

# 不同 RANS/LES 混合方法在汽车标模外流场 非定常数值模拟中的对比

杨志刚<sup>1,2,3</sup>, 陶悦<sup>1,2</sup>, 夏超<sup>1,2</sup>, 史芳琳<sup>4</sup>

(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. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

**摘要:** 针对 MIRA 汽车标模外流场, 采用 RANS/LES 混合方法开展非定常数值模拟, 通过与风洞实验测力、测压结果进行详细对比分析, 探究不同 RANS/LES 混合方法 (DDES、IDDES、SBES、SDS) 以及基于不同 RANS 模型 (RKE、SA、SST  $k-\omega$ 、GEKO  $k-\omega$ ) 的 DDES 方法在汽车外流场计算中的适用性。研究表明: 对于气动系数, 不同混合方法的预测结果都偏高, 其中 DDES-GEKO 模型的相对误差最小; 对于表面压力系数, 不同混合方法对垂直中截线的压力预测结果与实验值吻合程度较高, 其中 SBES-GEKO 模型的结果更优; DDES 模型内嵌不同 RANS 模型对后风窗的压力预测差别明显, 其中 SA 模型较优; 而不同混合方法对车底的压力预测偏差较大, 对车底前部压力预测都小于实验值, 其中对车底后部, SBES-GEKO 模型的结果较优; 此外, SBES-GEKO 模型能较好的识别出尾迹区的非定常流动结构。

**关键词:** MIRA 汽车标模; 非定常数值模拟; RANS/LES 混合方法

中图分类号: U461

文献标志码: A

## Comparison of the Different Hybrid RANS/LES Methods for Unsteady Numerical Simulation of the Flow around an Automotive Generic Model

YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>, TAO Yue<sup>1,2</sup>, XIA Chao<sup>1,2</sup>, SHI Fanglin<sup>4</sup>

(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 & Technology Research Institute, Beijing 102211, China; 4. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245)

**Abstract:** Unsteady numerical simulations were carried out using different RANS/LES hybrid methods for the

outflow field of the MIRA generic model. The applicability of RANS/LES hybrid methods (DDES, IDDES, SBES, SDS) and DDES based on different RANS models (RKE, SA, SST  $k-\omega$ , GEKO  $k-\omega$ ) in calculating the automotive outflow field was explored through detailed comparative analyses with the results of the wind tunnel experimental measurements of aerodynamic forces and pressures. The study shows that the results of different hybrid methods are all on the high side in predicting aerodynamic coefficients, with the DDES-GEKO model having the smallest relative error. For surface pressure coefficients, the predictive results of different hybrid methods for the vertical center line are in good agreement with the experimental values, among which the SBES-GEKO model performs better. The embedded RANS models in the DDES show significant differences in predicting pressure on the rear windshield, with the SA model being better. The pressure predictions for the underbody are deviated by different hybrid methods, with the pressure predictions for the front part being smaller than experimental values, while the SBES-GEKO model gives better results for the rear part. Additionally, the SBES-GEKO model is able to identify the unsteady flow structures in the wake region well.

**Keywords:** MIRA generic model; unsteady numerical calculation; hybrid Reynolds-averaged Navier-Stokes/ Large Eddy Simulation(RANS/LES) method

计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 是一种快速发展的流场数值仿真方法, 相比于风洞试验等方法, 其成本低、效率高, 还可获得丰富

收稿日期: 2023-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52372360); 国家重点研发计划 (2022YFE0208000); 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室项目 (23DZ2229029); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者: 杨志刚 (1961—), 男, 教授, 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: 夏超 (1988—), 男, 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: chao.xia@tongji.edu.cn

的流场数据,为汽车周围复杂的湍流流场研究提供了有效手段,是现代汽车空气动力学领域重要的技术工具之一。然而,CFD 模拟包含多种模型和方法,如何选择模型使之能适应计算成本并达到可接受的计算精度,是一个长期受到关注的问题。

在工业领域中,CFD 通常基于雷诺平均法(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS),通过建立时均化的湍流运动方程来求解平均流场。其中,普遍应用的是基于 Boussineq 假设<sup>[1]</sup>的涡粘模型,通过建立湍流粘度与流动时均参数的关系,将方程中雷诺应力的封闭问题转化为求解湍流粘度问题。根据微分方程的数量不同,又分为零方程模型、一方程模型和关于湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  的两方程模型<sup>[2]</sup>,由此衍生出的著名模型包括 Spalart-Allmaras (SA)<sup>[3]</sup>、Realizable  $k-\epsilon$  (RKE)<sup>[4]</sup> 和 Stress Transport  $k-\omega$  (SST)<sup>[5]</sup> 等。RANS 方法效率很高,但在捕捉流场中复杂的流动特征和模拟大范围流动分离时存在较大局限性,且无法模拟真实的瞬态流动信息。

近年来,许多研究者正在开展关于尺度解析模拟(scale-resolving simulation, SRS)<sup>[6]</sup> 的研究,以牺牲部分计算成本来达到更准确的流场模拟和更高的求解精度。大涡模拟(large eddy simulation, LES)是过去几十年中使用最广泛的 SRS 模型,其基本原理是对流场中的大尺度涡进行直接求解,小尺度涡用较为简单的模型求解,以此实现准确度较高的湍流模拟。但是,在高雷诺数下 LES 方法计算成本高昂,尤其是近壁区资源消耗过高,不适合在工程上应用<sup>[7]</sup>。在此背景下,混合方法(hybrid RANS/LES method)被提出,其思想是用 RANS 方法模拟近壁区中小尺度的涡结构,而用 LES 方法解析远离壁面的大尺度涡结构,从而在保证较高计算精度的条件下提高计算效率<sup>[8]</sup>。分离涡模拟(detached-eddy simulation, DES)<sup>[9]</sup> 及其改进方法是应用最多的混合模型。1997 年 Spalart 等<sup>[9]</sup> 首次提出了基于 SA 模型的 DES(SA-DES)方法,该方法根据壁面距离和网格尺度的大小关系实现 RANS 到 LES 的转换,但当边界层内网格过密时,会导致大涡模拟提前转换,使雷诺应力模化不足,发生网格诱导分离(Grid Induced Separation, GIS)<sup>[10]</sup>。因此,Spalart 等后续提出了引入延迟函数的延迟分离涡模拟(delayed detached-eddy simulation, DDES)<sup>[11]</sup>,来推迟 RANS 到 LES 的转换;Shur 等<sup>[12]</sup> 在 DDES 的基础上提出了改进的延迟分离涡模拟(improved delayed detached-eddy simulation, IDDES),使其具备 LES 方法中

WMLES(wall model LES)<sup>[13]</sup> 的优点,适用于边界层内不同密度的网格。Martinat 等<sup>[14]</sup> 用 Ahmed 模型评估了 DES 方法的表现,发现 DES 模型相比于 RANS 在精度上有一定提升,但在某些区域无法准确计算,而 DDES 方法得到了较优的结果,但仍未完全捕捉流动特征;Guilmineau 等<sup>[15]</sup> 分别用 DES 和 IDDES 方法计算 25° Ahmed 模型,发现 IDDES 方法表现较好,DES 系列的方法依然存在从 RANS 到 LES 过渡缓慢、在 RANS 和 LES 区域之间无明确界限、形成“灰区效应”<sup>[16]</sup> 等不足。针对以上问题,Menter 等<sup>[17]</sup> 提出了屏蔽分离涡模拟(shielded detached eddy simulation, SDES),该方法基于 DES 模型,具有更强的 RANS 屏蔽功能,确保 RANS 区域内雷诺应力建模完整,并通过改进网格长度尺度定义实现从 RANS 到 LES 的更快过渡;在此基础上,Menter 等<sup>[17]</sup> 又开发了应力混合涡模拟(stress blended eddy simulation, SBES),利用屏蔽函数使 RANS 模型可以直接混合到现有 LES 模型中,即可以模块化组合不同的 RANS 和 LES 模型公式。Ekman 等<sup>[18]</sup> 针对斜背式和快背式 DrivAer 模型,基于 SST  $k-\omega$  模型研究了 DDES、IDDES 和 SBES 三种混合方法,验证了 SBES 方法可以确保对 RANS 区域的充分屏蔽,且更快的过渡减少 RANS 和 LES 区域之间的“灰区效应”,可以解析比 DDES 模型更多、更小的湍流结构。

综上所述,RANS/LES 混合方法在一定程度上平衡了计算成本和计算精度,但目前研究中仍存在一些不足,对 SDES/SBES 新型混合方法以及内嵌不同 RANS 模型的研究均较少,且对非定常数值仿真方法的网格策略分析,以及湍流模型的适用性分析尚不明确。因此,本文针对快背式 MIRA 汽车标模外流场进行数值仿真研究,对比讨论了不同非定常数值模拟方案,包括网格策略、4 种 RANS/LES 混合方法(DDES、IDDES、SBES、SDES)以及基于 4 种 RANS 模型(RKE、SA、SST  $k-\omega$ 、GEKO  $k-\omega$ ) 的 DDES 方法,并通过与风洞实验结果的对比分析,探究不同混合方法在汽车外流场计算中的准确性。

## 1 数值仿真设置

### 1.1 模型、计算域及边界条件

数值仿真计算选用 1:1 尺寸的快背式 MIRA 汽车模型。仿真计算域的空间布置如图 1 所示,采用简化的长方形计算域,总尺寸为  $10L \times 15W \times 5H$

( $L$ 、 $W$ 、 $H$ 分别代表模型的长、宽、高),为了更细致地研究尾迹区的流场结构,在模型尾部划分多个采样区域。模型放置在关于 $y=0$ 对称的地面位置,模型头部距入口处 $3L$ 长,模型尾部距出口处 $6L$ 长,模型左右两侧与计算域边界的距离都为 $7W$ 。除了最大计算域外,进一步划分尺寸为 $2.5L \times 3W \times 2H$ 的小计算域,在网格设置中作为一个主要的加密区。计算域的入口边界条件为速度入口,出口边界条件为压力出口,左右两侧和顶面都设置为对称边界条件,地面和模型表面为非滑移壁面。

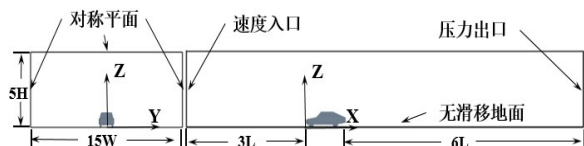


图1 仿真计算域布置

Fig.1 Arrangement of simulation domain

## 1.2 网格设置

网格生成采用Cutcell网格,在车身表面和地面分别生成边界层网格。车身表面边界层总层数为7,第一层边界层厚度为1 mm,对应 $y^+$ 值约为30,边界层增长率为1.15;地面边界层层数为3层, $y^+$ 值也为30。另外划分出模型周围的小范围区域进行局部加密,设置车轮表面网格加密和车身尾部加密区,尾迹区的网格加密使尾迹流动的捕捉更准确,加密区设置如图2所示。共设置4套不同的网格方案,每套网格的网格数、车身面网格尺寸、尾部加密区网格尺寸、边界层设置如表1所示。其中,方案一至方案四的网格数量分别为1 480万、2 686万、4 415万和8 275万,其边界层网格方案相同。

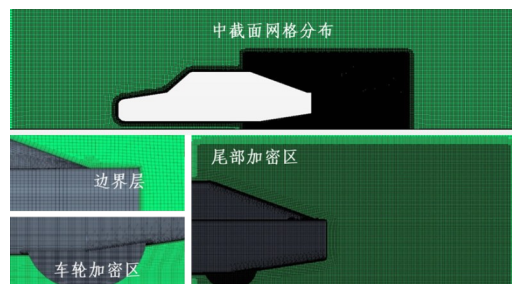


图2 网格分布及加密区(网格数4 415万)

Fig.2 Grid distribution and encrypted areas (44.15 million grids)

表1 网格方案

Tab.1 Grid schemes

网格方案	网格数/万	车身面网格尺寸/mm	车轮面网格尺寸/mm	尾部加密区网格尺寸/mm	车身边界层网格 $y^+$ 值
方案一	1 480	15	7.5	15	30
方案二	2 686	12	6.0	12	
方案三	4 415	10	5.0	10	
方案四	8 275	8	4.0	8	

## 1.3 计算工况

本文主要采用RANS/LES混合方法进行汽车外流场的非定常数值仿真计算。选择的非定常湍流模型包括延迟分离涡模拟(DDES)、改进的延迟分离涡模拟(IDDES)、屏蔽分离涡模拟(SDES)和应力混合涡模拟(SBES)<sup>[17]</sup>。混合方法当中的RANS模型选择包括 Realizable  $k-\epsilon$  (RKE)、Spalart-Allmaras (SA)、Shear Stress Transport  $k-\omega$  (SST) 和 Generalized  $k-\omega$  (GEKO)<sup>[19]</sup>模型。计算的入口速度设置为22.22 m/s,对应雷诺数 $Re=2.13 \times 10^6$ ,时间步长设为 $1.25 \times 10^{-4}$ 。针对表1当中的四套网格方案分别进行了不同混合方法算例的非定常数值计算,具体的计算工况如表2所示。

表2 计算工况

Tab.2 Calculation cases

网格方案	混合方法	y+值	雷诺数 ( $Re=U_0\times H/\nu$ )
方案三	DDES—RKE、DDES—SST、DDES—SA、DDES—GEKO； IDDES—GEKO、IDDES—SST； SDES—GEKO； SBES—RKE、SBES—SST、SBES—GEKO；	30	$2.13\times10^6$
方案一			
方案二	IDDES—GEKO、IDDES—SST；		
方案四	SBES—RKE、SBES—SST、SBES—GEKO；		

## 1.4 网格敏感度分析

表3所示为基于4种不同湍流模型的非定常数值计算获取的气动力系数 $C_d$ 预测值,以及与1:1 MIRA模型风洞实验获取的气动力系数 $C_d$ 值及其相

对误差。其中风洞试验是在同济大学上海地面交通工具风洞中心气动声学整车风洞完成,主要进行了气动力测量和表面压力测试,实验细节可以参考文献[20],这里不再赘述。从表中可以看出,非定常数



值计算得到的气动力预测值都比试验值偏高,但 SBES-GEKO 模型各个算例得到的气动力系数预测值与试验值的相对误差最小,基本都在 5% 以下,其他 3 个模型的预测误差较大。同时,在所比较的 4 种湍流模型下,不同网格数量算例计算获取的气动力系数之间差别并不大,即数值计算的气动力系数对网格数量的敏感度较低。图 3 为 4 套不同网格数量方案下基于 IDDES-GEKO 模型计算与风洞实验

获取的中截线表面压力系数  $C_p$  的对比。从图 3(a)模型上表面的压力曲线看到,不同网格数量算例的预测结果未显示出明显差异,并且与试验值吻合较好。图 3(b)为模型下表面压力,车底后部压力预测与试验值都比较接近,车底前部方案三网格的压力预测与试验值更接近,而车底中部方案二和方案四与试验值更接近,但总体来看,不同网格数量方案的预测结果未显示出较大差异。

表 3 气动力计算结果  
Tab.3 Results of aerodynamic calculations

网格方案	$C_d$ 值				试验值	相对误差			
	IDDES-GEKO	IDDES-SST	SBES-GEKO	SBES-SST		IDDES-GEKO/%	IDDES-SST/%	SBES-GEKO/%	SBES-SST/%
方案一	0.272	0.286	0.267	0.279	0.256	6.16	11.60	4.17	8.91
方案二	0.270	0.285	0.261	0.275		5.44	11.42	2.06	7.38
方案三	0.273	0.281	0.269	0.278		6.52	9.91	5.05	8.73
方案四	0.274	0.274	0.266	0.275		6.85	7.15	3.82	7.44

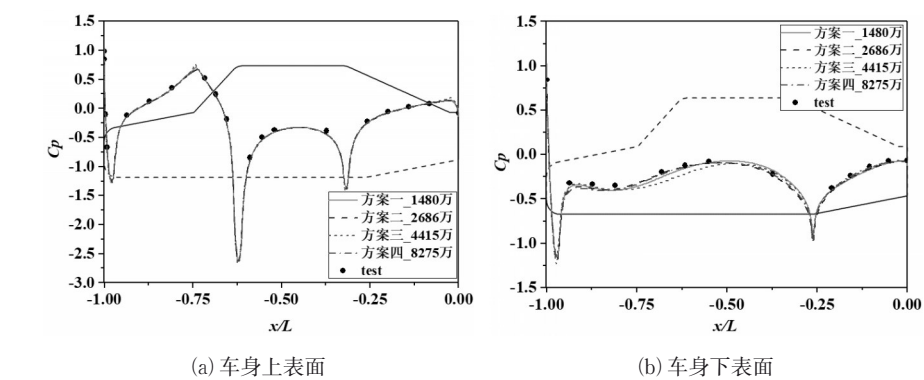


图 3 基于不同数量网格的 IDDES-GEKO 计算的中截线表面压力系数

Fig.3 Surface pressure coefficients of the center line based on IDDES-GEKO calculations with different number of grids

由以上分析可知,所选湍流模型对网格数量的敏感度较低。网格方案三(4 415 万)的气动力系数和表面压力系数预测结果已经较好,由于网格数量的增加对计算资源的消耗成倍增加,因此后续都采用 4 415 万的网格方案三进行相关计算和分析研究。

2 不同混合方法结果对比

本节在方案三 4 415 万网格算例基础上,基于 DDES-GEKO、IDDES-GEKO、SDES-GEKO、SBES-GEKO、DDES-GEKO、DDES-RKE、DDES-SST、DDES-SA 八种混合方法的非定常计算结果和风洞实验结果,进一步对气动力和表面压力系数进行深入分析,探究不同非定常湍流模型在汽车外流场计算中的准确性和局限性。

2.1 气动力对比分析

根据网格敏感度分析结果可知,SBES-GEKO 模型的气动力系数与试验值的相对误差最小。因此,首先选用 GEKO 模型作为混合方法当中的 RANS 模型,对采用不同湍流模型(DDES、IDDES、SDES、SBES)的计算结果进行气动力系数的比较,如表 4 所示。可以看到,其中 DDES 和 SDES 对气动力系数的预测较好,与试验值的误差为 1.47% 和 2.80%,而 IDDES 和 SBES 对气动力系数的预测较差,与试验值的误差为 5.05% 和 6.52%,DDES 模型的预测结果最优。

在延迟分离涡模型 DDES 的基础上替换其中的 RANS 模型,采用基于 SA、SST、GEKO 和 RKE 的 DDES 方法进行计算(DDES-SA、DDES-SST、DDES-GEKO、DDES-RKE)。表 5 为不同 DDES 湍

表4 不同混合方法的气动力结果

Tab.4 Aerodynamic results of different hybrid methods

湍流模型	$C_d$ 值	试验值	相对误差/%
DDES-GEKO	0.260	0.256	1.47
IDDES-GEKO	0.273		6.52
SDES-GEKO	0.263		2.80
SBES-GEKO	0.269		5.05

流模型的气动力系数计算结果,可看出RANS模型的不同对气动力系数有较大影响,其中DDES-GEKO模型的气动力系数预测结果最好,与试验值的误差为1.47%;而DDES-SST模型的气动力系数预测结果最差,与试验值的误差高达9.63%。

表5 基于不同RANS方法的DDES模型的气动力结果

Tab.5 Aerodynamic results of DDES model based on different RANS methods

湍流模型	$C_d$ 值	试验值	相对误差/%
DDES-GEKO	0.260	0.256	1.47
DDES-RKE	0.278		8.71
DDES-SA	0.273		6.46
DDES-SST	0.281		9.63

## 2.2 表面压力对比分析

### 2.2.1 不同模型中截面结果对比

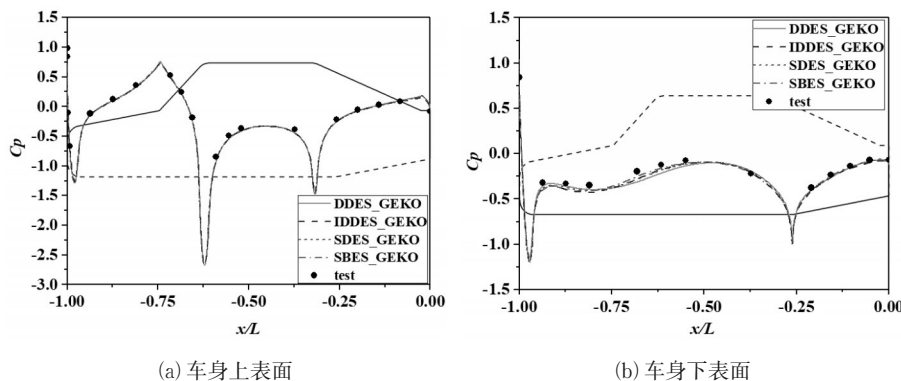


图4 不同混合方法计算的中截面表面压力系数

Fig.4 Surface pressure coefficients of the center line calculated by different hybrid methods

### 2.2.2 不同模型后风窗结果对比

图6展示了快背MIRA模型后风窗和C柱表面上截取的四排截线和试验的测压点位置。图7和图8分别展示了采用不同混合方法和采用不同RANS模型的DDES方法计算的后风窗处的表面压力系数与试验值的对比。对于不同的混合方法(如图7),在后风窗四排位置的预测值显示出较高的一致性,但是第一排测点的计算预测值都明显低于试验测量值,其他三排测点的计算预测值与试验值都吻合较好。对于采用不同RANS模型的DDES方法,

图4展示了采用不同混合方法计算的 $y=0$ 截面表面压力系数 $C_p$ 值与试验结果的对比。其中,图4(a)展示了车身上表面不同湍流模型的 $C_p$ 计算结果,整体上 $C_p$ 值与试验结果吻合较好,在模型的各个拐角位置略有差异。而从图4(b)可以看到,在模型下表面,不同湍流模型的计算结果与试验值存在一定的差异,尤其是车底前部计算结果都低于试验测量值,并且不同湍流模型之间也存在一些差异,其中与试验值吻合最好的是SBES-GEKO模型,IDDES模型的预测结果与试验值吻合的较差。图5展示的是采用不同RANS模型的DDES方法计算的 $y=0$ 截面表面压力系数 $C_p$ 值与试验值的对比结果(选择的RANS方法包括SA、SST、GEKO和RKE)。从图5(a)可见,在模型上表面各湍流模型的计算结果与试验值的吻合程度较高,主要在发动机舱盖、前风窗边缘和后风窗边缘处存在较小差异。图5(b)展示了车身下表面各湍流模型的 $C_p$ 值计算结果与试验值的对比,整体上 $C_p$ 值吻合结果较好,其中与试验值吻合最好的是DDES-SA模型和DDES-SST模型,但各模型的计算结果在车身前部都明显低于试验压力值。

在图8(a)后风窗第一排位置,各模型的预测结果同样都低于测点的试验值,其中DDES-RKE的结果与试验值吻合的最好。后风窗第二、三排位置的计算结果与试验值都吻合得较好,但第三排不同湍流模型在C柱附近的预测值略有差异;第四排DDES-RKE和DDES-SST的压力预测结果较差,整体小于试验值。

### 2.2.3 不同模型车底部结果对比

图9展示了快背MIRA模型车身底部截取的截线和试验的测压点位置,共截取车底前部的六排截线和车底后部的四排截线。图10和图11分别展示

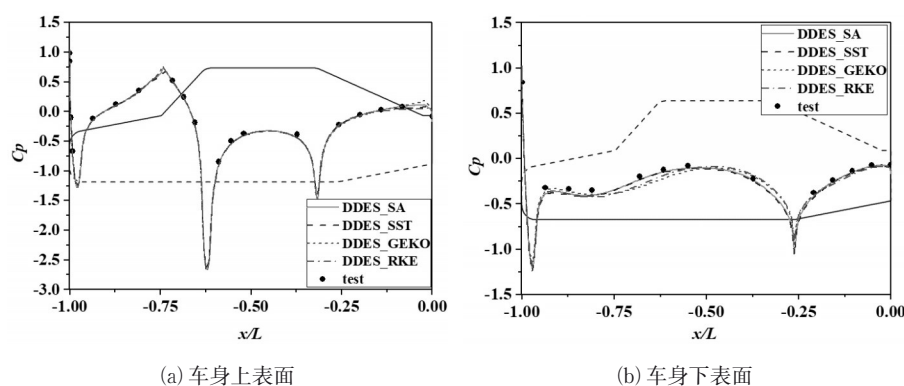


图5 采用不同RANS方法的DDES模型计算的中截线表面压力系数

Fig.5 Surface pressure coefficients of the center line calculated by DDES model with different RANS methods

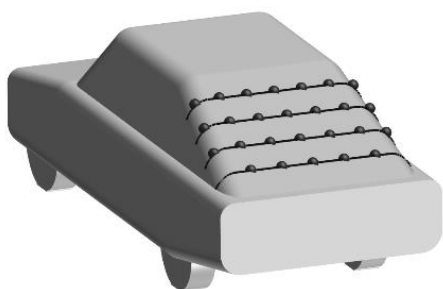


图6 后风窗测点位置

Fig.6 Measurement points of rear windshield

了采用不同混合方法计算的车身底部表面压力系数

与试验值的对比情况。

如图10(a)所示的车底前部第一排位置,各模型之间的压力预测结果差异不大,但都略小于试验值,在其他五排位置,不同湍流模型的压力预测结果相差较大,在前部第二排和第三排,DDES模型的压力结果与试验值最为吻合,SDDES和SBDES次之,IDDES模型的表现最差;而在前部后三排位置,SBDES模型的压力预测结果最接近试验值,此时DDES的表现反而最差。

如图11(a)所示的模型底面后部第一排位置,各种湍流模型的预测结果相差不大,但整体上小于试

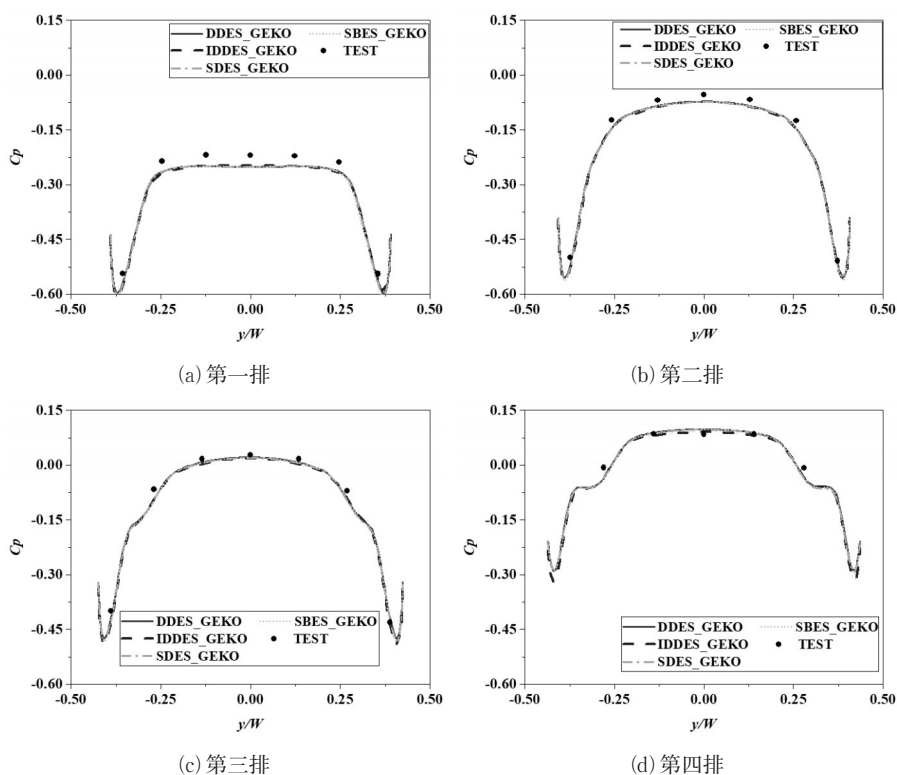


图7 不同混合方法计算的后风窗表面压力系数

Fig.7 Surface pressure coefficients of the rear windshield calculated by different hybrid methods

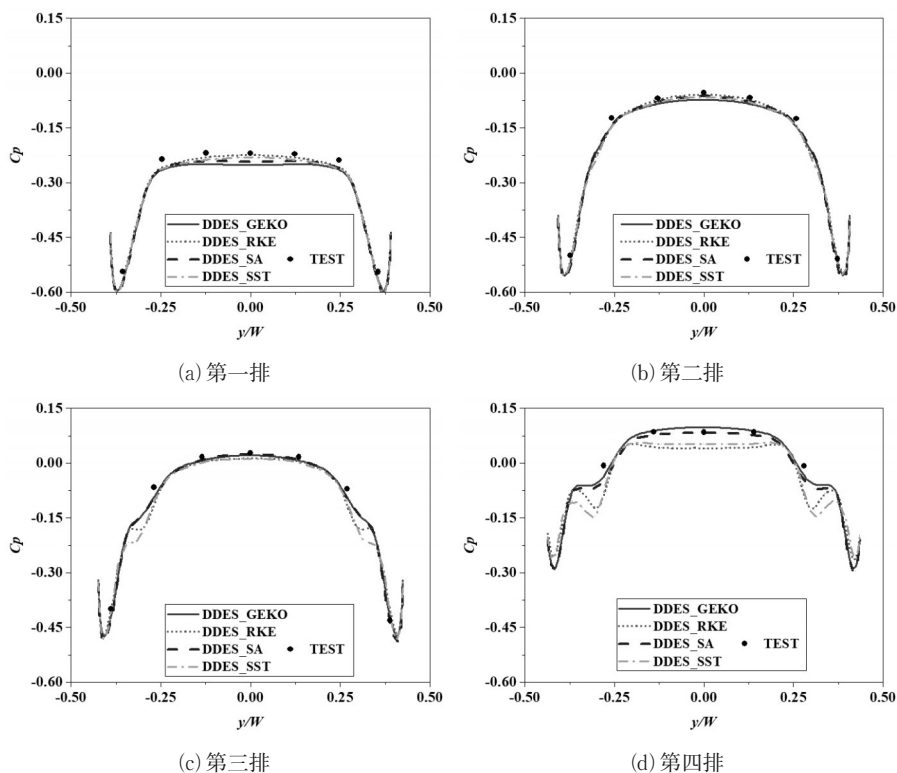
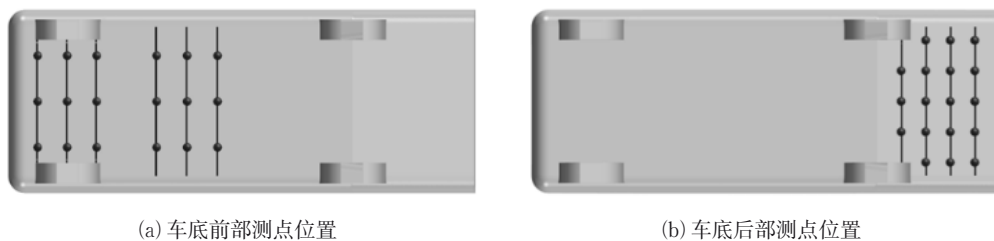


图 8 采用不同 RANS 方法的 DDES 模型计算的后车窗表面压力系数

Fig.8 Surface pressure coefficients of the rear windshield calculated by DDES model with different RANS methods



(a) 车底前部测点位置

(b) 车底后部测点位置

图 9 车底前部和后部测点位置

Fig.9 Measurement points of the front and rear underbody

验值。图 11 后三幅图展示了模型底面后三排位置的预测值,各种湍流模型的预测结果之间略有差异,但与试验值的吻合程度相差不大,总体上较好的还原了试验测量值,其中 SBES 模型的预测结果更优。

图 12 和图 13 分别为采用不同 RANS 模型的 DDES 方法计算的车身底部表面压力系数与试验测量值的对比情况,图 12 为车底前部的六排截线位置,图 13 为车底后部的四排截线位置。如图 12(a)和(f)所示的车前部第一排和第六排位置,各模型之间的预测结果差异不大,但是都略小于试验值。如图 12(b)和(c)所示的车前部第二排和第三排位置, DDES-GEKO 模型表现出与试验值较好的吻合,其

他模型的计算结果都较小。图 12(d)和(e)展示的车前部第四排和第五排, DDES-SA 和 DDES-SST 模型与试验值较为接近,其他模型的计算结果都小于试验值。

如图 13(a)所示的车后部第一排位置, DDES-GEKO 和 DDES-RKE 模型表现较好,与试验值较为契合, DDES-SA 和 DDES-SST 模型的预测结果较差,小于试验值;而在后三排位置, DDES-SA 和 DDES-SST 模型的预测结果与试验值较为契合,但 DDES-RKE 模型的预测结果稍差。

由以上对车身表面各位置表面压力系数的对比可知,不同混合方法都能够对车身表面压力系数进行一定程度的预测,但与试验值之间存在一定差异,



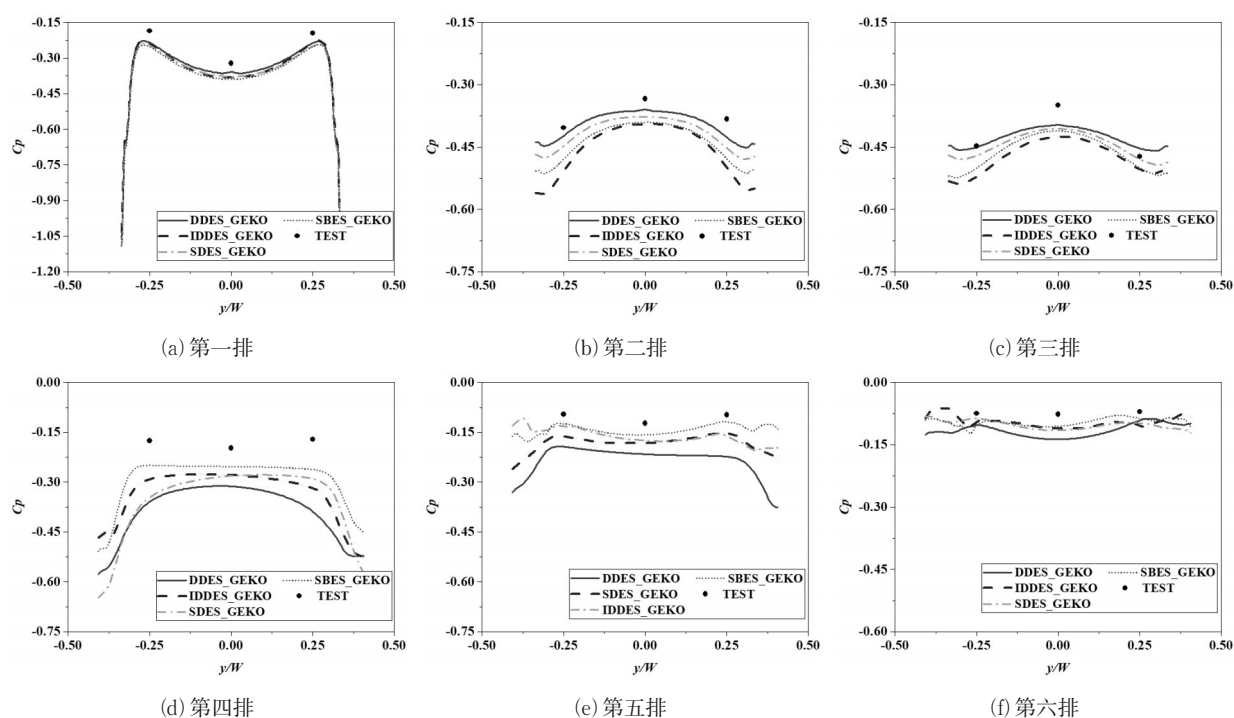


图 10 不同混合方法计算的车底前部表面压力系数对比

Fig.10 Surface pressure coefficients of the front underbody calculated by different hybrid methods

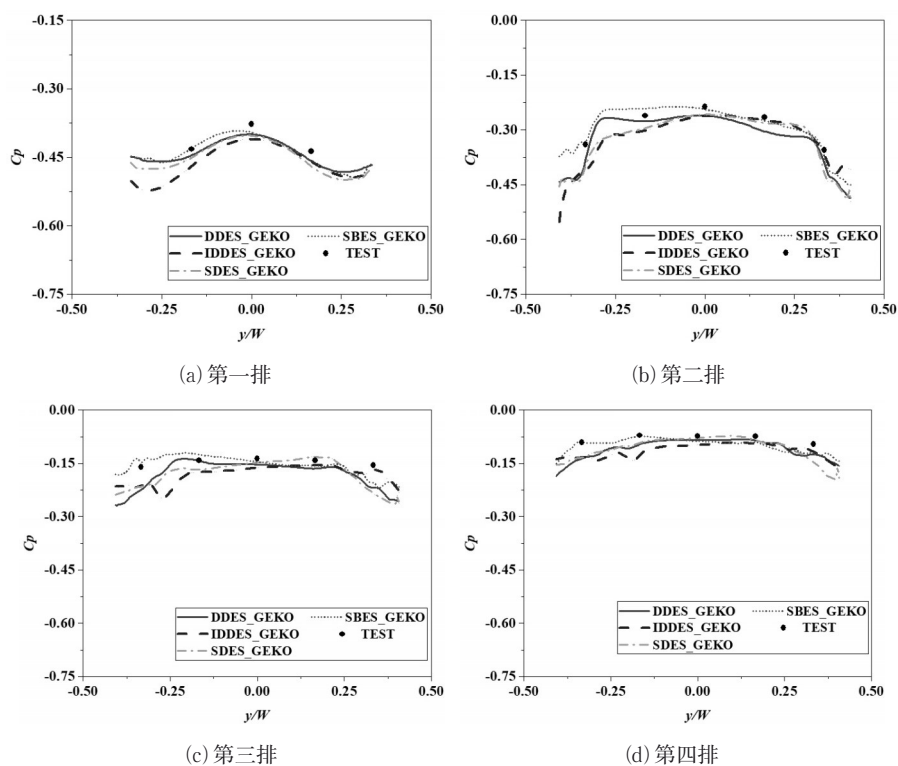


图 11 不同混合方法计算的车底后部表面压力系数对比

Fig.11 Surface pressure coefficients of the rear underbody calculated by different hybrid methods

并且在模型表面不同位置的预测值误差不同。一般来说,在大转角等发生流动分离的位置,预测结果更差。不同混合方法对表面压力系数的预测能力

也有所不同,并且在模型表面各位置的预测能力表现各异,比如能较好预测后风窗面  $C_p$  值的 DDES-GEKO 模型对车底中部  $C_p$  值的预测就较差。



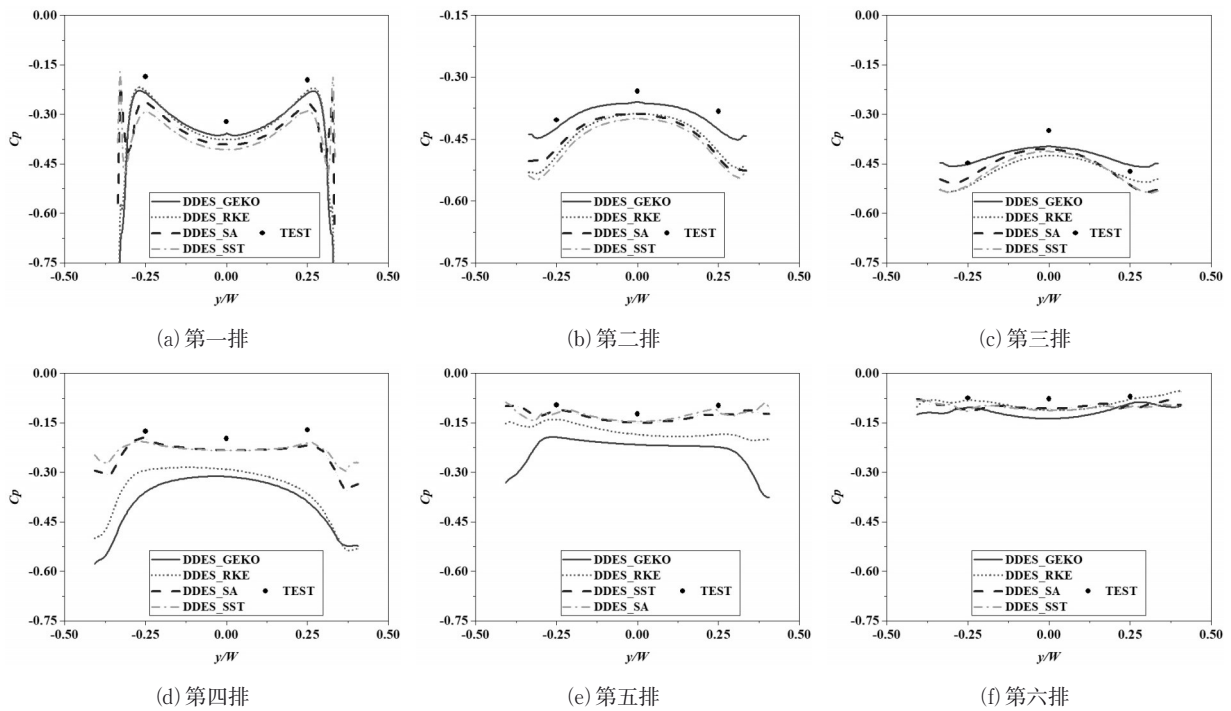


图12 采用不同RANS方法的DDES模型计算的车底前部表面压力系数

Fig.12 Surface pressure coefficients of the front underbody calculated by DDES model with different RANS methods

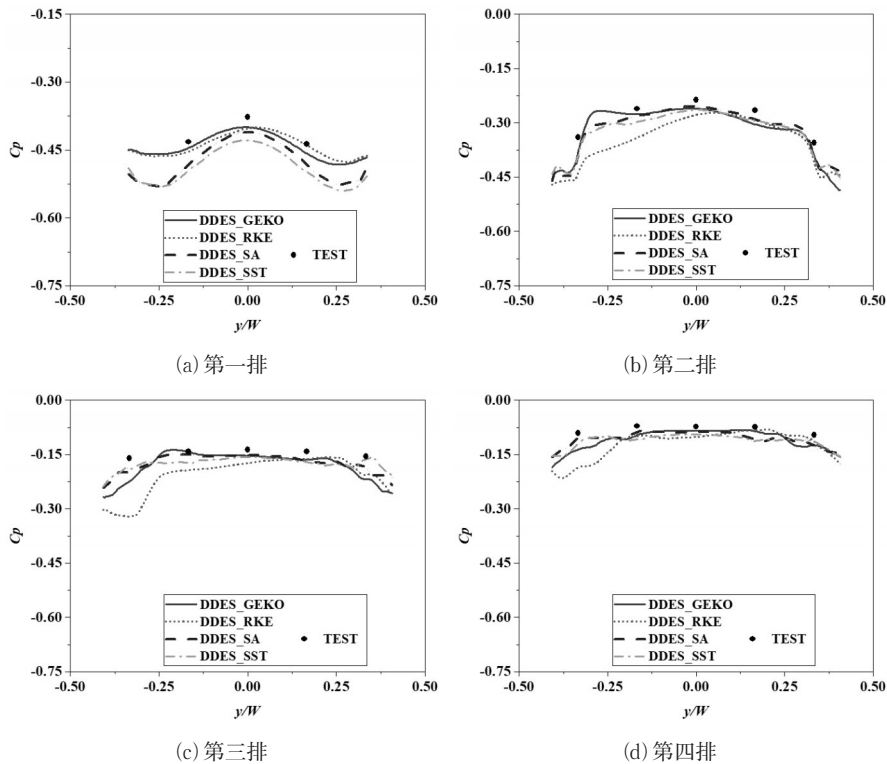


图13 采用不同RANS方法的DDES模型计算的车底后部表面压力系数

Fig.13 Surface pressure coefficients of the rear underbody calculated by DDES model with different RANS methods

### 3 流场分析

由于不同混合方法对车底的表面压力预测差别

较大,因此选取DDES-GEKO、SBES-GEKO和DDES-SST这3个模型的计算结果,对其底部时均流场进行进一步对比分析,比较不同混合方法和采

用不同RANS模型的DDES方法的差异。图14展示了三种混合方法计算的车底表面压力和流线分布。对比DDES-GEKO和SBES-GEKO的预测结果,车底前部的表面压力差异在前轮后侧较为明显,SBES-GEKO模型预测的前轮后侧回流区长度略短,且内侧和后侧压力小于DDES-GEKO的结果,而车底前部的中间位置(前部后三排截线位置)的压力大于DDES-GEKO的结果,对于车底后部压力预

测的差别不大,这与压力系数曲线结果相符(见图10、图11);对比DDES-GEKO和DDES-SST的结果,DDES-SST模型预测的前轮后侧回流区长度更短,且内侧和后侧表面压力更小,而车底前部的中间位置的压比DDES-GEKO的预测结果更大,对于车底后部,在靠近后轮位置DDES-SST模型预测表面压力小于DDES-GEKO的预测结果,这同样符合前述的压力系数曲线结果(见图12、图13)。

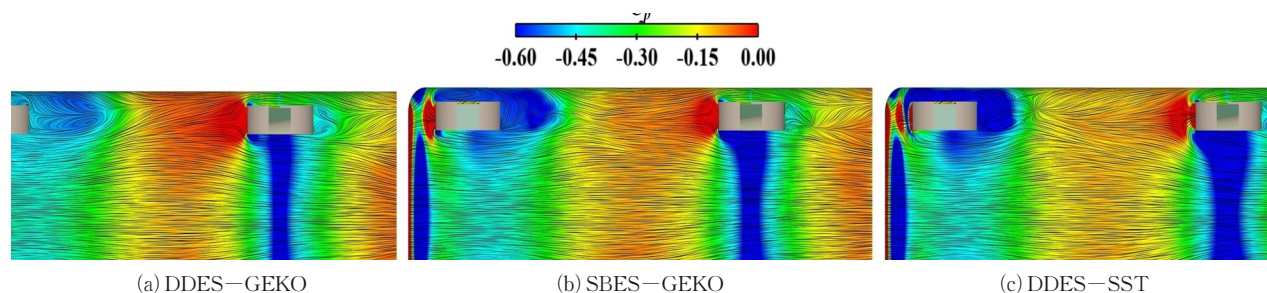


图14 不同混合方法计算的车底表面压力和流线分布

Fig.14 Underbody surface pressure and streamline of different hybrid methods

图15和图16分别展示了三种混合方法计算的 $z=0.15$  m平面和 $y=0$ 平面的车底速度场。从图15可见,不同混合方法对压力系数预测的偏差主要来源于其对前轮区域流场模拟的较大差异,其中DDES-GEKO模型预测的前轮后侧回流区范围较大,涡核距离前轮较远,因此前轮后侧区域对车底气流的阻塞作用较强,使车底中部气流的流速加快,压力变小;而SBES-GEKO模型和DDES-SST模型预测的前轮后侧回流区范围较小,涡核距离前轮较近,

因此该区域对车底气流的阻塞较弱,使车底中部气流流速小于DDES-GEKO模型的结果,所以压力较大。

结合图16还可看到,对于车底后部SBES-GEKO模型预测的速度场与DDES-GEKO的结果相近,而DDES-SST模型预测的速度场在靠近后轮位置的速度更大,在远离后轮位置的速度略小,因此在靠近后轮位置DDES-SST模型预测的表面压力较小。

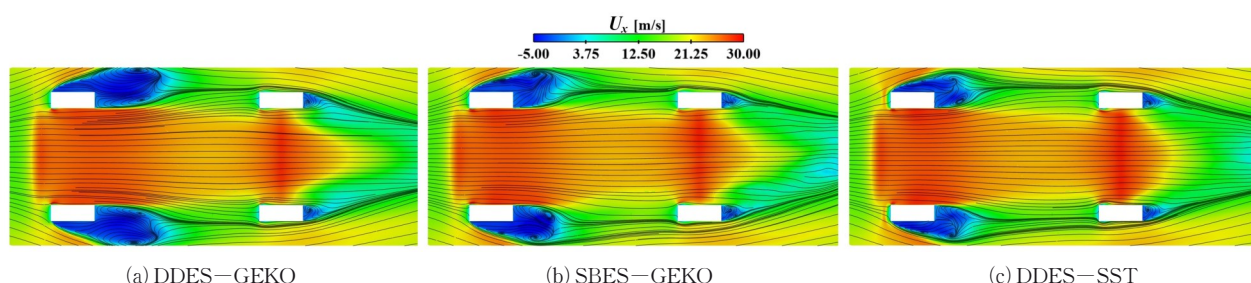


图15 不同混合方法计算的车底速度场( $z=0.15$  m)

Fig.15 Underbody velocity fields of different hybrid methods ( $z=0.15$  m)

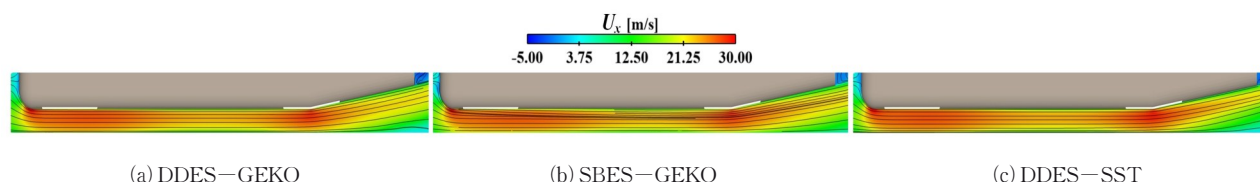


图16 不同混合方法计算的车底速度场( $y=0$ )

Fig.16 Underbody velocity fields of different hybrid methods ( $y=0$ )

4 种混合方法(基于 GEKO 的 DDES、IDDES、SDDES 和 SBES)的流场结果对比如图 17 所示,4 种不同混合方法计算获取的瞬时 Q-criterion 等值面,着色代表流向速度的大小。Q-criterion 等值面能够反映汽车外流场的涡结构分布,可以看到尾迹区的 C 柱涡、行李箱边缘处的分离和尾端拖曳涡结构以及地面和车轮后部的分离涡等。不同湍流模型的

Q-criterion 等值面差别不大,尤其是尾迹区涡结构比较相似,同样都识别出了 C 柱涡、行李箱边缘分离流和尾端拖曳涡结构,但对地面和车轮后部分离涡以及车身涡结构的预测略有不同。其中 IDDES 和 SBES 对地面和车轮后部分离涡的预测比 DDES 和 SDDES 预测的更大,同时 IDDES 相比于其他 3 种模型,行李箱盖和车顶位置存在较多小尺度涡结构。

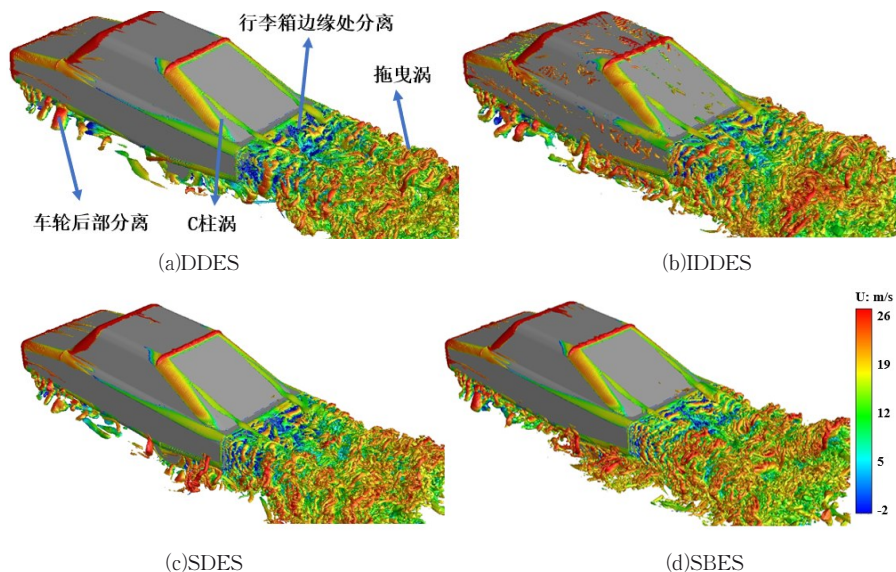


图 17 不同混合方法的瞬时 Q-criterion 等值面图

Fig.17 Transient Q-criterion isosurfaces of different hybrid methods

## 4 结论

本文针对快背 MIRA 汽车标准模型,通过与风洞实验测力和测压结果进行详细对比,探究 4 种 RANS/LES 混合方法(DDES、IDDES、SBES、SDDES)以及基于 4 种 RANS 模型(RKE、SA、SST  $k-\epsilon$ 、GEKO  $k-\omega$ )的 DDES 方法在汽车外流场计算中的适用性,得到主要结论如下:

(1)从气动阻力系数预测来看,RANS/LES 混合方法内嵌的 RANS 模型的不同对气动力系数存在影响,其中 GEKO 模型对气动力系数的预测结果最好,SST 模型对气动力系数的预测最差;而在采用 GEKO 模型的 RANS/LES 混合方法中,DDES 和 SDDES 模型对气动力系数的预测较好。

(2)从表面压力系数预测来看,不同混合方法对垂直中截线的压力预测结果与试验值吻合程度均较高,其中 SBES-GEKO 的预测结果更好。在对后风窗的压力预测中,不同混合方法的压力预测结果相似,内嵌不同的 RANS 模型对压力预测有影响,其中

SA 模型略优。不同的混合方法对车底部的压力预测结果区别较大,其中 SBES-GEKO 对车底后部的压力预测结果稍好;但对车底前部的压力预测各模型都显示出较大的偏差,并且都小于试验值。不同混合方法对车底压力系数预测的偏差主要来源于其对前轮区域流场模拟的较大差异。

(3)从尾迹的非定常流场结果来看,基于 GEKO 模型的不同混合方法的 Q-criterion 等值面结果相似,都识别出了尾迹区的非定常流动结构,但 IDDES 和 SBES 模型对地面和车轮后部分离涡的预测更大,且 IDDES 模型在行李箱盖和车顶位置预测出了更多小尺度涡结构。结合气动力和表面压力的计算结果,SBES-GEKO 模型整体表现较优。

## 参考文献:

- [1] WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD[M]. 3rd ed. La Canada, California: DCW Industries Inc, 2006.
- [2] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical model of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.

- [3] SPALART P R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[R]. AIAA Paper 92-0439, 1992.
- [4] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, *et al.* A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Computers Fluids, 1995, 24 (3) : 227. DOI: 10.1016/0045-7930(94)00032-T.
- [5] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8). DOI: 10.2514/3.12149.
- [6] MENTER F R. Best practice: scale-resolving simulations in ANSYS CFD[M]. Canonsburg, PA: ANSYS Inc, 2015.
- [7] MENTER F R, HÜPPE A, MATYUSHENKO A, *et al.* An overview of hybrid RANS-LES models developed for industrial CFD [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (6) : 2459. DOI: 10.3390/app11062459.
- [8] EKMAN P. Important factors for accurate scale-resolving simulations of automotive aerodynamics [D]. Sweden: Linköping University, 2020.
- [9] SPALART P R, JOU W H, STRELETS M K, *et al.* Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach [C]//First AFOSR International Conference on DNS/LES. Ruston, LA: AFOSR, 1997.
- [10] MENTER F R, KUNTZ M. Adaptation of eddy-viscosity turbulence models to unsteady separated flow behind vehicles [J]. The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains, 2004, 19: 339. DOI: 10.1007/978-3-540-44419-0\_30.
- [11] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, *et al.* A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities [J]. Theoretical & Computational Fluid Dynamics, 2006, 20 (3):181. DOI: 10.1007/s00162-006-0015-0.
- [12] SHUR M L, SPALART P R, STRELETS M K, *et al.* A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2008, 29 (6) : 1638. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
- [13] PIOMELLI U. Wall-layer models for large-eddy simulations [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(6), 437. DOI: 10.1016/j.paerosci.2008.06.001.
- [14] MARTINAT G, BOURGUET R, HOARAU Y, *et al.* Numerical simulation of the flow in the wake of Ahmed body using detached eddy simulation and URANS modeling [J]. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2008, 97: 125. DOI: 10.1007/978-3-540-77815-8\_13.
- [15] GUILMINEAU E. Computational study of flow around a simplified car body [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (6/7) : 1207. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.06.041.
- [16] SPALART P R. Detached-eddy simulation [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2009, 41 (1) : 181. DOI: 10.1146/annurev.fluid.010908.165130.
- [17] MENTER F R. Stress-blended eddy simulation (SBES)—A new paradigm in hybrid RANS-LES modeling [C]//Symposium on Hybrid RANS-LES Method. Springer, 2018, 137: 27.
- [18] EKMAN P, WIESER D, VIRDUNG T, *et al.* Assessment of hybrid RANS-LES methods for accurate automotive aerodynamic simulations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104301. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104301.
- [19] MENTER F R, LECHNER R. Best practice: generalized  $k-\omega$  two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO) [M]. Canonsburg, PA: ANSYS Inc, 2019.
- [20] 周华. MIRA 车型组气动特性数值计算与试验研究 [D]. 上海:同济大学, 2019.
- ZHOU Hua. Numerical Simulation on Aerodynamic Characteristics of MIRA Models with Experimental Validation [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.