

车身简化对不同轮辐下整车气动阻力 变化趋势的影响

贾青^{1,2}, 林靖如^{1,2}, 余霄雁^{1,2}, 杨志刚^{1,2,3}

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804;
3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 针对某A级轿车, 首先通过整车风洞试验验证了计算流体力学仿真方法的可靠性, 接着基于该数值计算方法, 对复杂车身数模进行了封闭格栅、轮拱罩并平顺底部的简化处理, 研究了车身简化对不同轮辐工况下整车气动阻力系数变化趋势的影响。结果显示, 简化前后阻力系数趋势发生了改变, 前后轮和车底部流场出现了明显变化。在此基础上, 仅针对发动机复杂的舱内部件进行了不同程度的简化, 结果显示, 阻力系数趋势对舱内部件的简化也很敏感。因此, 在以降低整车气动阻力为目标进行车轮局部优化时, 需要谨慎地进行车身的简化工作。

关键词: 汽车空气动力学; 计算流体力学; 车身简化; 轮辐设计

中图分类号: U467

文献标志码: A

Influences of Body Simplification on Aerodynamic Drag of a Sedan Under Different Rim Design Conditions

JIA Qing^{1,2}, LIN Jingru^{1,2}, YU Xiaoyan^{1,2},
YANG Zhigang^{1,2,3}

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: By means of computational fluid dynamics, this paper studies the effects of body simplification on the aerodynamic drag of a sedan under different rim design conditions. First, the numerical method is verified in a wind tunnel experiment. Then, the grille and wheel housings of the detailed sedan model are sealed while its bottom is flattened. The results show that the drag varies

and the flow field around the wheels as well as at the bottom also obviously differs after simplification. Finally, the detailed parts inside the engine bay are simplified while the grille and the detailed bottom are kept. The results show that the drag is also very sensitive to the simplification inside the engine bay. Therefore, great care should be taken in body simplification when optimizing the wheels for lowering the aerodynamic drag of the vehicle.

Key words: vehicle aerodynamics; computational fluid dynamics; simplification of vehicle body; rim design

随着能源和环境问题的日益严峻, 整车气动减阻成为目前汽车节能减排的一个重要突破口。车轮作为车辆主要外廓运动部件, 在气动阻力方面的影响越来越受到重视。Wickern等^[1]的研究表明, 对于一辆现代量产轿车, 车轮占整车气动阻力的比例可达25%。

在车轮空气动力学的研究方面, 造型多样的轮辐结构受到了广泛关注。Hooge等^[2]通过对车轮轮辐进行优化设计, 实现整车气动阻力减小6%。轮辐参数对整车气动阻力的影响和以低风阻为目标的轮辐优化成为研究的重要方向。在这些研究中, 既有采用实车或与实车还原度较高的复杂车身模型进行的研究^[3-6], 也有采用经过封闭格栅和轮拱罩、平顺底部等简化步骤的简化车身进行的研究^[7-9], 但车身简化对车轮优化研究的影响却少有提及。另一方面, 一些学者对车轮和车身的相互影响关系进行了研究^[10-13], 但这些研究主要将重点放在旋转车轮的

收稿日期: 2019-03-26

基金项目: 上海市重点实验室项目(18DZ2273300)

第一作者: 贾青(1979—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为空气动力学。E-mail: qing.jia@sawtc.com

通信作者: 林靖如(1993—), 男, 硕士生, 主要研究方向为空气动力学。E-mail: linjr0902@foxmail.com



流动特征方面,同样缺乏车身简化对不同车轮局部优化时整车阻力变化趋势影响的研究。而对于车轮优化设计而言,这种趋势在车身简化前后是否改变比单个车轮工况下阻力值是否改变更为重要。因此本文拟采用不同轮辐工况,研究车身简化方式对车轮局部优化的影响。

随着计算机能力的提高,计算流体力学(CFD)方法显示出较风洞试验局限少、成本低的优势。本文通过CFD数值计算,主要进行了两部分研究,首先根据目前常见的车身简化方式,对复杂车身数模进行了封闭格栅、轮拱罩及平顺底部的简化处理,研究简化前后不同轮辐工况下整车气动阻力系数的变化规律,分析其机理,并在复杂车身基础上,保留进气格栅和底盘结构,对发动机舱内的部件进行简化,研究舱内部件简化在不同轮辐工况下对整车气动阻力系数变化趋势的影响。

1 风洞试验与数值计算方法

1.1 风洞试验

以某A级轿车为研究对象,在同济大学上海地面交通工具风洞中心的气动声学风洞中进行了风洞试验,以对后续CFD仿真进行验证。该风洞为3/4开口回流式风洞,喷口面积为 27 m^2 ,配备有五带式移动地面系统、六分量天平及边界层抽吸设备。图1a所示为试验现场,试验时沿车身中截面布置了24个表面压力测点,测点位置如图1b所示。

1.2 数值模型

本文采用的车身数模包括模型A、B、C、D。

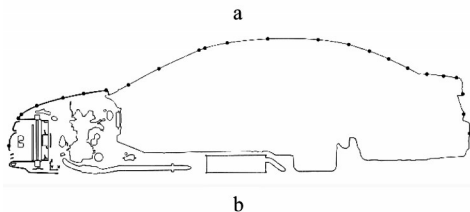


图1 风洞试验现场及表面压力测点

Fig.1 Wind tunnel experiment and pressure measuring points

模型A:基于实车建立的1:1复杂整车数模,具有完整的车身外形、原始车轮、制动盘以及发动机舱和车底部件,该模型也是与风洞试验进行对标的模型,如图2所示。



图2 模型A

Fig.2 Model A

模型B:在模型A的基础上,封闭进气格栅和前后轮拱罩,同时平顺底部。这种简化方式在车轮流场研究中被广泛采用^[8-9,11-14],如图3所示。



图3 模型B

Fig.3 Model B

模型C:在模型A的基础上将包括冷凝器多孔介质区域、散热器多孔介质区域、冷却风扇及风扇罩的前端进气模块简化为一个多孔介质区域,如图4所示,同时将原始发动机舱内部部件用一个包围大部分部件的长方体代替。

模型D:保留了模型A的原始前端进气模块,同时用3块较小的长方体替代原始发动机舱内体积最大的汽缸、变速箱和空气滤清器,忽略其他部件,3块长方体的总体积与原始部件总体积误差小于

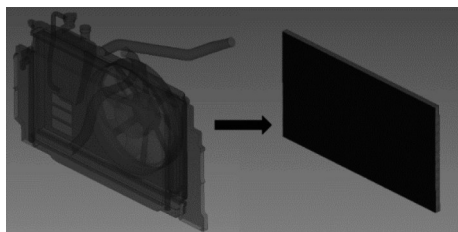


图4 模型C前端模块简化

Fig.4 Simplification of the air intake module of Model C

10^{-4} m^3 。图5所示为模型C和D对发动机舱内部部件的简化处理对比,黑色部分为模型A的原始舱内部件,透明部分为简化后的长方体,各长方体在部分位置开了槽以避免与底盘部件的干涉。

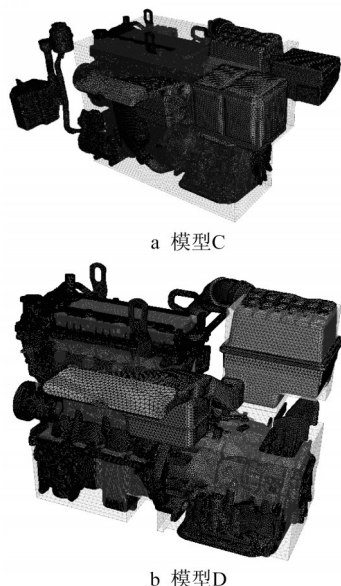


图5 模型C、D发动机舱内部部件简化

Fig.5 Simplification of the parts inside the engine bay of Models C and D

本文所采用的车轮模型如图6所示,轮胎型号为205/55 R16。其中,W0为上述模型A的原始车轮,进行与试验的对标。W1~W4为用于车身简化对比研究的不同辐条宽度的车轮,辐条宽度之比为1:2:3:6。各车轮轮胎接地处均拉伸了一个10 mm的小凸台与地面相接,其作用是改善车轮接地位置的网格质量,保证计算精度,该方法在车轮流场研究中被广泛采用^[7-9,12,14]。

各工况计算域均设置为10倍车长、10倍车宽、5倍车高的长方体,车头距计算域入口为3倍车长。

1.3 体网格划分及计算设置

本文采用商业计算流体力学软件STAR-CCM+进行仿真。体网格选择 Trimmed 网格,对包括发动机

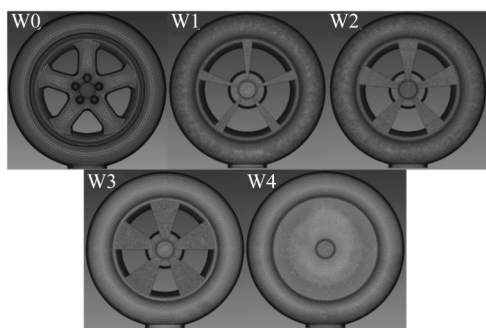


图6 车轮模型

Fig.6 Wheel models

舱和前后轮在内的车头车尾部位、后视镜附近进行局部加密,并在整车周围进行两次整体加密,同时在近壁面处生成5层边界层网格,以更好地捕捉流场结构,提高计算精度。最终,生成体网格数约3 700万。图7所示为车身中截面体网格示意图。

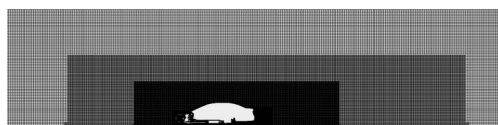


图7 车身中截面体网格

Fig.7 Cells on the middle section of the sedan

所有工况均采用RANS进行定常计算,湍流模型选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型,该模型对旋转气流和大尺度分离有较好的预测效果^[11]。壁面函数采用 Two-Layer All y^+ Wall Treatment 方法以减少对边界层网格尺寸的敏感性。计算域入口边界设置为速度入口,各工况速度大小均设置为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。出口设置为压力出口,侧边和顶部壁面设置为对称边界,地面设置为移动壁面,速度与入口一致。车轮设置为旋转壁面,外缘速度与入口速度保持一致。冷凝器和散热器设置为多孔介质区域,其惯性阻力系数和黏性阻力系数均由台架试验拟合得到。

2 计算结果及分析

2.1 数值方法验证

在展开车身简化仿真研究之前,首先对数值计算方法的准确性进行了验证。模型A整车气动阻力系数 C_D 的CFD计算值与试验值的对标结果如表1所示,其误差在5%以内,可满足本研究的需求。

车身中截面压力测点数据对标如图8所示,仿真与试验整体吻合较好,进一步验证了数值方法的准确性。

表 1 CFD 计算结果与风洞试验对标

Tab.1 Comparison of CFD results and experiment results

方法	C_D	$\Delta C_D/\%$
风洞试验	0.337 2	
CFD	0.354 1	5.0

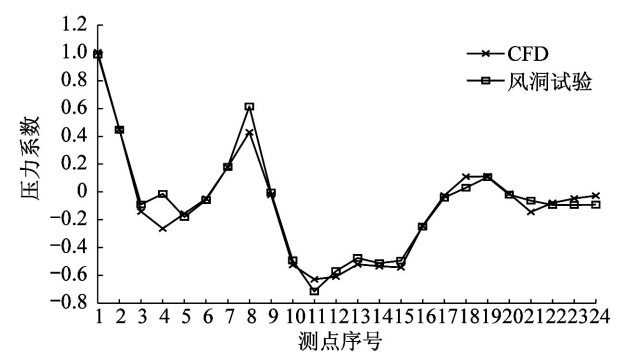


图 8 车身测点压力系数对标

Fig.8 Comparison of pressure coefficients of CFD and the experiment

2.2 模型 A 与模型 B 计算结果对比

图 9 所示为模型 A 与模型 B 在 4 个对比轮辐工况 W1~W4 下的整车气动阻力系数变化曲线。

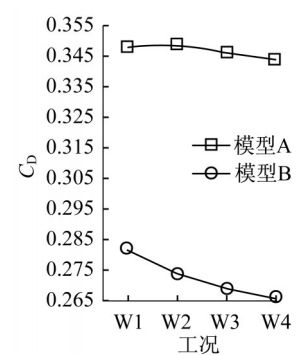


图 9 模型 A、B 整车 C_D 变化趋势

Fig.9 Variation of C_D of Models A and B

从图 9 中可以看出,模型 B 不仅整体具有更低的阻力,在 W1 和 W2 工况下的阻力系数变化趋势较模型 A 也发生了改变,因此选择 W1、W2 两个工况进行具体分析。表 2 所示为模型 A 和模型 B 在 W2 工况下相对于 W1 工况各部件的阻力系数增量 ΔC_D 。需要注意的是,由于前舱结构的不同,两种模型的上下车身划分是不同的,但这并不影响得到的结论。从表 2 中可以看出,简化前后对应部件阻力系数增量均发生了一些变动,最明显的是车身上的阻力增量由正变负。

图 10 所示为模型 A 与模型 B 在 $x=400\text{ mm}$ 截面的总压系数云图对比,该截面垂直于来流方向,位

表 2 模型 A、B 各部件 W2 工况阻力系数增量 ΔC_D

Tab.2 Increment of drag coefficient ΔC_D of different parts of Models A and B under W2 condition

部件	ΔC_D	
	模型 A	模型 B
前轮	-0.006	-0.004
后轮	0.003	0.001
上车身	0.001	-0.004
下车身	0.003	-0.001
其余部件	0	0
总体	0.001	-0.008

于前轮后缘的后方 82 mm 处。从图 10 中可以看出,一方面,模型 A 和模型 B 的前轮尾流结构存在明显差异,模型 A 前轮尾流上部①和中部②位置明显大于模型 B,这主要是由于前端冷却气流的存在使得前舱和轮腔内紊乱低速的气流更多通过前轮拱罩和轮辐的开口向外侧流出导致的。对于模型 B 而言,由于没有前端进气,中部②位置的尾流明显更小,车轮外侧的高速来流更加贴近辐条表面,而内侧的前方来流被积聚在封闭的前轮拱罩内,这部分紊乱低速的气流更多地从前轮拱罩的下方开口流出,从而将车轮内侧的高速来流下压至更低的位置。

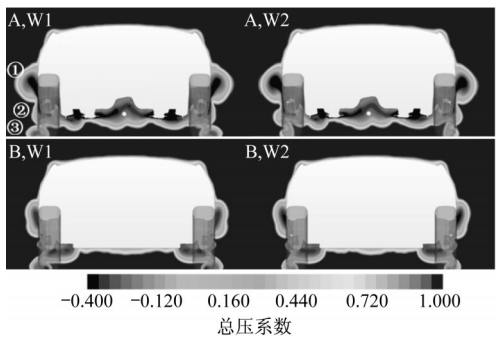


图 10 模型 A、B 在 $x=400\text{ mm}$ 截面的总压系数云图

Fig.10 Total pressure coefficient contours on $x=400\text{ mm}$ plane of Models A and B

另一方面,虽然表 2 中模型 A 和模型 B 在 W2 工况下的前轮阻力增量较为接近,但其前轮尾流的变化也有较大不同。从图 10 中可以看出,模型 A 在 W2 工况下中部尾流②向外侧突出更明显,同时近地面处的尾流③则显著减小,而模型 B 在 W2 工况下相比 W1 前轮尾流变化不大,仅近地面处的尾流③有所减小,且减小幅度不如模型 A。尾流变化的不同导致了前轮背部压力分布变化的不同,如图 11 所示。模型 A 在 W2 工况下车轮背部近地面处背压上升更明显,造成其前轮减阻量更大。

进一步给出了前轮和前轮拱罩附近的速度流线如图 12 所示。由图 12 可以看出,模型 A 的气流从轮

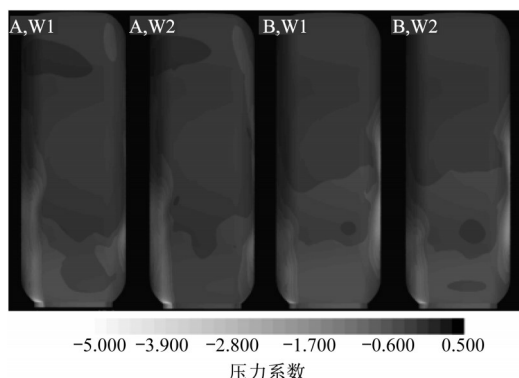


图11 模型A、B前轮背部压力系数云图

Fig.11 Pressure coefficient contours at the back of front wheels of Models A and B

辐开口及轮拱罩后侧向外侧流出的趋势比模型B更为明显,从而造成了尾流上部和中部整体向外侧突出更明显,这与上述尾流总压云图的分析是一致的。对于模型A而言,在W2工况下,轮辐开孔a处的气流变得较为集中,且向外侧流出的趋势更明显,造成中部尾流向外侧突出,而在高度方向有所缩小,同时,从轮辐下侧开孔b处流出的气流角度发生较大提前,推测这一角度变化抑制了近地面处气流的分离,使得近地面处的尾流显著减小。而模型B在轮辐开孔a处气流的变化并不明显,同时在开孔b处流出的气流角度仅小幅提前,因而近地面处尾流减小不如A显著。

前轮尾流的不同变化对其下游的后轮和车身部分也造成了显著的影响。图13所示为垂直于车高方向上的近车底部平面 $z=-140$ mm速度云图,图14所示为该平面与车身的位置关系及后轮压力系数云图。从图13中可以看出,模型A前轮尾流在W2工况下向外侧偏转,内侧高速气流补充并冲击后轮,这一点从图10模型A尾流中部②位置内侧高速气流的变化也可以看出,最终导致模型A在W2工况下后轮迎风面压力明显上升,如图14所示,从而增阻较模型B更明显。

从图13中还可以看出,模型B车底部流场相比模型A发生了很大改变,经过平顺处理的车底部的流速明显升高,同时由于平顺后底盘尾端的仰角与地面形成了扩散段,产生了吸入外侧气流的效应,从而使得后轮尾流向内偏折更明显^[13]。

图15所示为模型A和模型B的车身背压云图,可以看出,模型A在W2工况下相比W1工况的车身背压变化较小,而模型B在W2工况下车身背压升高更加明显,因此模型B上车身的阻力有所降低。图

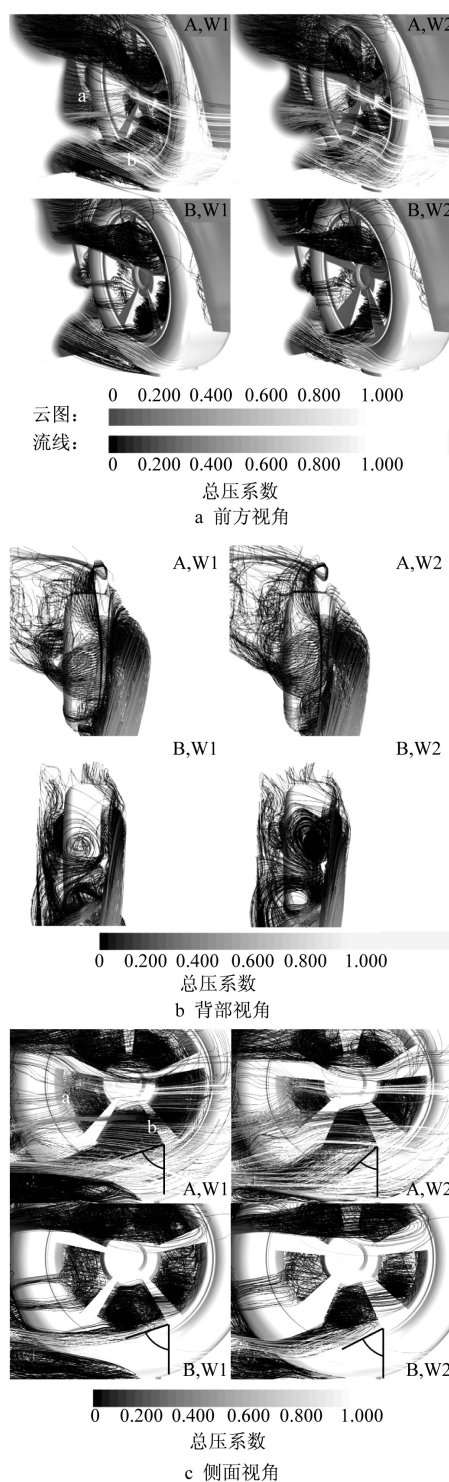


图12 前轮和前轮拱罩附近速度流线

Fig.12 Velocity streamlines around front wheels and front wheel housings

16所示为位于车身后方的 $x=3.8$ m平面总压云图,可以看出,模型B在W2工况下相比W1工况尾涡强度有所减小,模型A则几乎看不出区别。这是由于模型A变化剧烈的前轮尾流影响着后轮的尾流,尽管在W2工况下,近地面处后轮的尾流强度减小较

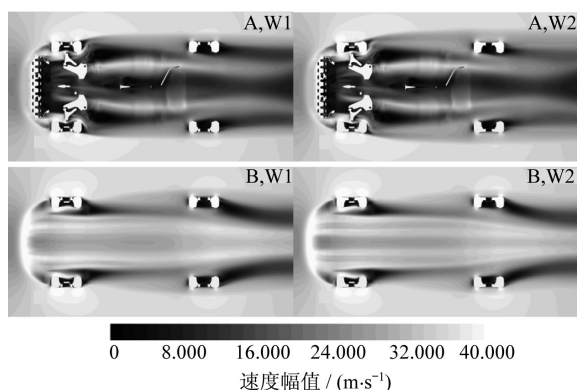
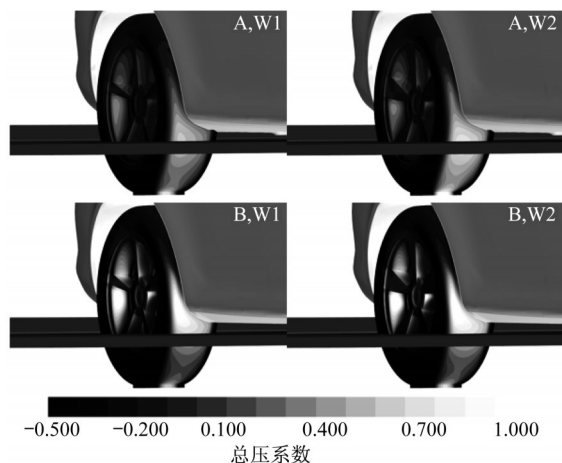
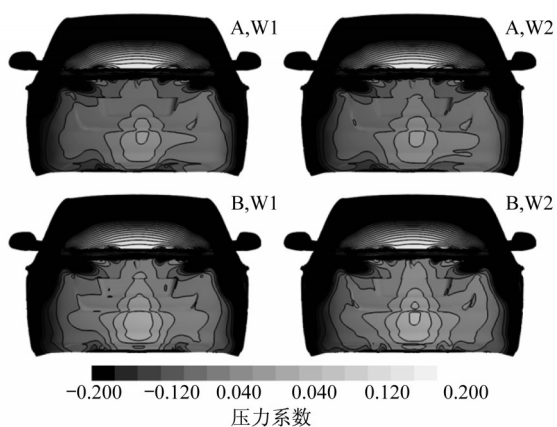
图13 车身底部 $z=-140$ mm截面速度云图Fig.13 Velocity contours on the $z=-140$ mm plane at the bottom of the body图14 $z=-140$ mm截面位置示意图及后轮压力系数云图
Fig.14 Location of the $z=-140$ mm plane and pressure coefficient contours of rear wheels

图15 模型A、B车身背压云图

Fig.15 Pressure coefficient contours at the back of Models A and B

模型B更明显,但其前轮中下部分较大的尾流一直发展到下游后轮,使得后轮中下部分也具有尺度更

大的尾流。对于模型B而言,其前轮尾流变化较小,因此后轮尾流减小带来的车身减阻效果较为明确。同时,由于其后轮尾流向内偏折,在W2工况后轮尾流减小的同时,其内偏角度也有所减小,使得底部流量进一步增大,底部高速气流的补充进一步促进了尾涡的减小和背部压力的回升。

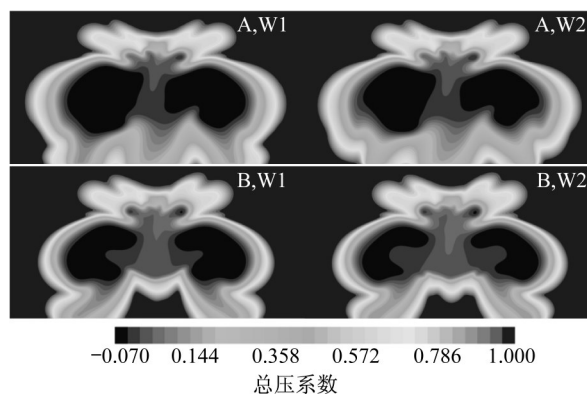
图16 车身后方 $x=3.8$ m总压系数云图Fig.16 Total pressure coefficient contours on the $x=3.8$ m plane behind the body

图17所示为模型A、B下车身压力系数云图对比。从图17中可以发现,模型A下车身尾端迎风面压力明显增大。其原因是模型A在W2工况下前轮内侧高速气流发生偏转,使得后轮内侧流速也高于W1工况,高速气流冲击迎风面,使其压力增大,从而使得下车身增阻,这可以由图18所示的后向流线图清晰地看出。而对于模型B而言,后轮内侧流速变化不明显,同时平坦的底部也显然使其难以发生阻力上的变化。

2.3 模型A与模型C、D计算结果对比

考虑到发动机舱内部部件建模的难度,同时根

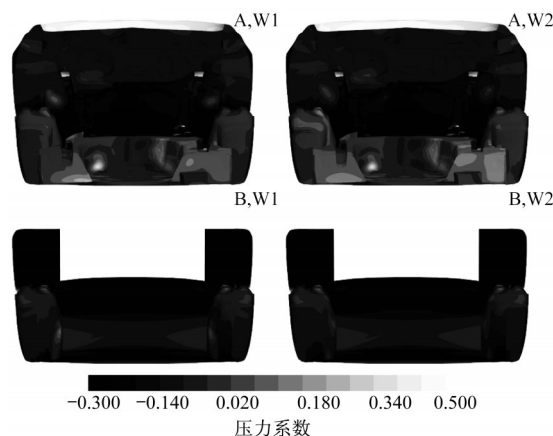


图17 下车身压力系数云图

Fig.17 Pressure coefficient contours of the underbody

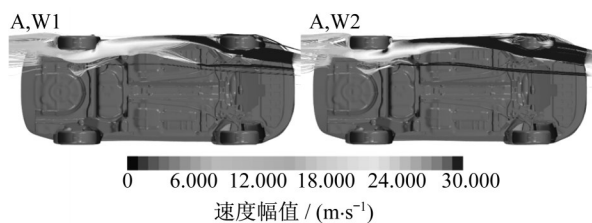


图18 模型A底部后侧迎风面后向流线图

Fig.18 Backward streamlines at the windward face of the rear side at the bottom of Model A

据上述分析可见,前端进气对整车阻力变化趋势影响较大,因此对模型A、C、D进行了计算分析,研究舱内部件简化对整车阻力变化趋势的影响。图19所示为模型A、C、D在W1~W4工况下整车及各主要部件的气动阻力系数 C_D 变化曲线。从图19中可以看出,经过较大改动的模型C的 C_D 变化趋势也发生了较大变化,而改动较少的模型D的 C_D 变化趋势整体与模型A吻合更好。

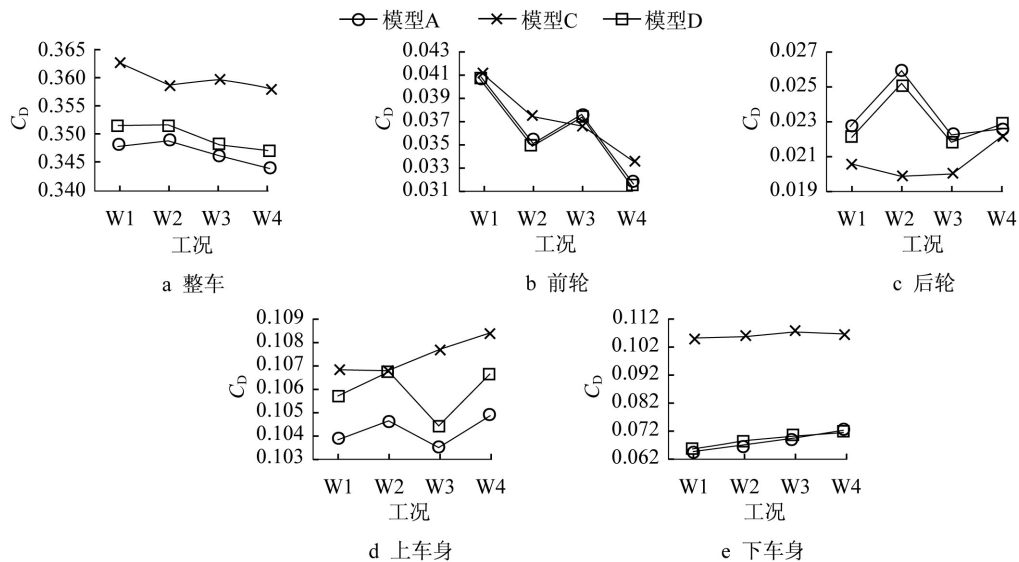
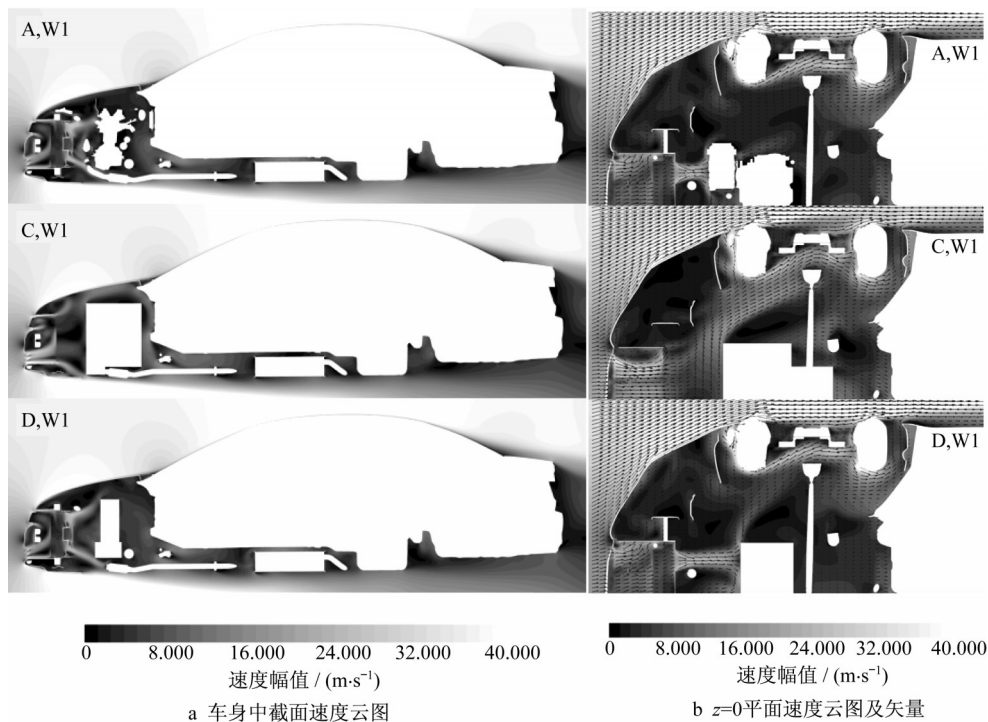
图19 模型A、C、D的 C_D 变化趋势Fig.19 Variation of C_D of Models A, C, and D

图20 W1工况模型A、C、D前舱流动对比

Fig.20 Comparison of the flow inside the engine bay of Models A, C, and D under W1 condition

以W1工况为例,图20比较了3种模型的前舱气流,可以看出,模型C、D的前舱气流相比模型A均有所变化,但模型D的前舱气流整体与模型A更接近,且没有对车底部和车轮附近的流场产生明显的影响,而模型C不仅使得前舱气流从车底部开口流出的气流量增大,也使得该高度上前轮轮辐开孔处向外流出的气流量增大。

图21、22比较了3种模型的前轮尾流和车底部流场,可以看出,前舱气流的显著改变导致了模型C、D的前轮尾流和车底部流场较模型A也发生了明显变化。2.2小节分析指出,W2工况下模型A前轮近地面处尾流的显著减小以及后轮前方来流的增速是导致其在该工况下具有较高阻力的重要原因,模型C简化方案没有出现这一流动现象,而与模型A具有相似前舱气流的模型D简化方案则很好地捕捉到了该流动特征。

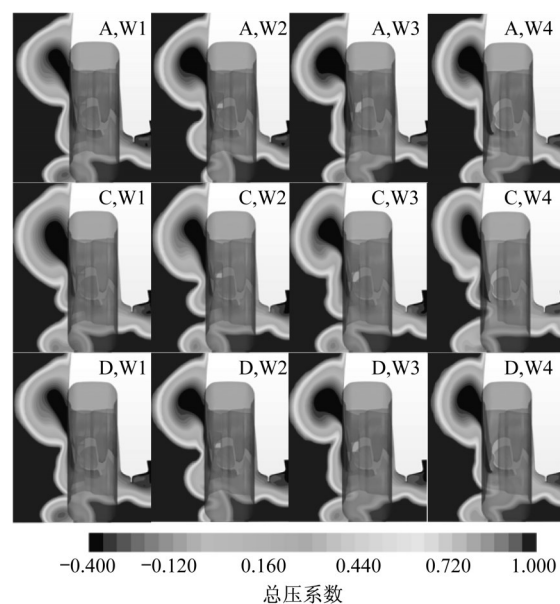


图21 前轮尾流对比

Fig.21 Comparison of front wheel wakes

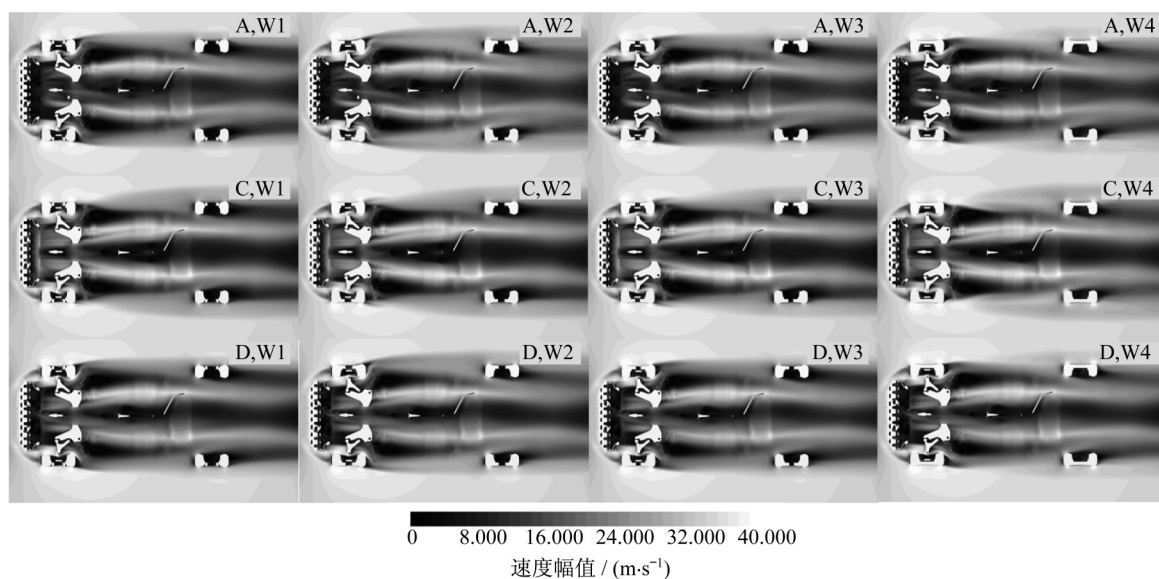


图22 $z=-140$ mm截面车底部速度云图对比

Fig.22 Velocity contours on the $z=-140$ mm plane at the bottom of the body

3 结论

(1)封闭格栅、轮拱罩并平顺底部的常见简化车身模型在不同轮辐工况下显示出与原始复杂车身模型不同的整车气动阻力系数变化趋势,其前后轮周围及车底部流场较原始模型发生显著变化并在轮辐工况改变时丢失原始模型部分关键的流场变化特征。因此这种常用的简化方式并不适用于以整车减

阻为目标的车轮局部优化方案的研究。

(2)整车气动阻力系数在不同轮辐工况下的变化趋势对发动机舱内部部件的简化也很敏感,不恰当的简化会使得前舱气流发生显著变化从而明显改变前轮周围和车底部的流场,同样会造成轮辐工况变化时丢失原始模型的部分关键流动变化特征。保留原始模型的前端进气模块,用体积相近的长方体替代原始舱内部件的简化方法显示出与原模型较好

的一致性,其前舱气流的变化并不太大,不足以对前轮和车底部流场产生明显影响。

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[R]. Detroit: SAE, 1997.
- [2] HOOGE A, PALIN R, JOHNSON S, *et al.* The aerodynamic development of the Tesla Model S .Part 2: wheel design optimization[R]. Detroit: SAE, 2012.
- [3] MODLINGER F, DEMUTH R, ADAMS N. New directions in the optimization of the flow around wheels and wheel archs[C]// 7th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference. Warwickshire: Mira Ltd, 2008: 324-335.
- [4] BUSCARIOLO F, KARBON K. Comparative CFD analysis between rotating and static cases of different wheels opening designs over a performance sedan[R]. Detroit: SAE, 2011.
- [5] LANDSTROEM C, WALKER T, CHRISTOFFERSEN L, *et al.* Influences of different front and rear wheel designs on aerodynamic drag of a sedan type passenger car [R]. Detroit: SAE, 2011.
- [6] VDOVIN A, BONITZ S, LANDSTROEM C, *et al.* Investigation of wheel ventilation-drag using a modular wheel design concept[R]. Detroit: SAE, 2013.
- [7] 傅立敏,胡兴军,张世村. CFD仿真在汽车轮辋辐板设计中的应用研究[J]. 汽车技术, 2006(5):16.
FU Limin, HU Xingjun, ZHANG Shicun. The application and research of CFD simulation in the design of automotive wheel disc[J]. Automobile Technology, 2006(5):16.
- [8] 谷正气,林肖辉,李伟平,等. 车轮辐板形状对汽车气动阻力影响分析[J]. 科技导报, 2011, 29(6):57.
GU Zhengqi, LIN Xiaohui, LI Weiping, *et al.* Effect of the shape of wheel spokes on vehicle aerodynamic performance[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(6):57.
- [9] 张苏铁. 车轮气动阻力及传热性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
ZHANG Sutie. Research on aerodynamic drag and heat transfer performance of wheel[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [10] ELOFSSON P, BANNISTER M. Drag reduction mechanisms due to moving ground and wheel rotation in passenger cars[R]. Detroit: SAE, 2002.
- [11] WAESCHLE A. The influence of rotating wheels on vehicle aerodynamics - numerical and experimental investigations [R]. Detroit: SAE, 2007.
- [12] 贾青,李挺,杨志刚. 旋转车轮对整车气动性能的影响评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 949.
JIA Qing, LI Ting, YANG Zhigang. Influence of rotating wheels on vehicle aerodynamics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(6): 949.
- [13] TARO Y, TAKAFUMI M, YUTA S, *et al.* Effects of moving ground and rotating wheels on aerodynamic drag of a 2-box vehicle[R]. Detroit: SAE, 2018.
- [14] 李心平,贾青,杨志刚. 刹车盘结构对车轮及整车流场的影响[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(2):70
LI Xinpeng, JIA Qing, YANG Zhigang. Effect of braking disk structure on wheel and whole vehicle flow field[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(2):70.