

文章编号:1674-2974(2016)04-0052-07

车身俯仰运动时流场的迟滞现象研究^{*}

黄泰明^{1†},谷正气^{1,2},文琪¹,陈阵¹,唐江明¹

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南长沙 410082;

2. 湖南工业大学,湖南株洲 412007)

摘要:通过 LES 模拟某轿车在行驶时车身发生俯仰运动的流场瞬态变化过程,车身俯仰运动规律为正弦波动,正弦波动的斯特劳尔数为 0.13. 利用风洞实验验证了该方法的准确性,比较瞬态与准静态模拟结果发现两者变化规律相差很大,说明采用准静态模拟无法真实体现汽车实际行驶时的气动性能. 从瞬态模拟结果可以发现车身在最高和最低位置时存在滞后,说明流场在俯仰运动过程中存在迟滞效应. 并通过 Q-准则可视化车身周围的瞬态流场,从空间和时间上更加深入地了解车身周围复杂流场的瞬态流动.

关键词:大涡模拟;俯仰运动;迟滞;气动力;Q-准则

中图分类号:U461.1

文献标识码:A

Study on the Hysteresis Effects of Flow-field around Road Vehicle Subjected to Pitching Motion

HUANG Tai-ming^{1†}, GU Zheng-qi^{1,2}, WEN Qi¹, CHEN Zhen¹, TANG Jiang-ming¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan Univ,

Changsha, Hunan 410082, China; 2. Hunan Univ of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: This paper studied the transient flow-field response of a simplified vehicle pitching around its front axle. The transient numerical solver employed is based on the large-eddy simulation. The sinusoidal-pitching motion was imposed on the model, and the Strouhal number was 0.13. The numerical method was validated with wind-tunnel experiments. The change rule of the results between transient simulation and quasi-steady simulation is quite large. It has been found that the quasi-steady simulation cannot reproduce the aerodynamics performance of vehicle driving on road. It has also been found that, from the transient simulation results, there is a time lag at the extreme position, which suggests that the flow-field has hysteresis effects. The complex flow-field of transient flow around the road vehicle was thoroughly understood from the space and time through the Q-criterion to identify the coherent structures of the flow.

Key words: large eddy simulation (LES); pitching motion; hysteresis; aerodynamic force; Q-criterion

^{*} 收稿日期:2015-01-29

基金项目:中央财政支持地方高校专项资金资助项目(0420036017);国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA041805);湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题资助项目(734215002)

作者简介:黄泰明(1982-),男,湖北黄冈人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: htm426@163.com

汽车在行驶时经常受到周围环境以及车身姿态变化的影响,导致汽车在行驶时所受到的气动力发生瞬态变化,进而对行驶稳定性产生重要影响^[1-2].很多学者采用不连续变化角度的方式来模拟这种瞬态变化,该方法也被称作为准静态模拟^[3].但气动力的瞬态变化过程是很难通过传统风洞试验或者准静态模拟的方法实现的^[4].针对这种复杂的瞬态流场,采用传统的雷诺平均模拟(RANS)方法并不适用,而大涡模拟(LES)方法模拟这种复杂瞬态流场是一种非常有效的手段^[5].

在对复杂的不稳定流场研究时发现,采用瞬态方法模拟的流场与准静态模拟的流场之间存在着响应的滞后,这种现象也被称作为迟滞现象^[6].目前,国内尚无人在汽车外流场领域对此现象进行研究,在国际上也只有少数学者对这种现象进行了实验或者是仿真研究^[7].他们在针对汽车外流场的迟滞现象研究时所采用的模型大部分都是类车体模型或是简化模型^[8];且都是在受侧风影响工况^[9],而由于路面的不平或者是驾驶员操作引起的车身姿态发生俯仰运动时外流场的迟滞现象尚无研究.

本文主要采用 LES 对某轿车车身俯仰运动进行了瞬态模拟,并采用了流场可视化技术对车身姿态变化时尾部流场的迟滞现象进行了分析与研究.

1 模型建立

本文所建立的 1:3 比例模型如图 1 所示,该车车身长 1 588 mm,宽 643 mm,高 505 mm.在不影响计算精度以及原车型整体气动性能的前提下,对原始模型进行适当的简化,忽略了后视镜、雨刮器等外凸装置和复杂曲面,将底盘简化为平面.

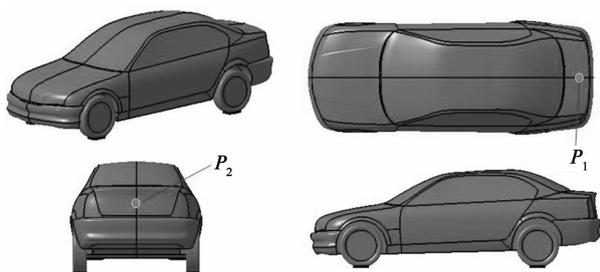


图1 车身简化模型及压力监测点
Fig. 1 Simplified vehicle model and the C_p monitor point

2 计算域、边界条件及网格划分

2.1 计算域及边界条件

本文采用商用软件 Fluent 进行仿真模拟.计算域如图 2 所示,计算域入口距车前端 5 倍车长,计算域出口距车后端 8 倍车长,计算域顶面与地面间总高度为 7.2 倍车高,计算域两侧距车各 4 倍车宽(如图 2 所示).阻塞比约为 1.5%,而在空气动力学模拟时通常接受的阻塞比为不超过 5%^[10].边界条件的具体设置如表 1 所示.

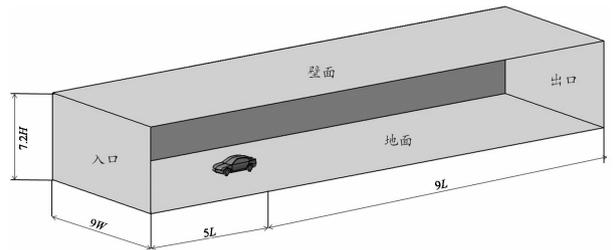


图2 计算域及边界条件

Fig. 2 Computational domain and boundary condition

表1 边界条件设置

Tab. 1 Boundary condition

计算域边界	边界条件设置方式
入口	速度入口 $v=30$ m/s,湍流强度 0.5%
出口	压力出口,出口处相对大气压力为 0
地面	Moving-wall 边界,自由滑移壁面
车身表面、顶面、侧面	wall 边界,无滑移壁面

为了保证瞬态计算的精度,瞬态计算时的参数设置如表 2 所示.

表2 瞬态求解参数设置

Tab. 2 Solver setting of transient

设置项	设置
压力-速度耦合方式	SIMPLE
压力离散方法	Second order
动能离散方法	Second order Upwind

2.2 网格划分

采用 OCTREE 方法在商用软件 ICEM CFD 将整个计算流域生成非结构化空间网格,如图 3 所示.在车身表面拉伸出 3 层与其平行的三棱柱网格,以满足壁面函数的需求,精确模拟汽车表面的附面层.计算敏感区域使用密度盒加密,以达到局部网格细化的目的.计算域网格数目大约为 1 030 万.

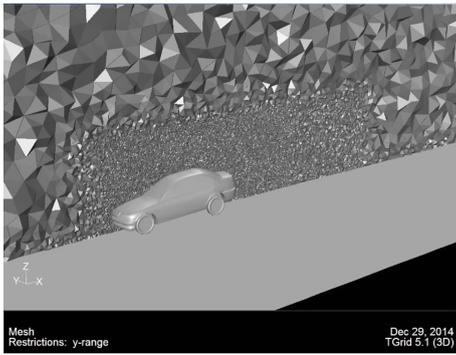


图3 网格拓扑结构
Fig. 3 Grid topology

3 计算模型及验证

3.1 LES 湍流模型

LES的基本思想是:用瞬时的N-S方程直接模拟湍流中的大尺度涡,不直接模拟小尺度涡,而小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑.这样既考虑了小尺度涡对流场的影响,又能求得大尺度涡产生的脉动压力.为了从湍流瞬时运动方程中将尺度比滤波函数尺度小的涡过滤掉,需要建立一种数学滤波函数.

经过滤波过后的基于LES的非定常不可压N-S方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) -$$

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \overline{u_i} \overline{u_j}. \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; $\overline{u_i}$, $\overline{u_j}$ 为滤波后的速度分量; μ 为湍流黏性系数; τ_{ij} 为亚格子尺度应力(SGS),体现了小尺度涡的运动对所求解的运动方程的影响.

Smagorinsky提出的基本SGS模型中,SGS应力具有如下形式:

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \overline{S_{ij}}. \quad (4)$$

其中, μ_t 是亚格子尺度的湍动黏度.

3.2 LES模型试验验证

为了验证本文所选取湍流模型的准确性,在湖南大学HD-2风洞中进行了实验(如图4所示),该风洞是双列单回流闭式,试验段的横截面为矩形,宽3 m,高2.5 m,面积为7.5 m²,高速试验段的长度为17 m,最大风速为58 m/s,收缩比3.2.在本次试

验时风速与仿真风速一致为30 m/s,.实验中采用了1:3的比例模型,本文中仿真模型与实验模型保持一致.表3中给出了实验与仿真情况下的气动力对比,气动阻力的误差为4.36%,气动升力的误差为9.07%,误差在可接受的范围内.



图4 PIV测量现场
Fig. 4 Sketch of PIV working

表3 实验与仿真气动力对比
Tab. 3 Comparison of aerodynamic force obtained from simulation and wind tunnel

	F_d	F_l
实验	11.817/N	2.261/N
仿真	12.332/N	2.466/N
误差	4.36%	9.07%

比较PIV试验与仿真计算的尾部速度流线图(如图6所示)可以发现:尾部的涡系结构相似、趋势基本一致,说明选取该湍流模型是可行的.两者在尾部有一对尾涡,其速度向着涡核减小,并在尾部形成一个回流区.仿真结果的涡系稍长于实验结果,这主要是由于试验是取多个状态的平均值.

4 车身俯仰运动设置

汽车在行驶过程中车身俯仰姿态的变化对瞬态气动力有着重要影响,进而对汽车的稳定性产生影响,而Okada的试验表明车后端所产生的影响比前端要大很多^[11].因此,本文采用车身绕前轮中心进行仿真(如图6所示),车身俯仰运动规律为:

$$\theta = -\theta_0 \sin \phi(t),$$

式中 θ_0 等于2 deg,车身俯仰运动的范围是从-2 deg到2 deg,所选取的最大俯仰角度比在实际行驶过程中遇到要大很多,主要为了更好地获取俯仰运动的过程中流场变化规律.其中 $\phi(t) = 2\pi ft$,频率 f 为10 Hz,所对应的斯特劳尔数为0.13,俯仰运动的周期为0.1 s.瞬态计算的时间步长设为0.000 1 s.

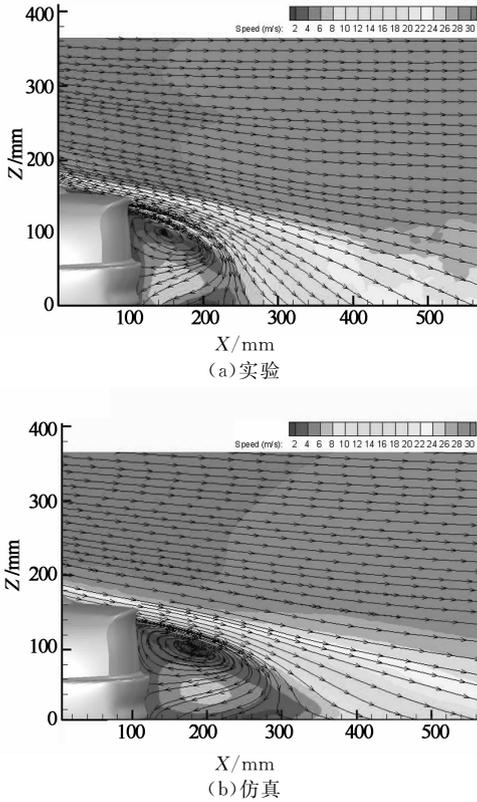


图 5 Y=0 截面流线图对比

Fig. 5 Comparison of velocity streamlines on the section of Y=0

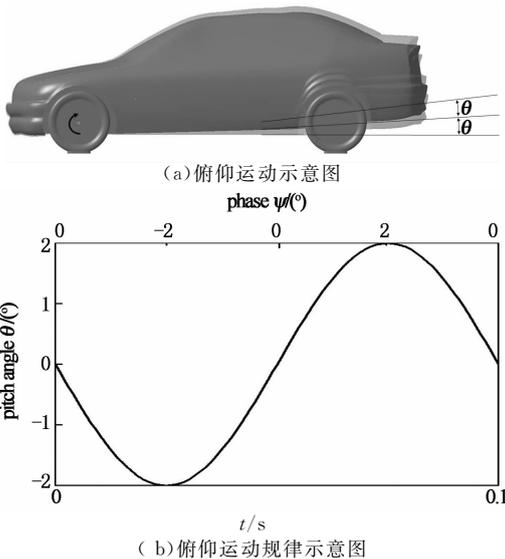


图 6 车身俯仰运动

Fig. 6 Pitching motion of vehicle

5 结果分析

5.1 车身俯仰运动时气动力及 C_p 的变化

在进行瞬态模拟时, 先进行初始化, 再进行瞬态

计算, 当瞬态计算达到稳定时, 继续计算 10 个周期, 并保存每步计算的气动力结果, 图 7 给出了达到稳定后某周期的气动力结果。

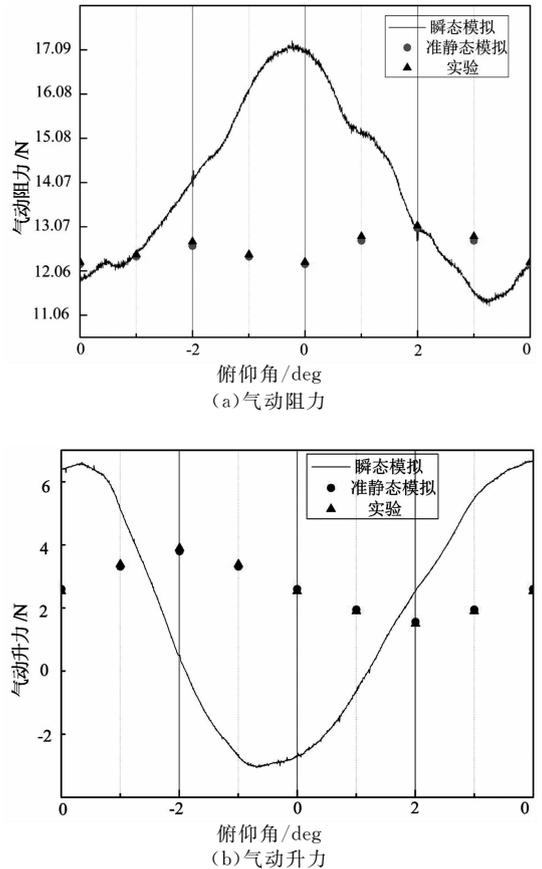


图 7 气动力变化曲线

Fig. 7 Curve of aerodynamics force

图 8 中是监测的点 P_1 和 P_2 的压力系数. 压力系数 C_p 定义为:

$$C_p = 2((p)_i - p_\infty) / \rho U_\infty^2.$$

其中 $(p)_i$ 是车身表面压力, U_∞ 是实验风速, ρ 是空气密度, p_∞ 为大气压力(参考压力). 在本文中, 参考压力点选取在计算域入口上方的顶角处, 它保证了所选取的参考压力点与模型之间有足够的距离。

从图 7 中可以发现采用 LES 模拟时准静态下的结果与实验时十分接近, 表明采用该方法进行仿真是可行的. 在瞬态模拟时结果与准静态模拟时的结果相差甚远, 变化规律完全不一致, 如气动力的最大最小值出现的位置及时间等. 这也表明采用准静态的模拟方法不能准确反映汽车实际行驶时气动性能. 在图 7 中可以发现在车身运动到极限位置时 ($\theta = -2 \text{ deg}$ 和 $\theta = 2 \text{ deg}$), 气动力有波动的现象; 从图 8 中可以发现当车身在到达和离开极限位置 ($\theta = -2 \text{ deg}$ 和 $\theta = 2 \text{ deg}$) 时, 压力系数的变化与其他位置

也存在着明显的不同,它们都存在着一定的滞后.气动力与压力系数都是受车身周围流场的影响,这些现象都说明在极限位置时车身周围的流场存在着滞后现象,也就是迟滞现象.

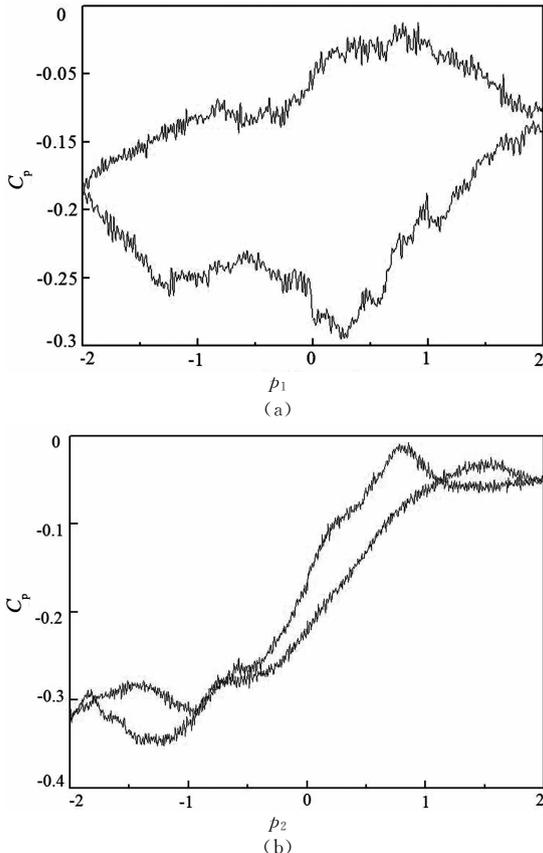


图8 压力系数变化曲线
Fig. 8 The curve of C_p

5.2 迟滞现象

图9显示的是从侧面观察车身周围的流场结构.有很多学者提出了不同的方法来识别流场的结构^[12-13].在本文中选择了Hunt等^[12]在1988年提出的Q准则来识别流场结构,该方法是基于速度梯度的第二不变量的等值面.Q准则定义为:

$$Q = -(\partial \bar{u}_i \partial \bar{u}_j) / (\partial x_i \partial x_j).$$

这种方法也被认为是识别瞬态三维涡的最好方法.

从图9可以看出:在车身俯仰运动的两个极限位置($\theta = -2^\circ$ 和 $\theta = 2^\circ$),车身周围流场存在着迟滞现象.由于迟滞作用的影响,导致车身在同一个半周期内运动到相同位置时, C_p 及气动力是完全不同的,一个很小的角度变化就可以导致它们发生很大的变化(图7和8所示).从图9还可以看出,在车身俯仰运动时,车身周围的气流试图随着车身运

动,但由于周围流场的特性以及流场的惯性导致了车身周围的流场存在时间和空间上的滞后,也使得流场出现了明显相移现象.

由于相移现象的存在,导致瞬态模拟时尾涡以及其它结果与准静态模拟时完全不同.从图9~图10可以发现车身周围的流场试图随着车身的俯仰运动而变化,但由于流体特性以及惯性的影响使得在车身即将达到和离开极限位置时的流场有明显的区别,如图10中当车身到达或者是离开最低位置时尾部尾涡的长度、高度以及形状都是不同的,同样在最高位置也有类似区别.从图10中还可以发现瞬态模拟与准静态模拟存在很明显的区别,两种状态下车身周围的流场完全不同,这主要是因为准静态模拟时车身周围的流场不受前一状态的影响.而瞬态流场存在“记忆”特性,使得车身周围流场有保持前一状态的趋势,但由于流体特性及惯性使得流场发生一定变化,导致车身周围的瞬态流场在一个周期内存在唯一性.

从图12中可以发现,当车身运动到达或者离开 $\theta = 2^\circ$ 和 $\theta = -2^\circ$ 这两个极限位置时周围的流场完全不同.当车身的运动方向发生变化时,首先由于车底板与地面间的间隙也发生变化,导致车身周围的流场发生变化.当车身将到达最低位置时,尾部的速度比车身离开最低位置要小,这也导致尾部的负压区离车身更近,上升的尾涡强度也会减小,但由于受到车身周围流体的特性影响,使得车身在将离开最低位置时的尾涡保持到达状态时的趋势,这也更进一步说明在车身周围的瞬态流场存在唯一性.在图10所示的涡量图的最高位置时与在最低位置时有着图12中相似的现象.图中所示涡的位置、大小以及结构的不同,会导致车身表面的压力变化,进而导致气动力的变化.由于在车身姿态发生变化时,车身周围的流场受到流场“记忆”的影响,进而导致车身周围的流场在不同的姿态时流场数据也不同.

从图11中可以发现,当车身将到达和离开 $\theta = -1^\circ$ 时,车身周围的流场结构完全不同,虽然车身周围的流场受“记忆”功能的影响,但它有足够的时间去调整方向,而车身在最高及最低位置时流场无足够的时间去调整.从图12中也可以发现相同的现象,当车身从 0° 向 -2° 方向运动到达 -1° 位置时,车尾底部的流线有向上升的趋势,而当从 -2° 向 0° 方向运动到达 -1° 位置时,车尾上部的流线有向下运动的趋势,同样在 $\theta = 1^\circ$ 时有相同的现象.

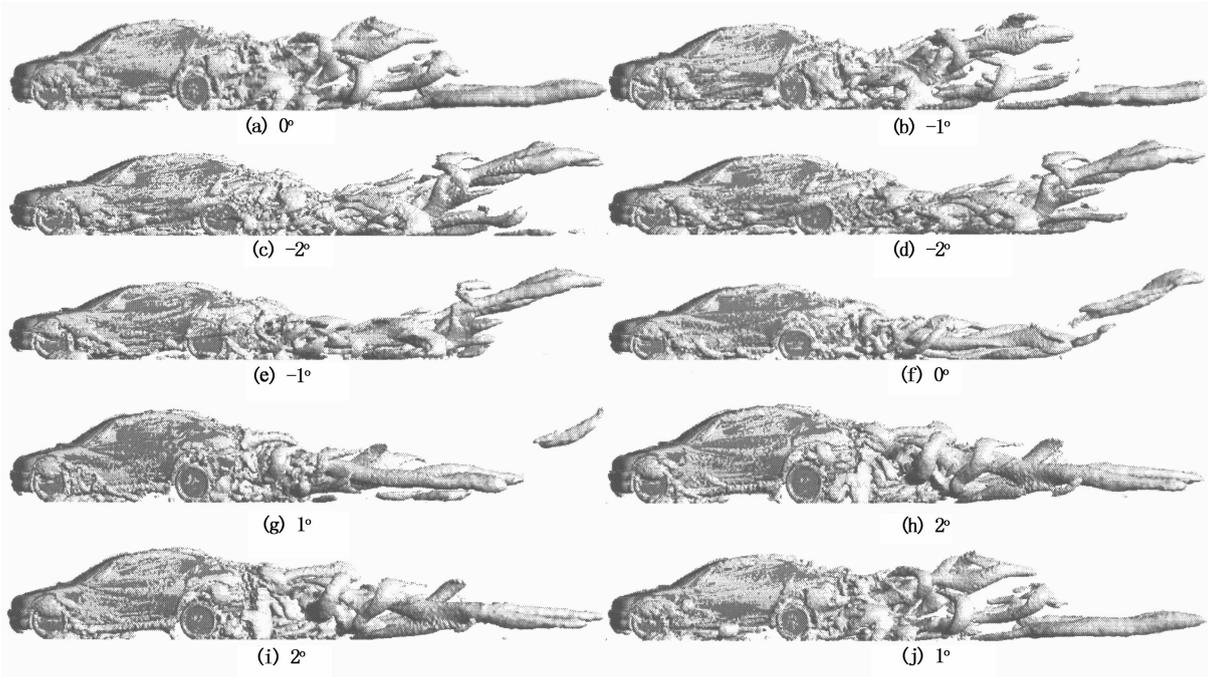


图 9 $Q=20\ 000$ 时不同位置的等值面图

Fig. 9 Iso-surface of $Q=20\ 000$ on different positions

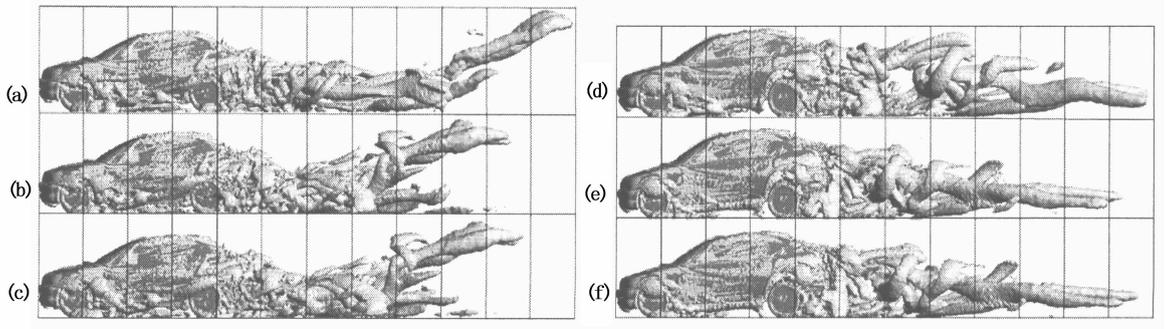
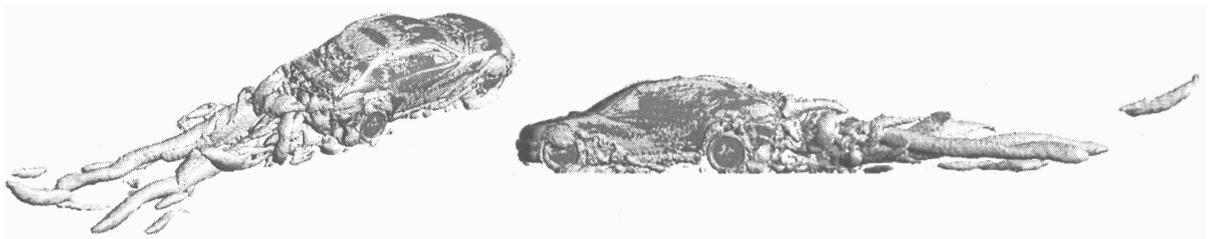
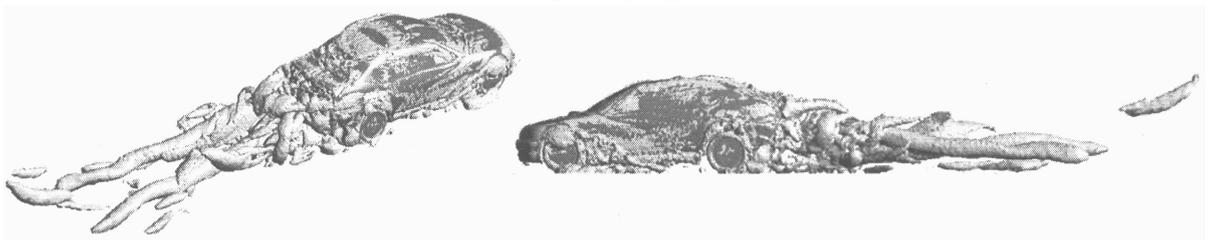


图 10 速度梯度张量第二不变量 $Q=20\ 000$ 时不同状态的等值面图

Fig. 10 Iso-surface of the second invariant of the velocity gradient tensor $Q=20\ 000$



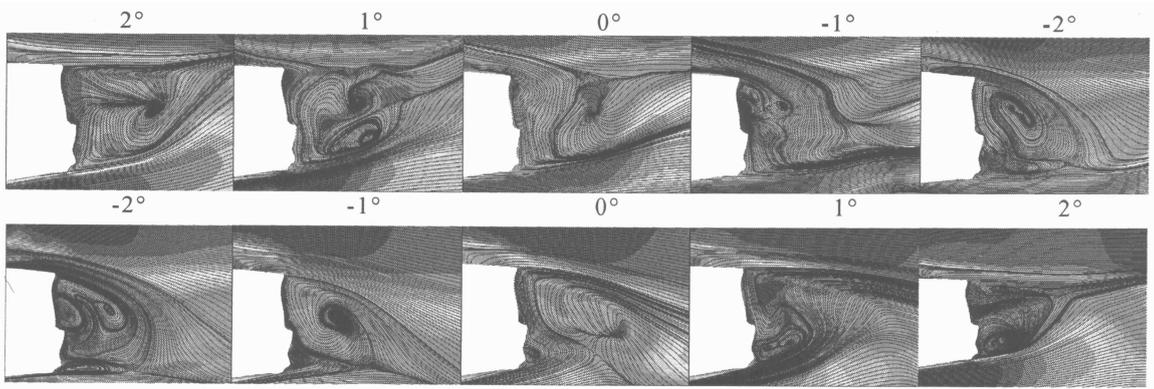
(a) 达到 1deg 位置时



(b) 离开 1deg 位置时

图 11 $Q=20\ 000$ 时不同模拟方法的等值面图

Fig. 11 Iso-surface of $Q=20\ 000$ on different methods

图 12 $Y=0$ 截面不同位置的流线图Fig. 12 Streamline project on the section $Y=0$ at different position

6 结 论

本文采用 LES 对某轿车车身正弦俯仰运动进行了瞬态及准静态模拟分析,采用了流场可视化技术对车身周围的流场进行了可视化分析,得出以下结论:

1)采用瞬态模拟的结果存在滞后现象,而采用准静态模拟不存在该现象,说明瞬态模拟能更好地反映汽车行驶的真实流场状态。

2)采用 LES 模拟了车身俯仰运动的瞬态流场,通过流场可视化 Q-准则,从空间和时间上更加深入地了解复杂流场的瞬态流动,更好地解释了瞬态模拟与准静态模拟的结果之间的差别。

3)由于气流本身的特性以及惯性作用,使得在车身俯仰运动时车身周围的气流存在迟滞效应,进而导致车身周围瞬态流场数据在车身俯仰运动时是唯一的。

参考文献

- [1] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2005:70-86.
GU Zheng-qi. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 70-86. (In Chinese)
- [2] 杨易,秦小飞,徐永康,等. 基于 AFS 与 DYC 的车辆侧风稳定性控制研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2014,41(5):14-19.
YANG Yi, QIN Xiao-fei, XU Yong-kang, *et al.* Study of vehicle crosswind stability control based on AFS and DYC [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(5): 14-19. (In Chinese)
- [3] BAKER C J. The simulation of unsteady aerodynamic cross wind forces on trains [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98:88-99.
- [4] VOLPE R, FERRAND V, SILVA A D, *et al.* Forces and

flow structures evolution on a car body in a sudden crosswind [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 128(5):114-125.

- [5] GUILMINEAU E. Computational study of flow around a simplified car body [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/7): 1207-1217.
- [6] 胡海岩,王在华. 论时滞与迟滞 [J]. 力学学报,2007,42(4):740-746.
HU Hai-yan, WANG Zai-hua. On hysteresis and retardation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 42(4):740-746. (In Chinese)
- [7] FULLER J, BEST M, GARRET N, *et al.* The importance of unsteady aerodynamics to road vehicle dynamics [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 117: 1-10.
- [8] KRAJNOVIC S. Large eddy simulation investigation of the hysteresis effects in the flow around an oscillating ground vehicle [J]. ASME: J Fluids Eng, 2011,133(12): 1-9.
- [9] DAVID U, KRAJNOVIC S. LES of the flow around several cuboids in a row [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013, 44:414-424.
- [10] 张清林. 汽车模型风洞关键影响因素研究及数据后处理软件开发[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2012.
ZHANG Qin-lin. Study on influence factor of automotive wind tunnel test and development of the data processing software [D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2012. (In Chinese)
- [11] OKADA Y, NOUZAWA T, NAKAMURA T, *et al.* Flow structures above the trunk deck of sedan-type vehicles and their influence on high-speed vehicle stability 1st report: On-road and wind-tunnel studies on unsteady flow characteristics that stabilize vehicle behavior [R]. SAE Paper. 2009-01-0004, 2009.
- [12] HUNT J, WRAY A, MOIN P. Eddies, stream and convergence zones in turbulent flows [J]. Center for Turbulent Research, 1988, 1:193-208.
- [13] JEONG J, FAZLE H. On the identification of a vortex [J]. J Fluids Mech, 1995, 285:69-94.