

类车体尾迹流动非定常特性

王冰心¹, 杨志刚^{1,2}, 朱 晖¹

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 通过与已发表的数据相对比, 对大涡模拟方法的有效性进行验证. 采用该数值方法对高雷诺数下 25° 后倾角 Ahmed 类车体背部斜面及尾部垂直面处尾迹区的流动进行解算. 通过对背部斜面处分离泡、背部斜面侧边“C 柱”处卷起的拖曳涡对及尾部垂直面处回流区流场信息的采用及相关频谱特性分析, 研究并明确了尾迹区起主导作用的大尺度相干结构及运动的非定常特性. 在流动的不同区域, 类车体尾迹区流动的非定常特性不尽相同, 主要体现为背部斜面分离泡的拍击振动具有绝对不稳定性特征, 由 Kelvin-Helmholtz(KH)不稳定性诱发的大尺度相干结构具有对流不稳定性特征; 两侧“C 柱”拖曳涡对在背部斜面上与展向涡相互耦合, 具有较好的对称性; 拖曳涡对在垂直面处回流区内与该区展向涡相互混掺, 但无耦合作用且不具有对称性; 垂直面处回流区内上、下侧剪切层卷起的展向涡以类似卡门涡街形式交替产生并脱落; 高雷诺数时, 整个尾迹区流动的特征频率趋于一致.

关键词: Ahmed 类车体; 大涡模拟; 非定常特性

中图分类号: O355; U461.1

文献标志码: A

Transient Feature of Flow Field in Wake of Ahmed Body

WANG Bingxin¹, YANG Zhigang^{1,2}, ZHU Hui¹

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 210804, China; 2. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: Compared with the published data, the validity of the large eddy simulation method is verified. The large eddy simulation method is applied to the study of the flow field around slanted surface and rear vertical base of the Ahmed body with a slant angle of 25° at high Reynolds number. This work aims to gain a relatively thorough understanding of the transient features of the predominant coherent structures around the Ahmed body by sampling flow field information and spectrum analyses of a recirculation bubble over the slanted

surface, one pair of counter-rotating longitudinal C-pillar vortices originating from the two side edges of the rear window, and a recirculation torus behind the vertical base. In different regions of flow field, the transient features of the wake are different. The flapping motion of the recirculation bubble over the slanted surface corresponds to an absolute unsteadiness while the activity of the coherent structures is convective. The pair of C-pillar vortices coupled with the spanwise vortices over the slanted surface are symmetric. However, they only mix with the recirculation torus behind the vertical base resulting in asymmetric characteristic. The rolling up and shedding of the recirculation torus behind the vertical base are similar to Karman vortex street. At high Reynolds numbers, the characteristic frequency of different regions tends to be consistent.

Key words: Ahmed body; large eddy simulation; transient feature

作为汽车气动减阻方法之一的流动主动控制法包括定常控制技术与非定常控制技术, 其中后者较前者更具优势. Brunn 等^[1]在 35° 后倾角 Ahmed 类车体背部斜面上侧分离线处采用非定常控制技术, 实现减阻率 2.5%; Krentel 等^[2]在 25° 后倾角 Ahmed 类车体背部斜面下侧分离线处采用非定常控制技术, 实现减阻率 5.7%; Pastoor 等^[3]采用非定常控制技术实现了上下剪切层同步, 减阻率达 15%. 非定常主动控制技术运用的成功与否依赖于对车体绕流场的流动结构及其非定常运动特性的研究^[4].

针对 Ahmed 类车体, 以往的数值与实验分析指出其尾迹区由 3 个主要部分组成: 背部斜面上的分离泡、背部斜面侧“C 柱”处卷起的拖曳涡对及尾部垂直面后部的回流区^[5], 气动阻力与这三种相干结构的相互作用有直接的关系^[6]. Minguéz 等^[7]用高阶大涡模拟法研究发现在 $Re_H = 7.78 \times 10^5$ 时背部

收稿日期: 2018-03-20

基金项目: 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台(16DZ2290400); 同济大学教学改革研究和建设项目(1700104075)

第一作者: 王冰心(1987—), 男, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: vincenzo198701@gmail.com

通信作者: 朱 晖(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhuhuisuccess@163.com

斜面出现主频,对应的 $St_r = 0.27$,垂直面后部回流区出现主频,对应的 $St_b = 0.42$,并指出背部斜面马蹄涡的频率起主导作用。

Thacker 等^[8-9]研究了不同雷诺数下背部斜面的主频, $St_r = 0.18 \sim 0.21$ 分别对应雷诺数 $Re_H = (3.89 \sim 7.78) \times 10^5$, 相比其他研究其结果偏小,且指出马蹄涡对应的频率不是背部斜面的主导频率,而应为高频特性,与文献[7]相矛盾。Heft 等^[10]在 $Re_H = 7.78 \times 10^5$ 时得出背部斜面主频 $St_r = 0.18$; Pierric 等^[4]研究了不同雷诺数时背部斜面处与垂直面处流动的主频特性, $St_r = 0.29 \sim 0.43$ 与 $St_b = 0.44 \sim 0.45$ 对应 $Re_H = (3.89 \sim 7.78) \times 10^5$, 指出主频会随雷诺数增大而增大,而高频特性对应由 KH 不稳定性造成的剪切层卷起频率。Zhang 等^[11]由主频特性与雷诺数关系的拟合曲线得出在 $Re_H = 7.78 \times 10^5$ 时, St_r 与 St_b 分别为 0.52 与 0.46。由此可知,针对 Ahmed 类车体尾迹区非定常特性的研究结果存在明显差异。Jean-Francois 等^[12]定性地解释了背部斜面分离泡与“C 柱”拖曳涡对存在竞争作用关系:较强较大的背部斜面分离泡会产生较低的背压,在使阻力增加的同时,导致从背部斜面侧“C 柱”处卷起的拖曳涡对更强;另一方面,较强的“C 柱”拖曳涡对在其涡核中心诱导出较大的低压区,从而延缓了背部斜面分离泡的分离,而且较强的“C 柱”拖曳涡对诱导流体产生的下洗作用较强,减小了背部斜面分离泡尺度从而使阻力减小;但作者并未对此作进一步定量的论证。因此,有必要对 Ahmed 类车体尾迹区不同相干结构的相互作用进行深入研究。

本文以大涡模拟为手段,在高雷诺数 ($Re_H = 7.78 \times 10^5$) 下,获取 25° 后倾角 Ahmed 类车体尾迹区不同部位处流场参数的时变信息,依据所得数据频谱分析结果,进一步明确尾迹区流动的非定常特性。

1 数值仿真模型与计算方法

1.1 数值仿真模型

采用全尺寸 Ahmed 类车体作为研究对象,具体结构及尺寸如图 1 所示。整车置于长 \times 宽 \times 高为 $8.352 \text{ m} \times 2.723 \text{ m} \times 1.152 \text{ m}$ 的计算域中,车头距入口 1.566 m ,车尾距出口 5.742 m ,阻塞比 3.57% 。

为降低数值黏性,在计算域内采用空间切块映射法构造六面体网格,如图 2 所示。车身表面网格尺寸 $< 4 \text{ mm}$,车身表面第一层边界层网格高度为 0.03

mm,地面第一层网格高度为 0.05 mm ,以 1.10 的增长率生成 20 层形成边界层网格;边界层网格以 1.15 的比例与外侧体网格过渡;在确保第一层网格高度量为 $Y^+ \leq 3$ 的前提下,体网格总数为 200 万单元,图 3 显示了中截面体网格结构。

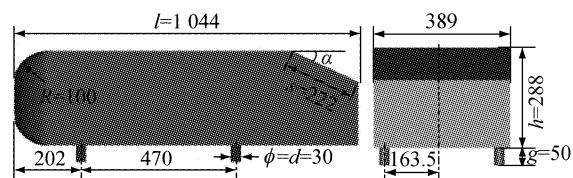


图 1 类车体构造及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Structure and size of Ahmed body(Unit:mm)

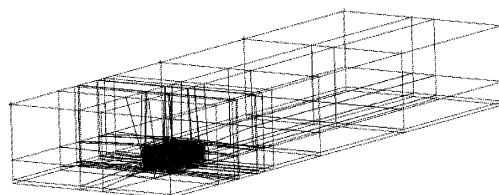


图 2 计算域分块结构

Fig. 2 Blocks structure of computational domain

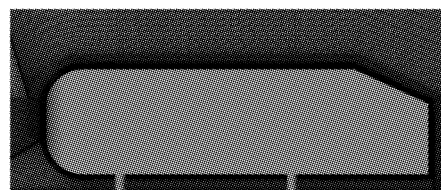


图 3 体网格结构

Fig. 3 Structure of volumetric mesh

1.2 数值模拟方法

流场求解基于 Fluent 仿真平台完成,湍流模型采用 LES 框架中的动态 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型。与传统 Smagorinsky 亚格子模型相区别,Smagorinsky-Lilly 亚格子模型计算涡黏系数 μ_t 的方程为

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (1)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (2)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$L_s = \min(kd, C_s V^{1/3}) \quad (4)$$

式中: L_s 为亚格子混合长度; \bar{S} 为应变率张量; k 为冯·卡门常数(von Kármán constant); d 为最近壁面距离; V 为当地网格体积; C_s 为 Smagorinsky 常数(Lilly 的取值为 0.17)。Smagorinsky-Lilly 模型对转捩及剪切流动的计算存在明显失真情况,因此采用基于已求解的流体运动尺度实时更新 C_s 值的思想

对 Smagorinsky-Lilly 模型进行改进,形成了动态 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型^[13-14],由于类车体绕流中含有转捩及剪切流动现象,故应采用动态 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型。

本文 $Ma < 0.3$, 所以不考虑空气压缩性,认为空气的温度、参考压强、黏性及密度不变,表 1 列出了计算条件下的主要物性参数. 边界条件见表 2, 来流 (V_0) 方向垂直于计算域进口。

表 1 物性参数

Tab.1 Physical parameters

温度/(°C)	压强/(Pa)	黏度/(Pa·s)	密度/(kg·m ⁻³)
20	101 325	$1.789 4 \times 10^{-6}$	1.225

表 2 边界条件

Tab.2 Boundary conditions

名称	类型
计算域进口	速度入口, $V_0 = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
计算域出口	压力出口, 0 Pa
车身表面及地面	无滑移固壁
计算域侧面及顶面	对称边界

采用 SIMPLEC(意为“协调一致的求解压力耦合方程组的半隐式方法”)压力速度耦合算法进行迭代计算,松弛因子为默认值. 基于可实现 $K-\epsilon$ 湍流模型得到流场的定常解进行 LES 模型的非定常计算,非定常时间步长为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$,单位时间步进行 30 次子迭代. 整个计算共历经 30 000 个时间步长,将最后 5 000 个时间步长计算结果用于数据分析。

1.3 数值方法初步验证

为验证数值方法的有效性,以来流速度为比例尺,在对称截面作流向速度型曲线,并与实验数据进行对比^[15],如图 4 所示, X 为流向尺度, Z 为垂向尺度. 由图可知:计算结果与实验值符合良好,且在尾迹区的对比一致性高于斜面区. $Re = 7.78 \times 10^5$ 时气动阻力系数 C_D 的计算结果为 0.317 9,实验值为 $0.312 0^{[4]}$,误差 1.9%。

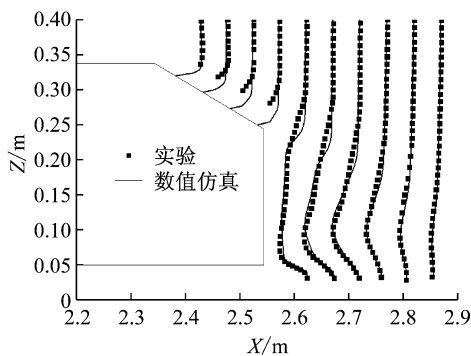


图 4 流向速度型曲线

Fig.4 Profile of longitudinal velocity

2 数值结果与分析

Ahmed 类车体尾迹区展向流动结构如图 5 所示. 主要涡结构由尾迹区上、下展向涡对(涡核中心 N_1 、 N_2)及斜面分离泡(涡核中心 N_3)构成. 尾迹区上、下展向涡对中、上侧展向涡的尺度较大,下侧展向涡的尺度较小. 上、下展向涡对形成鞍点 S_1 。

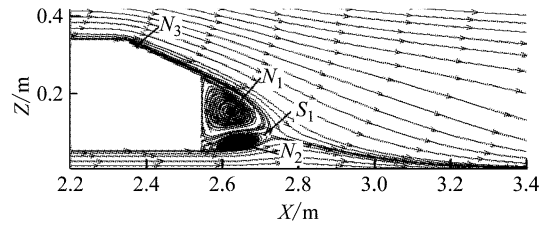


图 5 对称截面 $Y=0$ 时均流线

Fig.5 Time-averaged streamlines of the symmetric plane

使用 Q 准则显示类车体尾迹区空间涡系结构,如图 6 所示. 从图 6 可知, Ahmed 类车体尾迹分离结构主要可划分为 3 个部分,即背部斜面上的分离泡、从背部斜面侧边卷起的拖曳涡以及垂直面处回流区。

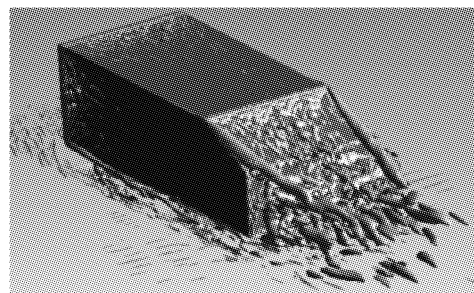


图 6 Q 准则等值面 ($Q = 3.13 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$)

Fig.6 ISO-surface of vortices in the wake using Q -criterion when $Q = 3.13 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$

2.1 背部斜面分离泡非定常特性

在背部斜面上方布置 $A_1 \sim A_4$ 测点如图 7 所示, X 方向坐标原点设置在计算域入口, Y 方向坐标原点设置在中间对称面, Z 方向坐标原点设置在地面. 点 $A_1 \sim A_4$ 的坐标分别为 $[2.373, 0, 0.339]$ 、 $[2.430, 0, 0.326]$ 、 $[2.487, 0, 0.315]$ 、 $[2.544, 0, 0.302]$, 单位 m。

图 8 为 $A_1 \sim A_4$ 测点处压力的功率谱分析结果. 在 $St_r = 0.49$ 时出现第 1 主峰, A_4 测点在该特征频率对应的峰值能量最高,表明随着流动往下游发展,峰值频率不变但对应的峰值能量增加,与

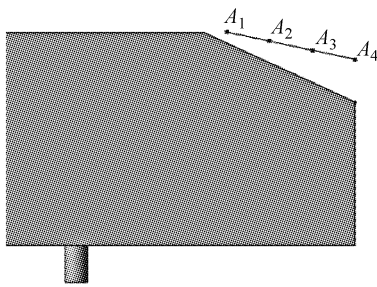


图 7 A₁~A₄ 测点分布

Fig. 7 Layout of sampling points from A₁~A₄

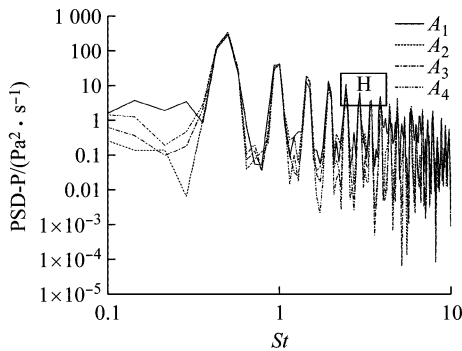


图 8 A₁~A₄ 测点压力功率谱

Fig. 8 PSD of the pressure at sampling points from A₁ to A₄

Thacker^[8]的研究结果一致;第 2 主峰处于高频段的一段频带中(以 H 标注),在该频带内 A₁ 测点峰值能量最高. 根据 Thacker^[8]的结果可以推断,第 1 主峰 $St_r = 0.49$ 对应背部斜面分离泡的拍击振动(flapping motion)频率,高频段的非定常特性对应的是由 KH 不稳定性引起的大尺度相干结构,测点 A₁ 处在剪切层起源附近,故该处第 2 主峰峰值频率对应 KH 不稳定性频率.

背部斜面分离泡拍击振动过程表现为分离泡持续放大(剪切层不断卷起并累积)与缩小(大尺度相干结构脱落流向下流)的交替过程. 而大尺度相干结构起源于剪切层的卷起,而剪切层卷起的直接原因为 KH 不稳定性. 根据不稳定性理论,如果瞬时扰动取消后,扰动随时间增长且向下游传播从而离开扰动的初始空间位置,在空间固定位置处,扰动将逐渐衰减,最终保持平静,那么流动是对流不稳定的;如果瞬时扰动取消后,扰动在初始空间位置处随时间增长,同时向上、下游传播,最终导致整个空间的扰动随时间增长,那么流动是绝对不稳定的.

如图 9 所示,在背部斜面壁面上布置 T₁~T₄ 测点,坐标分别为 [2.344, 0, 0.337]、[2.349, 0, 0.335]、[2.392, 0, 0.315]、[2.406, 0, 0.309],单位 m. T₁ 点、T₂ 点在分离线附近, T₃ 点、T₄ 点在附着

线附近. 测点压力互谱与相谱分析结果如图 10~图 12 所示,其中互相关函数见式(5). $P_{xy}(f)$ 为信号 X 与信号 Y 的互功率谱密度; $P_{xx}(f)$ 、 $P_{yy}(f)$ 分别为信号 X 与信号 Y 的自功率谱密度. 表 3 给出目前较为公认的相关程度划分标准.

$$Co_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \quad (5)$$

由图 10a 可知, T₁、T₂ 测点互谱曲线在分离泡拍击振动特征频率 $St_r = 0.49$ 附近的低频带内呈现中度相关性,表明低频运动强烈地影响了分离线附近区域的流动相关性. 而在该低频带对应的相谱曲线图 10 b 中,在 0° 相位角下相谱曲线几乎不随频率变化,表征了与分离泡拍击振动对应的低频运动是一种绝对不稳定性运动. 如图 11 所示,在分离泡拍

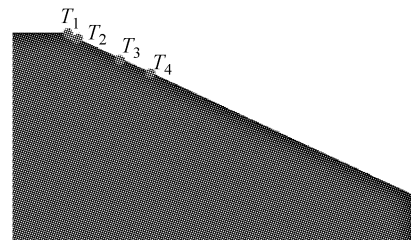
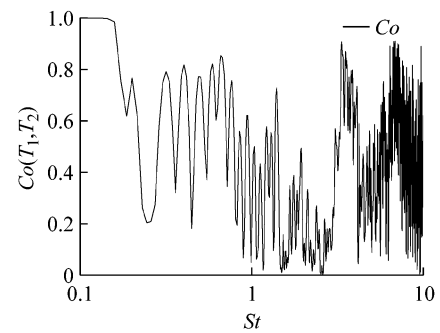
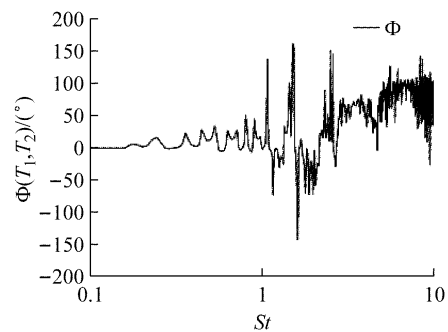


图 9 T₁~T₄ 测点分布

Fig. 9 Layout of sampling points from T₁ to T₄



a 互谱



b 相谱

图 10 T₁ 与 T₂ 测点压力互谱与相谱

Fig. 10 Coherence and phase functions from cross-spectra of the pressure between sampling points T₁ and T₂

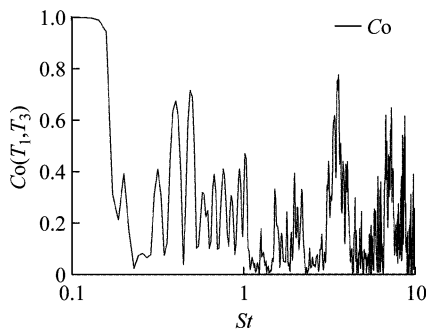
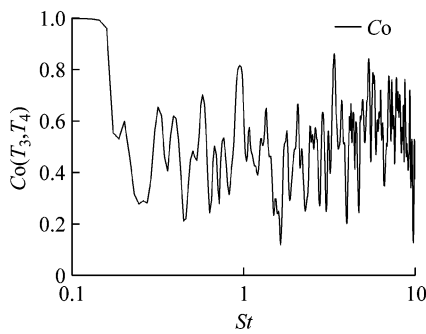
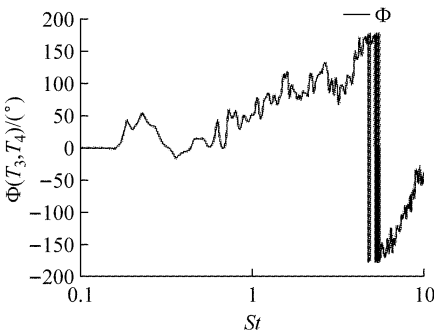


图 11 T1 与 T3 测点压力互谱

Fig.11 Coherence function from cross-spectra of the pressure between sampling points T1 and T3



a 互谱



b 相谱

图 12 T3 与 T4 测点压力互谱与相谱

Fig.12 Coherence and phase functions from cross-spectra of the pressure between sampling points T3 and T4

表 3 相关程度

Tab.3 Relationship correlation

$ C_{oxy}(f) = 1.00$	$0.95 \leq C_{oxy}(f) < 1.00$	$0.80 \leq C_{oxy}(f) < 0.95$
线性相关	显著相关	高度相关
$0.50 \leq C_{oxy}(f) < 0.80$	$0.30 \leq C_{oxy}(f) < 0.50$	$0 \leq C_{oxy}(f) < 0.30$
中度相关	低度相关	不相关

击振动特征频率 $St_r = 0.49$ 附近的低频带内, T1, T3 测点互谱曲线呈现中度相关性, 表明低频运动影响了整个背部斜面分离泡, 进一步证实了与分离泡拍击振动对应的低频运动是一种绝对不稳定性运动。

图 12 a 显示 T3、T4 测点的互谱曲线在表征 KH 不稳定性的高频带内呈现中度相关性, 图 12 b 所示相谱曲线在从低频至高频的范围内呈现准线性关系, 这证实了具有高频特性的 KH 不稳定性是一种对流不稳定性^[9]. 文献[9]得出对流速度 $V_c = 0.5V_0$ 的结论, 并给出了从相谱曲线推导 V_c 的表达式如下:

$$V_c = \frac{2\pi \cdot \Delta L \cdot H}{d\theta/dSt} \quad (6)$$

式中: ΔL 为两测点间距离; H 为车高; $d\theta/dSt$ 为相谱曲线中相位角 θ 对于频率 St 的斜率. 由图 12 b 中的 T3、T4 相谱曲线得到 $V_c \approx 0.56V_0$, 与文献[9]的结论基本符合, 进一步验证了数值计算的有效性。

2.2 “C 柱”拖曳涡对非定常特性

如图 13 所示, 在背部斜面两侧上方布置了关于 $Y=0$ 平面对称的 B1~B4、C1~C4 两列测点, 其坐标为 [2.373, 干0.194 5, 0.339]、[2.430, 干0.194 5, 0.326]、[2.487, 干0.194 5, 0.315]、[2.544, 干0.194 5, 0.302], 单位 m. 图 14 为 B、C 两列测点压力功率谱的分析结果, 可知: “C 柱”拖曳涡对(s)的特征频率为 $St_s = 0.49$, 随着流动往下游发展, 峰值频率对应的能量增强。

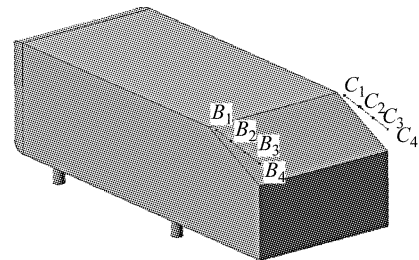
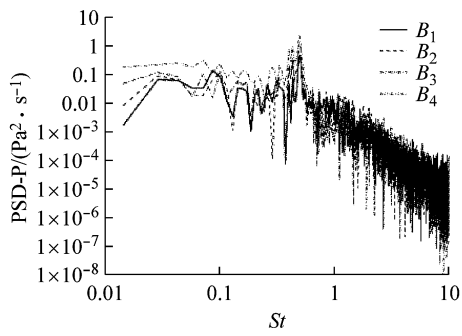


图 13 B1~B4 与 C1~C4 测点分布

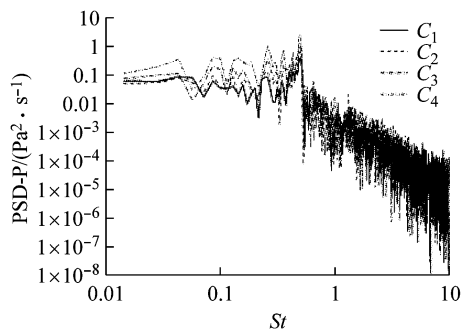
Fig.13 Layout of sampling points from B1 to B4 and from C1 to C4

图 15 为 A、C 两列对应测点压力互谱与相谱分析结果. 由图可知, A、C 测点压力脉动在特征频率 $St = 0.49$ 时具有高度或中度相关性, 且以同相位振动, 表明背部斜面处的分离泡与“C 柱”拖曳涡对具有很强的耦合作用: 流过背部分离线的流体远离壁面, 从而在背部斜面处产生低压区; 流过斜面侧边的流体在外部流场高压与斜面低压的压差作用下产生向内旋转的“C 柱”拖曳涡对, 在拖曳涡对的诱导作用下流体向斜面下洗。

图 16~图 19 为 B、C 两列对应测点压力与速度分量互谱与相谱分析结果. 可知: “C 柱”拖曳涡对的压力脉动在特征频率 $St_s = 0.49$ 时具有显著的高度相关性, 且以同相位振动; X、Y 方向上的运动相对纵向对称面呈高度对称性, 且在 Y 方向的运动特征

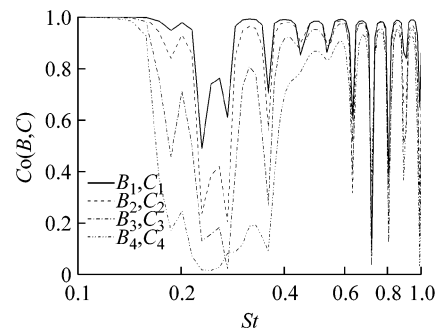


a B1~B4 测点

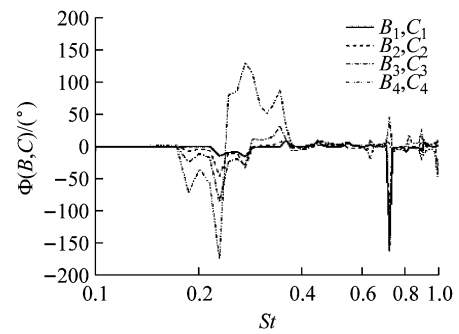


b C1~C4 测点

图 14 B1~B4 与 C1~C4 测点压力功率谱
Fig. 14 PSD of the pressure at sampling points from B1 to B4 and from C1 to C4

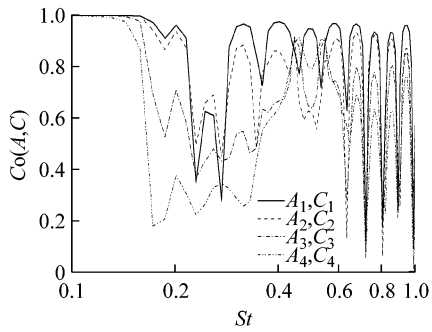


a 互谱

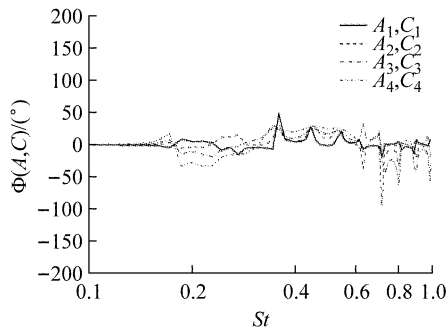


b 相谱

图 16 B 列与 C 列测点压力互谱与相谱
Fig. 16 Coherence and phase functions from cross-spectra of the pressure between sampling points B-series and C-series

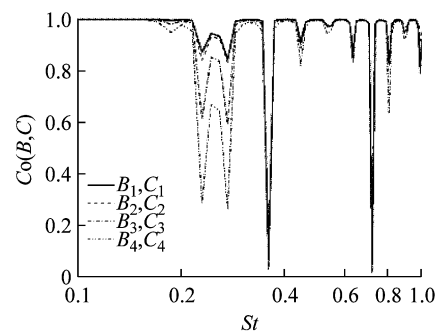


a 互谱

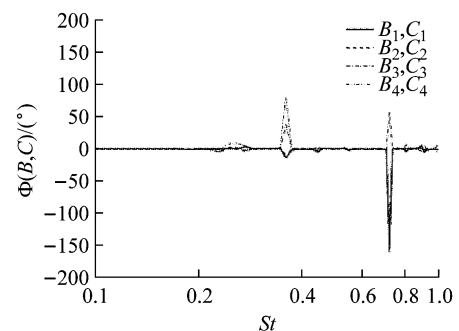


b 相谱

图 15 A 列与 C 列测点压力互谱与相谱
Fig. 15 Coherence and phase functions from cross-spectra of the pressure between sampling points A-series and C-series



a 互谱



b 相谱

图 17 B 列与 C 列测点 X 向速度互谱与相谱
Fig. 17 Coherence and phase functions from cross-spectra of the X-velocity between sampling points B-series and C-series

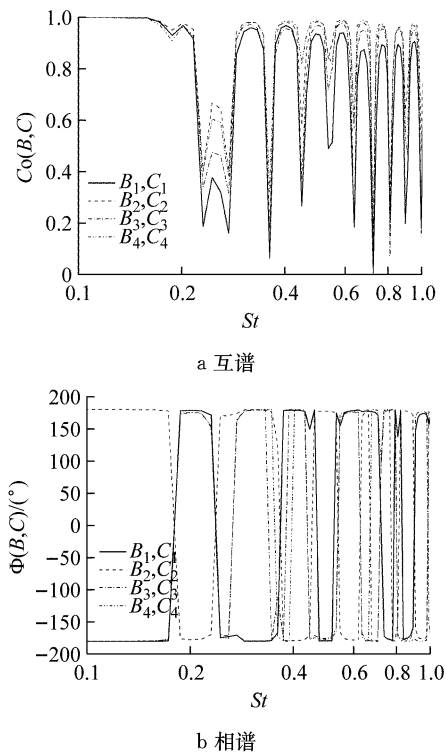


图 18 B 列与 C 列测点 Y 向速度互谱与相谱

Fig.18 Coherence and phase functions from cross-spectra of the Y-velocity between sampling points B-series and C-series

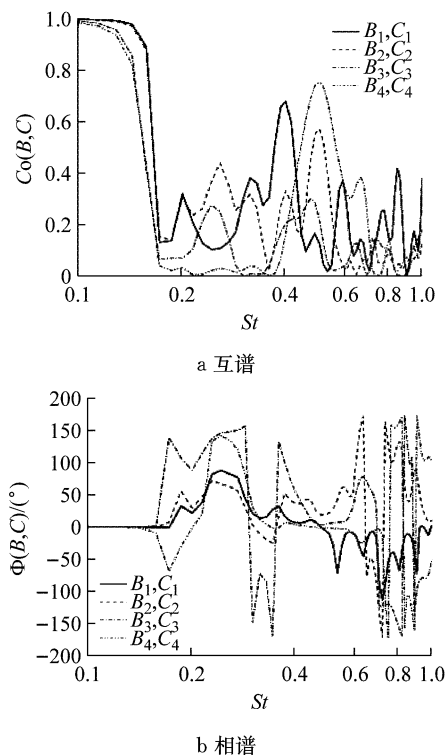


图 19 B 列与 C 列测点 Z 向速度互谱与相谱

Fig.19 Coherence and phasefunctions from cross-spectra of the Z-velocity between sampling points B-series and C-series

为同时向对称面靠近或远离的摆动;Z 方向速度呈低度相关或不相关特性,相谱在特征频率 $St_s=0.49$ 时存在既非 0° 又非 180° 的相位差,表明 Z 方向上的流动随机性强。

2.3 回流区流动非定常特性

垂直面后部回流区内布置的由 D 到 O 共 12 列测点如图 20 所示,每列均布 6 个测点,由下至上编号为 1~6.其中编号为 1 的测点 Z 坐标为 0.050 m,编号为 6 的测点 Z 坐标为 0.231 m;D~G、L~O 列测点 Y 坐标为 m,H~K 列测点 Y 坐标为 0 m;D、H、L 列测点 X 坐标为 2.611 m,E、I、M 列测点 X 坐标为 2.700 m,F、J、N 列测点 X 坐标为 2.813 m,G、K、O 列测点 X 坐标为 3.014 m.D6~G6 与 L6~O6 测点压力脉动功率谱表征了“C 柱”拖曳涡对发展至回流区的频谱特性,结果见图 21.在回流区中“C 柱”拖曳涡对的特征频率 $St_s=0.49$,与图 14 对比可知:由于与回流区中的流体相掺混,加强了质能交换,使得回流区中拖曳涡对的能量有显著提高;但随着向下游发展,高频能量衰减更快。

图 22 为 D6~G6 与 H6~K6 对应测点压力互谱与相谱的分析结果.由图可知,压力脉动在特征频率 $St_b=0.49$ 时呈中度相关,但相谱上存在既非 0° 又非 180° 的相位差.对比图 15 可知,拖曳涡与回流区中展向涡的相关度明显减弱,可见拖曳涡对与尾迹区展向涡之间虽相互干涉,但不存在耦合现象。

图 23~图 26 显示了 D6~G6 与 L6~O6 对应测点压力与速度分量互谱与相谱的分析结果.在回流区近壁面处(D6、L6),两侧拖曳涡的压力脉动呈中度相关,随着向下游发展,由于能量耗散作用,其相关程度逐渐减弱;在 M、E 位置受到回流区鞍点的影响,其相关程度最弱.相谱上在特征频率 $St_b=0.49$ 时存在既非 0° 又非 180° 的相位差,由此可知两侧拖曳涡的压力脉动并不对称.拖曳涡对在回流区中的速度信号呈低度相关或不相关特性,都以既非同相位又非反相位振动,表明两侧拖曳涡在回流区中的非定常特性较为独立,无对称性特征。

H~K 列测点压力功率谱分析结果如图 27 所

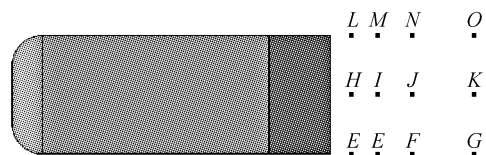


图 20 D~O 列测点分布

Fig.20 Layout of sampling points from D-series to O-series

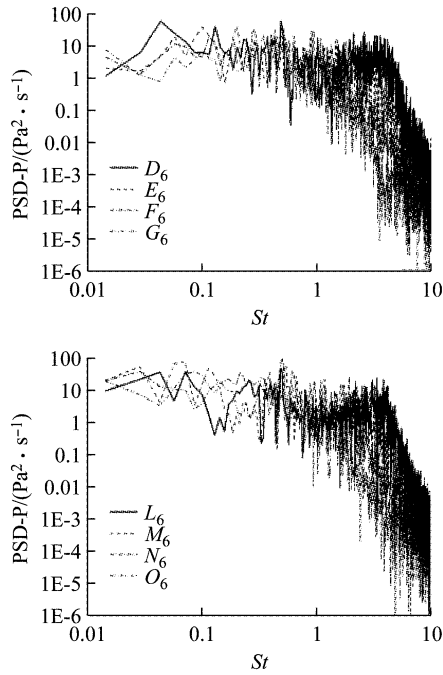


图 21 回流区内拖曳涡对测点压力功率谱

Fig.21 PSD of the pressure at sampling points within the C-pillar vortices shedding into the recirculation torus behind the vertical base

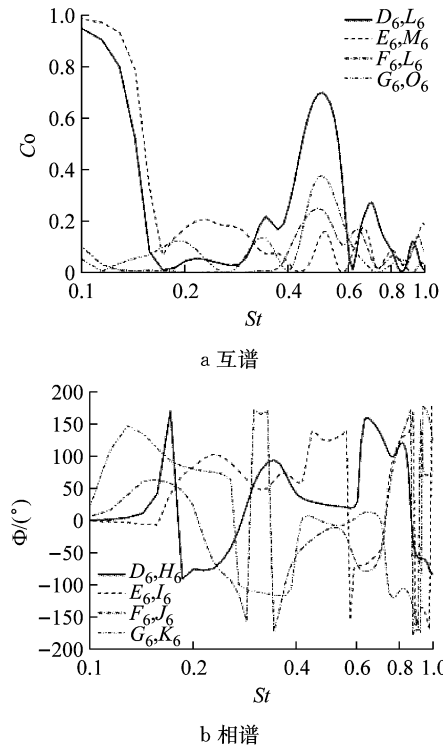


图 23 D6~G6 与 L6~O6 对应测点压力互谱与相谱

Fig.23 Coherence and phase functions from cross-spectra of the pressure between sampling points from D6 to G6 and their corresponding points from L6 to O6

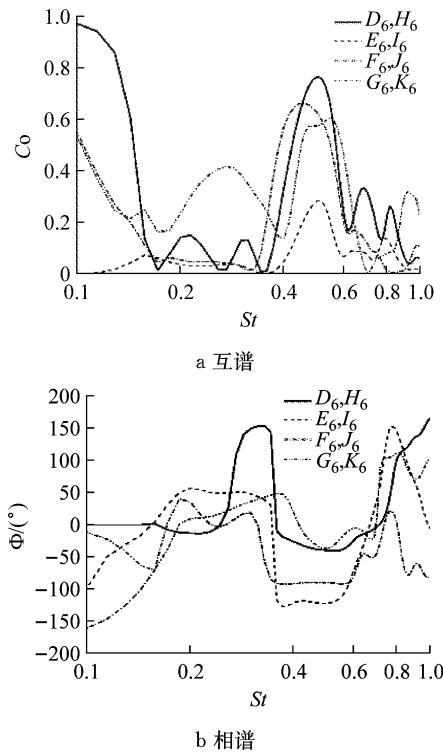


图 22 D6~G6 与 H6~K6 对应测点压力互谱与相谱

Fig.22 Coherence and phase functions from cross-spectra of the pressure between sampling points from D6 to G6 and their corresponding points from H6 to K6

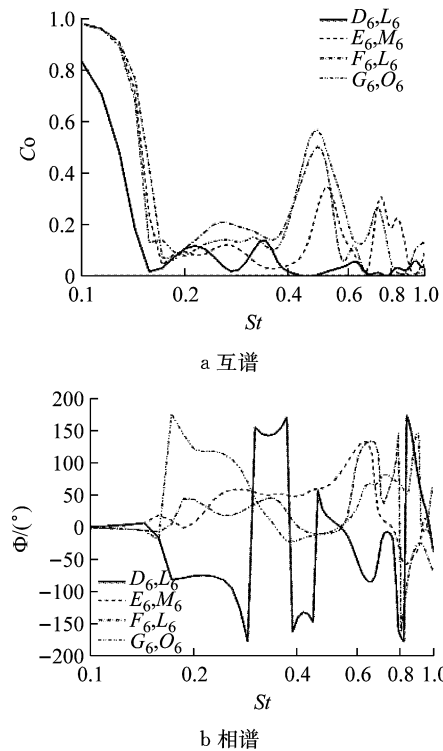


图 24 D6~G6 与 L6~O6 对应测点 X 向速度互谱与相谱
Fig.24 Coherence and phase functions from cross-spectra of the X-velocity between sampling points from D6 to G6 and their corresponding points from H6 to K6

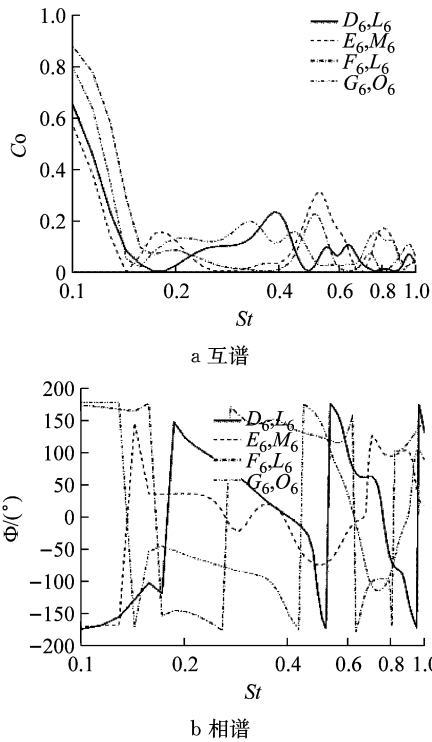


图 25 $D_6 \sim G_6$ 与 $L_6 \sim O_6$ 对应测点 Y 向速度互谱与相谱
Fig.25 Coherence and phase functions from cross-spectra of the Y-velocity between sampling points from D_6 to G_6 and their corresponding points from H_6 to K_6

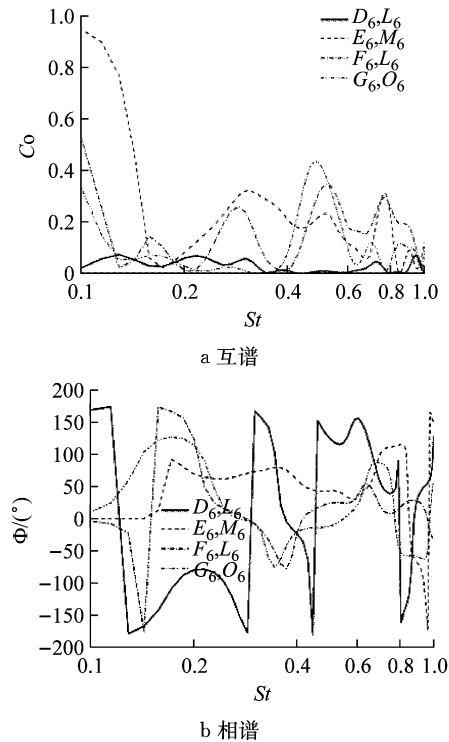


图 26 $D_6 \sim G_6$ 与 $L_6 \sim O_6$ 对应测点 Z 向速度互谱与相谱
Fig.26 Coherence and phase functions from cross-spectra of the Z-velocity between sampling points from D_6 to G_6 and their corresponding points from H_6 to K_6

示. 回流区上下剪切层卷起的展向涡特征频率 $St_b = 0.49$, 上、下剪切层卷起的展向涡向下游发展, 其能量在流向位置 1 处达到最大, 继续向下游发展能量

逐渐耗散. 根据上、下侧测点功率谱密度的曲线斜率可推断: 上侧展向涡的耗散较快, 下侧展向涡由于地面效应的存在, 其在流场中的持续时间更长.

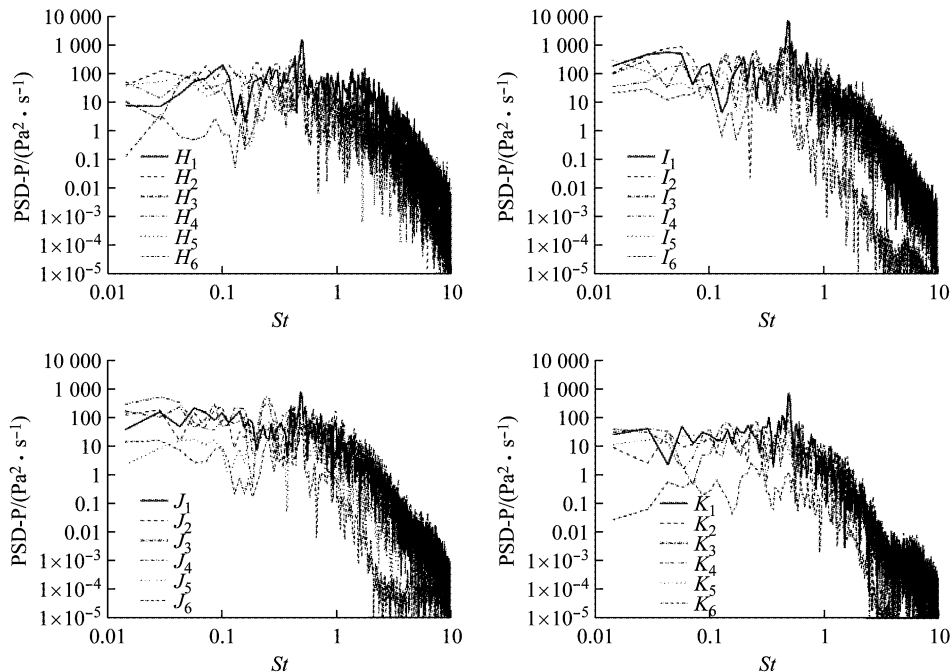


图 27 $H \sim K$ 列测点压力功率谱
Fig.27 PSD of the pressure at sampling points from H -series to K -series

图 28 显示了 $H \sim K$ 列上、下侧对应测点的压力互谱与相谱分析结果. $H \sim J$ 列互谱在特征频率 $St_b = 0.49$ 时具有高度或中度相关性,且在相谱上存在 180° 相位差,表明上、下侧展向涡呈现类似卡门涡街交替产生并脱落的过程.当到达流向位置 K 时,相关性有一定程度地减弱,且相谱上存在既非 0° 又非 180° 的相位差,证实了上侧展向涡比下侧展向涡耗散得更快的结论.

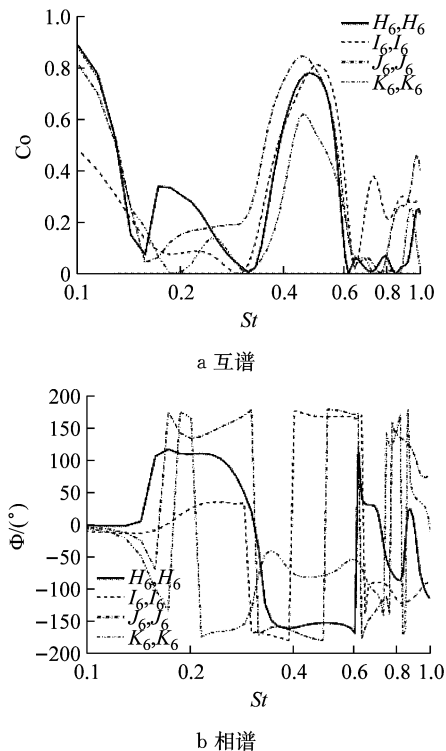


图 28 $H1 \sim K1$ 与 $H6 \sim K6$ 对应测点压力互谱与相谱

Fig.28 Coherence and phase functions from cross-spectra of the pressure between sampling points from $H1$ to $K1$ and their corresponding points from $H6$ to $K6$

3 讨论与结论

为了明确 25° 后倾角 Ahmed 类车体尾迹流动非定常特性所涉及的相干结构流动不稳定性及其相互作用机制,本文采用大涡模拟的方法,对高雷诺数下类车体模型背部斜面分离泡、“C 柱”拖曳涡对及垂直面处回流区 3 个核心区域进行流场数据采样,通过频谱分析得到以下结论:

(1) 背部斜面上,分离泡的拍击振动具有绝对不稳定性特征,由 KH 不稳定性诱发的大尺度相干结构具有对流不稳定性特征.

(2) 两侧“C 柱”拖曳涡对在背部斜面上与展向

涡相互耦合,且具有较好的对称性;拖曳涡对在垂直面处回流区内与该区展向涡相互混掺,使得能量增加,但无耦合作用且不具有对称性.

(3) 垂直面处回流区内上、下侧剪切层卷起的展向涡以类似卡门涡街形式交替产生并脱落,上侧展向涡耗散较快,下侧展向涡由于地面效应的存在,其在流场中的持续时间更长.

(4) 高雷诺数时,整个尾迹区流动的特征频率趋于一致,且与 Zhang 等^[11]给出的不同区域主频特性与雷诺数关系的拟合曲线相符,此特征与钝体绕流的自适应现象相统一.

参考文献:

- [1] BRUNN A, WASSEN E, SPERBER D, *et al.* Active drag control for a generic car model[C]//Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Berlin: Springer, 2007: 247-259.
- [2] KRENTEL D, MUMINOVIC R, BRUNN A, *et al.* Application of active flow control on generic 3D car models[C]// Active Flow Control II. Berlin: Springer, 2010, 108: 223-239.
- [3] PASTOOR M, HENNING L, NOACK BR, *et al.* Feedback shear layer control for bluff body drag reduction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 608:161.
- [4] JOSEPH P, AMANDOLÈSE X, AIDER J L. Drag reduction on the 25° slant angle Ahmed reference body using pulsed jets[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(5): 1169.
- [5] KRAJNOVIC S. Large eddy simulation exploration of passive flow control around an Ahmed body[J]. Journal of Fluids Engineering, 2014, 136(16): 121103.
- [6] BEAUDOIN J F, AIDER J L. Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps[J]. Experiments in Fluids, 2008, 44 (4): 491.
- [7] MINGUEZ M, PASQUETTI R, SERRE E. High-order large-eddy simulation of flow over the “Ahmed body” car model [J]. Physics of Fluids, 2008,20 (9) :123.
- [8] THACKER A, AUBRUN S, LEROY A, *et al.* Unsteady analyses of the flow separation on the rear window of a simplified ground vehicle model [C]//AIAA Applied Aerodynamics Conference. Chicago: AIAA, 2010:2010-4569.
- [9] THACKER A, AUBRUN S, LEROY A, *et al.* Experimental characterization of flow unsteadiness in the centerline plane of an Ahmed body rear slant[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54 (3): 1.
- [10] HEFT A, INDINGER T, ADAMS N. Investigation of unsteady flow structures in the wake of a realistic generic car model [C]//AIAA Applied Aerodynamics Conference. Honolulu, AIAA, 2011:2011-3669.
- [11] ZHANG BF, ZHOU Y, TO S. Unsteady flow structures around a high-drag Ahmed body[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 777: 291.
- [12] BEAUDOIN JF, AIDER JL. Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps[J]. Experiments in Fluids, 2008, 44 (4): 491.
- [13] GERMANO M, PIOMELLI U, MOIN P, *et al.* A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model [J]. Physics of Fluids, 1998, 3(3):1760.

- [14] DK LILLY. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method[J]. *Physics of Fluids A Fluid Dynamics*, 1998, 4(4):633.
- [15] LIENHART H, STOOT S, BECKER S. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (Ahmed model) [C]// *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*. Stuttgart: Springer, 2002, 77:323-330.

(上接第 103 页)

参考文献:

- [1] 衣宝廉, 侯明. 车用燃料电池耐久性的解决策略[J]. *汽车安全与节能学报*, 2011, 2(2):91.
YI Baolian, HOU Ming. Solutions for the durability of fuel cells in vehicle applications[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2011, 2(2):91.
- [2] 王文伟, 程夕明, 尹义林, 等. 串联式混合动力电动客车能量管理系统的前向仿真[J]. *汽车工程*, 2013, 35(2):121.
WANG Wenwei, CHENG Ximing, YIN Yilin, *et al.* Forward simulation on the energy management system for series hybrid electric bus [J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(2):121.
- [3] AMIRI M, ESFAHANIAN M, ESFAHANIAN V, *et al.* Minimization of power losses in hybrid electric vehicles in view of the prolonging of battery life[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 19(2): 372.
- [4] KARTHIK M, VIJAYACHITRA S. An integrated exploration of thermal and water management dynamics on the performance of a stand-alone 5-kW Ballard fuel-cell system for its scale-up design [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A—Journal of Power and Energy*, 2014, 228(7): 836.
- [5] JIA J, WANG Y, LI Q, *et al.* Modeling and dynamic characteristic simulation of a proton exchange membrane fuel cell [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(1): 283.
- [6] 赵治国, 张赛. 燃料电池轿车能量源混合度仿真优化[J]. *汽车工程*, 2014, 36(2):168.
ZHAO Zhiguo, ZHANG Sai. Simulation optimization on the hybrid degree of energy sources for fuel cell car [J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36(2):168.
- [7] CHEN H, PEI P, SONG M. Lifetime prediction and the economic lifetime of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2015, 142:154.
- [8] PEI P, CHEN H. Main factors affecting the lifetime of proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications: a review [J]. *Applied Energy*, 2014, 125:60.
- [9] 何平, 王鸿绪. 模糊控制器的设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
HE Ping, WANG Hongxu. *Fuzzy controller design and application*[M]. Beijing: Science Press, 1997.