

文章编号: 0258-1825(2012)06-0782-04

类车体外流场非稳态特性数值研究

朱 晖^{1,2}, 杨志刚¹

(1. 上海同济大学地面交通工具风洞中心, 上海 201804;

2. 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)

摘要:采用大涡模拟的数值方法,对30°后倾角类车体外流场进行计算。对计算所得结果(阻力、升力、三维速度)进行统计分析,参考已发表文献数据,在证明计算方法有效性的基础上得出相关结论:在0°偏航角情况下,几何对称的类车体,其外流场非稳态参数并非完全对称。

关键词:大涡模拟;非稳态流动;计算流体力学;类车体

中图分类号:V211.3 **文献标识码:**A

0 引言

类车体外流场结构受尾部斜面倾角的影响显著:0°~12.5°情况下,气流附着于尾部斜面上,并于车体背部分离,形成典型的直背构造尾迹区流场结构;随着斜面倾角的增大,在尾部斜面上产生分离泡,车体背部产生分离涡,并伴随流向拖曳涡对的出现。

当尾部倾角为30°时,气动阻力呈现急剧下降的状态,依此为判据,确定30°后倾角为临界状态^[1]。目前,针对30°后倾角类车体尾迹区流动特征及流场结构的研究较少,作为临界状态,有必要加以研究。

类车体外流场普遍具有非稳态的特性,然而诸多文献多采用稳态方法或非稳态方法,通过对时均流场结构特点的描述,研究其流动现象,无法有效揭示类车体外流场非稳态运动的变化规律^[2-4]。

本文以大涡模拟为手段^[5],监测30°后倾角类车体尾迹区流场部分参数的时变运动信息,对取得的采样数据进行统计分析,在明确其频谱特征的基础上,得出相应结论。

1 几何模型及流场空间离散

参考文献[1](Ahmed等,1984),数值计算采用的类车体模型构造如图1所示。图中,尾部倾角角 α 为30°,保持不变。

大涡模拟采用过滤方法,将湍流运动分解为可解尺度湍流和不可解尺度湍流运动。由于其基于空间平均的模式构架,决定了大涡模拟对网格尺寸较强的依赖性。

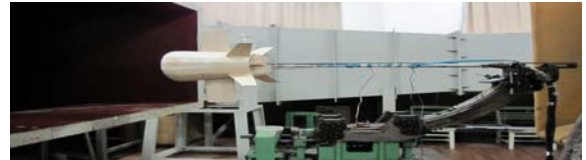


图1 类车体构造(单位:mm)

Fig. 1 Geometry of Ahmed body(unit:mm)

为了扩大直接数值计算范围,提高截断波数和计算求解精度,尤其是考虑到近壁面尾迹区流场的计算精度,面网格参数如表1所示。

表1 面网格参数

Table 1 Parameters of surface mesh

	头部	倾面	背面	支柱	其它
尺寸(mm)	1	0.5	0.5	0.5	2
类型	皆为四边形				
质量	determinant (2×2×2) value > 0.5				

空间计算区域长10144mm、宽4740mm、高3280mm,坐标系设定如图2所示,阻塞比为0.7%。为了减轻数值粘性的影响,整个计算域划分为大小不等的六面体网格。近壁面第一层网格中心离壁面的法向高度,以 y^+ 为1~10加以控制,目的在于:尽量描述边界层底层流底层的性质;边界层网格共40层,与

* 收稿日期:2011-02-22; 修订日期:2011-10-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB711200);湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金(31115024)

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

外围网格实现了较光滑的过渡连接。体网格总数为1500万单元,内部结构如图2所示。

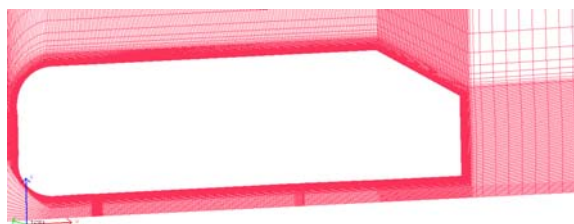


图2 体网格结构
Fig. 2 Structure of volume grid

2 数值计算方法

湍流模型采用 Smagorinsky 模型^[6],该模型是根据唯象论推出的剪切湍流亚格子模型,其原始模式为雷诺平均混合长度模式在大涡模拟中的推广。该模型属于耗散型,因此,在总体上符合湍流运输的性质,且数值上易稳定。唯一的模式系数 $C_s=0.14$ 。

迭代方法采用 Van doormal 和 Raithby 于 1984 年提出的分离式 SIMPLEC 算法。此算法与 SIMPLE 的计算步骤相同,只是速度修正方程中的系数项 d 的计算公式有所区别。动量方程采用 Bounded central differencing 离散格式,压力项采用标准格式。具体过程在 Fluent6.3 中实现。

时间步长取 0.0005s ,固定不变。每步迭代次数以计算达到内部收敛为准。为确保数值解的精度,所有监测的流场参数皆满足相应格式的收敛条件。

入口处采用速度入口边界条件,认为速度为均匀分布, $U=35\text{m/s}$, $V=W=0\text{m/s}$,湍流强度 1.35% ;出口采用压力出口边界条件,表压取 0Pa ,其它参数与进口类似;地面和车身皆采用无滑移边界条件,计算域回型面采用对称边界。雷诺数 $Re=2.5\times 10^6$ 。

3 计算结果

3.1 气动力的非稳态特性

气动力集中反映了绕流流场与车体的相互作用,流场运动的非稳态性质势必在车体所受气动力方面得以体现。图3、图4分别为车体所受气动阻力和升力随时间变化的图谱。

由图3、图4可知:随着时间的推进,阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 分别在各自的脉动区间内上下波动,体现了较强的周期性特征。其均值分别为 0.325 和 0.521 ,与实验值符合较好^[7]。

时变图谱不能直观反映气动力非稳态特性的频率特征,因此对计算结果进行时频转换。功率谱方法

将合成振动的简谐振动特征进行辨析,从而得到清晰的频率分布特性,如图5、图6所示。

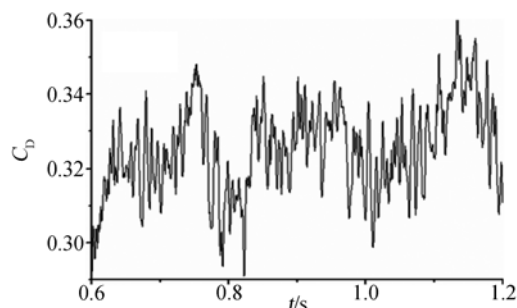


图3 阻力系数随时间变化图谱

Fig. 3 Figure of time-dependent C_D

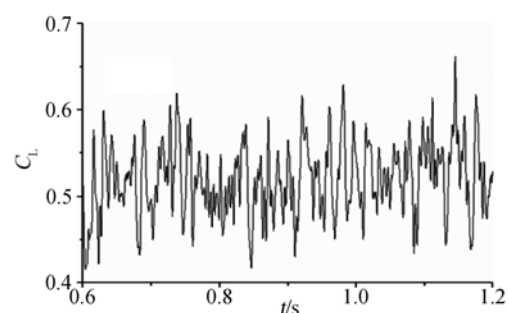


图4 升力系数随时间变化图谱

Fig. 4 Figure of time-dependent C_L

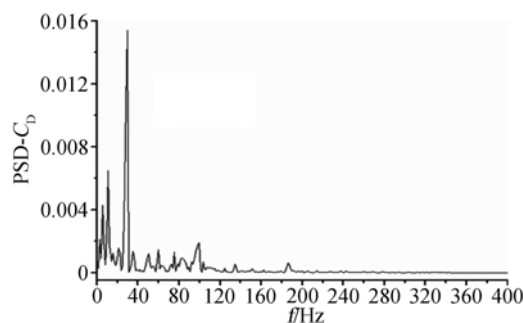


图5 阻力系数功率谱

Fig. 5 PSD of C_D

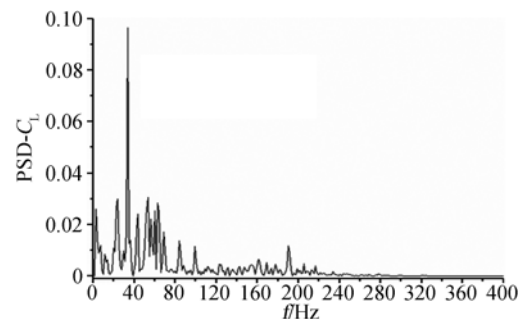


图6 升力系数功率谱

Fig. 6 PSD of C_L

由图5、图6可知:在频率范围 $[20,40]\text{Hz}$ 内,能量出现峰值,表明绕流流场作用于车体的能量集中于此频率范围;此频率范围也是气流从车体上脱落的特

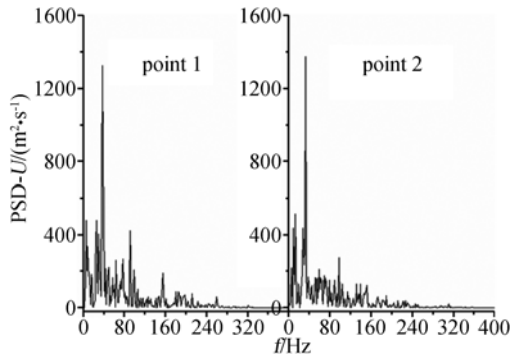
征频率范围。阻力系数和升力系数峰值频率分别为 30.0Hz 和 33.5Hz,其所对应的斯特罗哈数($St = fd/v$)分别为 0.287 和 0.320,略小于文献[8]发表的实验值。

3.2 尾迹区流场的非稳态特性

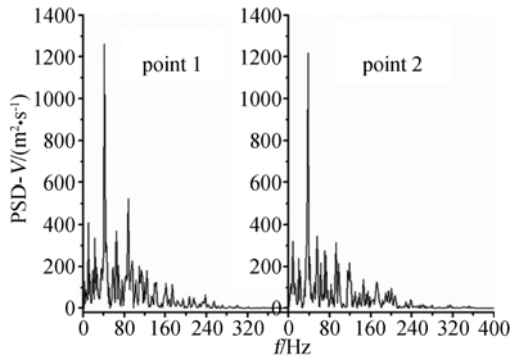
尾迹区流场的监测点坐标分别为:[1056.5, -97.25, 138.5]、[1056.5, 97.25, 138.5]、[1148.4, -97.25, 138.5]、[1148.4, 97.25, 138.5]、[1357.2, -97.25, 138.5]、[1357.2, 97.25, 138.5],为两两对应的三组测点,分别记为: point1、point2、point3、point4、point5、point6;离车体背部的相对位置 $x/L = 0.012, 0.1, 0.3$,式中 L 为车模长度 1044mm。

由于常用的稳态算法、平均流场统计仅描述了流场的定常性质;多数流场实验(尤其是测三维流速)又忽视了流场中空间位置对称处流动参数需同时测量的必要性。所以,对于尾迹区流场的非稳态特性描述不足,尤其是空间对称测点处,三维速度的相位变化特征。

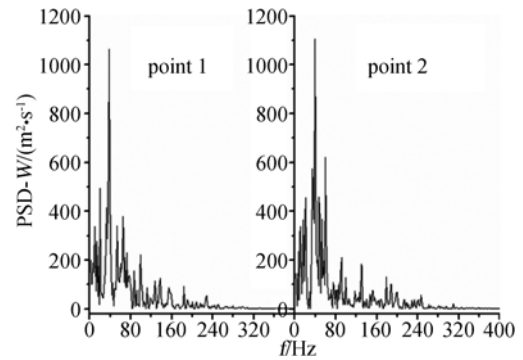
图 7 为 point1 和 point2 两对称采样点处三维速度的功率谱分析结果。由图可知:空间对称测点处三维速度功率谱分析结果类似,在频率范围[0, 100] Hz 内皆出现能量集中现象;在 40Hz 附近三个方向速度功率谱皆达到峰值水平。



(a) x 方向速度 U



(b) y 方向速度 V



(c) z 方向速度 W

图 7 point1 与 point2 三维速度功率谱

Fig. 7 PSD of 3D velocity in point1 and point2

point3 和 point4, point5 和 point6 之间,三维速度的功率谱分析结果与图 7 类似,所有测点处三维速度功率谱峰值对应的频率值见表 2。由表可知:最高频率对应的斯特罗哈数范围[0.306, 0.386],与文献[7]符合较好,且普遍高于阻力系数和升力系数的分析结果。

表 2 功率谱峰值频率

Table 2 Frequency to peak value of PSD

测点	频率/Hz		
	x	y	z
point1	36.33	40.53	37.74
point2	33.14	37.74	39.13
point3	33.54	40.53	33.14
point4	32.96	34.94	32.14
point5	35.73	33.54	36.33
point6	33.54	40.52	36.33

功率谱分析揭示了流场中测点处能量的频谱特性;进而,采用互谱分析,揭示流场中测点间的相位变化规律,如图 8~图 10 所示。

由图 8~图 10 可知,空间对称测点处三个方向速度两两之间存在明显的相位差,且并非常数。相位差在[-180°, 180°]范围内上下波动,并不完全为 0° 或 180°,说明三个方向速度两两之间并非完全对称。

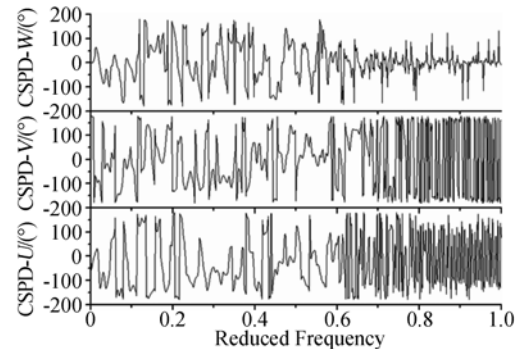
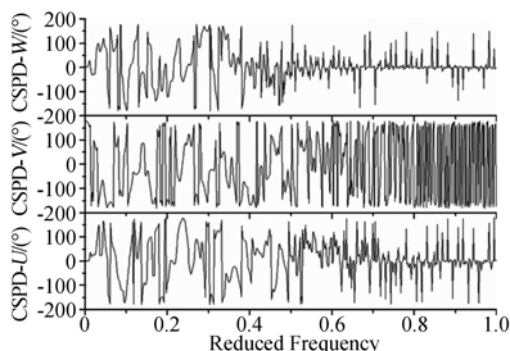
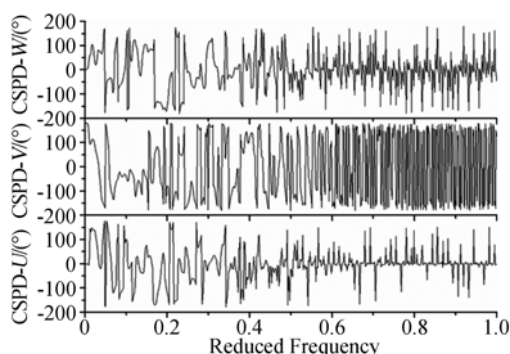


图 8 $x/L=0.012$ 处速度相位

Fig. 8 CSDP of velocity at $x/L=0.012$

图9 $x/L=0.1$ 处速度相位Fig.9 CSDP of velocity at $x/L=0.1$ 图10 $x/L=0.3$ 处速度相位Fig.10 CSDP of velocity at $x/L=0.3$

在选定测点处,当归一化频率小于0.6时,三维速度两两之间的相位差呈随机分布的特点。当归一化频率大于0.6时, y 方向速度的相位差接近于 $\pm 180^\circ$,且随着测点逐步远离车体背面,此规律亦成立; z 方向速度的相位差始终在 0° 附近上下波动;随着测点逐步远离车体背面, x 方向速度的相位差逐步呈现为围绕 0° 上下波动的特点。

4 结 论

根据数值计算结果及统计分析,结合已发表的相关文献数据,得到以下结论:

(1) 在 0° 偏航角情况下,虽然类车体几何结构左右对称,但其外流场非稳态特性参数并非完全对称;

(2) 气动力的波动是外流场非稳态特性作用于车体的直接表现,二者互为参考和推测的依据;就能量峰值频率对应的斯特罗哈数而言,流速分析值高于气动力分析值;

(3) 由于本次数值计算方法能有效预测临界后倾角类车体外流场的非稳态特性,从而证明了所采用方法的有效性和可行性。

参 考 文 献:

- [1] AHMED S R, RAMM R, FALTIN G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake[R]. SAE Technical Paper Series 840300, 1984.
- [2] FARES E. Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach[J]. *Computers and Fluids*, 2006, 35: 940-950.
- [3] KAPADIA S, ROY S, WURTZLER K. Detached eddy simulation over a reference Ahmed car model[R]. AIAA-2003-0857.
- [4] LIU Y L, ALFRED M. Numerical modeling of airflow over the Ahmed body[J]. *Proceedings of CFD 2003, Canada*, 2003, (2): 507-512.
- [5] RODI W. DNS and LES of some engineering flows[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2006, 38: 145-173.
- [6] JOSEPH S. General circulation experiments with the primitive equations [J]. *Monthly Weather Review*, 1963: 91-164.
- [7] VINO G, WATKINS S. Flow structures in the near-wake of the Ahmed model[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 20: 673-695.
- [8] WILLIAMS S. Self-excited aerodynamic unsteadiness associated with passenger cars[D]. University of Durham, 2001.

Numerical study of unsteady features of airflow around the Ahmed body

ZHU Hui^{1,2}, YANG Zhi-gang¹

(1. Automobile Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Changsa 410082, China)

Abstract: The airflow around the Ahmed body with 30° slant angle has been simulated using LES. By statistically analyzing the computational results including drag force, lift force and 3D velocity, consulting the data belong to published reference; the computational method has been validated. The key conclusion is that with 0° yawing angle, the unsteady parameters of airflow around Ahmed body with symmetry geometry are not absolutely symmetrical.

Key words: LES; unsteady flow; CFD; Ahmed body