

电动汽车底部流动分离对风阻的动态影响*

张倩文^{1,2}, 徐磊², 王庆洋², 徐胜金¹

(1. 清华大学航空航天学院, 北京 100084; 2. 中国汽车工程研究院股份有限公司风洞中心, 重庆 401122)

[摘要] 本文对某量产电动汽车风阻和车底流动分离进行了数值研究。研究表明, 在 $Re_L = 1.1 \times 10^7$ 时, 车底部流动在尾部分离并向上卷曲形成展向大尺度涡。风阻系数脉动与平均值占比约为 3.27%, 这对乘坐舒适性及里程预报存在不可忽视的影响。车体背部、底部压力、近尾流中下部、整车气动阻力、车底中后护板近壁面压力以及车底分离流均存在 12 Hz 的特征频率, 而车顶部及两侧的流动分离则无此特征频率, 证明车底部的流动分离是引起风阻动态变化的主要原因。

关键词: 电动汽车; 底部流动; 尾流; 风阻

Dynamic Effect of Underbody Flow Separation on Aerodynamic Drag in Electric Vehicles

Zhang Qianwen^{1,2}, Xu Lei², Wang Qingyang² & Xu Shengjin¹

1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Wind Tunnel Center, China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122

[Abstract] In this paper, an electric vehicle's aerodynamic drag and wake are numerically studied. The results show that the flow separates from the rear of the car may roll up into a large-scale vortex at $Re_L = 1.1 \times 10^7$. The ratio of the RMS drag and the mean drag reaches to 3.27%, making an unneglectable effect on ride comfort and mileage prediction. The pressure at the back, the underbody, the middle and lower parts of the near wake, the aerodynamic resistance of the entire vehicle, the pressure near the wall of the rear guard plate in the bottom, and the separation flow at the bottom all have a characteristic frequency of 12 Hz. However, the flow separation at the top and C-pillar of the car does not have this characteristic frequency. It proves that the underbody flow separation at the rear is the main cause of dynamic changes of the aerodynamic drag.

Keywords: electric vehicles; underbody flow; wake; aerodynamic drag

前言

行驶的汽车与空气相互作用, 在流体力学中是典型的湍流绕流问题。汽车对周围空气做功, 引起周围空气产生丰富的流动变化, 其代价是汽车能耗将一部分用于对空气做功。流动的变化对汽车产生了反作用力, 其中, 沿着流动方向的分力为汽车风阻。汽车周围的空气流动是动态变化的, 因此, 汽车

受到的气动力也一定是非定常的。气动力的统计定常结果对揭示汽车受力机理及分析动力学响应十分关键, 因此, 气动力的时间平均值往往是工程首要关注的信息。汽车平均风阻系数可定义为

$$\bar{C}_D = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T F_D(t) dt}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; U_∞ 为汽车与来流的相对速度; A 为汽车正投影面积; $F_D(t)$ 为动态阻力, 通常由测力

* 国家重点研发计划项目(2022YFE0208000)和重庆市博士“直通车”项目(CSTB2023NSCQ-BSX0021)资助。

原稿收到日期为 2024 年 05 月 24 日, 修改稿收到日期为 2025 年 01 月 08 日。

通信作者: 张倩文, 博士, E-mail: zhangqianwen@caeri.com.cn。

天平测量或CFD仿真计算获得; T 是阻力实验测量或阻力计算时间。式(1)的分子部分为风阻的时间平均,忽略了阻力本身的动态变化。显然,当阻力动态变化超过一定的限度时,可能给乘坐舒适性带来影响,给新能源车里程预报带来误差,还可能与结构或空腔产生共振,出现不希望的振动及异响。

学者们对汽车风阻动态变化做过一些研究,以简化汽车模型为研究对象,分析了三维绕流结构几何特征^[1-6],阐述了尾流的非定常基本特征^[7-8],尝试了一些减阻主动/被动控制方法^[9-10]。利用汽车空气动力学标准模型^[5]进行绕流研究可以大幅度降低研究代价,便于在风洞中开展流场、气动力、温度等多物理场实验研究。当气流绕过 Ahmed、MIRA 和 DrivAer 等空气动力学标准模型时,受模型几何形状变化以及流体惯性、黏性影响,气流可能在模型不同区域发生分离。分离的流动形成自由剪切层,产生不同尺度含有涡量的流动结构,表现为涡或波的特征。因来流速度高,车身大部分流动均是超临界流动,以湍流为主。车身的末端,无论是顶部、尾柱还是底部,在雷诺数为 10^7 量级时,分离的流动在剪切不稳定性作用下会重新形成大尺度涡^[11],这些涡脱离车身时会产生准周期变化的气动力,影响阻力动态变化。此外,车身尾流不仅仅含有大尺度的流动结构,仍然还有范围很广的小尺度涡结构,其尾流频谱呈现宽带和窄带随机并存的特征,对弹性的车身产生宽带及窄带随机作用力,引起噪声。Zhang 等^[12]对高阻及低阻 Ahmed 车模绕流结构进行了系统的实验研究,利用热线、流动显示、PIV 及壁面压力等测量技术,对 Ahmed 类车体高阻、低阻两种流场形态提出了非常系统的绕流结构几何模型,分析了各类旋涡结构的特征、形成、空间演化,提出了利用吹吸气控制流动实现减阻的方法。He 等^[13]构建了数值模拟与风洞实验相结合的阶背式车体尾流双稳态流场研究方法,发现车体尾部压力、阶背区域涡结构、背板后环形涡结构以及尾流动力学特征流动均与尾流的动态特性相关。Liu 等^[14]和 Liu 等^[15]的研究表明,车底流动特别是车轮区域的流动对整车尾流以及风阻的影响有很大贡献。通过使用合理的流动控制方法,可以降低底部流场动能损失,削弱尾部回流区的影响范围,从而降低风阻。但研究中仍没有给出完整的车底流动图像,缺少流动特征变化的机理认识,车底流动与动态风阻关联机制仍不清楚。

综上,以模型对时均阻力的研究可以应用到真

实汽车,对汽车减阻控制有理论指导意义。然而,真实汽车情况复杂,车底、车轮、车尾等均存在不光滑的几何点,产生流动分离,最终在车尾汇聚,形成复杂的非定常湍流尾流,其动态影响仍须关注。本文以某型量产的低风阻电动汽车为研究对象,利用数值仿真和全尺寸风洞实验,研究风阻动态变化规律,厘清风阻动态变化与车底流动及尾流的关系,为高效减阻设计、提升乘坐舒适性及控制异常振动和噪声奠定基础。

1 计算方法

选用某型量产电动汽车作为计算模型,如图 1 所示。该模型长度 $L = 4.98 \text{ m}$,以模型长度 L 为参考,模型的宽度 $W = 0.43L$,高度 $H = 0.31L$,正投影面积 $A = 2.46 \text{ m}^2$ 。利用实车外形扫描逆向建模得到计算模型,包含完整的外观造型、后视镜、底护板、车轮阻风板、轮辋等关键部件。车辆模型几何清理、边界划分以及表面网格划分操作均在 ANSA 软件中完成,最终处理为关闭进气格栅、无穿刺面、无自由边的模型,用于 CFD 计算。坐标原点选在车体底部最外边缘线和尾部中心线交点在地面上的投影(见图 1)。

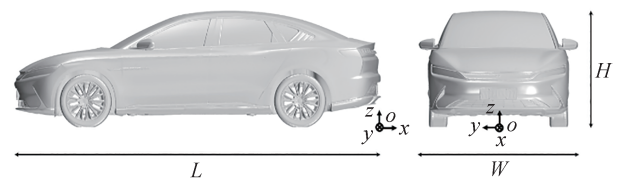


图1 计算模型

按照我国汽车空气动力学分会团体标准《TC/CSAE 乘用车空气动力学仿真技术规范》^[16],确立了如图 2 所示的计算域尺寸,其中高度 $H_r = 2.75L$,宽度 $W_r = 5.64L$,相应的阻塞比为 0.64%。如图 2 所示,计算模型位于宽度方向的正中间。气流入口设置为平均速度入口,计算域长度 $L_r = 11.0L$,入口边界距离坐标原点为 $4.0L$,自由来流速度设置为 $U_\infty = 120 \text{ km/h}$,以车长定义的雷诺数 $Re_L = 1.1 \times 10^7$ 。为使下游流动充分发展稳定,计算域出口边界距离坐标原点 $7.0L$,出口压力设置为大气压。模型表面设置为固定壁面。流域两侧端面及顶部均设置为对称面,即边界里外流动条件相同。地面边界为滑移壁面,滑移速度设置为 U_∞ 。车轮边界采用 MRF 旋转参

考坐标模拟滚动,车轮接地点线速度大小与入口流速一致。

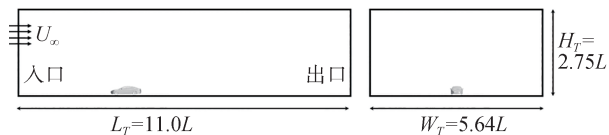


图2 计算域及边界条件

如图3所示,车身表面网格分辨率为 $(0.40 \sim 1.69) \times 10^{-3}L$ 。计算域体网格为切割体网格,主流域切割体网格最大尺寸为 $0.05L$,共设置4级加密区。图3中的a区~d区,对应的尺寸分别为 $2.56 \times 10^{-2}L$ 、 $1.28 \times 10^{-2}L$ 、 $0.64 \times 10^{-2}L$ 、 $0.32 \times 10^{-2}L$ 。车身边壁面包含5层棱柱网格,其中第1层网格法向高度为 $1.78 \times 10^{-4}L$,以保证 $y^+ < 1$ ^[12],车体周围网格在近壁面法向上的增长因子设置为1.3。

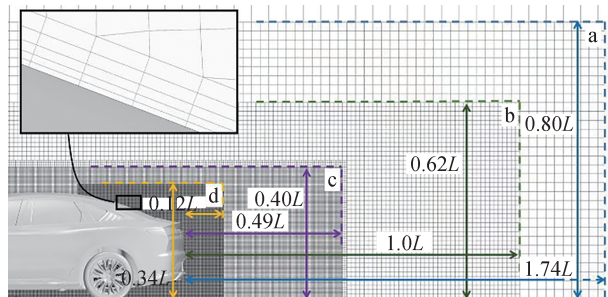


图3 数值模拟网格划分

采用基于湍动能 k -单位湍动能耗散率 ω 模型的剪切应力输运(shear stress transport, SST)两方程湍流模型,结合改进的延迟分离涡模拟方法(improved delayed detached eddy simulation, IDDES)进行湍流模拟。数值计算通过商业软件Star-CCM+实现。基于隐式非定常不可压缩有限体积求解器进行数值模拟,对流项采用混合格式进行离散。湍流项和扩散项都采用2阶迎风格式,时间步采用2阶隐式格式,时间步长设置为 $1.0 \times 10^{-4} s$,每个时间步的最大内迭代次数设置为 10 ^[17],使连续方程、动量方程和湍流方程的残差均在 1.0×10^{-4} 以下。

2 风洞实验验证

为验证计算的合理性,在一座全尺寸3/4开口气动声学风洞进行整车风洞实验验证。实验车辆水平安装在风洞地面上,偏航角为零,车头距离喷口

$0.6L$ 。使用精度为0.03%FS的六分量天平测量气动力。利用边界层抽吸、车轮驱动、中央移动带等系统消除地面边界层,模拟汽车行驶时真实的车底流场环境,如图4所示。风洞实验雷诺数与数值模拟保持一致,即 $Re_L = 1.1 \times 10^7$ 。

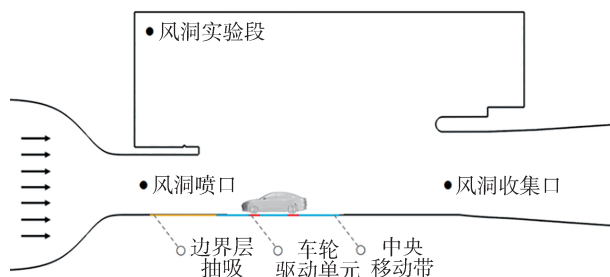


图4 整车风洞实验示意

实验测得整车平均风阻系数为0.24。数值计算方法获得的平均风阻为0.2445,与实验测试比较,相对误差为1.88%,证明平均阻力的计算值可信。

定义压力系数为

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (2)$$

式中: p 为车底或车身表面压强实测值; p_∞ 为流动远场处参考压强。图5对比展示了车底表面平均压力系数的数值模拟结果和风洞实验结果。结果表明,前、中、后护板表面压力的变化规律与实验一致,无量纲压力系数仿真与实验对比平均差异为0.02,相对于自由来流总压平均差异为2%。计算时,采用了理想封闭方法,将真实汽车底部P09及P38点附近的物理结构做了简化,使压力系数恢复出现差异。尽管存在局部误差,但考虑到误差的来源和其对整体流场分析的影响程度,可以认为该数值模拟方法能准确地捕捉车底流场的主要特征。

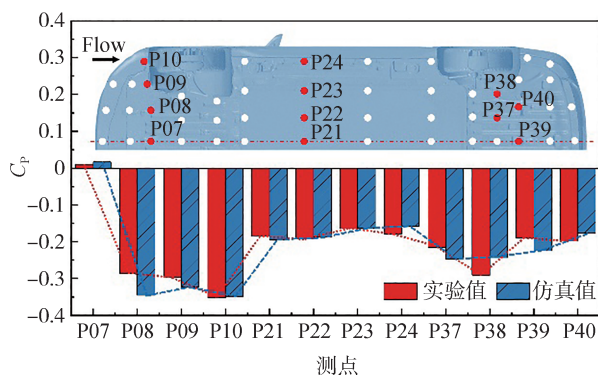


图5 车底表面压力系数对比

3 结果与讨论

为了研究车辆周围流动与风阻的动态关系,对整车风阻系数,车尾及顶部分离区、车体侧面、底护板近壁面、近尾流等处的压力变化进行了计算,计算总时长 $t^* = tU_\infty/L = 42$, 对应的物理时长为 6 s, 数据呈现的采样频率 $f_s = 1$ kHz。

图 6 展示了整车风阻系数随时间的变化,其中平均风阻系数值 $\bar{C}_D = 0.2445$, 脉动的均方根值 $C_{D_{rms}} = 0.008$, 脉动均方根值与平均值比值为 3.27%, 脉动阻力系数上下变化的最大幅度约 0.05, 占平均值的 20%。风阻的脉动变化可能会对汽车驾乘舒适性及里程预报造成不可忽视的影响, 结合式(3)和式(4)计算得到, 当 C_D 预测波动为 20% 时, 在车速 $U_\infty = 120$ km/h 条件下, 每秒的耗能误差为 2 637.1 J。

$$\Delta F_D = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A \bar{C}_D \times 20\% \quad (3)$$

$$\Delta F_D S_L = F_D \cdot 1 \cdot U_\infty = \frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A \bar{C}_D \times 20\% \quad (4)$$

式中 S_L 为单位时间内车辆的行驶距离。

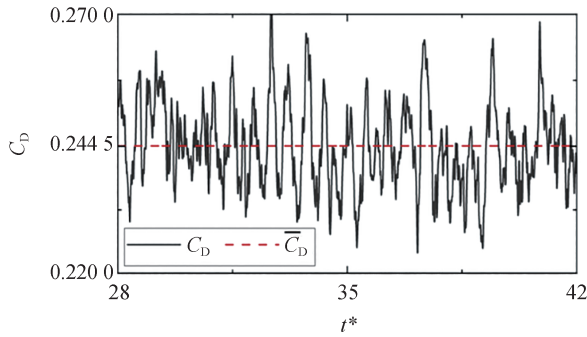


图 6 整车风阻系数时间历程曲线

图 7 为风阻系数 $C_D(t)$ 的 FFT 结果。可以发现, 风阻系数在 $f_{c_0} = 12$ Hz 处存在明显的峰值, 存在以周期性波动。如果此波动与汽车局部结构固有频率或

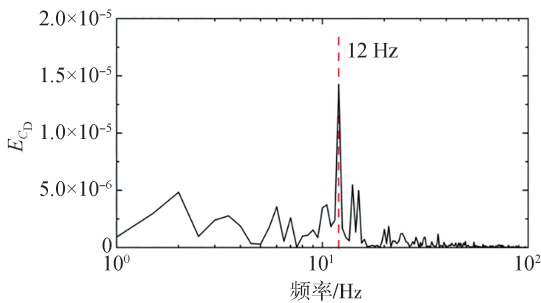


图 7 风阻系数 PSD 曲线

舱体空腔固有频率接近, 可能会产生不希望的共振或异响。

图 8 给出汽车尾流在不同纵对称面与 $f_{c_0} = 12$ Hz 的结构频率一致的脉动压力频谱。图中截面 a ~ e 分别为 $y/W = 0 \sim 0.37$ 的 5 个等间距截面, 暗红色代

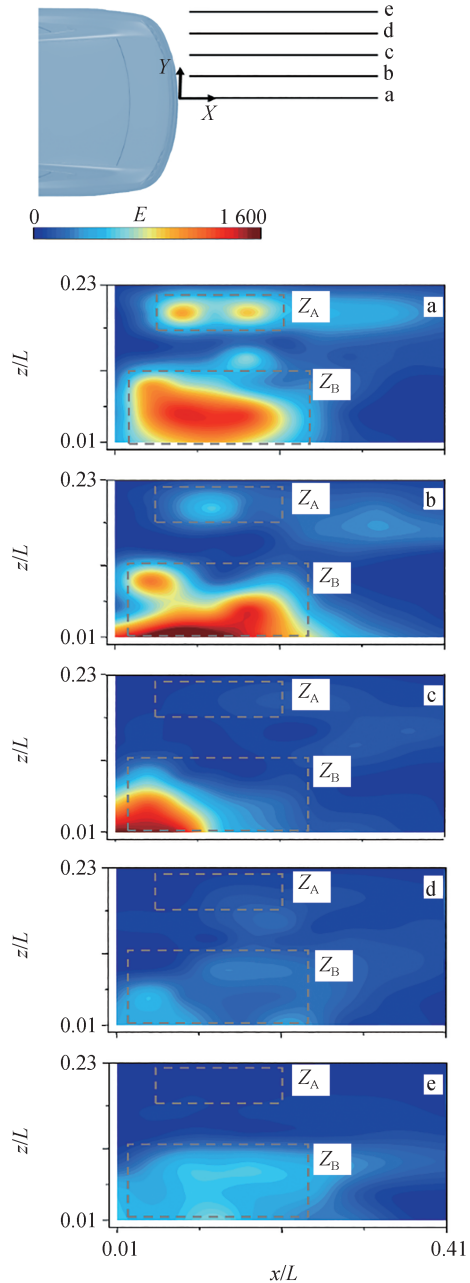


图 8 不同空间平面 $f = 12$ Hz 频率压力脉动能量谱 ($Re_L = 1.1 \times 10^7$)

表脉动压力强度最大, 间接反映与特征频率存在更高的相关性。整车风阻系数频谱特性与尾流压力脉动高度相关。在 a 平面, 存在与 $f_{c_0} = 12$ Hz 的结构频率一致的两个区域 Z_A 和 Z_B , 相应范围分别为 $0.05 \leq$

$x/L \leq 0.19$ 、 $0.18 \leq z/L \leq 0.21$ 和 $0.03 \leq x/L \leq 0.21$ 、 $0.01 \leq z/L \leq 0.09$ 。其中,靠近车底部的 Z_B 区域所占面积最大、能量高,表明此处的流动为风阻出现特征频率的波动有更多贡献。在 b 截面, Z_A 区域相关频率的能量大幅减弱,该区域的压力脉动能量仅为 a 截面的 1/4,并且结构频率从 c 截面开始不再可见,表明该非定常流动结构极大减弱。b 截面 Z_B 区域仅在 $0.01 \leq x/L \leq 0.23$ 、 $0.01 \leq z/L \leq 0.1$ 区域存在较高的压力脉动,对近尾流总能量脉动有较大的贡献。此外,由 c 截面 ~ e 截面频谱还可以看到, $0.01 \leq z/L \leq 0.11$ 区域始终存在与风阻系数相同的结构频率,脉动能量大小呈现先减小再增大的变化。结合图 9 的 $x^* = 0.09$ 截面 $f = 12$ Hz 压力谱,近尾流 Z_B 区域脉动能量显著高于 Z_A 区域,在展向的作用区域更大。车底非定常结构频率脉动能量在总能量脉动中占主导地位。

值得注意的是,图 8 和图 9 计算的雷诺数达 10^7 量级,参考二维圆柱绕流理论^[15],雷诺数在 $2.5 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^6$ 之间时,流动分离后产生的尾流中全部是湍流,但没有明显的大尺度涡结构。当雷诺数大于 3.5×10^6 之后,尾流中重新出现大尺度涡结构。虽然至今仍不知其机理,但其现象在很多类似的情况中都出现过。本算例中,雷诺数为 10^7 量级,因此尾流中重新出现了大尺度流动结构,这些结构随着流动向下游输运,出现类似涡脱落的现象,引起气动阻力周期性变化。

对车尾顶部分离区、车体侧面和底护板近壁面

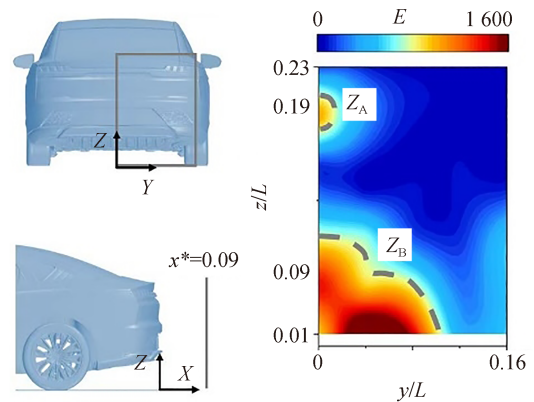


图 9 $x^* = 0.09$ 截面 $f = 12$ Hz 频率压力脉动能量谱 ($Re_L = 1.1 \times 10^7$)

监测点进行分析,如图 10 和图 11 所示。其中测点 P01 - P48 位于底护板近壁面,P49 - P51 位于车尾顶部车体中心线 $y/W = 0$ 处,P52 - P54 位于近尾流 a 截面 Z_A 区域,P55 - P61 位于车体侧面。可以发现,位于车底部前护板近壁面的监测点 P7 - P10 的特征频率为 4 Hz,能量脉动幅值较小,且随着监测点位置靠近轮缘,主频对应的脉动幅值逐渐增大,是测点 P9、P10 受车底结构变化及旋转车轮周围流动耦合导致。监测点 P21 - P24,逐渐出现具有和整车气动阻力相同的结构频率 12 Hz。后护板近壁面测点也同样监测到了 12 Hz 的特征频率(测点 P33 - P35、P41、P43、P48)。随着车底流动结构从中护板到后护板的运动与演化,该特征频率处的幅值逐渐增大。后轮及后护板的尾缘分离处脉动最强,约为中护板区

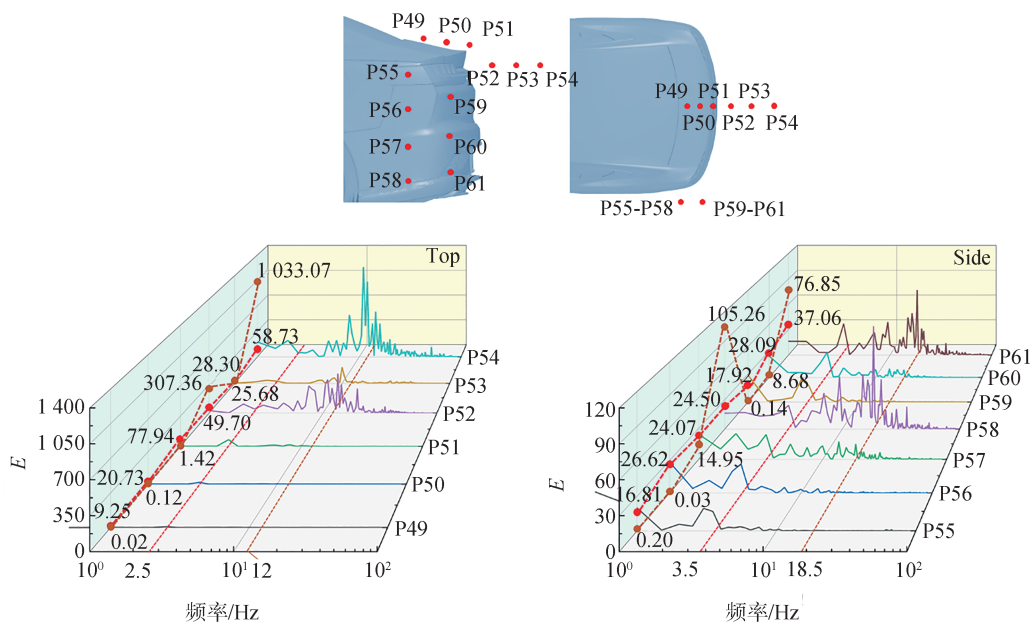


图 10 车体顶部和侧面压力谱

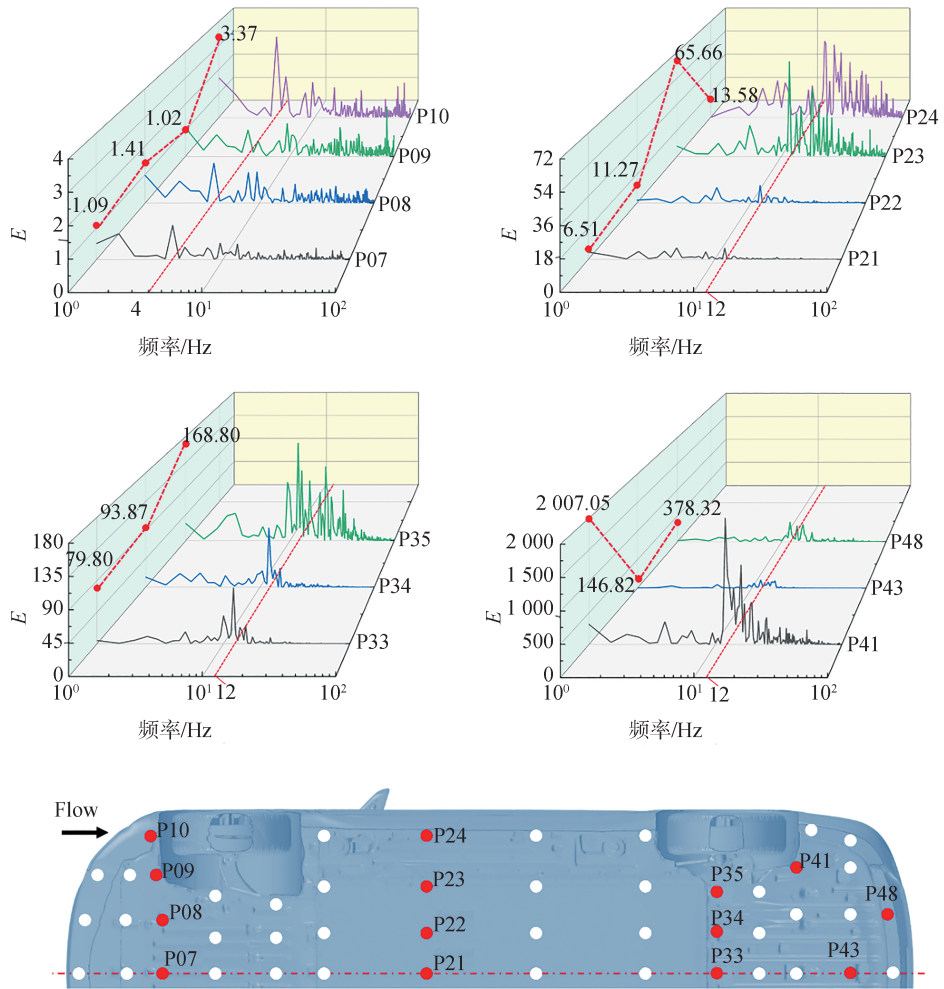


图 11 底护板近壁面压力谱

域的 30 倍。与文献[15]中的发现相同,汽车底部流动存在流动分区现象,这说明可以对前护板以及中、后护板结构进行分区设计。

对于车顶倾斜尾窗近壁面的测点 P49 - P51,仅存在一个 2.5 Hz 的低频。同样,在车体侧面测点 P55 - P57、P59 - P60 也仅监测出主频为 3.5 Hz 的特征频率,以及在点 P58、P61 获得的主频为 18.5 Hz 的特征频率。可以发现,只有车底近壁面、尾流与风阻动态变化存在相同的特征频率,高度关联的区域为尾流中下部以及后护板区域。

图 12(a)、图 13(a),图 12(b)、图 13(b),图 12(c)、图 13(c),图 12(d)、图 13(d),图 12(e)、图 13(e) 依次为 t_0 、 $t_0 + 1/4T_{c_0}$ 、 $t_0 + 2/4T_{c_0}$ 、 $t_0 + 3/4T_{c_0}$ 、 $t_0 + 4/4T_{c_0}$ 时刻车体背部及车底瞬时表面压力系数云图,其中 $T_{c_0} = 1/f_{c_0}$ 。图 12(f)和图 13(f)为平均压力系数云图。由图 12 和图 13 可以发现,车体背部、车底的压力与整车风阻存在一致的周期性变化。车体背部压

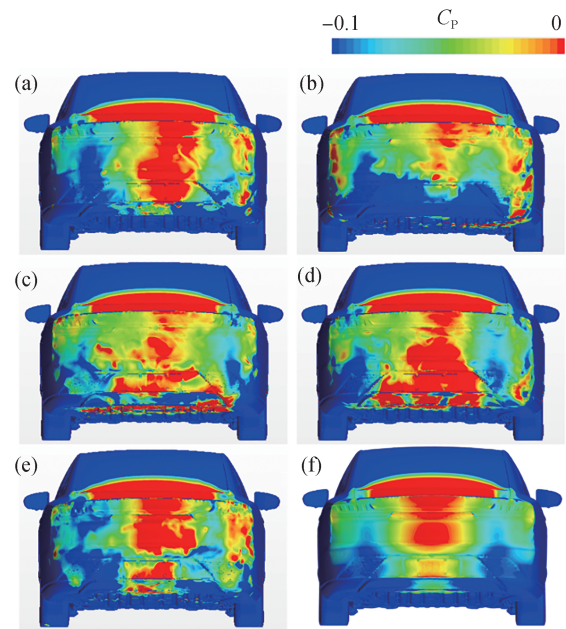


图 12 车体背部瞬时及平均压力系数云图

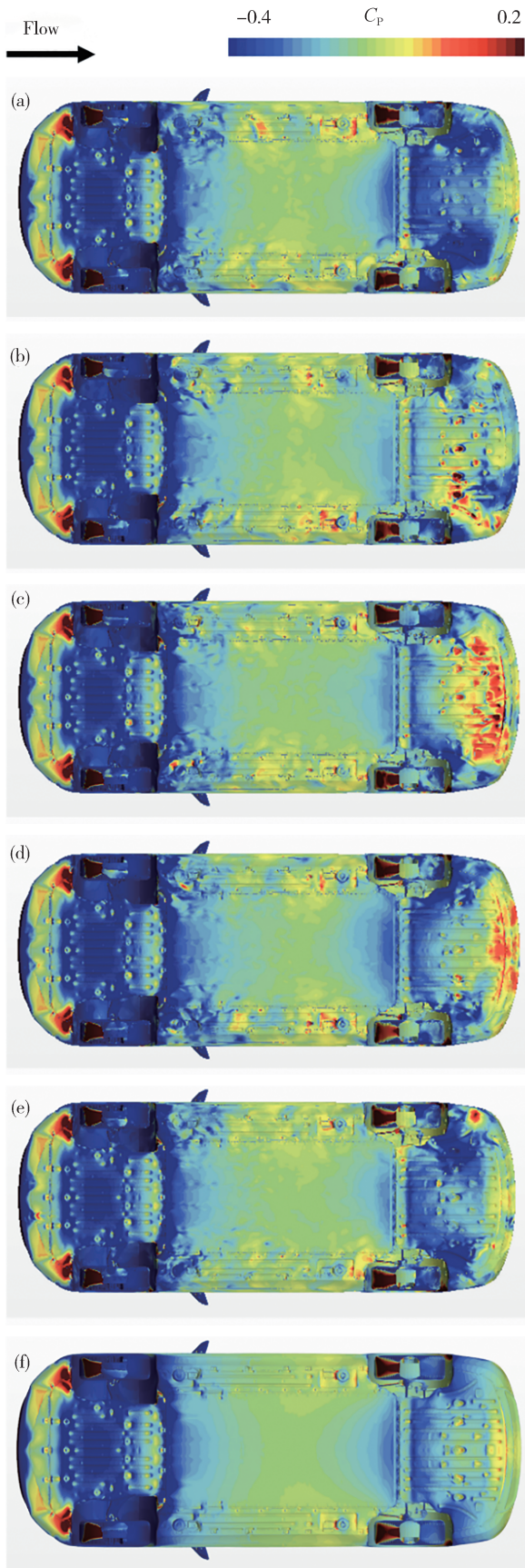


图13 车底瞬时及平均表面压力系数云图

力变化的区域主要集中在车体垂直后背的下半部,而倾斜尾窗的压力系数几乎不变。车底压力在特征周期内动态变化的区域为车底部中护板和后护板位置,这与频谱分析的结果一致。因此,汽车底部流动是阻力动态特征变化的主要原因。

进一步分析背部及车底表面压力周期变化的原因,图14(a)、图14(b)、图14(c)、图14(d)、图14(e)依

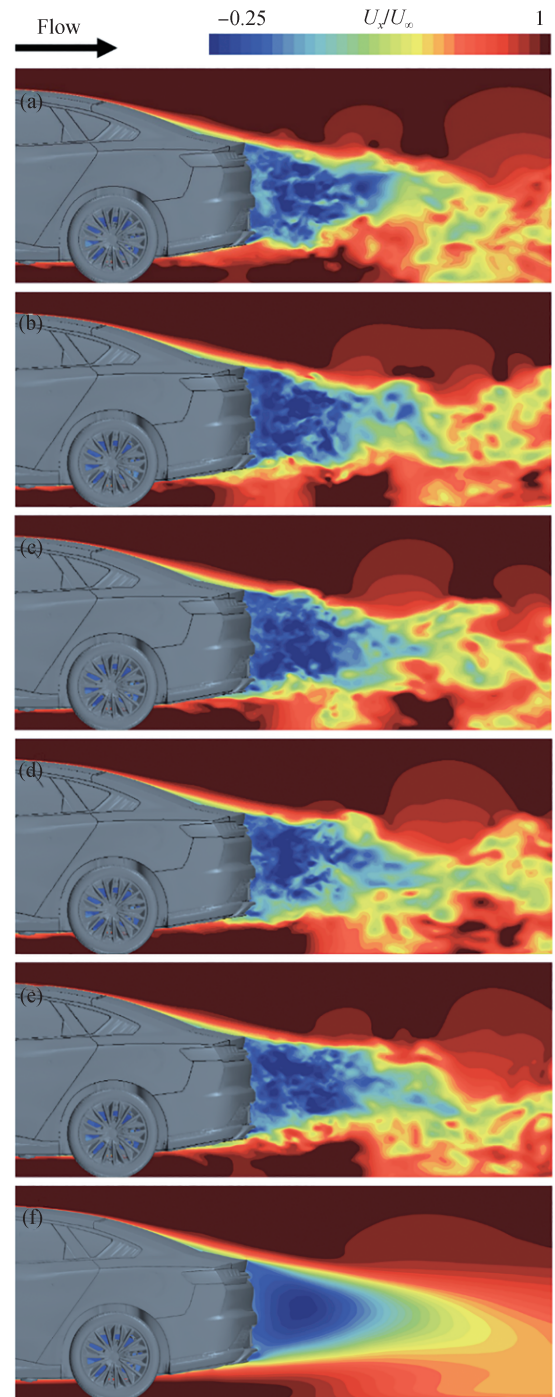


图14 $y/W = 0$ 截面瞬时及平均速度云图

次为 t_0 、 $t_0 + 1/4T_{c_0}$ 、 $t_0 + 2/4T_{c_0}$ 、 $t_0 + 3/4T_{c_0}$ 、 $t_0 + 4/4T_{c_0}$ 时刻 $y/W = 0$ 截面瞬时速度云图,图 14(f)为平均速度云图。如图 14 所示,车底后护板区域流动与近尾流以及地面之间存在相互作用,导致近尾流中心低速回流区面积动态变化。利用雷诺输运定理,可有:

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt} \left(\int_V \mathbf{U} \rho dV \right) + \int_S \mathbf{U} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dS \quad (5)$$

式中:等号左边表示汽车受到的气动力矢量和; \mathbf{U} 是流动速度矢量,是时间和空间的函数; V 和 S 分别表示包裹汽车的流体体积和表面积。根据式(5),汽车的气动力与周围流体的流动速度矢量有关,尾流的动态变化反映风阻的动态变化,与二维圆柱绕流时

尾流越宽阻力越大类似,近尾流低速回流区越大阻力也越大。

图 15 展示了不同截面瞬时及时均展向涡量场。在 $y/W = 0$ 截面,存在高度集中的涡量,从 $y/W = 0$ 到 $y/W = 0.19$ 逐渐收缩。在靠近车辆外侧的 $y/W = 0.28$ 截面,负涡量(涡量方向指向纸面外)集中区域相较于其在中心面 $y/W = 0$ 向下偏转,随着观察截面越来越向车的两侧靠近,底部的绕流逐渐变弱。 $y/W = 0.37$ 截面,流动接近远场的自由流,涡量比 $y/W = 0.28$ 截面弱。车体上表面的流动表现出较好的稳定性,均是在车体垂直后背上缘几何间断处发生分离,靠中间位置分离最明显。

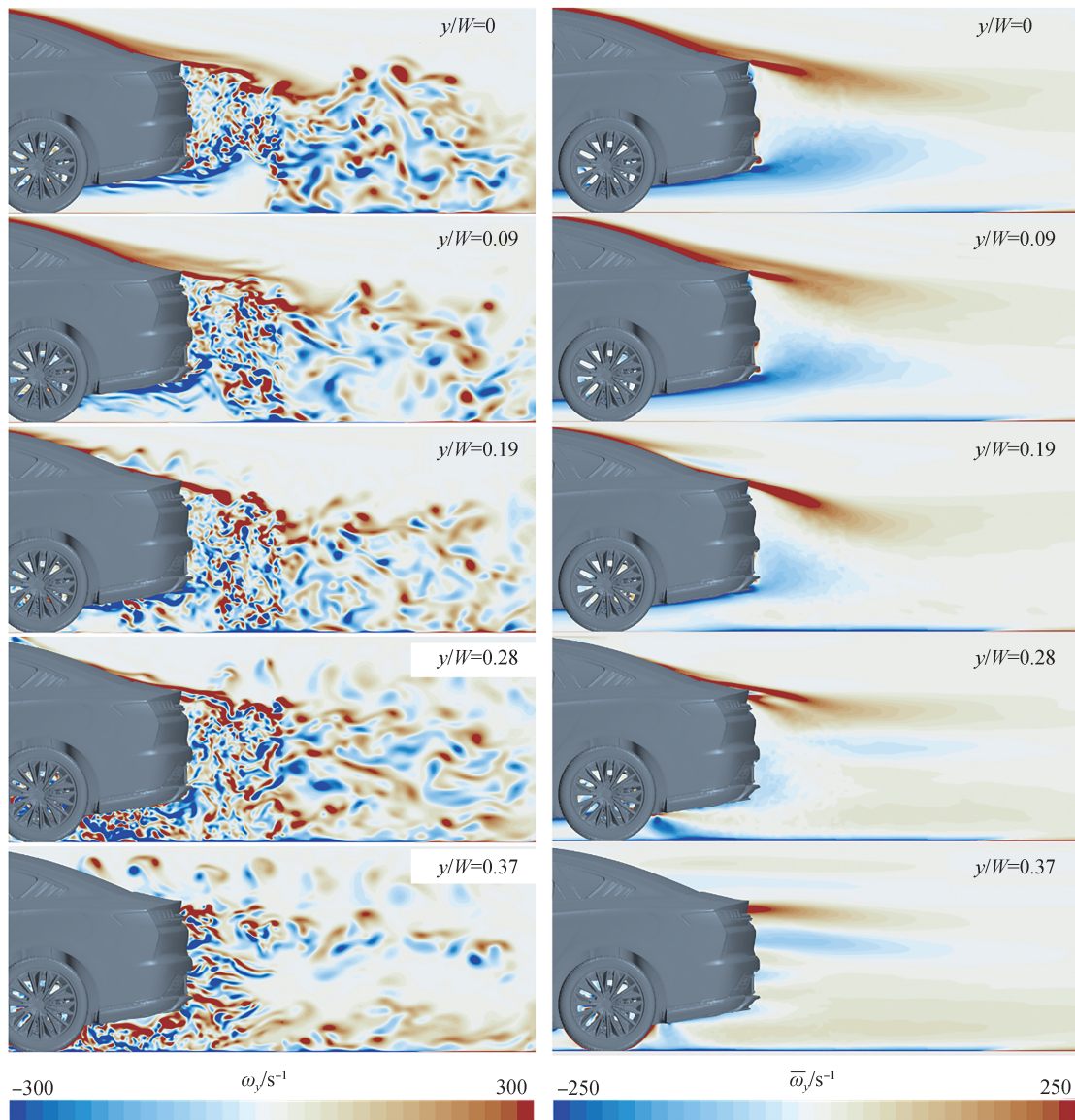


图 15 $y/W = 0$ 截面典型瞬时(左)及时均展向涡量(右)($Re_L = 1.1 \times 10^7$)

图16展示了不同截面速度流线,在 $y/W = 0$ 截面,气流沿车体垂直后背上、下缘、底部均出现流动分离,并形成涡。从 $y/W = 0.09$ 截面到 $y/W = 0.37$ 截面,沿车体垂直后背上缘的流动分离逐渐减弱,分离位置不变;底部的流动分离呈现比较明显不同,分离流动卷曲成涡主要集中在中间区域,约为 $-0.19 \leq y/W \leq 0.19$ 。

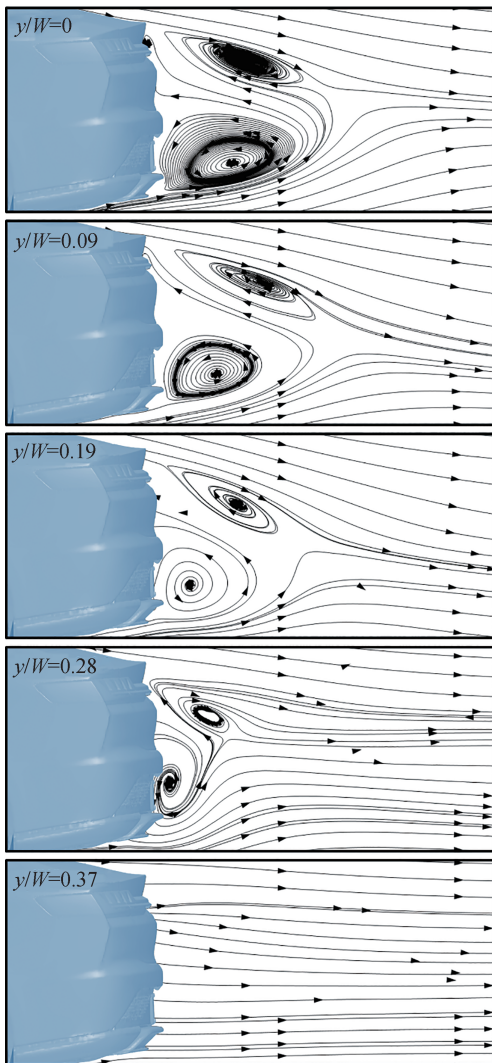


图16 不同截面速度流线图($Re_L = 1.1 \times 10^7$)

4 结论

采用非定常数值模拟方法,研究雷诺数为 1.1×10^7 时某型电动汽车底部、尾部流动及其对阻力系数的动态影响,获得了车底及背部表面压力、近尾流与整车风阻动态变化的时空关联。通过频谱和流场分析,分析了车底流场物理特征。结果表明,整车风阻

动态数据出现12 Hz的结构频率,与尾流大尺度流动结构的特征频率一致。整车风阻动态变化受车顶和车体侧面绕流影响较小,底部流动是阻力动态特征变化的主要原因。车体底护板近壁面周期性的流动分离与尾流的动态变化有重要关联,同时也影响了车体背压的变化,导致整车风阻动态波动。

电动汽车均采用底部铺平、尾部略微上翘的设计,经过车底的流动在汽车尾部流动分离无法避免。分离的流动在压力梯度作用下卷曲形成大尺度涡,随后周期性分离,这是所有电动汽车都会出现的流动状态,即引起阻力波动无法避免是一个共性现象。本文研究得到的普遍适用规律和结论,可以为电动汽车的气动设计提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] LIU K, ZHANG B F, ZHANG Y C, et al. Flow structure around a low-drag Ahmed body[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 913: A21.
- [2] WANG J, MINELLI G, CAFIERO G, et al. Validation of PANS and effects of ground and wheel motion on the aerodynamic behaviours of a square-back van [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, 958: A47.
- [3] 张之豪,王宇萌,王庆洋,等.利用自动PIV技术测量DrivAer模型三维尾流场结构[C].2020中国汽车工程学会年会论文集,2020:6.
ZHANG Z H, WANG Y M, WANG Q Y, et al. Experimental study on three-dimensional wake structure of DrivAer standard model using auto-PIV [C]. 2020 SAE China Annual Meeting, 2020:6.
- [4] SELLAPPAN P, MCNALLY J, ALVI F S. Time-averaged three-dimensional flow topology in the wake of a simplified car model using volumetric PIV [J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59: 1-13.
- [5] 刘锦生,徐胜金,王庆洋,等.基于物理模型的汽车空气动力学研究综述[J].*实验流体力学*,2020,34(1):38-48.
LIU J S, XU S J, WANG Q Y, et al. Review of automotive aerodynamics research based on physical models[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2020, 34(1): 38-48.
- [6] WANG Q Y, GAN L, XU S J, et al. Vortex evolution in the near wake behind polygonal cylinders [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 110: 109940.
- [7] GRANDEMANGE M, GOHLKE M, CADOT O. Bi-stability in the turbulent wake past parallelepiped bodies with various aspect ratios and wall effects[J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(9).
- [8] CAPONE A, ROMANO G P. Investigation on the effect of horizontal and vertical deflectors on the near-wake of a square-back car model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 185: 57-64.
- [9] 王汉封,张运平,邹超.导流板对25°倾角Ahmed类车体尾流

- 与气动阻力的影响[J].实验流体力学, 2014, 28(1): 31-37.
- WANG H F, ZHANG Y P, ZOU C. Effects of deflectors on the wake and aerodynamic drag of a 25° slant angle Ahmed model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(1): 31-37.
- [10] 汪怡平, 郭承奇, 王涛, 等. 基于自由变形技术的Ahmed模型气动减阻优化[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(3): 221-228.
- WANG Y P, GUO C Q, WANG T, et al. Aerodynamic drag reduction of Ahmed model based on free form deformation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(3): 221-228.
- [11] 庄礼贤, 尹协远, 马晖扬. 流体力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009:328-329.
- ZHUANG L X, YIN X Y, MA H Y. Fluid mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 328-329.
- [12] ZHANG B F, ZHOU Y, TO S. Unsteady flow structures around a high-drag Ahmed body [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 777: 291-326.
- [13] HE K, MINELLI G, WANG J, et al. Numerical investigation of the wake bi-stability behind a notchback Ahmed body [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 926: A36.
- [14] LIU J S, ZHANG Z H, WANG Y M, et al. Experimental study on the three-dimensional wake structure of the DrivAer standard model[J]. Journal of Visualization, 2021, 24: 443-460.
- [15] LIU X, FU Q X, XU S J. Experimental study of underbody flow of electric vehicle[C]. The 1st International Conference on Intelligent Optimization of Aerodynamics and Heat Flow Control, June 14-16, 2023.
- [16] 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会. 乘用车空气动力学仿真技术规范:T/CSAE 112—2019[S].[2019-07-10]. China-SAE Automotive Aerodynamics Committee. Technical specification of passenger car aerodynamic numerical simulation: T/CSAE 112—2019[S].[2019-07-10].
- [17] ASHTON N, REVELL A. Key factors in the use of DDES for the flow around a simplified car [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, 54(43):236-249.

(上接第896页)

- [20] HUSSAIN A H. Tuning and performance evaluation of 2DOF PI current controllers for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1401-1414.
- [21] 张志坚, 荆龙, 赵宇明, 等. 高速低开关频率下永磁同步电机的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6345-6353.
- ZHANG Z J, JING L, ZHAO Y M, et al. Decoupling control of permanent magnet synchronous motor at high speed and low switching frequency [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6345-6353.
- [22] 刘宇博, 王旭东, 周凯. 基于滑模观测器的永磁同步电机电流偏差解耦控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1642-1652.
- LIU Y B, WANG X D, ZHOU K. Decoupling control of current deviation of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1642-1652.
- [23] 吴为, 丁信忠, 严彩忠. 基于复矢量的电流环解耦控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4184-4191.
- WU W, DING X Z, YAN C Z. Research on control method of current loop decoupling based on complex vector [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4184-4191.
- [24] 陈志成, 朱冰, 赵健, 等. 考虑非线性特性的电控助力制动系统多闭环压力控制策略[J]. 机械工程学报, 2023, 59(4): 190-198.
- CHEN Z C, ZHU B, ZHAO J, et al. Multi-closed-loop pressure control strategy considering nonlinear characteristics of electro-booster brake system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(4): 190-198.