

定常喷/吸流动主动控制方法减阻研究

王冰心^{1,2}, 杨志刚^{1,2}, 朱 晖^{1,2}, 李彦龙^{1,2}

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对 Ahmed 类车体, 在车身斜面选定位置处设置控制槽, 采用证明为有效的大涡模拟数值方法, 研究喷/吸流动主动控制方法的气动减阻机理及效果. 基于流场数据分析发现喷射控制致使车体斜面上流动大分离发生, 拖曳涡对得以消除, 但尾迹区尺度增大, 气动阻力上升; 抽吸控制方法抑制和消除展向涡结构的产生及发展, 但拖曳涡对未受显著影响, 气动阻力下降.

关键词: Ahmed 类车体; 分离流动; 流动主动控制; 大涡模拟

中图分类号: O 355; U 461.1

文献标志码: A

Drag Reduction by Active Flow Control with Steady Blowing/Suction Methods

WANG Bingxin^{1,2}, YANG Zhigang^{1,2}, ZHU Hui^{1,2}, LI Yanlong^{1,2}

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ahmed body with flow control slot at special location of slanted surface being taken as the object, the mechanism and effect of steady blowing/suction methods for active flow control concept were studied by the large eddy simulation, an effective way proved to be accurate. Based on an analysis of flow field data, the blowing control method resulted in fully separation on the slanted surface and enlarged recirculation zone around body with higher aerodynamic drag, although trailing vortex pair was eliminated. The suction control method eliminated and delayed the production and development of spanwise vortices structure with lower aerodynamic drag, however trailing vortex pair remained unchanged.

Key words: Ahmed body; separation flow; active flow control; large eddy simulation

汽车燃油限值及排放标准的日益严格促使汽车减阻技术成为研究热点, 其中气动减阻成为汽车减阻技术研究的核心课题之一^[1-2]. 除传统的汽车车身造型及细节优化方法外, 流动控制技术亦成为实现气动减阻的重要手段^[3-4].

流动控制技术有被动控制(无需消耗能量)及主动控制(消耗能量)之分. 被动控制的实现方式为加装车体附件, 如导流板、涡发生器等, 该方法常以牺牲造型风格完整性为代价获得减阻效果. 因此, 流动主动控制方法得以发展^[5-6].

汽车气动阻力以压差阻力为主, 因此 Ahmed 类车体常作为汽车空气动力学研究的基本形体^[7], 被引入到与流动主动控制相关的研究中^[8-9].

目前, 针对类车体绕流主动控制研究多关注于各种实现方式的最终减阻效果, 对机理分析不足, 且雷诺数普遍偏低 ($Re = 2 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$). 本文以 Ahmed 类车体为对象, 采用大涡模拟 (LES) 数值仿真手段, 在较高雷诺数 ($Re = 7.78 \times 10^5$) 下, 针对开槽式流动主动控制方法, 研究定常喷/吸法的减阻效果、效率及机理, 并得出与文献^[10]不同的结论.

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, 后倾角 α 为 25° 与文献^[10]保持一致. 对有控制方案, 控制槽(长 389 mm、宽 4 mm)处于车顶与背部斜面(下文简称: 斜面)交界处, 具体如图 2 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%.

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台(16DZ2290400)

第一作者: 王冰心(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为流体力学. E-mail: vincenzo198701@gmail.com

通讯作者: 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

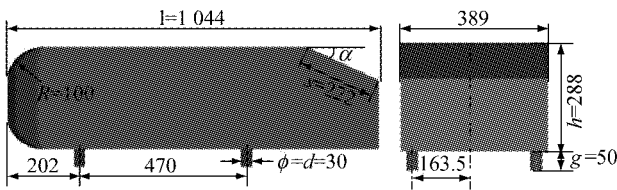


图 1 类车体构造及尺寸(单位:mm)

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

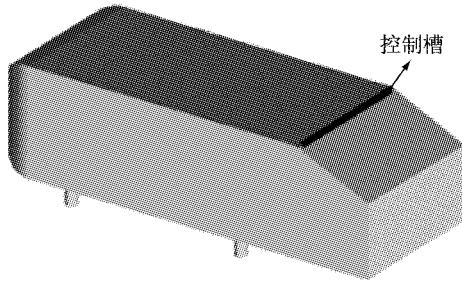


图 2 控制槽位置

Fig.2 Location of control slot

为降低数值粘性,在计算域内采用空间切块映射法构造六面体网格,如图 3 所示. 车身表面网格尺寸 4 mm, 针对有控制方案,控制槽面网格 1 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 层流动边界层网格,边界层网格以 1.15 的比例与外侧体网格过渡;在确保 $Y^+ \le 3$ 的前提下,体网格总数为 2 200 万单元,图 4 显示了中截面体网格结构.

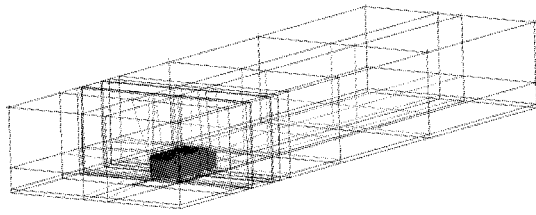


图 3 计算域分块结构

Fig.3 Blocks structure of computational domain

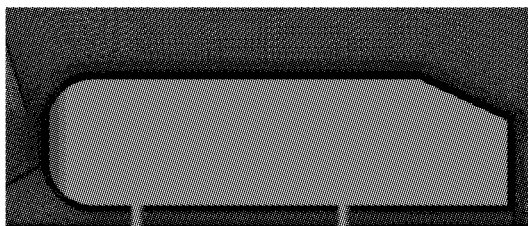


图 4 体网格结构

Fig.4 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,湍流模型为动态 Smagorinsky-Lilly 亚格子湍流模型. 与传统

亚格子模型相区别,动态 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型计算涡粘系数 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: ρ 为流体密度; L_s 为亚格子混合长度; \bar{S}_{ij} 为应变率张量; k 为冯·卡门常数; 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 值的思想对该模型进行改进,形成了动态 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型^[11-12],由于类车体绕流中含有明确的转捩及剪切流动现象,因此应采用动态 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型.

$M_a < 0.3$ 为不可压缩流,因此空气的温度、参考压强、粘性及密度不变,表 1 列出了计算条件下的主要物性参数.

表 1 物性参数

Tab.1 Physical parameters

温度/°C	压强/Pa	粘度/Pa·s	密度/kg·m ⁻³
20	101 325	1.789 4×10 ⁻⁵	1.225

边界条件见表 2,来流(V_0)方向垂直于计算域进口;对有控制的方案, β 为控制流(V_c)与来流间夹角,取 45°(与文献[10]保持一致),采用定常喷/吸控制方案,见图 5.

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	无滑移壁面
控制槽	速度入口, $ V_c = 0.6 V_0 $
计算域侧面及顶面	对称边界

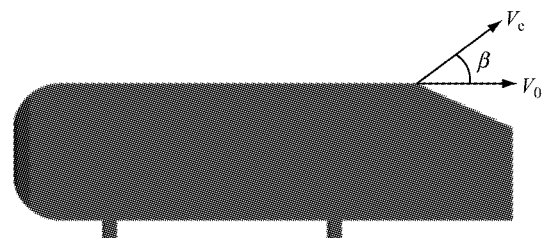


图 5 来流及控制流方向

Fig.5 Direction of V_0 and V_c .

采用 simplec(协调一致的求解压力耦合方程组

的半隐式方法)算法进行迭代计算,松弛因子为默认值;时间步长为 5×10^{-4} s,每个时间步内进行 30 次子迭代,整个计算共历经 6 000 个时间步长,并将最后 2 000 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

对于无控制方案,为验证本文数值方法有效性,在对称截面作流向速度型曲线,并与实验数据进行对比^[3],如图 6 所示, X 为流向尺度; Z 为垂向尺度。计算结果与实验值符合良好,且在尾迹区的对比一

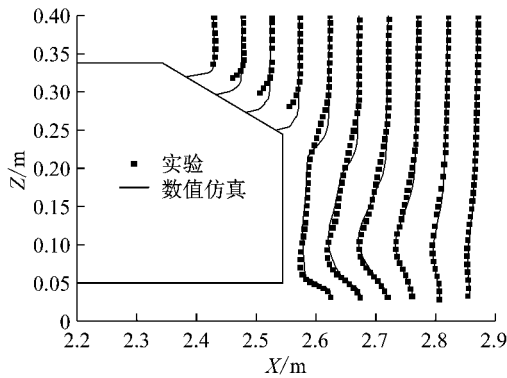


图 6 流向速度型曲线

Fig.6 Profile of longitudinal velocity

致性高于斜面区。在 $Re=7.78 \times 10^5$ 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^[13],误差 1.9%。

2 数值结果分析与讨论

后倾角为 25° 的 Ahmed 类车体斜面上存在明显的分离泡结构,在顶部与斜面交线处设置控制槽的目的为限制或消除斜面上分离泡结构,从而获得减阻效果。图 7 显示了有/无控制时车体后部静压系数分布。

由图 7a 及图 7b 对比可知:喷射控制消除了分离泡结构,提高了斜面处静压分布均匀度;“C 柱”附近低压区完全消失;致使下游斜面及尾部垂直面静压水平降低。由图 7a 及图 7c 对比可知:抽吸控制限制了分离泡的发展,提高了下游斜面静压水平;对“C 柱”附近低压区无显著影响。因此可推断:喷射控制致使分离泡破裂进而形成大分离结构;抽吸控制对分离泡抑制作用显著,而对气流绕过“C 柱”所形成的拖曳涡对无显著影响。

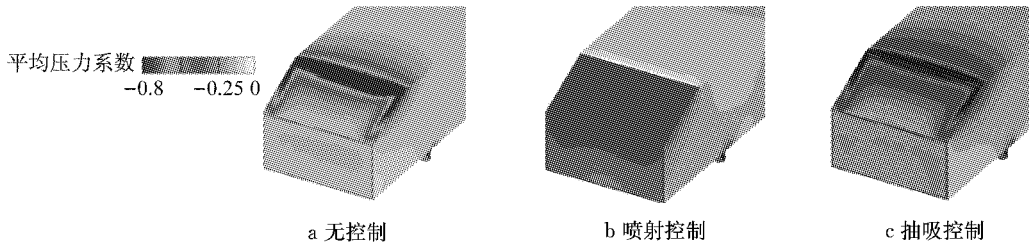


图 7 车体后部压力分布

Fig.7 Pressure distribution on rear body

图 8 显示了斜面中截面流向速度 V_{x_3} 的速度型曲线, l 为斜面长度,图中坐标系设定规则为: X_3 正

向沿斜面向后, Y_3 正向取斜面外法线方向,原点处于顶部与斜面交线上。

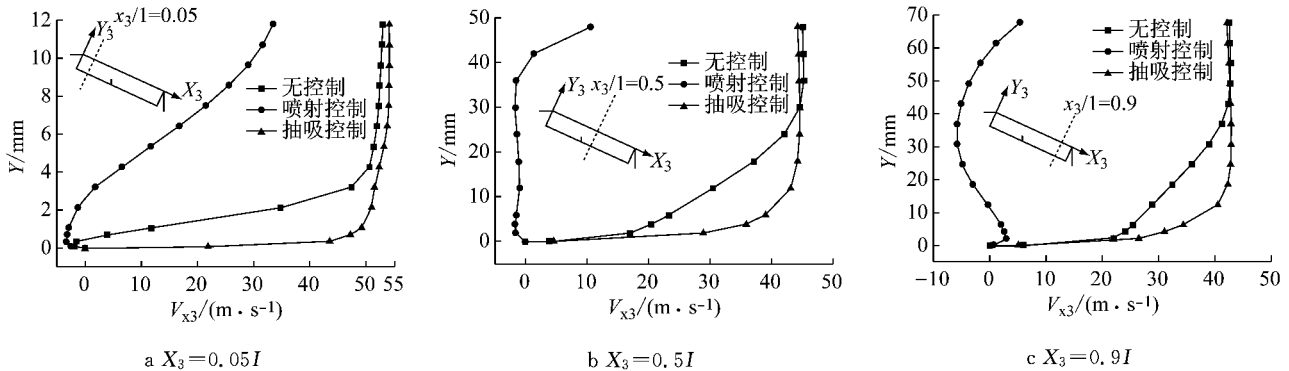


图 8 斜面速度型曲线

Fig.8 Velocity profiles on slant surface

由图 8a 可知:逆压梯度致使流动在顶部交线处产生局部分离,形成分离泡,所以在无控制时,临近壁面处 V_{x3} 为负;施加喷射控制时 V_{x3} 显著减小,表明喷射控制导致流动在顶部与斜面交线处产生相较于无控制时更大的分离结构;施加抽吸控制时 V_{x3} 增大且恒为正,速度型曲线更“凸”,表明边界层流动在该处抵抗逆压梯度能力强,流体紧贴斜面运动,实现了抑制分离的目的.由图 8b 及图 8c 可知:喷射控制致使 V_{x3} 显著减小,故推断斜面整体处于尾迹回流区之中,流动在顶部交线处产生完全分离,且在斜面上再附着的可能性极小;抽吸控制使流体始终紧贴斜面运动,控制效果延伸至斜面末端,结合图 7c 表明分离泡被有效抑制或消除.

图 9a 为无控制时中截面流线图.由图可知:无控制时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.如图 9b 所示,喷射控制时流体在斜面上发生了大分离致使分离泡消失,尾迹区由涡对 N_1 及 N_2 构成,且产生由 N_1 诱导形成的二次涡 N_4 ,进而使与图 8 相关的推论得以证实.如图 9c 所示,抽吸控制时,分离泡 N_3 完全消失,流体紧贴斜面运动直至尾部垂直面发生分离形成涡 N_1 及涡 N_2 .

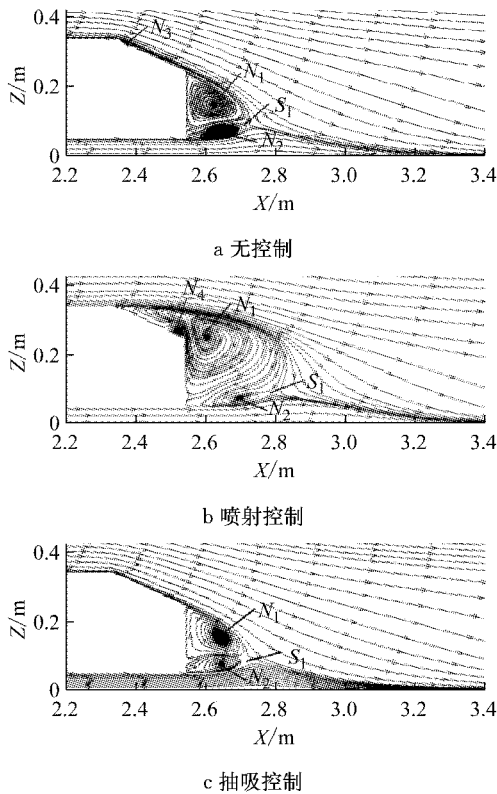


图 9 中截面流场结构

Fig. 9 Flow structure of symmetrical section

涡核中心 N 及鞍点 S_1 的坐标见表 3. 喷射控制

时 S_1 的位置远离车体,尾迹回流区尺度显著增加;涡 N_1 更贴近车身,而涡 N_2 则远离车身,由于涡 N_1 的尺度远大于涡 N_2 ,故涡 N_1 的中心低压区对壁面静压影响占主导地位,从而导致尾部静压水平降低.相对于无控制方案,抽吸控制时 S_1 的位置稍贴近车身,尾迹回流区尺度略有减小;涡 N_1 远离车体,而涡 N_2 的位置则大致不变,故尾部静压水平略有回升.

表 3 涡核中心点 N_1 、 N_2 及鞍点 S_1 坐标(单位:m)

Tab.3 Coordinates of N_1 , N_2 and S_1 (Unit:m)

控制方案	S_1 坐标		N_1 坐标		N_2 坐标	
	X	Z	X	Z	X	Z
无	2.722	0.089	2.625	0.149	2.645	0.070
喷射	2.786	0.082	2.606	0.252	2.698	0.073
抽吸	2.713	0.094	2.643	0.152	2.645	0.075

图 10 为在选定位置($X=2.494$ m)处 YZ 平面流线图(Y 为横向尺度, Z 为垂向尺度).由图可知喷射控制使拖曳涡对完全消失,而抽吸控制对拖曳涡对尺度几乎无影响.对比有/无控制时拖曳涡对核心(涡核中心 N_4)坐标(见表4)发现:抽吸控制时涡核

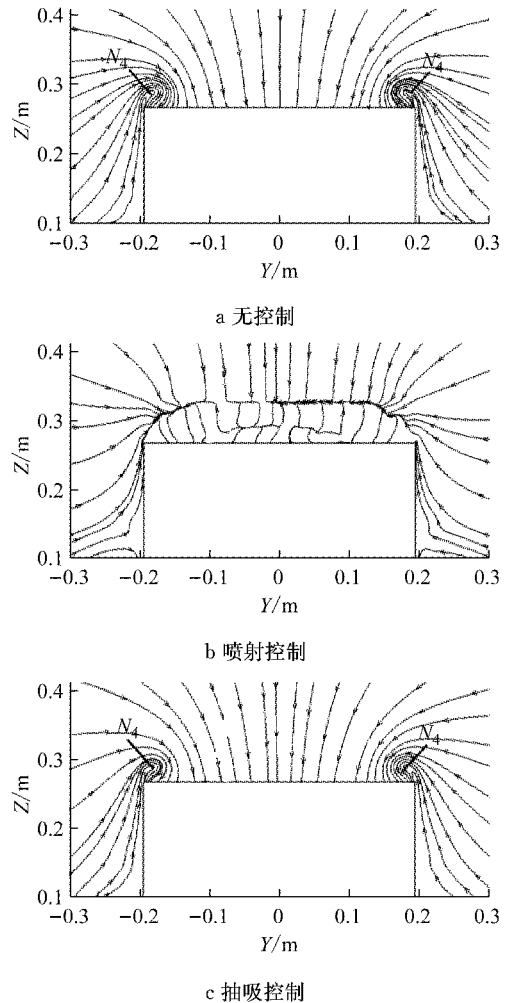


图 10 YZ 平面流线

Fig.10 Streamline of YZ plane

中心无显著变化,“C”柱附近车身静压近乎不变,明确了图 7c 所示斜面静压分布特征的成因。

表 4 拖曳涡核心 N_4 坐标(单位:m)

Tab.4 Coordinates of trailing vortex core N_4 (Unit: m)

状态	坐标	Y	Z
无控制		± 0.180	0.289
抽吸		± 0.178	0.289

图 11 显示了中截面瞬时涡量分布. 喷射控制时更多携带能量的涡被输运至下游并耗散; 抽吸控制

时在分离被消除及削弱后,输送至流体中的涡量显著减少且涡脱落所需时间更长. 由图 11c 可知:在斜面及尾部垂直面上卷起并向下游输运的涡量同时减少,因此有助于减少流体能量耗散,达到减阻目的。

中截面速度脉动均方根分布见图 12. 考察尾迹回流区内的速度脉动均方根值,抽吸控制方案高于无控制方案,而喷射控制时情况正相反,说明:抽吸控制时更多外部能量注入尾迹区,弥补了该区域部分能量耗散。

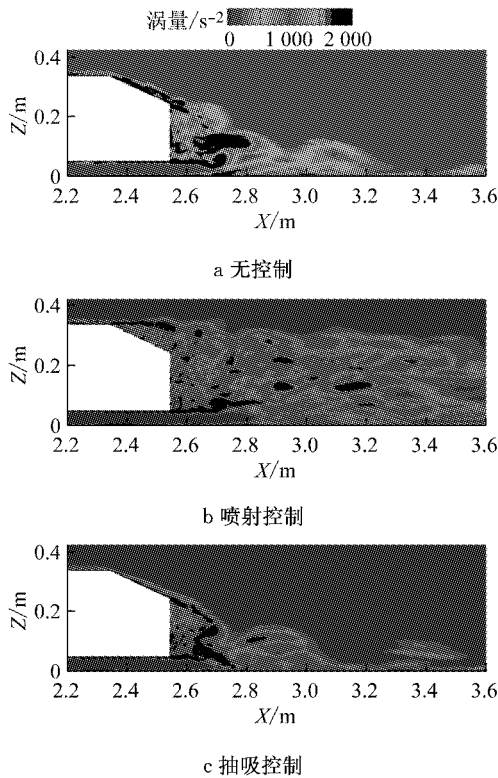


图 11 中截面涡量分布

Fig.11 Vorticity contours of symmetrical section

Q 判据 ($Q = 3.13 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$) 等值面分布见图 13. 喷射控制时纵向涡完全消失,尾迹区大分离流动区域显著扩张; 抽吸控制时,在斜面分离涡消失的同

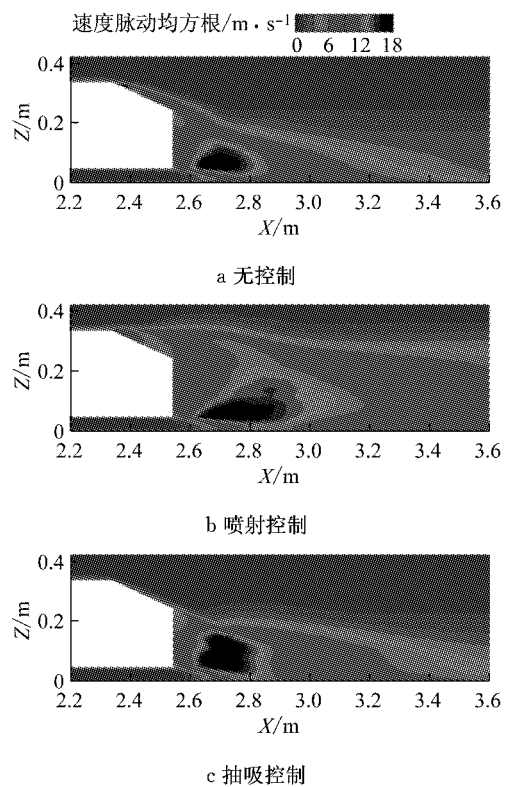


图 12 中截面速度脉动均方根

Fig.12 Fluctuating velocity RMS of $y=0$ plane

时,尾迹区中涡量减少从而降低了该区域流动能量耗散,但拖曳涡对无明显变化。

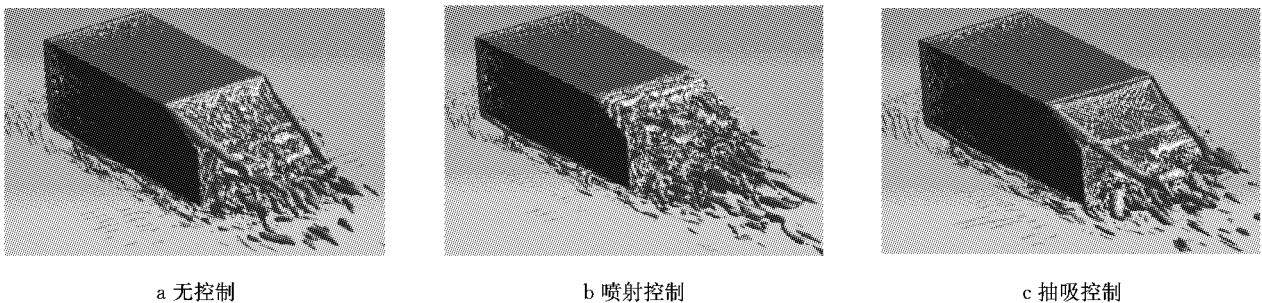


图 13 Q 判据等值面

Fig.13 ISO surface of Q criterion

3 气动减阻效果分析

流动主动控制方法必须消耗能量以获得气动减阻效果,因此定义控制效率 η 为有控制时气动阻力所耗功率增益与控制槽所耗功率之差和无控制时气动阻力所耗功率的比值

$$\eta = \frac{\Delta P_{net}}{P_0} = \frac{(P_0 - P) - P_s}{P_0} = \frac{\frac{\Delta C_D}{C_{D0}} - \frac{A_s V_s^3 \sin(\alpha + \beta)}{C_{D0} A V_0^3}}{1} \quad (5)$$

$$P_0 = F_{drag0} V_0 = \frac{1}{2} C_{D0} \rho A V_0^3 \quad (6)$$

$$P = F_{drag} V_0 = \frac{1}{2} C_D \rho A V_0^3 \quad (7)$$

$$P_s = \frac{1}{2} \dot{m} V_s^2 = \frac{1}{2} \rho A_s V_s^3 \sin(\alpha + \beta) \quad (8)$$

式中: P_0 为无控制时气动阻力所耗功率; P 为有控制时气动阻力所耗功率; P_s 为控制槽所耗功率; A 为车体投影面积; A_s 为控制槽面积; C_{D0} 为无控制时气动阻力系数; C_D 为有控制时气动阻力系数; ρ 为空气密度; \dot{m} 为单位时间控制流的质量流量。

表 5 给出了有/无控制时气动阻力系数及控制效率值. 喷射控制使气动阻力系数增大, 而抽吸控制有效降低了气动阻力系数且效率为 10.6%, 因此抽吸控制方法对于本研究所涉及的类车体气动减阻可行.

表 5 气动阻力系数及控制效率
Tab.5 C_D and control efficiency

	C_D	ΔC_D	η
无控制	0.3179	—	—
喷射控制	0.332	+4.4%	-5.3%
抽吸控制	0.2816	-11.4%	+10.6%

基于本文所涉及的雷诺数条件, 为了寻求最佳的控制策略, 对控制速度进行了参数化研究. 将控制速度设为 $|V_c| = \gamma |V_0|$, 其中比例系数 γ 选取了 [0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0] 5 个水平. 气动阻力系数 (C_D)、控制效率 (η) 与速度比 (γ) 之间的关系见图 14.

由图可知, 气动阻力系数随着喷射速度的增大递增, 随着抽吸速度的增大递减. 在使用喷射控制方法时, 控制效率始终为负, 表明喷射控制不利于减阻; 而在使用抽吸控制方法时, 控制效率始终为正, 表明抽吸控制有利于减阻, 且当 $\gamma=0.8$ 时, 控制效率最高. 继续增大抽吸速度会使得气动阻力进一步降低, 但由于消耗的控制功率随之增大, 故控制效率

有所降低.

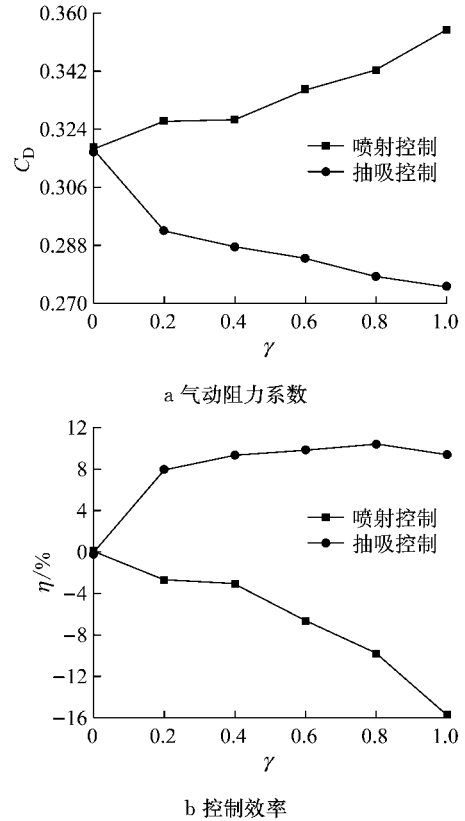


图 14 阻力系数及控制效率的变化规律
Fig.14 Variation of C_D and η

4 讨论与结论

本文与文献[10]的研究对象及控制方式类似, 但雷诺数及控制流速皆高于文献设定值. 尽管二者所得流场拓扑结构一致, 但文献得出喷射控制“减小”阻力的结论且机理分析不足; 在相同控制位置处采用喷/吸交替控制策略时, 文献得出喷射过程“增加”阻力的结论, 明显存在矛盾但未说明原因.

本文采用 LES 方法, 着重流动机理分析并进行减阻效果分析, 得出以下结论:

(1) 对类车体绕流施加定常喷/吸流动主动控制可显著改变外部绕流场拓扑结构、运动特征及能量输运/耗散规律;

(2) 在控制参数下, 喷射控制致使流动分离特性增强, 尾迹区尺度增大、能量耗散增加且控制效率为负, 因此喷射控制不利于气动减阻;

(3) 抽吸控制促使斜面分离泡消除, 涡脱落现象得以延缓, 尾迹分离区尺度缩小, 涡量输运/耗散减少, 且控制效率较高, 因此抽吸控制有利于气动减阻.

参考文献:

- [1] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- FU Limin. Aerodynamics of road vehicles[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicles[M]. 4th ed. Detroit: SAE World Congress & Exhibition, 2004.
- [3] LIENHART H, STOOT'S C, 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, 2002:323-330.
- [4] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicle [J]. Annual Review of Fluid Mechanics 1998, 25(1):485.
- [5] GUILMINEAU E, DUVIGNEAU R. Drag reduction by flow control for the Ahmed body[C]//Proceedings of 4th Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations. Santorini: [s. n.], 2005:247-250.
- [6] ROUMEAS M, GILLIERON P, KOURTA A. Analysis and control of the near-wake flow around a simplified car geometry [C]//Proceedings of 4th Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations. Santorini: [s. n.], 2005: 251-254.
- [7] KOURTA A, VITALE E. Analysis and control of cavity flow [J]. Physics of Fluids, 2008, 20(7): 196.
- [8] BRUNN A, NITSCHKE W. Active control of turbulent separated flows over slanted surfaces[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 27(5):748.
- [9] MATHIEU R, PATRICK G, AZEDDINE K. Drag reduction by flow separation control on a car after body[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010, 60(11):1222.
- [10] SINISA K, BRANISLAV B. LES of the Flow around Ahmed Body with Active Flow Control [C] // Turbulence and Interactions 2009. La Martinique: Springer, 2010: 247-254.
- [11] GERMANO M, PIOMELLI U, MOIN P, *et al.* A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model [J]. Physics of Fluids, 1991, 3(7):1760.
- [12] LILLY D K. A proposed modification of the germane subgrid-scale closure model[J]. Physics of Fluids, 1992, 4(4):633.
- [13] PIERRIC J, XAVIER A, JEAN-LUC A. Drag reduction on the 25° slant angle Ahmed reference body using pulsed jets[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(5):1169.
- reduction on a simple car-Like shape with rear upper body taper [J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 2013(1): 52.
- [12] SAE. Aerodynamic testing of road vehicles open throat wind tunnel adjustment; J2071 MAR90[S]. [S.1.]: SAE, 1994.
- [13] 朱晖, 杨志刚. 小尺寸缩比模型车风洞试验及数值验证[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 1562.
- ZHU Hui, YANG Zhigang. Wind tunnel test of small size scaled vehicle models and numerical validation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(10): 1562.
- [14] 李启良, 陈力, 杨志刚, 等. 不同扩散角下汽车风洞试验段轴向静压系数[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(8):1227.
- LI Qiliang, CHEN Li, YANG Zhigang, *et al.* Axial static pressure coefficients of automotive wind tunnel test section at different diffuser angles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(8):1227.

(上接第 1382 页)

- [7] YU H, ZHU H, YANG Z G. Numerical analysis on effect of back/front windshield and hood angle on automotive aerodynamic drag [C] // IET International Conference on Information Science and Control Engineering. Shenzhen: IET, 2012: 229-233.
- [8] MAIR W A. Drag-reducing techniques for axi-symmetric bluff bodies [M]. [S.1.]: Springer US, 1978.
- [9] 傅立敏, 刘锡国. 典型汽车尾流结构的研究[J]. 汽车工程, 1996(6): 343.
- FU Limin, LIU Xiguo. A study on the wake structure of typical automobile shapes [J]. Automotive Engineering, 1996 (6): 343.
- [10] EMMELMANN H J, BERNEBURG H, SCHULZE J. The aerodynamic development of the opel calibra [C] // SAE. Detroit: SAE Paper, 1990: 900317.
- [11] HOWELL J, PASSMORE M A, TUPLIN S. Aerodynamic drag