

文章编号: 1000-8055(2007)11-1858-05

侧风环境下行驶的直背式轿车气动力计算

郑 昊, 康 宁, 蓝 天

(北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083)

摘 要: 分别对直背式简化轿车模型在无侧风、稳态侧风、非稳态侧风三种条件下汽车周围流场进行了数值模拟, 并对汽车受到的气动力进行了计算. 结果表明, 定常侧风会产生较大侧向力, 阻力和升力也有一定增加; 在非定常侧风作用下, 气动力变化趋势与侧风速率变化趋势基本相同. 阻力增大幅度较为平缓, 侧向力增大较为显著, 升力处于两者之间. 当侧风增大到一定速率后, 车外流场会发生较大变化, 尾涡会转变为侧向涡.

关 键 词: 汽车空气动力学; 气动力; 侧风; 非定常流

中图分类号: U461. 1

文献标识码: A

Calculation of aerodynamic forces of a car with the effect of crosswind

ZHENG Hao, KANG Ning, LAN Tian

(Department of Automotive Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The outflow field of a simplified fast back car was simulated numerically with the effect of no cross wind, steady cross wind and unsteady cross wind. The aerodynamic forces and coefficients were calculated. The results show that, steady crosswind will generate bigger lateral force, and also increase the drag and lifting force to a certain extent; the change trend of aerodynamic forces was the same as that of lateral wind speed. With the effect of unsteady cross wind, the drag increases more slightly, and the lateral force increases most significantly; the lifting force remains moderately. When cross wind reaches a high level, the flow field will change dramatically, and the wake vortex is turned into side vortex.

Key words: automobile aerodynamics; aerodynamic forces; crosswind; unsteady flow

汽车在侧风中行驶时, 会受到较大的侧向力、横摆力矩和侧倾力矩. 侧向气动力将引起轮胎侧偏, 致使汽车偏离行驶方向, 这种偏离由驾驶员调整转向盘来修正^[1]. 为了消除侧风的影响, 驾驶员连续调整转向盘, 会导致驾驶员极度过早疲劳和增加危险性. 因此, 对行驶中的汽车进行侧风环境下的气动力分析是十分必要的.

本文应用商用 CFD 软件 Fluent 分别对无侧风、稳态侧风、非稳态侧风下的车身周围流场进行了数值模拟, 对气动力及气动力系数进行了计算, 并根据车身外流场的三维流线和车身表面压力

分布情况对气动力的影响进行了分析.

1 计算模型的建立

1.1 控制方程

通常状态下, 汽车车速低于 200 km/h, 远小于 0.3 倍声速, 因此汽车周围流动可按不可压流处理. 在阵风作用下流动应按非定常流动处理, 空气介质的物性参数恒为常数, 空气对汽车的绕流完全处于湍流状态. 控制方程为非定常不可压 N-S 方程

收稿日期: 2006-10-26; 修订日期: 2007-01-18

作者简介: 郑昊(1982-), 男, 北京人, 硕士生, 主要从事汽车空气动力学方向的研究

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \tag{2}$$

式中, $\mathbf{V}$ 为速度矢量, ∇ 为哈密顿算子, p 为空气压强, ρ 为空气密度, ν 为空气运动粘性系数.

把湍流运动的速度和压力分解为平均值和脉动量后,在平均值基本方程中就出现了雷诺应力这一反映湍流运动的特征量.由于方程不封闭,无法对此进行求解.为此,人们在试验基础上对雷诺应力提出了一系列假设,得到了适应于不同湍流流动的湍流模型.其中, Spalart-Allmaras 模型是一种新出现的单方程模型,只需求解一个关于 v_t 的输运方程,该输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_t v_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \mu_t \right] \frac{\partial v_t}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left\{ \frac{\partial v_t}{\partial x_j} \right\}^2 - Y_v \tag{3}$$

式中, G_v 是湍流粘度生成项, Y_v 为壁面堵塞和粘度衰减而在近壁区域形成的湍流粘度损耗, σ_v 和 C_{b2} 为常数.

离散格式采用 QUICK 格式,即对流运动的二次迎风格式.这是目前应用的较广泛的离散格式,它可以减少假扩散现象,具有三阶精度^[2].

根据文献[2],对于此简化模型,采用 Spalart-Allmaras 湍流模型,以及 QUICK 离散格式可以得到较小的误差.

1.2 模型及网格划分

本文采用的简化缩比模型如图 1. 车身长为 512 mm, 高为 138 mm, 宽为 206 mm, 为了减小计算量, 保证计算的可行性, 对车身进行了简化, 忽略了车轮、后视镜、门把手、雨水槽、排气管等外凸装置和复杂曲面, 而以简单曲面代替.

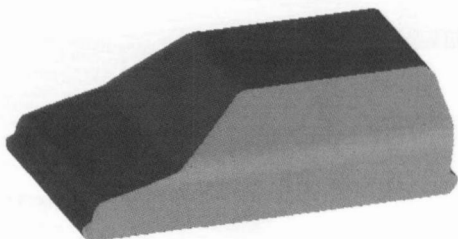


图 1 汽车模型

Fig.1 Simplified car model

计算域为 2 750 mm × 2 150 mm × 520 mm, 见图 2. 计算域左侧面距离车身表面 2 倍车宽; 右

侧面距离车身表面 7 倍车宽, 进口距离模型最前端 3 倍车身高, 模型后端至计算域出口 4 倍车身高, 计算域高度取 4 倍车身高, 车模离地间隙 20 mm.

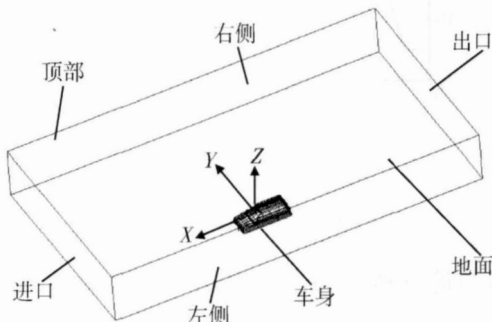


图 2 计算域示意图

Fig.2 Computational domain

对此计算模型采用六面体结构网格, 为了更好地在计算过程中模拟附面层, 对贴近轿车表面的网格进行加密, 如图 3. 这样在速度梯度较大的地方也可以得到较好的计算精度. 同时由于网格密度由轿车表面向计算域外边界是由密到疏的过渡, 也解决了网格过多计算时间过长的问题. 整个网格数量为 70 万.

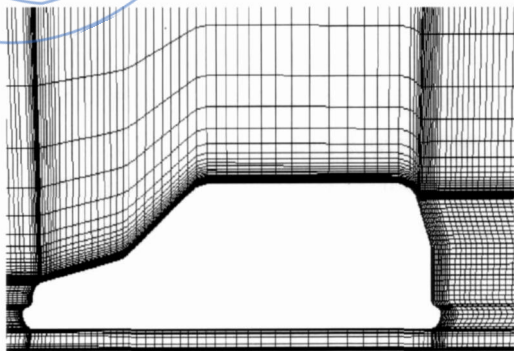


图 3 车身纵向对称面内的网格划分

Fig.3 Grid in the longitudinal section of symmetry

1.3 边界条件及初始条件

1.3.1 边界条件

整个流场的流体材料设置为空气, 空气的密度为 1.205 kg/m³, 动力粘性系数为 1.81 × 10⁻⁵ (kg/m · s).

计算域进口面作为来流速度入口, 沿 x 负向取 $v = 35$ m/s.

计算域左侧面为侧风速度入口, 速度方向沿 Y 轴正方向, 在第一阶段取 $u = 5$ m/s, 待流场稳定后侧风速度取文献[3]非稳态侧风的风谱数据库中的正弦变化阵风, 如图 4 所示.

在计算域顶面边界为滑移的移动壁面边界.

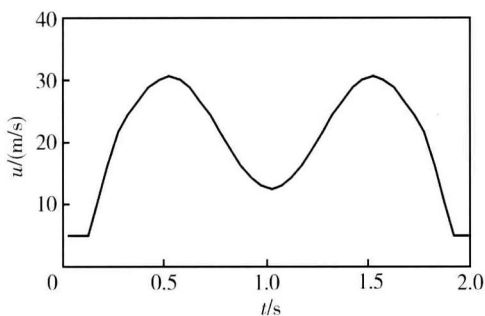


图 4 正弦变化阵风
Fig. 4 Sinusoidal gust

速度与进口速度与左侧侧风速度矢量合速度相同。

地面边界为无滑移壁面边界,速度大小与进口速度相同。

计算域出口与右侧边界同为出流边界,采

用外推法,即出流边界上流向梯度为零的处理方法。

轿车表面边界取无滑移壁面边界,速度大小为 0。

1.3.2 初始条件

对定常侧风环境进行模拟计算,得到一个稳定的流场后,把该流场的速度、压强分布作为非定常计算的初始流场,然后直接改变侧风速度变化规律进行计算。

2 对计算结果的分析

2.1 定常侧风的影响

在无侧风和 5 m/s 的定常侧风两种条件下,对该模型进行数值模拟计算,均采用耦合的稳态求解器,计算结果见表 1:

表 1 气动力和气动力系数
Table 1 Aerodynamic forces and aerodynamic force coefficients

	阻力 / N	C_d	升力 / N	C_l	侧向力 / N	C_s
无侧风	9.64	0.469	2.73	0.133	0	0
定常侧风	15.60	0.762	9.64	0.471	34.81	1.700
增量百分比 / %	61.9	62	252.6	253	—	—

表 1 中, C_d 为轿车阻力系数, C_l 为升力系数, C_s 为侧向力系数。在无侧风和定常侧风两种条件下,沿轿车运动方向的来流速度均为 35 m/s。可见,侧风带来的影响对侧向力最为明显,侧向力是定常侧风条件下阻力的 2.2 倍、升力的 3.6 倍;升力相对于无侧风条件增加了 2.5 倍,同时,气动阻力也增加了 61 %。

图 5 为 5 m/s 的定常侧风下,轿车模型 A 柱末端横截面流场的压力分布图。可以看到:侧风流入侧和流出侧的压力差主要集中在车身 A 柱两侧,这样的压力差会对车身产生一个侧向力。

图 6 为 5 m/s 的定常侧风下,轿车模型尾部的流线图。可以看到在侧风的作用下,模型尾部会形成两个涡流区,模型底部气流在尾迹区向上形成了不规则的尾涡,车身顶部的气流在通过车身后向下运动,形成一个较大的尾涡。由于侧风的作用,该尾涡径向与侧风风向相同,尺度沿侧风风向逐渐减小。上下两部分气流在通过尾涡后互相交汇,延长了尾迹区的长度,致使阻力增加。另一方面,模型底部的气流通过车身,在尾部形成的尾涡不规则,会进一步降低流经底部的气流速度,增大上下表面压力差,使升力增加。

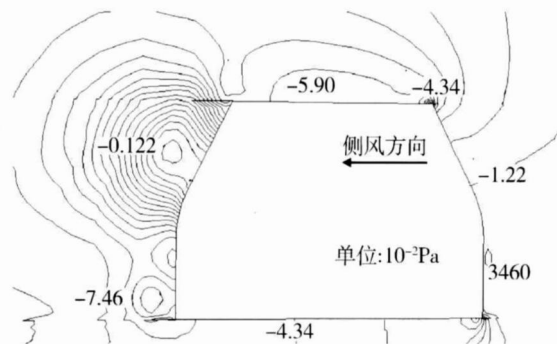


图 5 定常侧风下压力分布

Fig. 5 Pressure distribution with steady cross wind

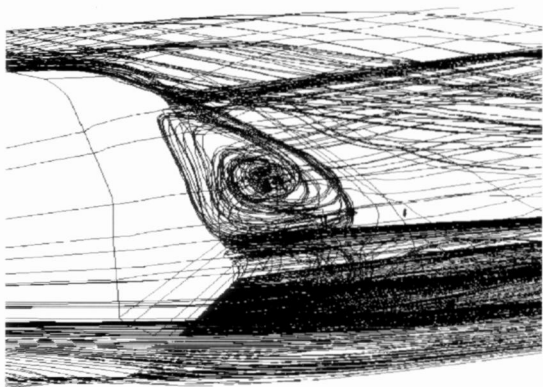


图 6 定常侧风条件下流线图

Fig. 6 Streamlines with steady cross wind

图 7 是无侧风条件下的轿车模型尾部流线图.对比定常侧风条件的流线图,在侧风条件下其尾涡更为剧烈,特别是底部气流所形成的尾涡对尾部流场形成很大影响.因此,在侧风条件下,气动升力的变化最大.

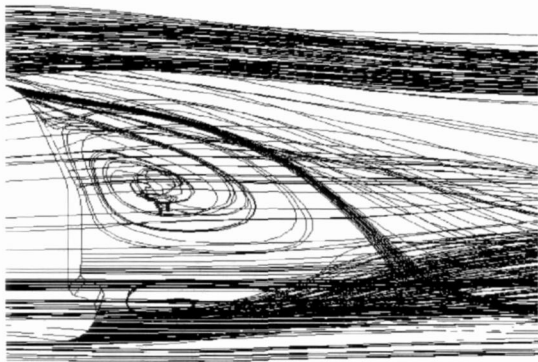


图 7 无侧风条件下流线图
Fig. 7 Streamlines without cross wind

2.2 非定常侧风的影响

在非定常侧风的影响下,其横摆角(合成气流与前方来流之间的夹角)随侧风风速的变化不断变化,气动力和气动力系数也随之改变.图 8、图 9 分别是气动力和气动力系数随时间变化关系.

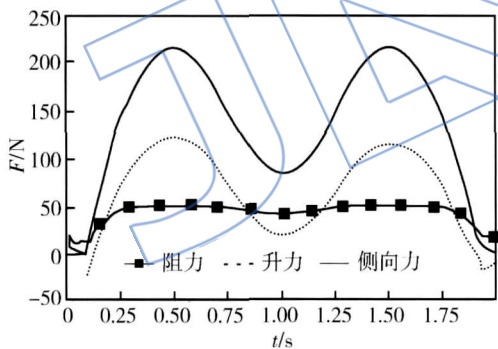


图 8 气动力随时间变化关系
Fig. 8 Variation of aerodynamic forces with time

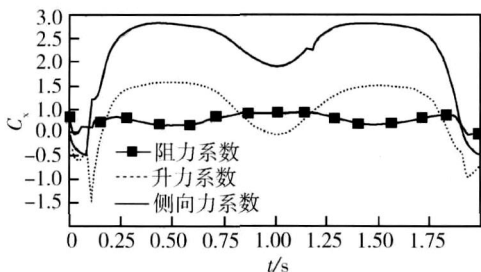


图 9 气动力系数随时间变化关系
Fig. 9 Variation of aerodynamic force coefficients with time

随着侧风风速的增加,横摆角度不断加大,气

动力的变化趋势与侧风风速的变化趋势相同,但各气动力变化幅度并不一样:从定常的 5 m/s 侧风到正弦变化侧风最大值时,阻力增大幅度最为平缓,增大了不到 3 倍;侧向力增大的最为显著,增加了 25 倍左右;而升力处于两者之间,增加了 10 倍左右.

由于气动力系数与来流速度的平方成反比,因此在侧向风速率的变化按照正弦规律变化时,侧向力系数和升力系数的变化曲线变得较为平坦,而阻力值变化较小,则造成在这一阶段的阻力系数的变化趋势不同于侧风速度曲线的变化趋势.

图 10 是 $t = 0.125$ s 时的轿车模型尾部流线图,侧向风速由定常时的 5 m/s 增加到 8 m/s. 可以看到,此时上部气流形成的尾涡开始上移,并且沿侧向风来流方向出现回流.

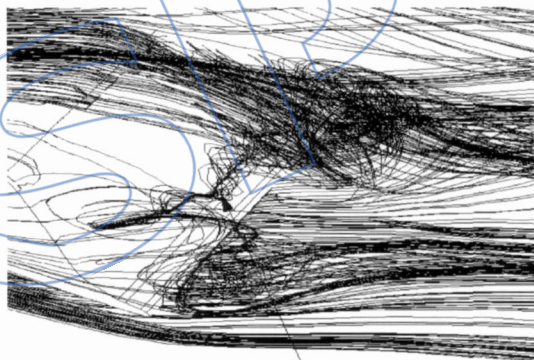


图 10 $t = 0.125$ s 流线图
Fig. 10 Streamlines at $t = 0.125$ s

图 11 是 $t = 0.25$ s 时车外流线图,侧向风速率增大到 21.5 m/s,并开始由线性变化转入正弦变化.这个时候上部分气流流经发动机罩和前挡风玻璃,在车身背风侧形成涡流,涡流尺度沿车身向后逐渐增大,尾部并未形成涡流,同时流经底部的气流也会车身侧面形成一个小尺度的涡流.

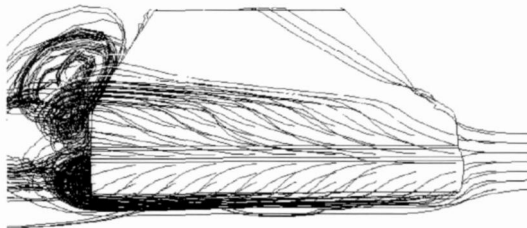


图 11 $t = 0.25$ s 时流线图
Fig. 11 Streamlines at $t = 0.25$ s

图 12 是 $t = 0.625$ s 时车外流线图,侧向风风速达到最大值 30.5 m/s,此时,侧向风速率仍然

按照正弦曲线变化.对比图 11 与图 12,气流流经车身后所形成的涡流形式与 $t = 0.25 \sim 0.625$ s 时基本相同,且涡流区均在车身右侧向后延伸.

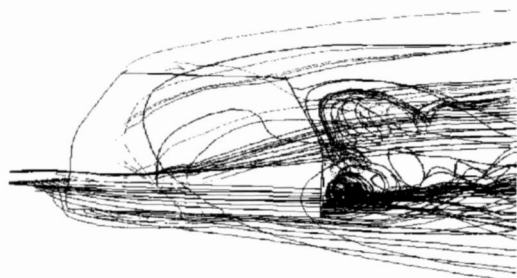


图 12 $t = 0.625$ s 时流线图

Fig. 12 Streamlines at $t = 0.625$ s

由此可以看出,侧风主要改变了汽车行驶过程中尾部涡流的形式.当侧风风速足够大时,尾涡出现了明显的逆向侧风风向回流.若侧风速率继续增大,则尾涡不再存在,气流一部分流经车身底部、发动机罩和前挡风玻璃,在车身的背风向形成两个涡流,随着车身向后延伸,两个涡流的尺度逐渐增大;而另一部分气流沿车身迎风面流经汽车尾部,并不形成明显的尾涡.

非定常侧风条件下车身流场的这种变化,对阻力的影响最小,当涡流转为在车身背风侧形成时,阻力的变化率达到最小;升力在尾涡转为侧向涡的过程中变化最为剧烈,之后随着侧向风速率的变化变得相对平缓;而侧向力在侧向风速率的迅速增加过程中一直保持着剧烈的增大趋势.

3 结 论

高速行驶的直背式汽车受侧风的影响非常明

显,侧风带来的影响对侧向力最为明显,侧向力从 0 N 增加到 34.81 N,是定常侧风条件下阻力的 2.2 倍、升力的 3.6 倍;升力相对于无侧风条件增加了 2.5 倍,同时,气动阻力也增加了 61%.

侧风的影响作用随着非稳态侧风风速的增加会显著增加,气动力的变化趋势与侧风速率的变化趋势基本相同.阻力增大幅度最为平缓,增大了不到 3 倍;侧向力增大的最为显著,增加了 25 倍左右;而升力处于两者之间,增加了 10 倍左右.

车外流场当侧风增大到一定速率后,会发生较大的变化,尾涡会转变为侧向涡.

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. Automotive aerodynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 李广辉. 带行李架的旅行车的空气动力学计算与分析[D]. 北京:北京航空航天大学, 2004.
LI Guanghui. Aerodynamic computability and analysis of estate car with carrier[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [3] 海贵春 谷正气. 非稳态侧向风对高速汽车操纵稳定性的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2004, 4(7): 637-638.
HAI Guichun, GU Zhengqi. Study of effect of the non-steady state lateral winds on the high-speed vehicle stability[J]. Science Technology and Engineering, 2004, 4(7): 637-638.