

合成射流对类车体流动控制的影响

崔文诗, 杨志刚, 朱 晖

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 基于大涡模拟对有无合成射流控制的三维类车体流场进行仿真, 与试验结果对比, 验证仿真方法有效. 平均场结果表明, 当合成射流出口位于顶盖和斜背交界处时, 可减弱流动分离, 缩小回流区, 改变背压, 降低阻力. 频谱分析显示, 当激励动量系数超过 1.0×10^{-4} 时, 斜背表面压力、回流区速度和涡量以及阻力系数功率谱密度对应的峰值频率皆为激励频率. 瞬态流场分析结果指出, 合成射流与外流之间的交互作用导致了阻力系数曲线中出现周期性改变的波谷和波峰.

关键词: 大涡模拟; 类车体; 合成射流; 气动减阻
中图分类号: U270.1; O357.5+2 **文献标志码:** A

Influences of a Synthetic Jet Actuator on the Flow Around Ahmed Body

CUI Wenshi, YANG Zhigang, ZHU Hui

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Large-eddy simulation (LES) was used to study the unsteady flow around Ahmed body in both natural and controlled flow. The simulation results were validated against the experimental data. The mean-time results indicated that flow separation could be suppressed when a synthetic jet actuator was located at the junction of the roof and the slant, which could result in a smaller separation zone and aerodynamic drag reduction. Spectrum analyses revealed that with the momentum coefficient of excitation is more than 1.0×10^{-4} , the peak frequency of power spectral density surface pressure on the slant, velocity and vortices in the recirculation zone, as well as drag coefficient is related to driving frequency. The transient flow results suggest that the interaction between the jet and the flow lead to periodical changes of the peak and trough of drag coefficient.

Key words: large-eddy simulation; Ahmed body; synthetic jet; aerodynamic drag reduction

汽车气动阻力主要为压差阻力, 利用主动流动控制技术可控制汽车尾部背压, 降低压差阻力, 提高汽车燃油经济性, 实现节能减排. 2007 年以来, 国内外学者将等离子^[1]、脉冲射流^[2]、定常吹气^[3]、合成射流^[4]等技术引入汽车主动流动控制研究.

目前, 合成射流出口速度瞬态峰值已达到 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[5], 因其具有结构微型化、无需气源、响应频带宽等优点, 被广泛应用于绕汽车的非定常外流场(外流)的主动控制研究中. 如文献[4]利用声激励合成射流技术对二维类车体简化尾迹进行瞬态控制; 文献[6-8]分别应用合成射流激励器(射流器)对三维类车体的平均场进行流动控制; 文献[9-12]基于数值仿真研究了合成射流对二维类车体剪切层和尾迹的控制.

高效的主动控制研究关键在于对气动力随时间变化的曲线及瞬态流场结构进行分析, 在此基础上, 在适当的时间和位置对流场进行反馈控制. 目前, 对合成射流控制类车体瞬态气动力系数及流场的认识十分有限. 由于试验和数值仿真条件有限^[6-8, 12], 以往研究多基于平均气动力系数和平均场流动现象, 虽指出合成射流对减阻有效, 但尚未分析阻力系数出现周期性变化的原因.

本文在验证数值仿真有效的基础上, 对类车体进行了有无合成射流控制的计算, 首先比较平均场结果, 然后结合频谱和瞬态场结果, 分析合成射流与外流之间的瞬态交互作用, 指出气动力系数出现周期性变化的原因.

1 数值仿真

1.1 参考试验

以斜背与车顶夹角为 25° 的缩比为 0.7 倍的 Ahmed body^[13]模型为研究对象, 缩比模型长、宽、高

收稿日期: 2015-08-07

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203)

第一作者: 崔文诗(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: 1210765@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

分别为 $L=0.761\text{ m}$, $W=0.272\text{ m}$ 和 $H=0.212\text{ m}$, 后垂直背与斜背夹角为 65° .

如图 1a 所示,合成射流激励器由腔体、出口喉部和激励源组成.对激励源发出周期性驱动信号,腔

体内的气流在激励源和外界气流的共同作用下进行有规律的压缩和扩张,实现向外吹气和向内抽吸作用^[14].

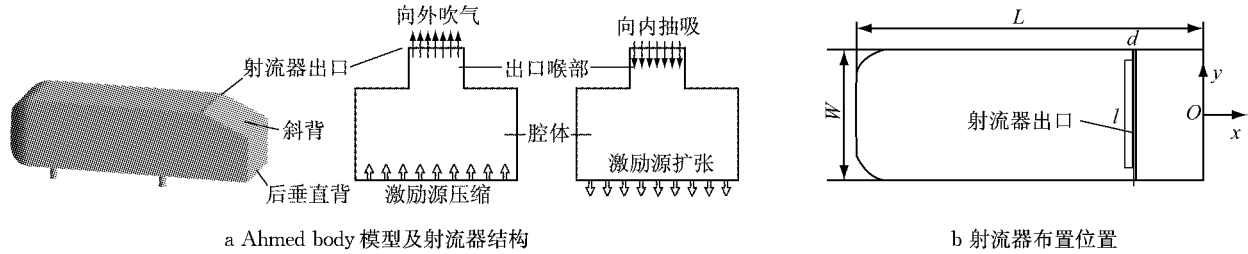


图 1 Ahmed body 模型和射流器布置
Fig.1 Ahmed body model and arrangement of the jet

为验证数值仿真方法的有效性,依托上海地面交通工具风洞中心 1/15 整车缩比模型风洞,首先应用热线风速仪,对无控制下的 Ahmed body 模型斜背附近和尾迹内 147 个点的速度进行测量,热线风速仪探头型号为 55P01. 由于模型风洞最大风速为 $48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 喷口面积为 0.123 m^2 , 为满足阻塞比,本次试验雷诺数 $Re_L=1.1\times 10^6$, 与文献[7-8]中的雷诺数 $Re_L=1.2\times 10^6$ 有差距,但已处于同一自模区内,将每个点监控的时域信号转换为频域信号,得到的斯特劳哈尔数 $St_0=A^{1/2}\cdot f_0\cdot V_0^{-1}$ 应相等或相近,其中, A 为 Ahmed body 模型的迎风面积; f_0 为速度的功率谱密度,即涡脱落频率; V_0 为当地气流速度. 本文还参考了文献[7-8]基于合成射流技术对 Ahmed body 模型进行流动控制的阻力、压力、油流和速度场的试验结果. 如图 1 所示,射流器安装在类车体顶部和斜背交界处. 射流器出口为长槽型,其宽度和长度分别为 $d=0.0005\text{ m}$ 和 $l=0.234\text{ m}$, 出口位于车顶,到斜背距离为 $e=0.0005\text{ m}$.

1.2 数值仿真方法

依据车体尺寸,如图 2 所示,确定计算域长、宽、高分别为 8 倍车长、7 倍车宽、4 倍车高;流场空间采用六面体非结构化网格划分,保证近壁面第 1 层网格法向高度对应的量纲一化值 y^+ 小于 1. 如图 3a,对车体斜背和近尾迹区进行加密,表面网格边长为 $0.1\sim 2\text{ mm}$,在无控制下体网格总数为 2 445 万.

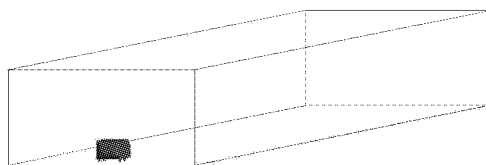
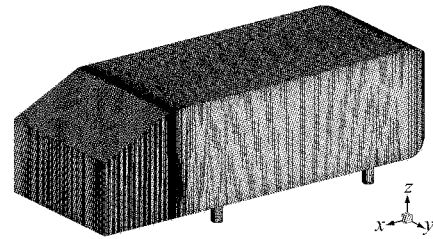
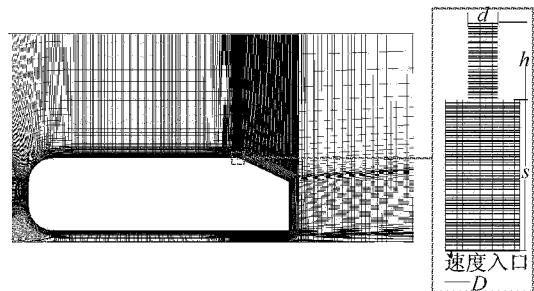


图 2 计算域
Fig.2 Computational domain

已知合成射流出口尺寸、激励频率和动量系数等条件,根据文献[14]总结的合成射流仿真控制模型,得到腔体简化几何参数. 如图 3b, $h/d=2.6$, $s/D=2$, $D/d=2.45$, 其中, D 为腔体宽度, h 为出口喉部高度, s 为腔体高度,对合成射流的腔体和出口喉部网格加密,有控制下的网格总数达 2 498 万.



a 车体表面网格



b 在面 $y=0$ 上的射流器内部和车体周围网格

图 3 加密网格
Fig.3 Refined mesh

激励动量系数 C_μ 表征了合成射流强度^[7-8].

$$C_\mu = \rho_{\text{jet}}(\bar{V})^2 ld / (\rho U_0^2 A_{Oxy}) \quad (1)$$

式中: ρ_{jet} 和 ρ 分别为合成射流和外流密度; A_{Oxy} 为车辆模型在 Oxy 面内的投影面积; U_0 为来流速度; 定义空间和时间平均速度^[14]为

$$\bar{V} = (\pi/Tdl) \int_0^T \int_0^d \int_0^l v(x,y,t) dx dy dt \quad (2)$$

式中: $v(x, y, t)$ 为出口瞬态速度; x 和 y 分别为射流器出口在流向上的宽度和在展向上的长度; T 为周期, $T=f_a^{-1}$, f_a 为激励频率,本文中 $f_a=520\text{ Hz}$; t 为时间;动量系数包括: $C_{\mu 1}=4\times 10^{-5}$, $C_{\mu 2}=1\times 10^{-4}$, $C_{\mu 3}=3.9\times 10^{-4}$.

使用商业软件 Fluent16 进行计算,采用 WALE 亚格子模型,迭代方法为 SIMPLEC 算法,计算时间步长为 0.0001 s .地面和车身采用无滑移边界条件.来流速度 U_0 为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应雷诺数 $Re_L=1.2\times 10^6$.将激励作为速度入口条件,引入计算.以正弦波为激励的输入信号,定义射流器等效速度 V_a [4] 为

$$V_a = (\bar{V}d/D)\sin(2\pi f_a t) \quad (3)$$

2 仿真结果验证及分析

2.1 气动力比较

在激励动量系数为 $C_{\mu 2}$ 的试验中,平均阻力系数 \bar{C}_d 减小了 6%,而数值仿真结果减小了 6.2%.数值仿真与试验得到的平均压力系数 \bar{C}_p 结果类似,如图 4 所示,有控制下的后垂直背($0 < z < 0.171\text{ m}$)上的 \bar{C}_p 值变化不大,而斜背($0.171 < z < 0.235\text{ m}$)上的 \bar{C}_p 值增大; $z=0.235\text{ m}$ 处的流动受合成射流作用,速度增大, \bar{C}_p 值减小,且此处接近分离位置,仿真预测困难,故仿真预测值与试验结果相差较大.

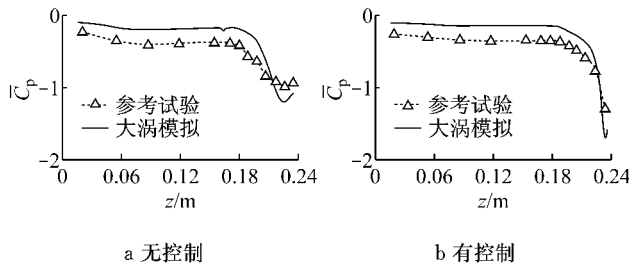


图 4 面 $y=0$ 上的斜背和后垂直背平均压力系数

Fig.4 Mean pressure coefficient on the slant and rear vertical case in plane $y=0$

文献[13]通过试验总结:阻力主要源于斜背压力,后垂直背贡献较小.如图 5 所示,有无控制下的压力差异也主要体现在斜背上,因此下文主要从斜背压力变化分析阻力系数.

2.2 平均场比较

有无控制下的数值仿真与油流试验结果变化趋势一致.在斜背上,受流向涡和 C 柱拖曳涡共同作用,无控制下附着线呈“人”字型(如图 6 所示).由于

试验安装射流器的需要,在 C 柱没有布置射流器出口,故合成射流未显著影响 C 柱拖曳涡的形成,而流向上布置的合成射流使得流体动量得到补充,增强了边界层抵抗逆压梯度的能力,减弱了流动分离,附着线更靠近并平行于顶部分离线,回流区减小,斜背压力升高,阻力系数降低.

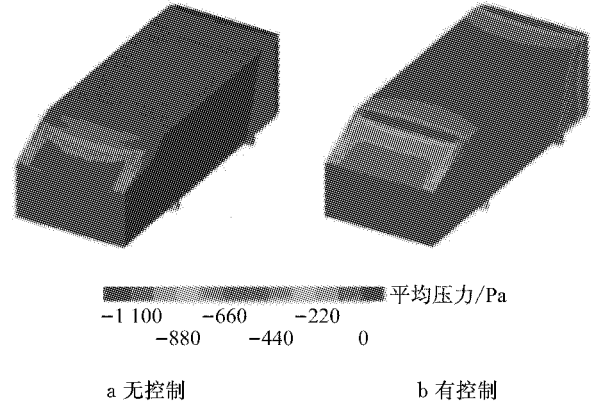


图 5 车身表面的平均压力

Fig.5 Mean pressure distribution on the body

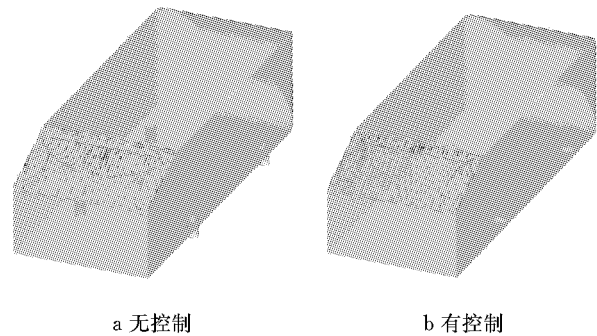


图 6 斜背表面油流

Fig.6 Oil-streamline on the slant

2.3 频谱比较

有无控制下的数值仿真分别监控了流场中 147 个点的瞬态速度与涡量、车体表面 10 个监控点的瞬态压力,监控点位置如图 7 所示.图中, n_i 为监控点编号, $i=1,2,3,\dots,12$.

无控制下,风洞试验结果表明尾迹区各监控点频率值皆为自然涡脱落频率 f_0 ,数值仿真与试验得到的 St_0 皆在 $0.44\sim 0.48$ 范围内.如图 8 所示,PSD 为功率谱密度.施加激励动量系数 $C_{\mu 2}$ 时,对于点 n_1 的涡脱落频率、点 n_{10} 和 n_{11} 的压力功率谱密度,仿真预测值与试验结果 [7-8] 一致,皆为 520 Hz .

合成射流对距离射流器出口较近的外流诱导作用较强,如图 8a,8b,8c,8d,8e 和 8f,点 n_1, n_2 和 n_3 的速度和涡量皆按 f_a 改变.斜背回流区内速度和涡量的改变导致了斜背表面上点 n_{10}, n_{11} 和 n_{12} 的压力

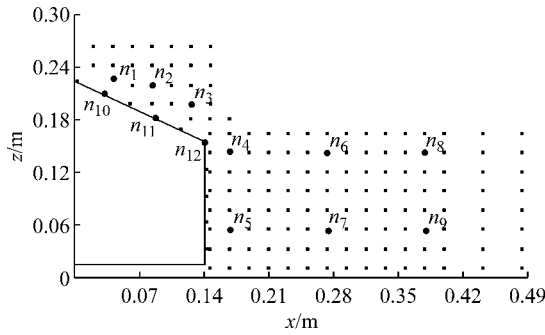


图 7 压力和速度监控点

Fig. 7 Pressure and velocity sensor positions

随 f_a 变化,如图 8m,8n 和 8o 所示,这些点的频谱峰值皆对应了 f_a ,故瞬态压力系数 $C_p(t)$ 可修正为

$$C_p(t)_{n_i} = \bar{C}_{p,n_i} + \xi_{n_i} C_{\mu} \sin(2\pi f_a t) \quad (4)$$

式中: \bar{C}_{p,n_i} 为平均压力系数; ξ_{n_i} 为修正系数,与选取的监控时间有关. 由于合成射流输出动量有限,如图 8g,8h,8i 和 8j 所示,近尾迹区内点 n_4, n_5, n_6 和 n_7 对应的激励频率峰值(激励峰值)已经消失,自然涡脱落频率对应的峰值(自然峰值)皆低于无控制下自然峰值高度,说明合成射流对近尾迹区仍有影响. 在下游的 n_8 和 n_9 点,如图 8k 和 8l 所示,有无控制下的自然峰值高度相当,说明外流尾迹远场不再受合成射流的影响.

由于绕过类车体流动的非定常特点,其无控制下的阻力系数频谱含有自然峰值(如图 8p,8q 和 8r 所示). 施加 $C_{\mu 3}$ 的激励,如图 8p 和图 9 所示,瞬态阻力系数 $C_d(t)$ 周期性震荡,阻力系数的频谱中仅含有激励峰值. 如图 9 所示,随着 C_{μ} 的减小, C_d 增大. 当 $C_{\mu} = C_{\mu 2}$ 时,如图 8q 所示,频谱中已出现较弱的自然峰值,激励峰值减弱但仍占主导,且激励峰值高于无控制下的自然峰值;当 $C_{\mu} = C_{\mu 1}$ 时,如图 8r 所示,其激励峰值已小于自然峰值,继续减小 C_{μ} ,自然峰值突出,激励峰值更加微弱. 故当 $C_{\mu} \geq C_{\mu 2}$ 时,瞬态阻力系数 $C_d(t)$ 可修正为

$$C_d(t)_{n_i} = \bar{C}_d + \zeta_{n_i} C_{\mu} \sin(2\pi f_a t) \quad (5)$$

式中: ζ_{n_i} 为修正系数,与选取的监控时间范围有关,波峰和波谷分别对应吹气和抽吸相位,类似现象也出现在二维 D 形体流动控制研究^[4,9-11]中; \bar{C}_d 与射流器安装位置、射流倾角、激励频率和动量系数等因素有关. 当 C_{μ} 减小,合成射流对气流输入动量减少,故对流动分离的控制减弱,斜背回流区增大,导致 \bar{C}_d 和 $C_d(t)$ 皆增大. 同时,阻力系数的激励峰值高度不断降低至消失,而自然峰值高度不断升高,接近无控

制下的高度.

3 瞬态流动分析

外流的发展历程包含多个合成射流工作周期,提取任意一个周期,如 0.300 1 s 到 0.302 0 s,分解为 4 个工作相位:吹开始、吹最大、吸开始、吸最大,分别对应 t_1, t_2, t_3, t_4 时刻.

3.1 有无控制比较

无控制下,外流沿着车顶向下游运动,如图 10a 和 11a 所示,瞬态速度始终较小,在斜背产生较大回流区,涡量较高. 合成射流的吹气和抽吸作用都为边界层注入了动量,如图 10b、图 10c 和图 11 所示,速度增大,提高了抵抗逆压梯度的能力,减弱流动分离,斜背回流区减小,涡量减小,能量耗散得以补偿,背压升高,阻力系数减小.

3.2 抽吸和吹气相位流动和减阻机理

任意时刻流动均受前一时刻流动影响,在描述 t_1 时刻流动前,首先描述前一周期最后时刻 t_0 的流动,此刻激励源抽吸强度达到最小,如图 12 所示,局部流速差导致了腔体和出口喉部内有多对漩涡,外流向下游运动.

在 t_1 时刻,合成射流抽吸作用结束,开始进入吹气工作阶段. 在较低强度的吹气作用下,前一时刻腔体内的漩涡减弱,少量气流注入外流. 在 t_2 时刻,激励源的吹气强度达到最大,腔体内漩涡被打碎,出口喉部内漩涡减弱,大量气流从出口流出. 在 t_3 时刻,合成射流开始抽吸作用,腔体的两侧气流受抽吸作用,中心气流受之前吹气作用影响,不同流速的气流间产生剪切作用,形成 1 对漩涡;在出口喉部内,中心气流仍受吹气影响,少量外流流入出口喉部,气流间的速度差导致了较强漩涡. 在 t_4 时刻,激励源抽吸强度达到最大,使得更多的外流流入出口喉部,前一刻射流器内形成的多对漩涡减弱或被打碎;外流在遇到出口喉部和腔体后,因分离形成漩涡,解释了前一周期最后时刻射流器内漩涡的来源. 随着时间的推移,合成射流不断影响外流.

在合成射流一个工作周期内, t_4 时刻的抽吸相位将低速气流吸入射流器内,如图 10,出口速度达最大,边界层抵抗逆压梯度的能力最强,对流动分离的抑制能力最强,如图 13 和 14,斜背回流区范围和涡量最小,背压最高,阻力系数达最小值 0.310 1.

在 t_2 时刻,吹气带来的高速气流与外流相互掺混,如图 10 所示,与无控制下相比,出口速度增大,

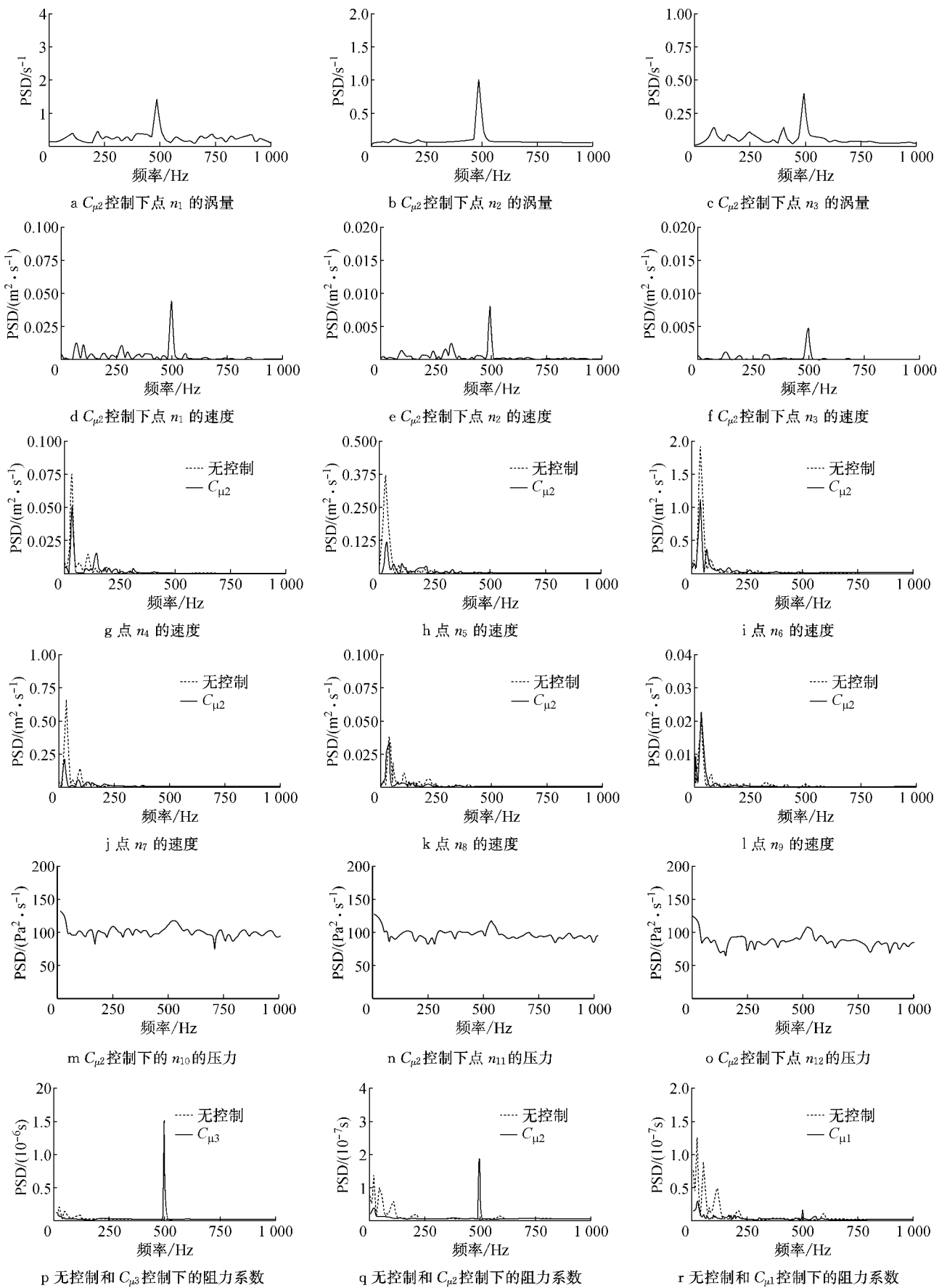


图 8 速度、涡量、压力和阻力系数功率谱密度

Fig. 8 Power spectral density of velocity, vortices, pressure and drag coefficient

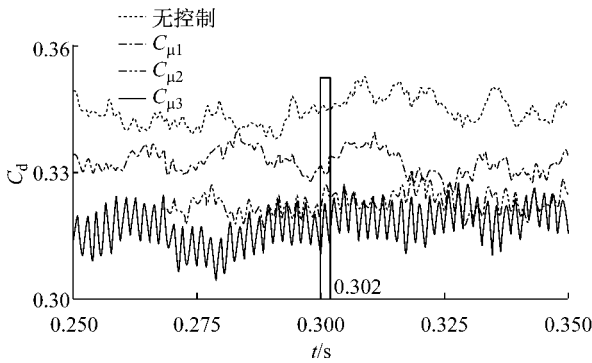


图 9 阻力系数曲线
Fig.9 Drag coefficient curve

边界层提高了抵抗逆压梯度的能力,减弱了气流的分离作用,提高了背压,实现了减阻.但是,在合成射流一个工作周期内, t_2 时刻阻力系数皆高于其他时刻对应值.这一方面是由于 t_2 时刻出口速度达到工作周期内最小值,对流动分离的抑制能力最弱;另一方面,腔体内的涡量随着吹气作用向外流输运,裹挟着涡量的外流与自由剪切层相互耦合(如图 13 和 14 所示)使得斜背回流区范围和涡量达到最大,背压最低,阻力系数达最大值 0.322 5.

从吹气到抽吸过程,出口速度增大,分离减弱,回流区减小,涡量减小,背压增大,阻力升高.故当抽

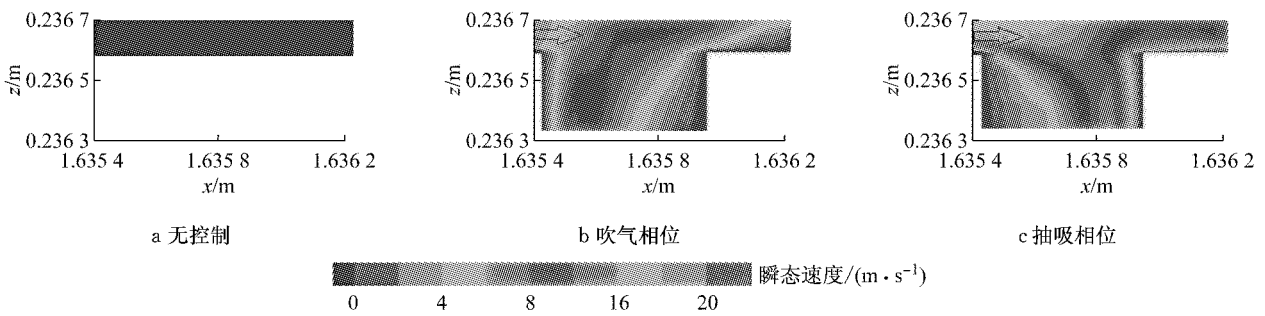


图 10 在面 $y=0$ 上的射流器出口瞬态速度
Fig.10 Instantaneous velocity near the exit of the jet in plane $y=0$

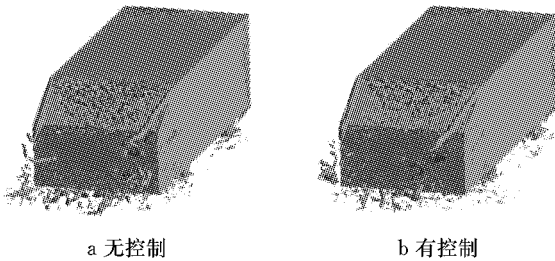


图 11 等值面涡量
Fig.11 Isosurface of vortices

吸和吹气分别达到最大时,阻力系数分别达到波谷和波峰.

4 结论

通过与试验结果对比,验证了数值仿真方法的有效性,进一步分析得到以下结论:

- (1) 合成射流激励器布置在类车体顶部和斜背



图 12 在面 $y=0$ 上的合成射流不同相位下的流线
Fig.12 Streamlines in different phase of the jet in plane $y=0$

交界处,可降低阻力系数.抽吸相位将低速气流吸入射流器内,吹气带来的高速气流与外流相互掺混,吹吸气的作用皆使得出口速度增大,边界层抵抗逆压梯度的能力增强,流动分离减弱,斜背回流区减小,

涡量减小,背压升高,实现减阻.

- (2) 合成射流的吹气和抽吸工作相位使出口速度、涡的来源与输运、斜背回流区分离作用等产生差异,工作相位的交替变换导致斜背回流区覆盖范围、

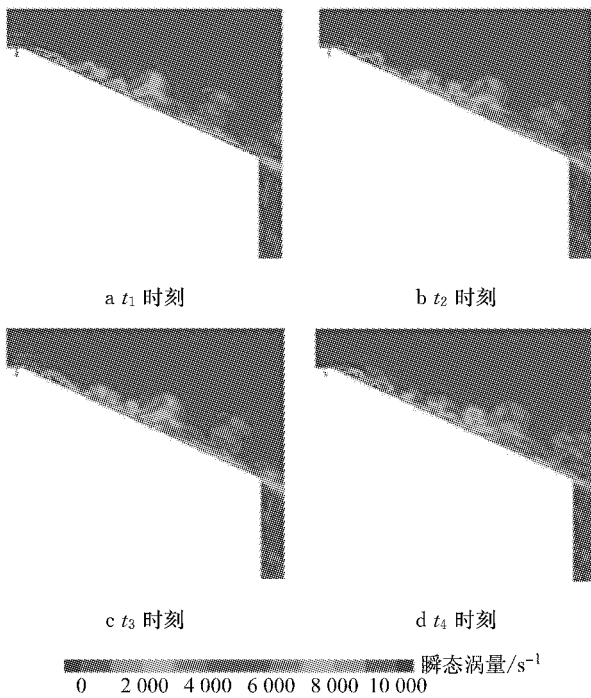


图 13 在面 $y=0$ 上的合成射流不同相位下的涡量
Fig.13 Y-vortices in different phase of the jet in plane $y=0$

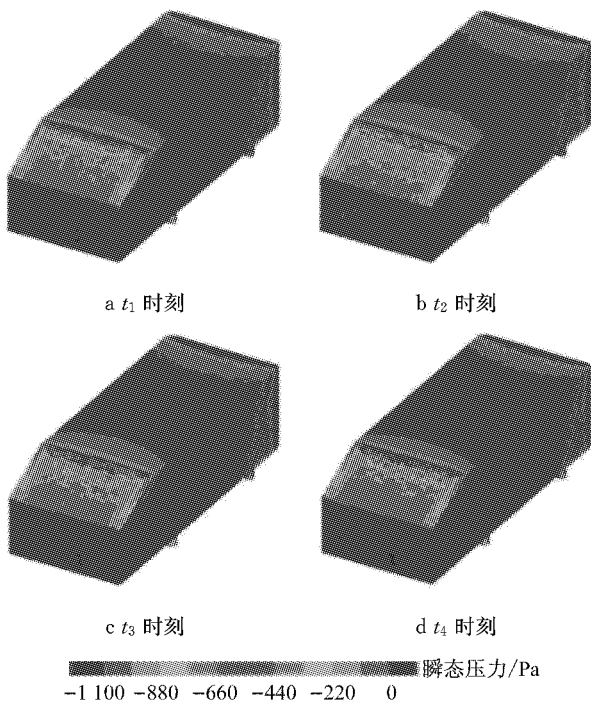


图 14 在合成射流不同相位下的车身表面压力
Fig.14 Pressure in different phase of the jet on the body

涡量和速度等流场参数按激励频率变化. 流场的变化使得压力周期性改变,进而导致了阻力系数随之的周期性震荡,产生波峰和波谷.

(3) 随着动量系数的减小,合成射流对外流输

入动量减少,流动分离的控制作用减弱,这一方面导致了斜背回流区增大,阻力系数随之增大;另一方面,阻力系数的激励峰值不断降低至消失,自然峰值增高.

(4) 合成射流可使车辆斜背压力和阻力系数按自定义的激励频率和动量系数信号进行周期性变化,为实现反馈控制奠定了基础,但选取模型表面哪些点的压力作为反馈,以提高鲁棒性,需继续研究.

参考文献:

- [1] Boucinha V, Weber R, Kourta A. Drag reduction of a 3D bluff body using plasma actuators [J]. International Journal of Aerodynamics, 2011, 1(3/4): 262.
- [2] Gillieron P, Kourta A. Aerodynamic drag control by pulsed jets on simplified car geometry [J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(2): 1.
- [3] Aubrun S, McNally J, Alvi F, et al. Separation flow control on a generic ground vehicle using steady microjet arrays [J]. Experiments in Fluids, 2010, 51 (5):1177.
- [4] Pastoor M, Henning L, Noack B R, et al. Feedback shear layer control for bluff body drag reduction [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 608(15):161.
- [5] Jabbar M, Liddle S, Potts J, et al. Development of design methodology for a synthetic jet actuator array for flow separation control applications [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2011, 227(1):110.
- [6] Park H, Cho Jun-Ho, Lee Joonho, et al. aerodynamic drag reduction of ahmed model using synthetic jet array [C/OL]. [2015-01-04]. <http://papers.sae.org/2013-01-0095>.
- [7] Kourta A, Leclerc C. Characterization of synthetic jet actuation with application to Ahmed body wake [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 192(4):13.
- [8] Leclerc C. Réduction de la traînée d'un véhicule automobile simplifié à l'aide du contrôle actif par jet synthétique [D]. Toulouse:[s.n.], 2008.
- [9] Han Xingsi, Krajnovic S, Basara B. Study of active flow control for a simplified vehicle model using the PANS method [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013(42): 139.
- [10] Parkin D J, Thompson M C, Sheridan J. Numerical analysis of bluff body wakes under periodic open-loop control [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 739 (1):94.
- [11] Krajnovic S, Fernandes J. Numerical simulation of the flow around a simplified vehicle model with active flow control [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32 (1): 192.
- [12] Agarwal R K. Computational study of drag reduction of models of truck-shaped bodies in ground effect by active flow control [C/OL]. [2015-02-01]. <http://papers.sae.org/2013-01-0954/>.
- [13] Ahmed S R, Ramm R, Faltin G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake [C/OL]. [2015-03-01]. <http://papers.sae.org/8403001>.
- [14] Kotapati R B, Mittal R, LNC lii. Numerical study of a transitional synthetic jet in quiescent external flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 581 (74):287.