

有无车轮对低风阻车型气动特性的影响

杨志刚^{1,2,3}, 杨 婷^{1,2}, 夏 超^{1,2,4}, 贾 青^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804;
3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211; 4. 同济大学南昌汽车创新研究院, 江西 南昌 330052)

摘要: 针对有无车轮低风阻电动汽车模型进行数值计算, 并通过对两种模型是气动力、表面压力、速度场等计算结果对比, 评估了有无车轮对低风阻车型气动特性的影响。研究表明: 车轮的存在使得整车气动阻力增大 63.8%, 其中各部件的贡献从大到小依次为前轮室、车身前部、背部、车底(负贡献)、后轮室; 而升力增大一倍多, 主要来源于车底的贡献; 流场结果显示车轮对车身的气动作用体现在车轮带来的全局阻塞和局部尾迹两种效应的综合影响; 后轮及后轮导流罩产生的尾迹会导致低阻车尾涡环强度增强, 回流区长度减小, 背压降低。综合气动阻力、升力、压力分布和流场对比分析, 明确了车轮的存在会给低风阻车型带来较大的气动特性变化。

关键词: 低风阻车型; 有无车轮; 气动阻力; 气动特性

中图分类号: U461.1; O355

文献标志码: A

Influence of Presence or Absence of Wheels on Aerodynamic Characteristics of Low-Resistance Vehicles

YANG Zhigang^{1,2,3}, YANG Ting^{1,2}, XIA Chao^{1,2,4}, JIA Qing^{1,2}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Beijing 102211, China; 4. Nanchang Automotive Institute of Intelligence and New Energy, Nanchang 330052, China)

Abstract: Numerical calculations are conducted for the low-resistance electric vehicle model with or without wheels, and the aerodynamic force, surface pressure, velocity field, and other calculation results of the two models are compared to evaluate the influence of wheels on the aerodynamic characteristics of the low-resistance vehicle. The results show that the presence of wheels increases the aerodynamic drag of the vehicle by 63.8%. The components which have the largest contribution are

the front wheel chamber, the front of the vehicle body, the base, the underbody (negative contribution) and the rear wheel housing in descending order. The vehicle lift increases more than doubled, mainly due to the contribution of the underbody of the vehicle. The aerodynamic influence of the wheels on the vehicle is reflected in the combined effect of global blocking and local wake caused by the wheel. The wake generated by the rear wheel and the rear guide hood will enhance the strength of the tail vortex ring and reduce the length of the backflow area and the base pressure. A comparison of aerodynamic drag, lift force, pressure distribution, and flow field shows that the existence of wheels will bring significant changes to the aerodynamic characteristics of the vehicles of low wind resistance.

Key words: low wind resistance vehicle; with or without wheels; aerodynamic resistance; aerodynamic characteristics

车轮其周围流场具有很强的三维特性和较为复杂的涡旋动力学现象^[1], 因此会给车身及其部件的气动特性带来显著的影响。在一辆普通现代小轿车上, 车轮及轮室所产生的气动阻力占汽车总气动阻力的约 30%^[2-3], 所以车轮及轮室的存在对汽车的气动特性也有重要的影响。现有研究表明, 相同车轮放在不同车身上, 车轮本身的气动力也是不同的^[4]; 同时, 针对车轮旋转的研究则显示, 车轮旋转不仅会对车轮本身的气动力带来较大的改变, 也会对车身的气动特性产生很大的影响^[5]。以上两点都体现了车轮车身之间存在着较强的相互作用。

随着对车轮空气动力学的认知程度加深和风洞试验设备的进步, 以及旋转车轮模拟方法的发展和成熟, 针对车轮-汽车空气动力学相互作用的研究逐渐深入。2007 年, Wäschle^[6]通过风洞试验与数值模

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 上海市重点实验室项目(18DZ2273300); 同济大学南昌汽车创新研究院前瞻课题(QZKT2020-12)

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆空气动力学。E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

通信作者: 贾青(1979—), 女, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆空气动力学。E-mail: qing.jia@sawtc.com

拟相结合的方法研究了车轮旋转对量产车的气动影响,研究表明,车轮旋转造成阻力、升力变化主要是由于车底流动和后轮尾迹之间的干扰效应带来的。2013年,Koitrant等人^[7]通过计算流体动力学(CFD)的方法研究前后轮的旋转与地面的移动,如何综合影响汽车局部和全局的流场,特别是车辆后面的尾迹,结果表明,相比于地面及前后轮都静止的工况,同时施加地面移动和前后轮旋转的工况,汽车的阻力和后轴升力显著降低,而前轴升力几乎没有变化。2014年,杨志刚^[8]等人以三厢轿车为研究对象,运用CFD数值模拟技术,对不同宽度车轮对整车气动性能的影响进行了研究,结果表明,整车及车身气动阻力随车轮宽度减小而降低。2017年,Huminic等人^[9]研究了车轮和轮室的加入对带扩压器车身空气动力学特性的主要影响,结果显示,后轮室产生的涡对车底扩散器的空气动力有主要影响,导致车体阻力、升力增加,由增加车轮引起的阻力系数和升力系数的平均增量分别为0.058、0.243。2018年,余霄雁等人^[10]以一辆量产小型轿车为研究对象,采用定常雷诺平均N-S(RANS)方法进行数值计算,探究不同轮室充盈率下的旋转车轮对整车气动力的影响机理,研究结果表明,整车气动阻力随轮室充盈率的降低而增大,而升力呈现相反趋势。Sabine等人^[11]对汽车前轮室下游近壁流动进行了分析,观察到两种主要的流动现象,一种是由上部轮室流出的气流引起的,另一种是由轮室底部边缘的分离引起的,并与封闭轮室的工况进行对比证实了流

动结构是由车轮、轮室的流动相互作用和车轮的转动引起的。Ilea L等人^[12]采用计算流体动力学(CFD)方法分析车轮区域的车身形状对乘用车整体气动性能的影响,主要结论是封闭后轮具有重要的空气动力学优势,并且不会影响车辆的其他性能。

到目前为止,车轮对车身气动特性影响及车轮车身的气动相互作用尚未被完全了解,并且针对低风阻车型的相关研究较少,低风阻车型车轮-车身空气动力学相互作用特点尚不清楚。为此,本文针对有无车轮的低风阻车型进行数值计算,通过对有无车轮低风阻车型气动力、部件表面压力、部件周围流场结构等模拟结果进行对比分析,探讨低风阻车型车轮对车身气动特性的影响。其中,分析的重点聚焦在车轮车身的相互作用上。

1 计算设置

1.1 计算模型

研究对象为同济大学地面交通风洞中心设计的一款低风阻车型的1:1简化模型。相对于实车,该模型的前端进气口与底部气流出口进行了封堵,其长(L)宽(W)高(H)尺寸为4 622 mm \times 1 948 mm \times 1 479 mm,其车轮与实车一致,包含轮辐、轮辋等结构。原始带车轮的低阻车模型采用静止车轮工况的,称之为WW;无车轮模型则是把WW的车轮、导流罩、扰流板等部位去掉,并将轮室封平后得到的,称之为NW。有无车轮低风阻汽车模型如图1所示。

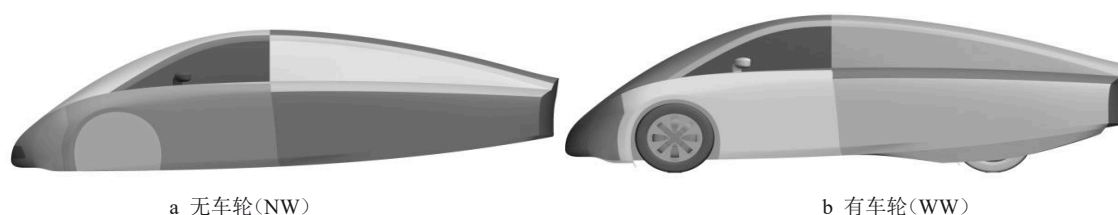


图1 低风阻汽车模型

Fig.1 Models of low-resistance vehicle

1.2 计算设置

本文采用的计算域为长方体盒子,计算域的尺寸设置如图2所示,长宽高尺寸为 $10L \times 15W \times 5H$,入口到车前脸的距离是 $3L$,出口到车尾垂直背部的距离是 $6L$ 。入口边界条件设置为速度入口,速度为30 m/s,出口边界条件设置为压力出口,压力值为0,左右两侧及上侧设置为对称边界条件,以减少计算域对流场的影响。并且,为了尽量还原风洞真实环境,按照风洞试验工况同等比例设置了地面五带系

统,地面前端设置为滑移边界,对应风洞的边界层抽吸系统,防止边界层发展;中央移动带设置为Moving Wall,移动速度为30 m/s;其他地面部分和车体表面设置为固定壁面边界。

网格采用Fluent meshing工具中的Poly-Hexcore方法,核心区采用六面体网格,边界层和过渡区域采用多面体网格,相对于切割体网格,可以大大减小网格数量,进而提高计算效率,并且能够大大改善网格质量。针对计算域设置了5个加密区,分

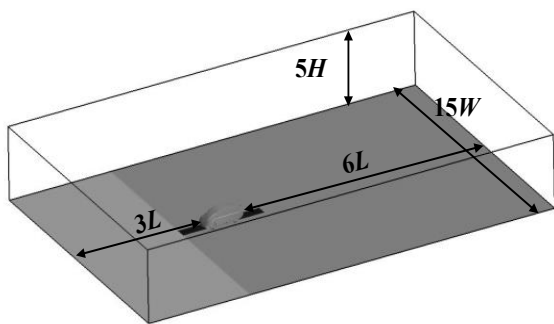


图2 计算域尺寸设置

Fig.2 Size of computational domain

别对车轮、车尾、车体进行网格加密,提高计算精度。

1.3 网格无关性

为了验证网格无关性,针对有车轮低风阻车型,通过加密面网格大小、车轮及尾部区域,得出3套网格方案,网格数量分别为2 269万、3 637万、6 651万。对3套网格方案的车轮静止、地面静止工况进行数值计算,并对气动阻力系数计算结果进行对比。由表1可以看到,3套不同网格阻力变化较小,并且与1:3缩比模型实验结果较接近,因此,综合考虑计算精度和计算资源的限制,选取最大面网格尺寸为10 mm的网格方案进行后续的对比计算。

表1 气动阻力系数结果对比

Tab.1 Comparison of aerodynamic drag coefficient results

最大面网格尺寸/mm	网格数/万	气动阻力系数	1/3模型试验气动阻力系数
12	2269	0.161	0.163
10	3637	0.162	
8	4844	0.162	

2 结果与讨论

2.1 空气动力

为了更好地分析有无车轮低风阻车型车身不同部件的气动力变化情况,将车身分9个部件,分别是前轮室、后轮室、前轮、后轮、垂直背部、车底、车身前部(包括车身前脸、引擎盖、前风窗、前部左右侧风窗、A柱、车身前半部侧围、前半部分车顶、后视镜等部位)、车身后部(包括后部左右侧风窗、C柱、车身后半部侧围、斜背等部位)、其他(包括导流罩、扰流板等部位)。

有车轮、无车轮汽车模型的分部件及总气动阻力对比情况如图3所示。从整车气动阻力来看,无车轮汽车模型NW的总气动阻力系数为0.105,而有车轮汽车模型WW的总气动阻力系数为0.172,添加车轮后汽车模型的总阻力增大了63.8%。从有车轮、无车轮汽车模型各部件的气动阻力对比结果来看,汽车模型增加车轮后,与无车轮汽车模型NW相比,前车轮、前轮室增加的气动阻力占总气动阻力增加量的31.3%,后车轮及后轮室增加的气动阻力占总气动阻力增量的14.9%,其中,前轮室气动阻力的增量在总气动阻力增量中占比最大。有车轮汽车模型WW与无车轮汽车模型NW相比,除了增加的车轮、轮室这些结构本身会带来较大的气动阻力增量外,车身其他部位的气动阻力也会发生较大改变,变化较大的部位有背部、车底、车身前部。其中,增加车轮后,背部和车身前部阻力增大,它们的阻力增量分别占总阻力增量的20.9%和23.9%,而车底部位阻力减小,阻力减小量占总阻力增量的16.4%。

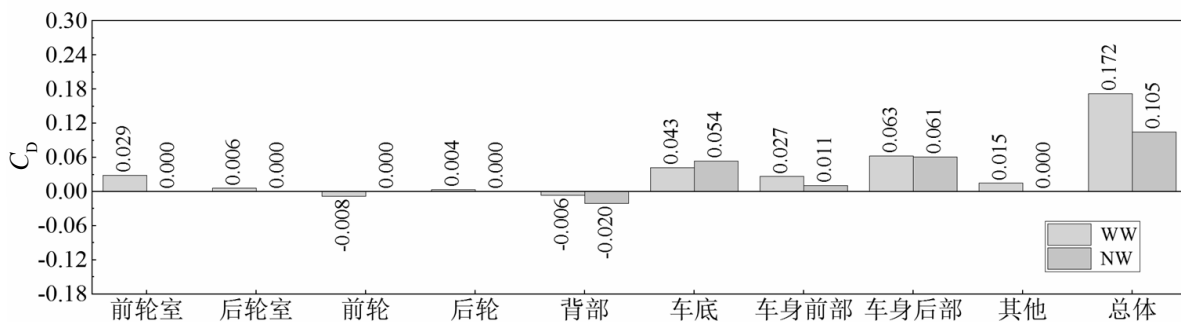


图3 部件气动阻力和总气动阻力

Fig.3 Component aerodynamic resistance and total aerodynamic resistance

车轮及轮室的存在与否也会对汽车模型的气动升力有一定的影响,因此对有车轮、无车轮汽车模型的分部件及总气动升力也进行对比研究,如图4所示。由总气动升力的对比可以看出,添加车轮后,汽

车模型的总气动升力显著增加,与无车轮模型NW相比,有车轮模型WW的总气动升力增加了一倍多。而由分部件气动升力的对比可得,总体升力的增加主要是由车底升力的增加所贡献的。

由有无车轮汽车模型总体及分部件气动阻力、气动升力的对比可见,车轮及轮室的存在会对低风阻车型的气动特性产生重要的影响,车轮和车身的

空气动力学相互作用会导致车身部件的气动力情况发生变化,进而导致车身总体气动阻力、升力的显著增大。

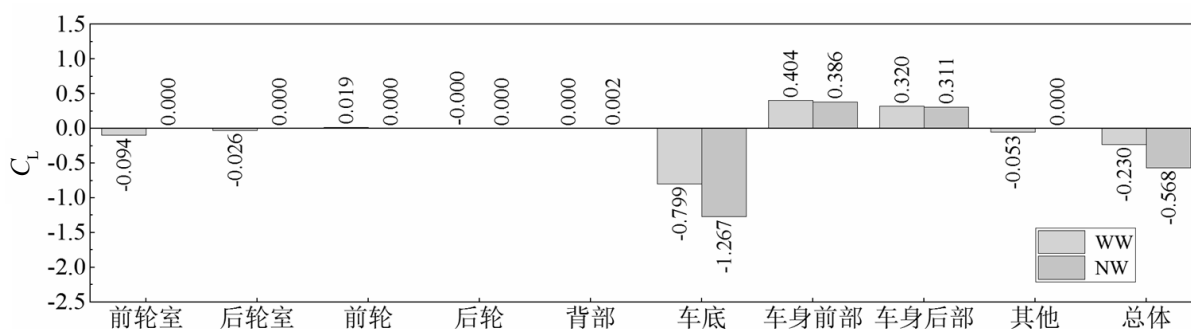


图4 部件气动升力和总气动升力

Fig.4 Component aerodynamic lift and total aerodynamic lift

2.2 部件表面压力分布及其周围流场情况

气动力的变化主要来源于物体表面压力的变化,而表面压力的变化与其周围的流场结构又有着密不可分的关系。因此为了深入探讨增加车轮后低风阻车型气动力发生变化的原因,本文接下来对增加车轮后气动力发生重要改变的部位(前轮及前轮室、背部、车身前部、车底)进行研究,重点分析其表面压力分布及变化情况,并结合其周围流场情况探究表面压力及气动力变化的原因。

2.2.1 前轮、前轮室表面压力分布及周围流场情况

低风阻车型添加车轮后,前轮、前轮室气动阻力的增量在总气动阻力增量中占比较大,因此首先分析有车轮低风阻车型的前轮、前轮室的表面压力分布情况,如图5所示。可以看到前轮、前轮室的表面压力分布都呈现负压状态,而前轮及前轮室后上部压力相对较高,轮室后底部也有相对较高的压力,因此在整体表面压力综合作用下,有车轮模型 WW 的前轮阻力较低,前轮室阻力较高。

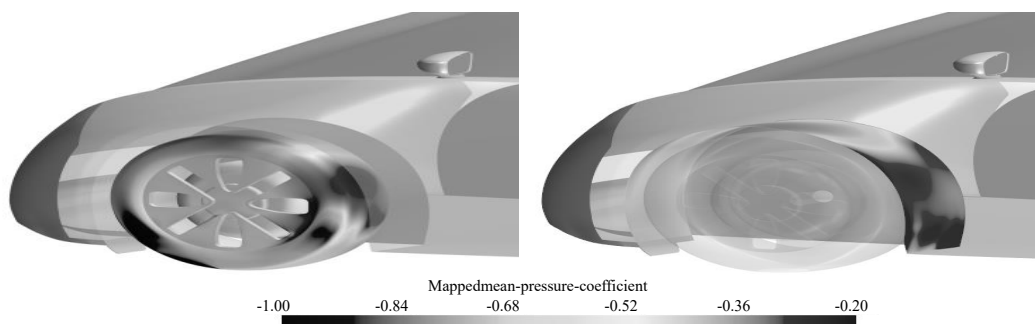


图5 前轮、前轮室表面压力分布(WW)

Fig.5 Surface pressure distribution of front wheel and front wheel chamber (WW)

表面压力的分布情况是由周围气体流动状态所决定的。由图6有车轮汽车模型的前轮及前轮室周围绕流情况可以看出,前轮及轮室周围的流动加速及复杂流动分离导致前轮及轮室表面压力分布为负压状态。高速气流从车轮外侧及轮室内侧进入轮室后部,在车轮与轮室后底部相互作用,偏转向上,导致流速降低,进而导致其附近的车轮及轮室后上部表面有相对较高的压力。而从轮室内侧前缘流进轮室的部分高速气流会冲击到轮室后底部表面,进而

导致轮室后底部也有相对较高的表面压力。

2.2.2 车身前部、侧面表面压力及周围流场

有车轮、无车轮低阻车型车身前部及侧面压力分布对比如图7所示。有车轮低风阻车的车轮和轮室会对车身侧面、车身底部气流产生阻碍作用,会导致前轮及轮室前部的车身侧面及车头底部入口处的气流流动速度明显减小,进而导致车轮前部、车头底部的车身负压有所减小,使得车身前部阻力增大。

由车身中截面的速度场分布图8可以看出,相

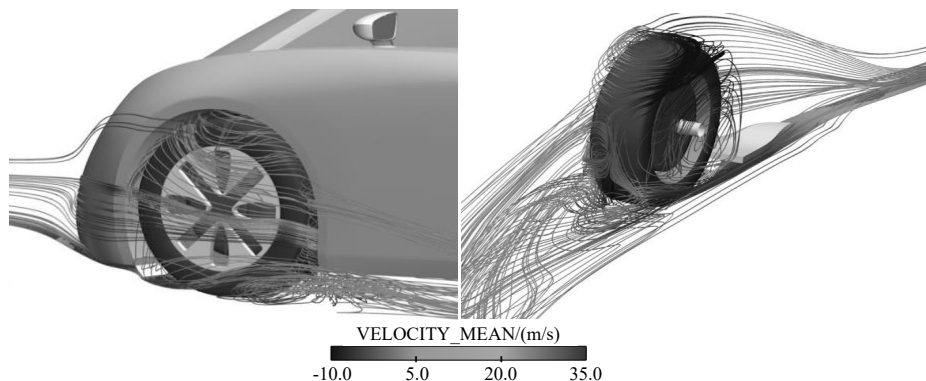


图6 前轮、前轮室周围绕流情况(WW)

Fig.6 Flow around front wheel and front wheel chamber(WW)

比于无车轮低风阻车型,有车轮低风阻车型的车底入口处气流流速明显降低,表明车轮的存在会对其周围气流流动产生阻碍作用,导致气流流速降低,进

而导致附近表面压力的增高。同时还可以观察到,车轮存在产生的阻塞也会使车底的气流流速减小,进而会对车底表面的压力分布带来相应变化。

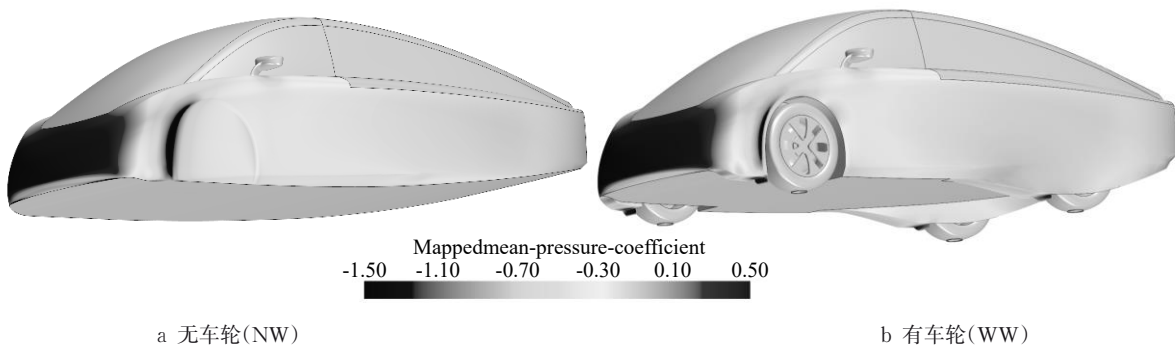


图7 车身前部及侧面表面压力分布

Fig.7 Pressure distribution on front and side surfaces of vehicle body

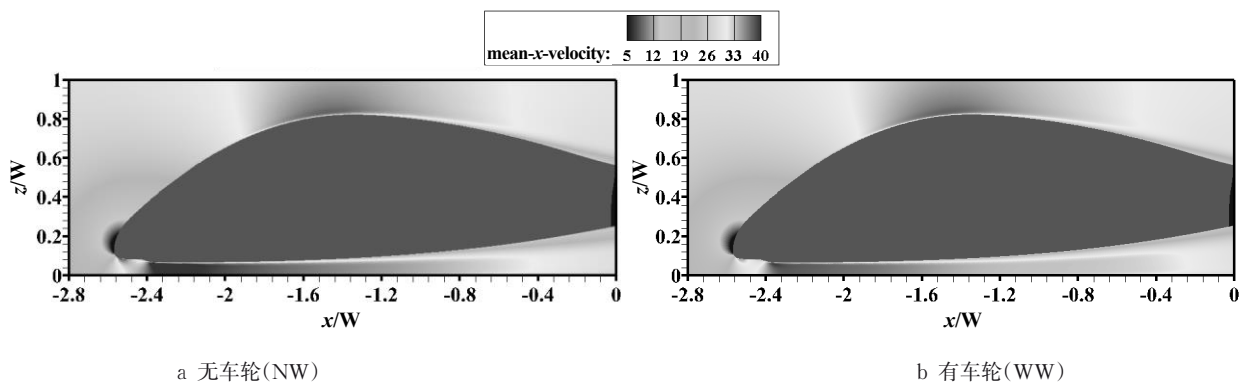


图8 车身中截面的速度场分布

Fig.8 Velocity field distribution in cross section of vehicle body

2.2.3 车底表面压力分布及周围流场情况

有无车轮车型的车底表面压力分布如图9所示。可以看出,在增加车轮后,相较于无车轮模型,车底的表面压力尤其是中部区域压力明显升高,这是由上述车轮对车底气流的阻塞作用致使车底气流

流速降低而导致的。而在车底后部,由于有车轮模型的后轮导流罩在车底形成通道,使得气流在流经后轮及后轮导流罩之间时在车底后部加速,进而使得车底后部表面压力相对于无车轮情况降低。还可以注意到,有车轮车型的车底前轮后方及车底出口

处相较于无车轮模型表面压力也有降低,尤其是前轮后部,这主要是受车轮低压尾迹的影响。但是综合来看,车底表面压力在有车轮情况下仍然高于无车轮情况,同时由于车底结构从前到后上翘,使得有车轮工况车底阻力减小,升力增大。

车轮尾迹可以从图 10 中过前后轮尾迹的水平面 $z=0.08\text{ m}$ 上的流线中明显看到。由于前后车轮的存在,车轮后部产生尾迹分离区,车底受车轮尾迹的影响,靠近车轮附近的表面压力降低,尤其是前轮后部。

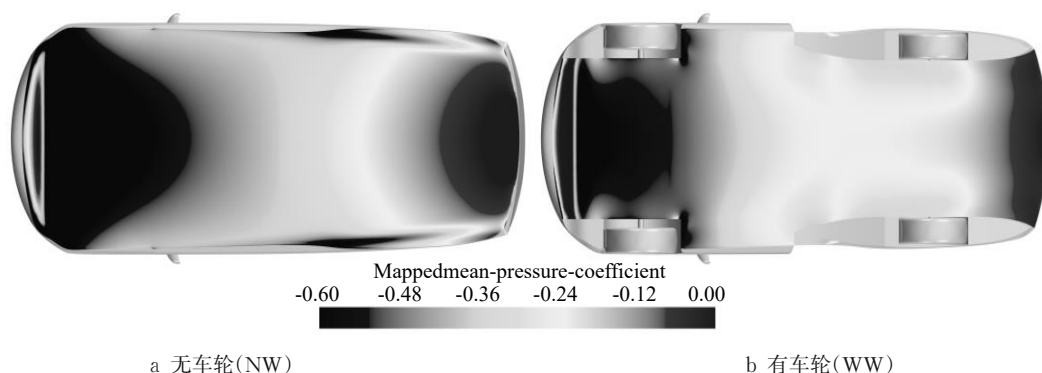


图9 车底表面压力分布

Fig.9 Distribution of pressure on vehicle underbody

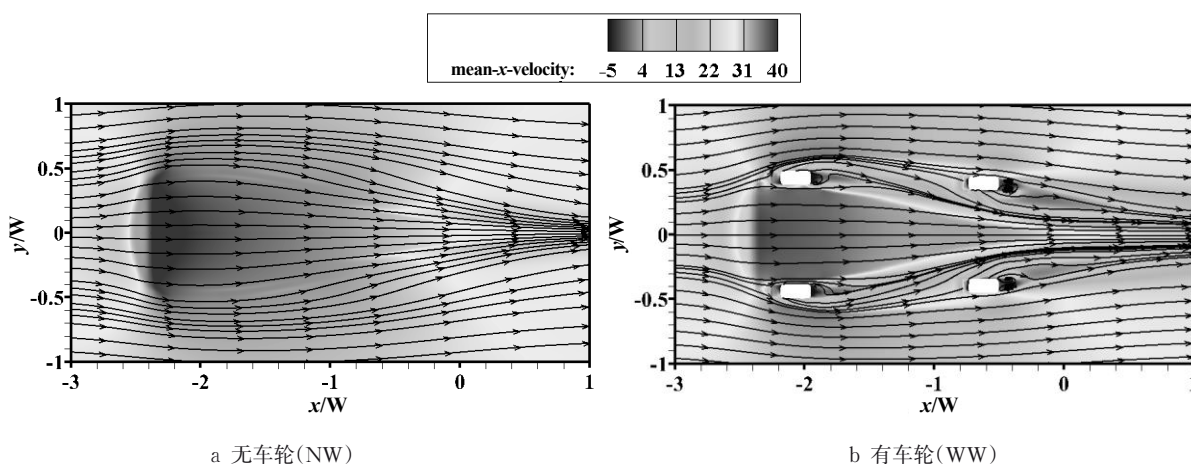


图10 $z=0.08\text{ m}$ 的平面流线图

Fig.10 Diagram of plane streamline at $z=0.08$

从车底表面压力分布对比可以看出,低阻车型气动特性受车轮的影响可以归类为两种效应。一种是全局阻塞效应,也就是车轮的存在类似于车底障碍物会使车底气流流通面积减小,导致气流更多流向车轮外侧,使得流经车底中间的气流量减少,流速降低,进而导致车底表面压力上升(本文把车轮对车底整体气流流动的影响称为车轮的全局阻塞效应);另一种是局部尾迹效应,也就是车轮的低速低压尾迹区会导致附近表面产生较低的压力。因此,车身气动特性受车轮的全局阻塞效应和局部尾迹效应的综合影响。

2.2.4 背部表面压力分布及周围流场情况

增加车轮后,低阻车背部阻力大幅增加。由图

11 背部压力分布对比可以看出,无车轮低阻车型、有车轮低阻车型背部表面压力分布都呈现环状分布,背部中央压力高,两侧压力较低。相对于无车轮工况,有车轮低阻车背部中间及两侧压力明显降低,尤其是背部两侧因为受到车轮尾迹的影响负压更加明显,导致背部阻力增大。

回流区长度主要受剪切层与回流区掺混强度的影响,一般情况下,剪切层与回流区掺混增强,回流区长度减小。由图 12 汽车尾部中截面平均湍动能叠加速度 $u=0$ 等值线图可以看到,相比于无车轮工况,有车轮工况的汽车尾迹下剪切层湍动能强度明显增大,这主要是由于车轮的存在导致车尾底部产生较强的流动分离。有车轮汽车尾迹下剪切层湍动

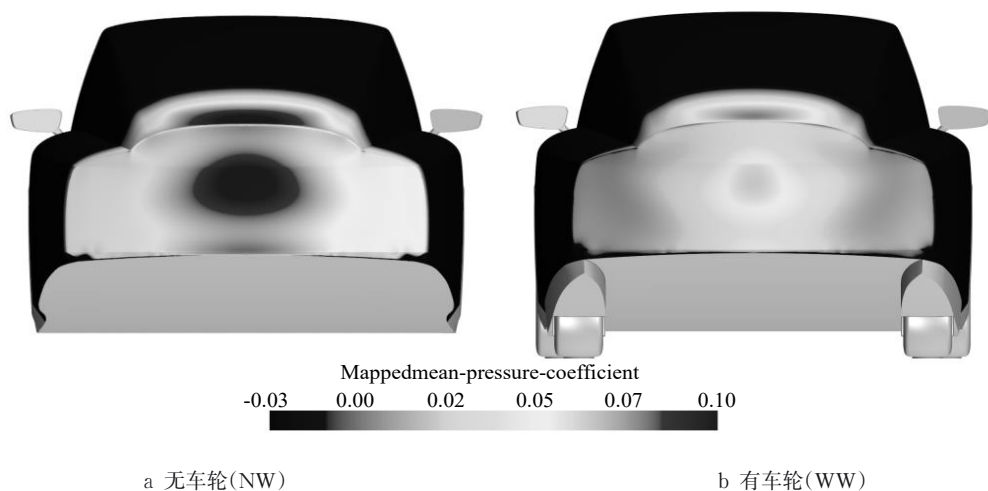


图11 汽车背部表面压力

Fig.11 Distribution of pressure on vehicle base

能增大,会导致剪切层与回流区掺混的增强,进而导致回流区长度减小,背压减小,背部阻力增大。

再通过一个过后轮尾迹区 $y = -0.52$ 的平面流

场图(见图13),可以更明显看到,有车轮工况下,回流区长度明显减小,以及剪切层与回流区掺混作用增强导致的底部气流更强的上洗。

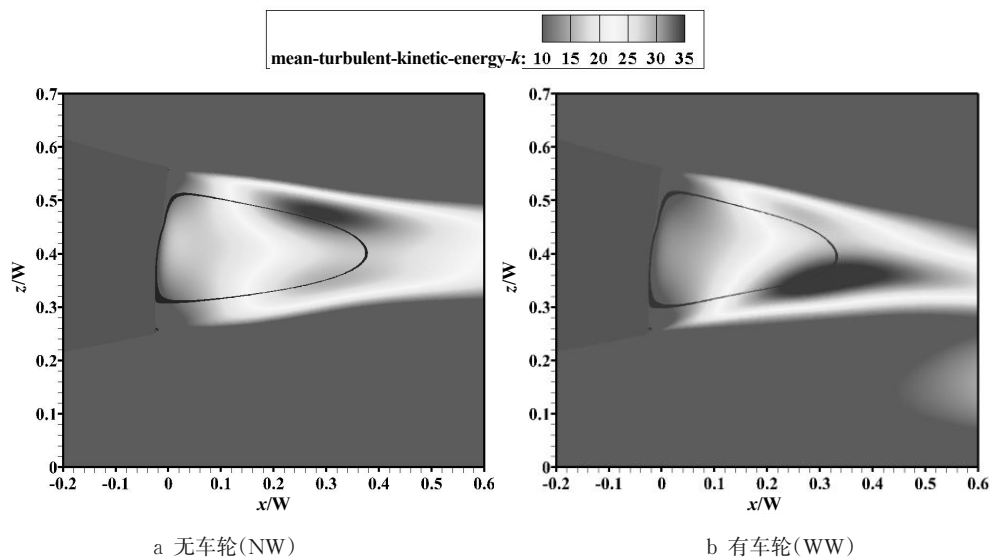


图12 汽车尾部中截面平均湍动能分布

Fig.12 Average turbulent kinetic energy distribution in the middle section of the car's tail

通过有无车轮汽车模型的三维尾部流线及总压 C_p 等值面图也可以解释汽车背部的压力分布特点以及有无车轮工况背部压力的变化情况,如图14所示。首先可以看出,有无车轮的汽车尾部的尾迹都呈现涡环结构,正是这种涡环结构诱导了背部压力的环状分布特点。还可以看出,有车轮工况下,后轮的尾迹分离与车尾涡环相互作用使得背部涡环的范围更广、强度更强,继而会诱导更低的背压,尤其是在背部的两侧。

这部分首先对有无车轮低风阻车型的总气动力

及部件气动力进行对比分析,结果表明,增加车轮会导致低阻车型的总气动阻力、总气动升力大幅增加。而从部件气动力变化情况看,增加车轮后阻力发生显著变化的部位有车轮轮室、背部、车身前部和车底,升力发生较大变化的部位主要是车底。

为了探究车身部件气动力变化的原因,又分别针对以上气动力发生重要改变的部位的表面压力分布变化情况及周围流场结构进行了对比分析。以上结果均表明,车轮与轮室的存在会产生复杂的流场结构,并与车身周围的流场结构相互作用,进而给车

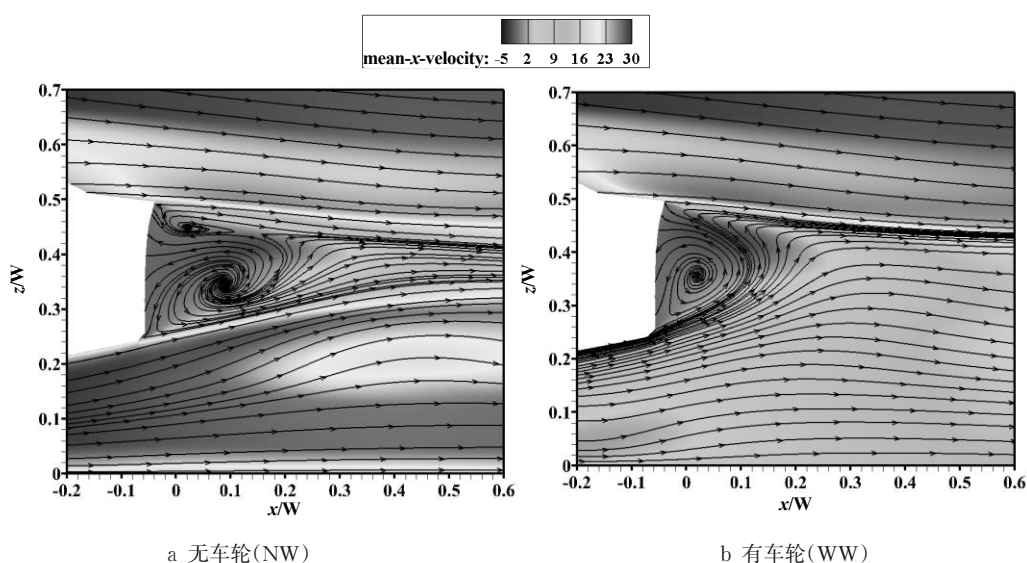
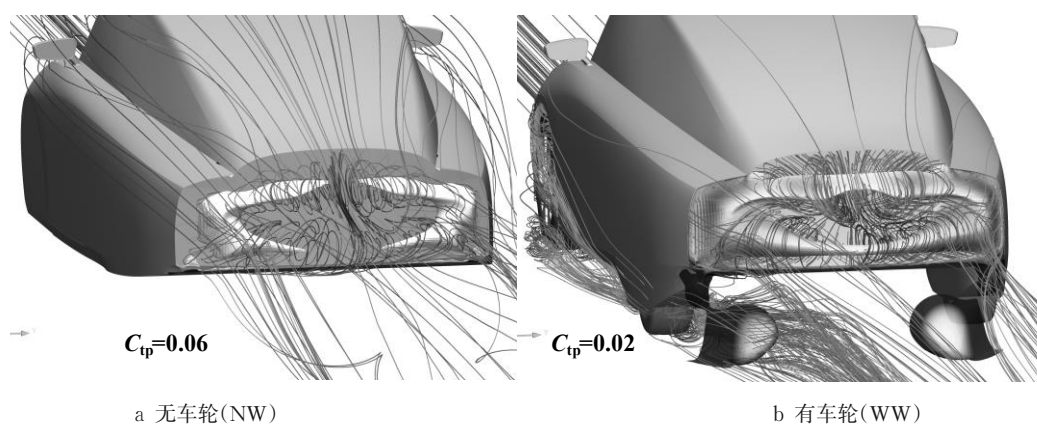
图 13 $y=-0.52$ 平面流线图Fig.13 $y=-0.52$ plane streamline diagram

图 14 三维尾部流线及总压等值面图

Fig.14 Three-dimensional tail streamline and total pressure iso-surface map

身的气动特性带来巨大的影响,而车轮对车身的气动影响可以分为全局阻塞效应与局部尾迹效应。

3 结论

本文采用CFD方法对无车轮低风阻车模型、有车轮低风阻车型的气动特性及周围流场结构进行了数值研究,通过对两模型的气动力、表面压力、流场模拟结果进行对比分析,得到以下结论:

(1) 有车轮低风阻车型与无车轮低风阻车型相比,车轮的存在使得总阻力增大63.8%,其中贡献最大的依次为前轮室、车身前部、背部、车底(负贡献)、后轮室;而升力增大一倍多,这主要由车底升力增大带来的。

(2) 低风阻车型车身受车轮带来的全局阻塞效

应和局部尾迹效应两种效应的综合影响。

(3) 有无车轮低风阻车型的汽车背部尾迹均呈现涡环结构,这使得汽车背部表面压力均呈现出中间高、四周低的环状分布。

(4) 有车轮低风阻车型的后轮及后轮导流罩产生的尾迹会使车身尾部下剪切层湍动能增大,这会增强剪切层与尾部回流区的掺混和车尾底部气流的上洗,导致背部涡环强度增强,回流区长度减小,背压降低。

参考文献:

- [1] PIROZZOLI S, ORLANDI P, BERNARDINI M. The fluid dynamics of rolling wheels at low Reynolds number [J]. Journal of fluid mechanics, 2012, 706: 496.
- [2] PFADENHAUER M, WICKERN G, ZWICKER K. On the

- influence of wheels and tyres on the aerodynamic drag of vehicles [C]// MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics. [S. l.]: [s. n.], 1996.
- [3] WICKERN G, LINDENER N. The Audi aeroacoustic wind tunnel: Final design and first operational experience [J]. SAE transactions, 2000(6): 1387.
- [4] WILLUMEIT H P, MATHEIS A, MÜLLER K. Korrelation von untersuchungsergebnissen zur seitenwindempfindlichkeit eines pkw im fahrsimulator und prüffeld [J]. ATZ, 1991, 93: 28.
- [5] WICKERN G, ZWICKER K, PFADENHAUER M. Rotating wheels-their impact on wind tunnel test techniques and on vehicle drag results [C]// SAE International Congress and Exposition. SAE Technical Paper 970133, 1997. <https://doi.org/10.4271/970133>.
- [6] WÄSCHLE A. The influence of rotating wheels on vehicle aerodynamics-numerical and experimental investigations [C]// SAE World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper 2007-01-0107, 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0107>.
- [7] KOITRAND S, REHNBERG S. A computational investigation of wheel and underbody flow interaction [D]. Gothenburg Sweden: Chalmers University of Technology, 2013.
- [8] 杨志刚, 沙潇, 贾青. 车轮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.
YANG Zhigang, SHA Xiao, JIA Qing. The influence of wheel width on car wind resistance [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(11): 1682.
- [9] HUMINIC A, HUMINIC G. Aerodynamic study of a generic car model with wheels and underbody diffuser [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(3): 397.
- [10] 余霄雁, 贾青, 杨志刚. 轮拱罩充满率对整车气动特性的影响 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 1550.
YU Xiaoyan, JIA Qing, YANG Zhigang. The effect of wheel arch cover filling rate on vehicle aerodynamic characteristics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2018, 46(11): 1550.
- [11] BONITZ S, WIESER D, BRONIEWICZ A, *et al.* Experimental investigation of the near wall flow downstream of a passenger car wheel arch [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2018, 11(1): 22.
- [12] ILEA L, IOZSA D. Wheels aerodynamics and impact on passenger vehicles drag coefficient [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S. l.]: IOP Publishing, 2018, 444(7): 072005.