负压气动造型对DrivAer车空气阻力的影响

李 铭[1,2,3],赵尚义[2],徐海军[2],高 青[3],陈 鑫[3],秦国锋[1]

(1.广西师范大学 农林智能装备技术广西高校工程研究中心,广西 桂林 541006;2.广西汽车集团有限公司博士后与外部专家工作站,广西 柳州 545027;3.吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,长春 130022)

摘 要:为了研究负压表面对真车的实际减阻效果,基于DrivAer车模型,利用RANS仿真对比研究了负压造型和光滑造型两种模型的气动阻力特性和流场特性,并基于对回流区三维结构和回流涡旋的分析揭示了负压造型气动减阻的内在机理。结果表明,负压造型无法在全雷诺数区间实现减阻效应:在低雷诺数时,负压造型实现2.1%以上的减阻;但在高雷诺数时,负压造型弱化车尾回流涡旋的效果已经无法抵消由其自身引起的气动阻力,进而引起整车阻力系数的提高。

关键词:车辆工程;DrivAer;气动减阻;负压造型;涡旋结构;乘用车

中图分类号:U461.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2026)07-1780-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241290

Effect of negative-pressure design on aerodynamic drag of DrivAer car model

LI Ming[1,2,3],ZHAO Shang-yi[2],XU Hai-jun[2],GAO Qing[3],CHEN Xin[3],QIN Guo-feng[1]

(1. *Engineering Research Center for Intelligent Agriculture & Forestry Equipment Technology of Guangxi Universities, Guangxi Normal University, Guilin* 541006, *China*; 2. *Postdoctoral and External Expert Workstation, Guangxi Automobile Group Co., Ltd., Liuzhou* 545027, *China*; 3. *State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun* 130022, *China*)

Abstract: The practical drag reduction effect of negative-pressure surfaces on real vehicles was investigated, RANS simulations based on the DrivAer vehicle model were adopted to comparatively analyse the aerodynamic drag and flow field characteristics of the negative-pressure configuration model and the smooth configuration model, and the inner mechanism of drag reduction was analyzed based on the three-dimensional structures of recirculation zones and recirculating vortices. The results show that non-smooth surfaces might not be capable of producing drag reduction over the full Reynolds number range. At low Reynolds number, a drag reduction of 2.1% is achieved, but at high Reynolds number, the drag increase by non-smooth surface itself could not be compensated by the drag reduction through weakening recirculating vortices in the rear of the vehicle, resulting in an increase in the overall drag.

收稿日期:2024-12-02.

基金项目:广西科技计划项目(桂科AD22035023);桂林市科技项目(20230120-6).

作者简介:李铭(1984-),男,副教授,博士.研究方向:汽车空气动力学和新能源汽车热管理.
E-mail:lmingdldr@gmail.com

Key words: vehicle engineering; DrivAer; drag reduction; negative-pressure design; vortical structures; passenger car

0　引　言

目前，汽车产业面临能源短缺和环境污染两大危机，我国大力发展新能源汽车以保障能源安全并缓解环境污染，而降低汽车气动阻力有利于降低能耗，提高新能源汽车续航里程，从而提升新能源汽车的品牌竞争力。采用负压气动造型不仅可以丰富车辆造型特征的表达元素，强化表现力并增强品牌特征，还可以在一定程度上实现汽车的气动减阻，降低风噪并改善气动稳定特性。近年来，具有负压气动造型的新车市场份额有逐年增多的趋势。

随着仿真条件的提升，研究重点已经逐渐从Ahmed和MIRA等简化汽车模型演变为类真车模型。DrivAer模型是开源模型，具有与Audi A4和BMW 3系相似的气动造型，可用于在真车条件下仿真方法和气动优化措施的研究。Heft等[1]对DrivAer车进行了最早一轮的风洞试验研究，然后利用OpenFOAM进行了数值仿真研究，对比分析了后视镜、车轮转动、地面效应等因素对气动阻力系数和压力系数分布的影响。Qin等[2]分别基于RANS仿真、大涡模拟和分离涡模拟对DrivAer车进行了仿真，结果表明，大涡模拟的预测精度最高。Rüttgers等[3]采用大涡模拟对DrivAer车上流动分离、涡旋结构以及流场动态特性进行了研究。Liu等[4]利用粒子图像测速(Particle image velocimetry，PIV)实验研究DrivAer车车尾流场，重建了流场三维结构。此外，Wittmeier等[5]对具有开放格栅的DrivAer车模型进行了试验和仿真研究，提供了Notchback和Estate两种背部造型的气动阻力和升力系数。John等[6]基于风洞试验和RANS仿真对比了当前14种DrivAer车的气动变形对气动阻力和升力的影响。Ford汽车和韩国现代汽车的Hupertz等学者[7]提供了DrivAer车模型的包括前后风窗、A柱、车尾、格栅、发动机以及汽车流场特征面压力分布，为仿真验证提供了详尽的数据。

在减阻措施方面，张英朝等[8]通过主动射流实现了6%以上的减阻效果。Cho等[9]对比在DrivAer车背部和尾箱设置的多种被动减阻装置，实现了3.3%～5.1%的实际减阻效果。He等[10]采用离散伴随优化对DrivAer车的造型进行了优化，阻力系数最多下降了12.1%。Grandemange等[11]在车尾回流区设置扰流圆柱破坏涡旋结构的完整性，从而促进压力回升并实现减阻。胡兴军等[12]在货车顶部布置多孔介质，实现了接近6%的减阻效果。

在负压减阻方面，Wang等[13]利用Ahmed模型研究了负压车身造型对气动阻力的影响，利用Kriging代理模型对负压造型进行优化，并获得了5.2%的减阻效果。Ballerstein等[14]在后车窗布置凹坑组，实现了1.9%的减阻效果，而且结果表明，负压造型表面在减阻的同时还显著降低了升力。杨易等[15]在MIRA车尾布置凹坑组，利用风洞试验验证负压造型对具有直背式造型车辆的减阻效应，结果表明，负压造型结合涡流喷射可以实现8.75%的减阻效果。

尽管已有学者对负压造型的减阻效果进行了研究，但很多学者是利用简化汽车模型开展研究[11,13]，而简化汽车模型的气动阻力提升空间本身就很大，且曲面和结构都与真车相差甚远，因此这些减阻措施在真车上的实际减阻效果仍需要进一步验证。同时，负压造型对真车回流区涡旋的作用机制和减阻原理的探讨仍然有限。基于此，本文利用DrivAer车对负压造型的减阻效果进行探索，研究雷诺数效应对负压造型减阻效果的影响，对回流区和涡旋结构进行分析，揭示负压造型的减阻原理。

1　数值方法

1.1　控制方程

对汽车外流场进行仿真，工作介质为空气，最大车速为16 m/s(雷诺数Re约为4.9×10^6)，因此将空气视为不可压缩流体。控制方程如下：

$$\nabla\cdot U=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\nabla\cdot(UU)=-\frac{1}{\rho}\nabla P+\upsilon\nabla^2U \tag{2}$$

式中：U、P分别为速度场和压力场；∇为哈密顿算子；υ为运动黏度；ρ为密度；t为时间。

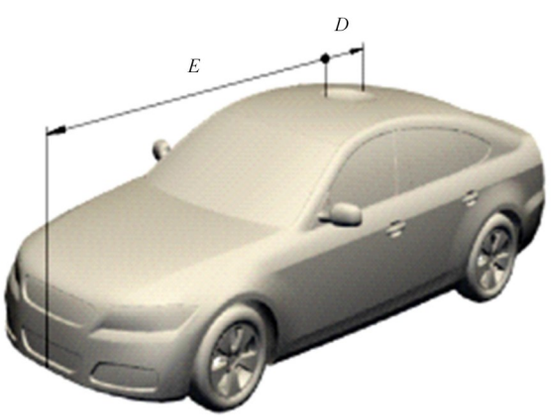
空气有效黏度由分子黏度和涡黏度组成,涡黏度利用湍流模型求出。

1.2 数值模型

本文利用Notchback式DrivAer车验证负压造型对真车的减阻效果并研究其流场特性。如图1所示,具有负压造型DrivAer车是原车基础,在车背上布置了单个球形浅凹坑。一方面,凹坑结构可产生同等负压作用;另一方面,该设计方案能够规避过度优化带来的问题,避免所得研究结论适用范围受限。凹坑前缘距离车头距离E为2 790 mm,凹坑直径D为450 mm,深度系数d/D为0.1。本文虽然只研究了车顶采用负压造型的情况,但因为相似性,得到的结论也适用于车辆侧面采用负压造型的情况。



(a)光滑造型



(b)负压造型

图1 DrivAer车及其负压造型模型

Fig. 1 DrivAer car model and its negative-pressure design

数值风洞的尺寸为$9L\times11W\times8H$,其中,L、W和H分别为DrivAer车的长、宽、高,取值分别为4.6 m、2 m和1.4 m。如图2所示。阻塞比约为1%,满足实验要求。为了降低计算量,假定左右后视镜相同,在数值风洞中心平面施加对称边界条件,取数值风洞的一半作为计算域。在风洞顶面和侧壁施加对称边界条件;在底面施加滑移边界条件,用以消除路面边界层的影响;进口速度为4~16 m/s。此外,不考虑车轮旋转对流场和阻力系数的影响。

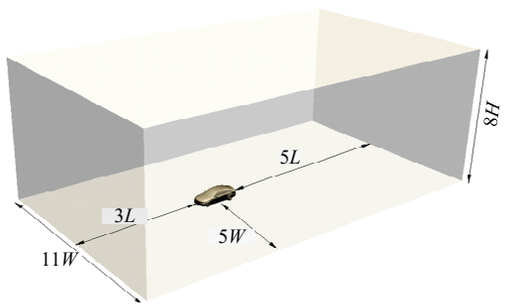
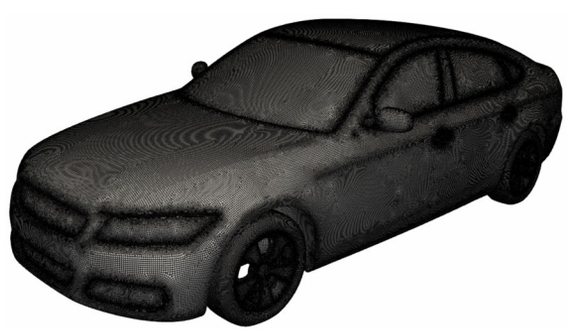


图2 DrivAer车数值风洞示意图

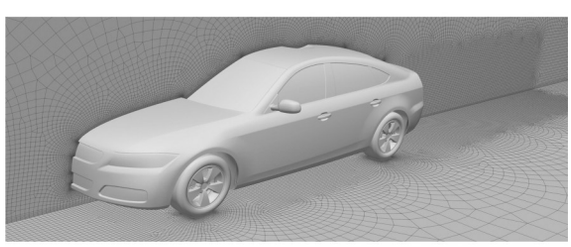
Fig. 2 Schematic scheme of numerical tunnel for DrivAer model

利用ANSA实现曲面修复和网格生成。采用混合式面网格,网格质量大于0.5,面网格尺寸控制在1.5~10 mm;共生成7层边界层网格,拉伸率为1.2,第一层网格中心的y^+约为30;在汽车周围和尾场设置3级加密区,加密区的网格尺寸分别为30、60和120 mm;利用ANSA自带的Hexa Interior网格生成器生成六面体为主的体网格,体网格非正交性最大为70度,如图3所示。网格规模在1700万~1900万之间。

本文在OpenFOAM软件平台利用RANS仿真进行数值仿真,采用了k-ω SST湍流模型,基



(a)面网格



(b)边界层和加密区

图3 DrivAer车的网格模型

Fig. 3 Gridding design for DrivAer model

于SIMPLE算法和SimpleFoam求解器对速度场和压力场耦合进行求解。速度采用二阶差值格式,压力和湍流场采用一阶格式。表1列出了本文所有算例的详细信息。

表1 算例参数

Table 1　Detail information for cases

算例	造型	速度/(m·s^{-1})	雷诺数/10^6
S12	光滑造型	4	1.22
S24	光滑造型	8	2.34
S48	光滑造型	16	4.87
D12	负压造型	4	1.22
D24	负压造型	8	2.34
D48	负压造型	16	4.87

2　方法验证

本文利用阻力系数和压力系数分布验证仿真结果的可靠性。表2列出了快背式DrivAer车在3个雷诺数下的气动阻力系数以及与风洞试验实测值间的误差,最大误差在2%以内。

表2 阻力系数对比

Table 2　Comparison of drag coefficients

算例	雷诺数/10^6	阻力系数	试验值	误差/%	仿真类型
S12	1.22	0.253	0.257[16]	−1.29	RANS
S24	2.34	0.251	0.248[16]	0.99	RANS
S48	4.87	0.242	0.243[1]	−0.23	RANS

3　结果与讨论

3.1　气动阻力系数和压力系数

图4为DrivAer车整车阻力系数随雷诺数变化的规律。两种造型的阻力系数都随雷诺数的增加而下降。结果还表明,负压造型的阻力系数在$Re=1.22\times10^6$时比光滑造型降低4个百分点,气动阻力降低了2.1%。但随着车速和雷诺数的增大,负压造型的阻力系数下降得更为缓慢。当$Re=4.87\times10^6$时,其阻力系数已经反超光滑造型。也就是说,在高雷诺数工况下,负压造型不仅不能起到减阻的作用,甚至反过来增加阻力。

图5对比了仿真所获取的车表中心平面上的压力系数和风洞试验数据。汽车前端滞流区的压力系数为0.91~0.93,与理论值和试验值非常接近。压力系数在发动机舱盖和前风挡交会处取得第2个局部极值,但由于雨刮槽处发生气流分离并形成了回流区,因此压力系数在此处出现小幅

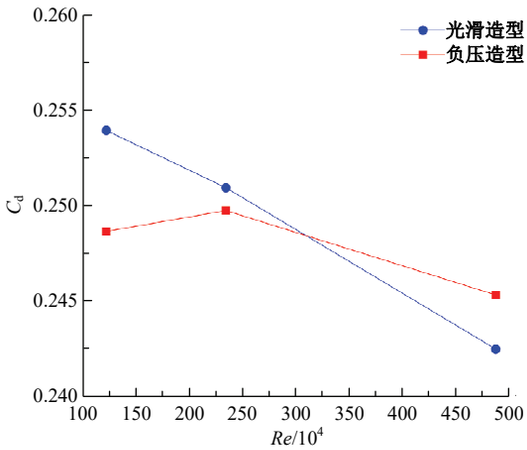


图4　雷诺数对阻力系数的影响

Fig. 4　Effect of Reynolds number on drag coefficient

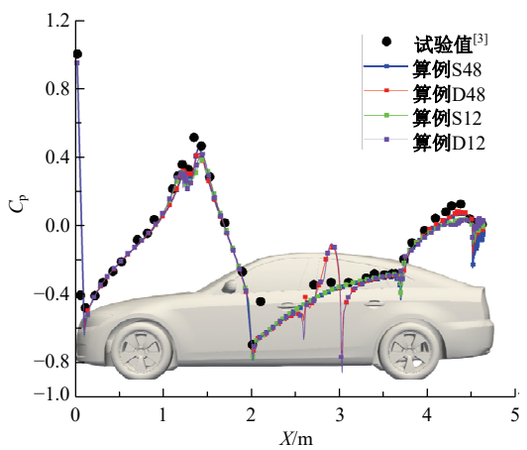


图5　中心面压力系数曲线

Fig. 5　Pressure coefficient profile in central plane

度下降。在前风挡上,随着气流加速,压力系数迅速下降。压力回升是压力在车顶处取得最小值之后逐步上升并在车尾恢复至接近大气压的过程。两段压力回升分别发生在车顶和后车窗,后车窗的压力系数回升的速率更快。最终在车尾处,压力回升至接近大气压的水平。

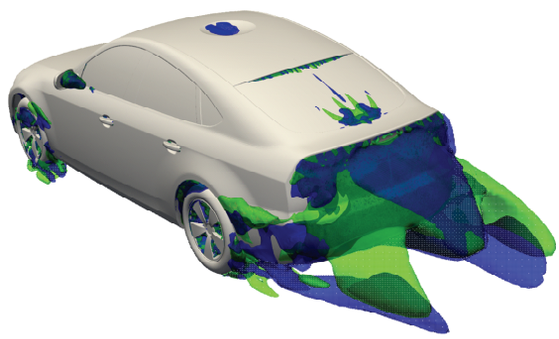
不同雷诺数下压力系数的差别主要存在于雨刮槽、后备箱和尾部回流区3个区域。这3个区域分别形成了回流区,所以雷诺数对压力系数的影响主要体现在回流区压力系数的差别上。当雷诺数升高后,雨刮槽和后备箱回流区的压力系数有所上升,但是尾流回流区的压力系数有所下降。

负压造型带来的压力系数变化主要存在于后备箱和尾部两个回流区以及凹坑所在区域。在两个回流区,负压造型的压力系数都要略高于光滑造型。尾部回流区域压力回升可以有效降低形阻,因此这是负压造型降阻的主要方式。同时,与光滑造型相比,负压造型的压力系数在凹坑区域

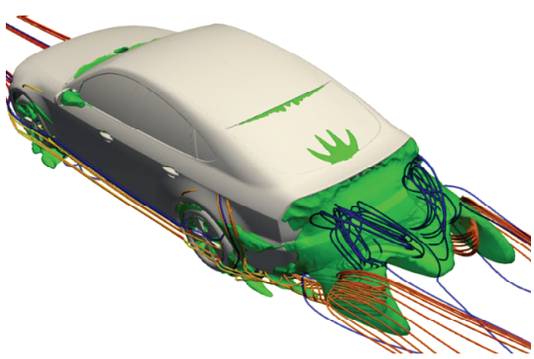
发生了明显的变化。但压力系数的改变仅局限于凹坑区域,离开凹坑后,压力系数迅速回升至光滑造型压力系数水平。需要注意的是,凹坑迎风面压力系数显著高于光滑造型,这意味着负压造型本身也产生了形阻。

3.2 回流区和回流涡旋

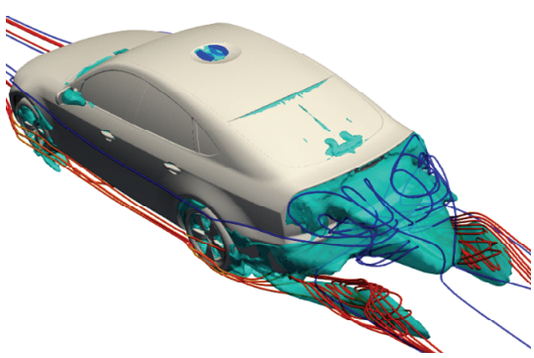
图6为车尾回流区的形状及流线结构(彩图见电子版,下文同)。由图6可知,在后视镜、发动机舱进气口、前风挡雨刮槽以及车尾分别形成了回流区,图中的回流区由流向速度为零的等值面包络出。负压造型对后视镜、发动机舱进气口、前风挡雨刮槽等区域的回流区未产生明显影响。



(a)**算例**S12(**绿色**)**和算例**D12(**蓝色**)



(b)**算例**S12



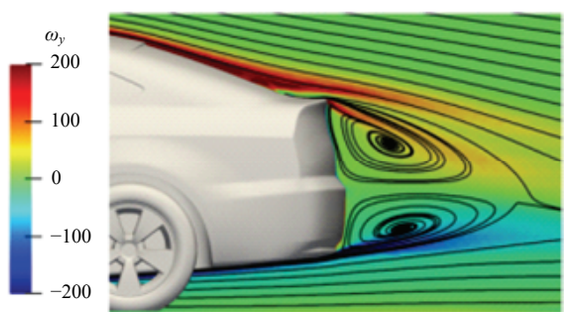
(c)**算例**D12

图6 车尾回流区(U_x=0)的形状及流线结构

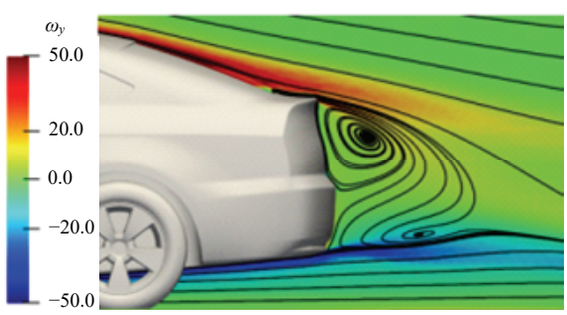
Fig. 6 Shape and streamlines of car-rear recirculation region

除了在非光滑区域形成回流区外,光滑造型和负压造型在车尾形成的回流区形状有明显差别。负压造型在车尾形成了3个相对独立的回流区,而对于光滑造型,车尾这3个区域连通为一个整体。由图6(b)(c)可知,车尾中心的回流区形成一个较大车尾回流涡旋,而车底气流在后车轮后流场分别形成了一个尺寸相对较小的回流区。

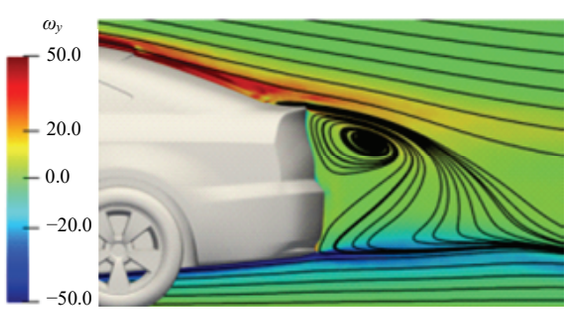
图7为汽车中心面上的二维流线结构和涡量图。当雷诺数Re=4.87×10^{6}时,车尾形成了一对涡旋。当Re降为1.22×10^{6}时,两个涡旋都减弱了,但下部涡旋的减弱更为明显。而且,下部涡旋的流线主要源于车顶气流,这与高雷诺数时流线源于车底气流的情况明显不同。对于低雷诺数,负压造型彻底将下部涡旋打散,这意味着下部涡旋进一步减弱。显然,减弱的涡旋与压力回升



(a)**算例**S48



(b)**算例**S12



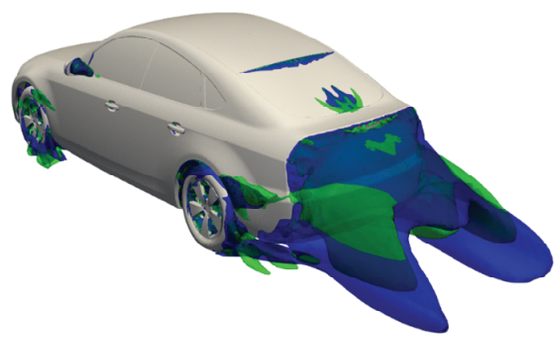
(c)**算例**D12

图7 中心平面的二维流线结构和涡量图

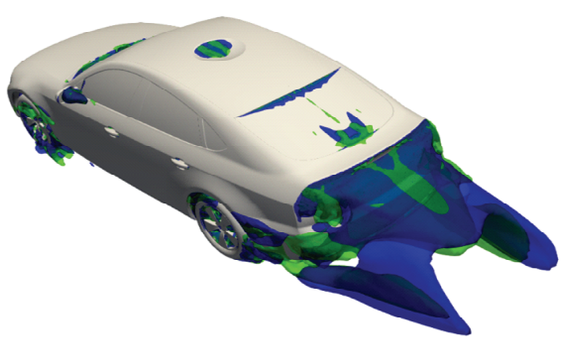
Fig. 7 2D Streamlines and vorticity in the central plane

是一致的,都意味着气动阻力系数的降低。

雷诺数对回流区产生了显著影响。如图8所示,对于光滑造型,随着雷诺数的增大,回流区都拉长了,但形状和结构没有发生明显改变。对于负压造型,随着雷诺数的增大,两个底部的回流区尺寸也有所增大,车尾中心的回流区流向尺寸变化不大,但其展向尺寸明显增大,并将低雷诺数下独立的3个回流区重新连成了一个整体。这意味着,负压造型在高雷诺数时不再能通过破坏回流区的连通性减阻。



(a)**算例**S12



(b)**算例**D12

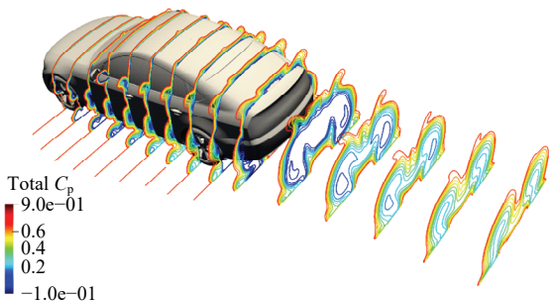
图 8　雷诺数对回流区的影响

Fig. 8　Effect of Reynolds number on recirculation region

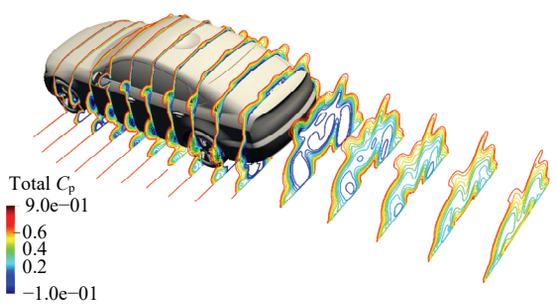
3.3　减阻效应

图9为汽车周围总压力系数的分布情况,由图可以观察到后视镜、C柱、凹坑诱导涡旋和演化对总压力系数的影响。在图9(b)中,负压造型车尾回流区的总压力系数形成了3个相对独立的封闭区域,而在图9(a)中,光滑造型车尾回流区的总压力系数存在大片的连通区,只在两侧形成尺寸很小的封闭区。

综合三维回流区结构、二维流线型和三维总压力系数分布特性可知,负压表面诱导产生涡旋,打断了涡旋结构的连通性,形成了多个相对独立的回流区域,并以减弱车尾回流区涡旋结构的方式促进了压力回升,从而降低阻力。但是,当雷诺数增大时,回流区重新连通为一个整体,而且凹坑本身也会产生气动阻力,因此负压造型在高雷诺数工况不仅不会降低阻力,还会提高阻力系数。这与圆柱绕流的阻力特性的相似,负压表面在低雷诺数阶段实现了阻力降低,但在高雷诺数阶段增加阻力。此外,凹坑只占了车顶宽度的1/3左右,在展向方向上多布置凹坑可以进一步降低在低雷诺数阶段的阻力系数。



(a)**算例**S12



(b)**算例**D12

图 9　总压力系数分布图

Fig. 9　Distribution of total pressure coefficient

4　结　论

(1)负压造型在低雷诺数时实现减阻2.1%,甚至可以实现更高比例的减阻,但在高雷诺数下负压造型的减阻效果将削弱,甚至提高阻力系数。

(2)负压造型诱导产生涡旋,并以减弱车尾回流区涡旋结构的方式促进压力回升,从而实现气动阻力的降低。

(3)负压造型自身也产生形阻和诱导阻力,若其抑制车尾回流涡的减阻增益无法抵消自身带来的附加阻力,将引起整车阻力系数的提高。

(4)负压造型无法在全雷诺数区间实现减阻效应,此类减阻措施只适用于具有气动造型转换功能的汽车。

参考文献:

[1] Heft A I, Indinger T, Adams N A. Experimental and numerical investigation of the DrivAer model[C]// ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting, New York, USA, 2012: 41-51.

[2] Qin P, Ricci A, Blocken B. CFD simulation of aerodynamic forces on the DrivAer car model: impact of computational parameters[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2024, 248: No. 105711.

[3] Rüttgers M, Park J, You D. Large-eddy simulation of turbulent flow over the DrivAer fastback vehicle model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186: 123-138.

[4] Liu J, Zhang Z, Wang Y, et al. Experimental study on the three-dimensional wake structure of the DrivAer standard model[J]. Journal of Visualization, 2021, 24(3): 443-460.

[5] Wittmeier F, Kuthada T. Open grille DrivAer model-first results[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 2015, 8(1): 252-260.

[6] John M, Buga S D, Monti I, et al. Experimental and numerical study of the DrivAer model aerodynamics [C]//SAE Technical Paper, 2018-01-0741.

[7] Hupertz B, Chalupa K, Krueger L, et al. On the aerodynamics of the notchback open cooling DrivAer: a detailed investigation of wind tunnel data for improved correlation and reference[C]//SAE Technical Paper, 2021-01-0958.

[8] 张英朝, 杜冠茂, 田思, 等. 35°Ahmed模型气动射流减阻主动控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49(2): 351-358.
Zhang Ying-chao, Du Guan-mao, Tian Si, et al. Active flow control of 35° Ahmed model to reduce aerodynamic drag with steady jet[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 351-358.

[9] Cho J, Park J, Yee K, et al. Comparison of various drag reduction devices and their aerodynamic effects on the DrivAer model[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 2018, 11(3): 225-238.

[10] He P, Mader C A, Martins J R R A, et al. An aerodynamic design optimization framework using a discrete adjoint approach with OpenFOAM[J]. Computers & Fluids, 2018, 168: 285-303.

[11] Grandemange M, Cadot O, Courbois A, et al. A study of wake effects on the drag of Ahmed's square-back model at the industrial scale[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 145: 282-291.

[12] 胡兴军, 郭鹏, 惠政, 等. 多孔介质对厢式货车气动特性的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49(2): 345-350.
Hu Xing-jun, Guo Peng, Hui Zheng, et al. Effect of porous media on the aerodynamic characteristics of van-body truck[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 345-350.

[13] Wang Y, Wu C, Tan G, et al. Reduction in the aerodynamic drag around a generic vehicle by using a non-smooth surface[J]. Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(1): 130-144.

[14] Ballerstein N, Horst P. Manipulation of the aerodynamic behavior of the DrivAer model using dimple patterns[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 233: No. 105216.

[15] 杨易, 郑萌, 黄剑锋, 等. 基于非光滑表面与涡流干扰的车身气动减阻方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 982-988.
Yang Yi, Zheng Meng, Huang Jian-feng, et al. Aerodynamic drag reduction method of vehicle body based on non-smooth surface and vortex interference [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(7): 982-988.

[16] Strangfeld C, Wieser D, Schmidt H J, et al. Experimental study of baseline flow characteristics for the realistic car model DrivAer[C]//SAE Technical Paper, 2013-01-1251.