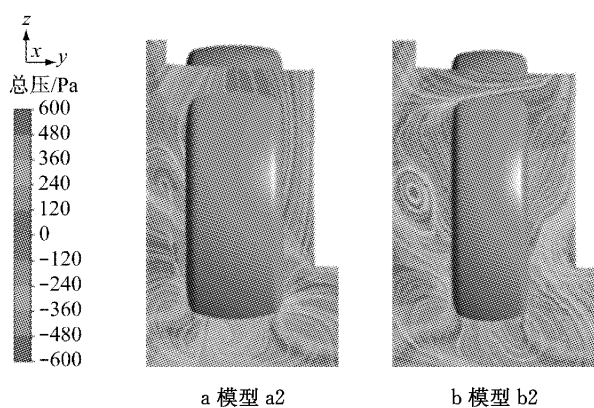


图 11 总压云图和流线图

Fig. 11 Total pressure contour and surface flow

z_1 与 z_2 , 其湍动能分别如图 13 a、13b 所示。

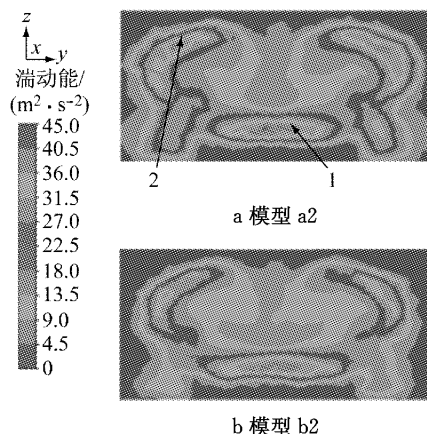


图 13 汽车尾部湍动能图

Fig. 13 Turbulent kinetic energy of vehicle rear area

从图中可以发现模型 a2 不仅拥有更大的尾迹区,而且尾迹区湍流强度明显更强. 由于模型 a2 的车轮宽度较大,车轮尾部尾迹区域与湍流强度较大,这部分尾迹随着气流的运动向前扩散和衰减,这解释了为何 z_1 左、右下角的尾迹区更大,湍流强度更强。

此外,随着车轮宽度的增大,暴露在空气中的体积变大,流经汽车底部的气流更加紊乱,速度有所提高,这部分气流上卷与从汽车顶部流向车尾的气流汇合,加强了尾部漩涡的强度(如箭头 1 所示). 此外还可以发现由于车轮宽度的增大,大量气流受车轮阻挡直接从车轮外侧流出,流经车身侧表面的气流增加,导致后背厢尾部漩涡强度增强(如箭头 2 所示),由于气体粘性的作用,有更多的动能转化为热能,导致尾部产生了较大的负压区,因而产生了更大的阻力。

3 结论

本文采用 Realizable $K-\epsilon$ 湍流模型,研究车轮宽

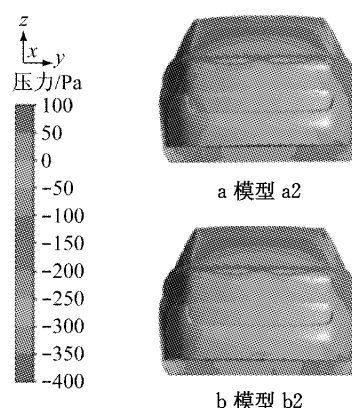


图 12 汽车尾部表面压力图

Fig. 12 The pressure contour on surface of vehicle in rear view

度对独立车轮模型及相应整车模型气动性能的影响,得出以下结论。

(1) 对于单车轮模型,减小轮宽有利于减小车轮两侧的气流分离,缩小尾迹区域,降低涡流强度,从而有利于气动阻力的改善,车轮宽度每减小 5%,气动阻力约减小 9.2%。

(2) 对于整车模型,减小轮宽不仅有利于车轮本身气动性能的改善,而且有利于车身气动阻力的改善,这是因为减小轮宽有利于缩小车尾涡流区域,减小气流速度,降低车尾处气流的紊乱程度。

(3) 单车轮模型与整车模型的气动阻力系数与车轮宽度呈近似一次函数关系,都随着车轮宽度减小而减小。

参考文献:

- [1] Wickern G, Zwicker K, Pfadenhauer M. Rotating wheels—their impact on wind tunnel test techniques and on vehicle drag results[C] // SAE. [S. l.]: SAE, 1997; doi: 10. 4271/970133.
- [2] Skea A F, Bullen P R, Qiao J. CFD Simulations and experimental measurements of the flow over a rotating wheel in a wheel arch[C] // SAE. [S. l.]: SAE, 2000; doi: 10. 4271/2000-01-0487.
- [3] Mears A P, Dominy R G, Sims-Williams D B. The air flow about an exposed racing wheel[C] // SAE. [S. l.]: SAE, 2002; doi: 10. 4271/2002-01-3290.
- [4] Angel Huminic, Anghel Chiru. On CFD investigations of vehicle aerodynamics with rotating wheels' simulation[C] // SAE. [S. l.]: SAE, 2006; doi: 10. 4271/2006-01-0804.
- [5] 胡兴军,傅立敏,张世村,等. 具有不同辐板车轮的空气动力学特性研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(12): 1684.

HU Xingjun, FU Limin, ZHANG Shicun, *et al.* Research on aerodynamic characteristics of automotive wheels with different

(上转第 1732 页)