文章编号:1674-2974(2019)08-0051-08

DOI: 10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2019.08.007

MIRA 阶背式模型的瞬态流动结构分析

张英朝1+,曹惠南1,朱会2

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,吉林 长春 130022;

2. 吉利汽车研究院 虚拟性能开发部 CFD 科,浙江 宁波 315336)

摘要:应用采用格子玻尔兹曼方法的 PowerFLOW 软件,结合非常大涡模拟方法,对 MIRA 阶背模型进行非稳态流场求解,研究外流场的结构及流动特性.通过分析时均流场中气 流从 A 柱沿着车顶至 C 柱、车尾的流动过程,探索了 C 柱涡、D 柱涡、部分分离涡的结构及流 动机理.通过分析瞬态流场探索了更加精确的随机流动特性,其中时域流场分析部分,发现车 轮、后风窗及车尾区域处流场结构复杂;对频域结果的分析进一步展示了涡的振动频率及其 脉动特点,发现车尾上方振动频率达 12 Hz,侧窗、发动机舱顶部,车顶及车身侧部的振动频 率为 23 Hz,并探究了振动频率的形成机理,压力脉动分析发现底盘上方、车身尾部及后轮区 域存在较大振动能量,推断得出以上区域流场结构复杂,对阻力贡献大.将仿真结果与实验结 果对比分析,二者流场结构相似,涡核的数量和位置都具有较好的一致性,验证了仿真的可 靠性.

关键词:流场;瞬态;流动结构;汽车空气动力学 中图分类号:U270.1;0357.5+2 文献标志码:A

Instantaneous Flow Structure Analysis of MIRA Notchback Model

ZHANG Yingchao^{1†}, CAO Huinan¹, ZHU Hui²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;2. Research Institute of Geely Automotive, Ningbo 315336, China)

Abstract: Applying the PowerFLOW software using the Lattice Boltzmann Method (LBM), and combining with the very Large Eddy Simulation Method (VLES), the unsteady flow field of the MIRA notchback model was solved to study the structure and flow characteristics of the external flow field. By analyzing the process of the flow from the A-pillar along the roof to the C-pillar and the rear of the flow field, the structure and flow mechanism of the C-pillar vortex, D-pillar vortex, and partial separation vortex were explored. The transient flow field was analyzed to explore more precise random flow characteristics. In the time domain flow field analysis part, the flow field structure of the wheel, rear wind window and rear part is complicated. The analysis results of the frequency domain further showed the vibration frequency and pulsation characteristics of the vortex. The vibration frequency of the side window, top of the engine compartment, roof, and side of the body is 23Hz. In addition, the formation mechanism of the vibration frequency was explored. By analyzing the pressure pulsation, it is

* 收稿日期:2018-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11702109,11772140),National Natural Science Foundation of China(11702109,11772140) 作者简介:张英朝(1978—),男,河北石家庄人,吉林大学教授,博士

[†]通讯联系人, E-mail: yingchao@jlu.edu.cn

found that large vibration energy occurs around the chassis, rear part of the vehicle body, and rear wheel area. It is concluded that the flow field structure in the above area is complex and it contributes a lot to the drag. When comparing the simulation results with the experimental results, the flow field structure is similar, and the number and position of the vortex cores are well consistent, which verifies the reliability of the simulation.

Key words: flow field; instantaneous; flow structure; automobile aerodynamics

能源问题不断加剧,环境问题越演越烈,降低 汽车油耗至关重要,因此降低气动阻力成为日益关 注的研究课题.为得到有效的减阻,首要的工作是深 入分析汽车外流场,探索其流场形成机理,因此研 究瞬态流场至关重要.

压差阻力与汽车流场状态密切相关,尤其与汽 车尾流场结构有关.Janssen and Hucho^[1]最先对尾流 进行深入探索.Carr²¹指出阶背式汽车尾部阻力占据 车身总阻力 50%,并发现后风窗处存在横向涡结构. Nouzawa 等人³³通过数值仿真的方法发现后风窗处 存在拱形结构,与 Carr 发现的横向涡结构具有相同 特性,他们还发现从C柱发展出两个拖拽涡结构. Jenkins⁴⁴研究发现,存在另外两个涡结构,与从C柱 发展来的两个涡结构旋向相反,向行李箱中心处延 伸.Gilhome 等人^[5-6]对阶背式轿车周围形成的气流结 构进行了实验研究,对非稳态压力进行了频谱分 析,发现在汽车尾部存在两个主要的频率特性,其 中低频与剪切层的振动有关.Lawson 等人四对 1/3 阶 背式轿车运用时均压力测量法、流态显示和 PIV 实 验结合方法[8-9],提出雷诺数变化对流场的影响.气流 在行李箱盖上再附着以后,形成了分离气泡并且气 流分解为向上游和下游移动的两股气流,通过仿真 分析,人们发现这种回流结构确实存在于尾流中¹¹⁰⁻ ^{13]}.Ahmed 和 Baumert^[14]发现气流在行李箱盖后缘处 发生分离,来自行李箱上下两侧的气流在尾部相互 融合形成分离气泡.

1 基本模型及仿真设置

1.1 基本模型描述

本文以 MIRA 模型为研究对象,如图 1 所示为 MIRA 阶背式模型的基本尺寸示意图,前轴中心定 义为坐标原点,车身纵向向后为 *x* 轴正方向,*x* 轴方 向左侧为 *y* 轴正方向,垂直向上为 *z* 轴正方向,其中 发动机罩与 *x* 轴成 10°,前、后风窗与 *z* 轴成 45°,车 身尾部与 x 轴成 10°的上翘角,两侧侧窗也有 15°的 倾斜角度.



Fig.1 Basic demensions of MIRA notchback model (unit:mm)

1.2 仿真方案设置

EXA 公司为 PowerFLOW 提供了最佳实践标准 及最佳参数设置状态,据此设置本文基本模型方案. 计算域采用基于规则网格模型的风洞几何结构,尺 寸为 85.1 m×49.7 m×37.2 m,速度进口距离车头为 10 个车长,恒定静压出口边界距离车尾为 10 个车 长,宽度为 30 倍的车宽,高度为 26 倍的车高,保证 了阻塞比小于 1% 的要求.体网格是通过设置 Variable Resolution 即 VR 区实现的,VR 区为局部 变量细化区域,共设置 9 个,其中最小网格参数为 2.5 mm,由内向外网格尺寸顺次加倍,体网格数量达 4 243 万,如图 2 所示,边界条件设置如表 1 所示.

根据最佳实践标准,仿真时间应保证气流流过 10个车长(车长 4.165 m,流速为 30 m/s),由网格条 件得出时间步长为 1timestep = 1.485×10⁻⁵ s,由此计 算仿真时间为 1.485 s,总步数设置为 10 万步.



图 2 最终生成的体网格 Fig.2 The final volume mesh

conditions of the simulation model		
Tab.1 Parameter settings for the bound	dary	
表 1 仿真模型的边界条件设置		

类别	参数
风洞入口	入口速度 30 m/s
风洞出口	出口压力 101 325 Pa
壁面	无摩擦壁面
地面	标准壁面
密度	1.204 kg/m ³
运动粘度	$1.49 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
马赫数	0.087 412
雷诺数	2.81e+06

2 CFD 瞬态流动结构分析

2.1 阻力系数

对 MIRA 阶背式模型进行瞬态仿真分析,得到 阻力发展曲线,最终总阻力系数为 0.345.湖南大学 对 MIRA 模型进行过一系列的风洞试验,其实验的 风阻系数为 0.324¹¹⁵,相对误差为 6%,一方面可能是 模型的误差造成的,另一方面湖南大学实验选取的 风速比 30 m/s 略大,其多组风速下的阻力系数平均 以后的结果为 0.324,这也可能导致数据相差较大. 如图 3 所示,车身前部对阻力系数的贡献较小,而 在车尾处阻力系数迅速上升,推测尾流区域存在的 流场较为复杂,尾部流场状态对空气阻力影响更大.





2.2 时均流场仿真分析

为了了解流场形成机理从而分析出阻力形成 原因,对纵向对称面(y=0)截面处的压力系数云图 和流线图进行分析,如图4和图5所示,从图中可 以看到车身各位置的压力系数分布以及车身表面 附近的流体流动轨迹,进而分析气流沿车身的流动 过程:前方来流由于发动机舱前部的阻挡受到阻滞 作用,产生较大的正压,这与阻力发展曲线的开始 部分相对应.随后气流沿车身向四周流动,当流至 发动机盖前缘处由于拐角的存在气流发生分离,气 流流速增大,从而形成较大负压,此现象对应于阻 力发展曲线中车身前部阻力第一次的下降阶段.接 下来气流沿发动机盖平稳流动,当接近发动机盖与 前风窗曲率过渡处时,气流再次受到阻滞而产生正 压,此处会伴有少量的气流分离.气流沿前风窗顺 势而上过渡至车顶时,车身曲率发生很大的改变, 导致气流不能继续紧贴车身表面流动,产生剧烈的 气流分离,形成很大的负压,对应于阻力发展曲线 的第二次下降阶段.随后气流沿车顶平缓流动,随 着车身曲率的再次大幅改变,在后风窗与车顶交汇 处再次发生分离形成较大的负压,阻力增加.从图 4 中还可以看到后风窗处形成了很大直径的涡,是分 离气流经过 C 柱而产生的 C 柱涡,沿着后风窗向下 延伸,形成一对很长的拖拽涡,最终在逐渐远离车 尾处,涡的直径达到最大,其对整车阻力影响很大. 车身底部气流由于模型离去角的存在,在车身底部 曲率过渡处发生分离,同样导致阻力增大.最后气 流在离开车身尾部时在车尾四周又一次发生分离, 再次形成负压,阻力增大.



-0.8 000 -0.5 714 -0.3 429 -0.1 143 0.1 143 0.3 429 0.5 714 0.8 000 图 4 y=0 截面压力系数云图和流线图





前方来流流经 A 柱,一部分气流沿侧窗向后流 动,另一部分沿车身侧面向后发展,其中侧窗上的 气流由于没有向上流动的趋势,因此在车顶处无 A 柱涡结构,但是在车顶和车窗处的边界层内会形成 一定的涡量,如图 5 所示.其中,车身顶部两侧形成 方向相反的涡量,侧窗处形成内外两层相互叠置的 方向相反的涡量,且每层涡存在多个涡核,具体形 状及分布如图 6 所示.沿车身侧面发展的气流有向 下发展的趋势,并形成较大的纵向涡,发展至行李 箱盖处被 C 柱涡吸收而消失.



图 6 侧窗处涡结构 Fig.6 Vortex structure of side window

图 7 为后风窗某截面处的 x 方向上的涡量等高 线图,此截面上主要存在三对涡结构,其中 C 柱涡 沿车身后部发展形成一对很长的拖拽涡³³,在此过 程中与周围其他涡结构相互作用、影响甚至融合, 涡量逐渐增强,对形成阻力贡献量最大.中间两对 分离涡,由车顶气流分离而来,距离 C 柱涡较近的 一对分离涡受到 C 柱涡的影响,产生向中心对称面 流动的趋势,诱导其产生 x 方向的涡量,并与 x 轴成 一定的角度.图 7 中距离 C 柱涡较远的一对分离涡



Fig.7 x-direction vorticity at the rear window

也存在 x 方向涡量, 气流沿后风窗旋转回流至气流 分离初始点时, 气流并非直接向后分离, 而是在气 流惯性的作用下向车身侧面流动然后再分离, 使得 气流在此处形成较小的 x 方向涡量. 图 8 左图中圆 圈区域放大显示为右图, 可以看到气流在此处向车 身侧面流动(箭头方向).

通过以上对两对分离涡的分析,可知分离涡并 非简单的二维流动涡,分离涡主要产生y方向上的 涡量,但由于气流绕x方向旋转以及受到周边其他 涡的作用,因此也会形成一定的x向涡分量,这说明 此处的分离涡结构相当复杂.



图 9 分别为车尾在 y = 0 和 y = 0.6 m 截面处的 流线图.分析可得车尾底部上洗气流产生的分离涡 在车身两侧起主导地位,中间部位则是由带有较大 能量的下洗分离涡占据主导.由于 MIRA 阶背模型 车底尾部存在的上翘角,使得尾部流场结构中出现 一对与 C 柱涡类似性质的纵向涡——D 涡,D 涡形 成是因为车身两侧气流的剪切层的分离作用,车身 底部上翘角分离出的剪切气流与流经车身两侧气 流在车身尾部相互融合,形成一对与 C 柱涡旋向相 反的涡结构,并沿上翘角向上延伸,与 C 柱涡相互 作用,由于车身尾部 C 柱涡占据中间位置,所以 D 涡相对于 C 柱涡更偏向于外侧.

2.3 瞬态流场仿真分析

分别从时域和频域两方面入手来分析 MIRA 阶 背式模型的瞬态流场仿真结果.

时域分析:(a)在湍流场中,选取测量速度分量 的标准差是最基本的方法,速度分量的标准差也称 为湍流分量的强度(在无量纲状态下时),因而首先 采用此方法.图 10 中(a)(b)(c)三幅图分别为不同 标准差(Stdev Vx)0.1、0.15、0.2(也称 10%,15%, 20%)下流场内 x 方向上的速度等值面,标准差越大 表示当地速度脉动越大,可以看出车轮和车身尾部 速度脉动较高.





(a)标准差 0.1
 (b)标准差 0.15
 (c)标准差 0.2
 图 10 分别为 0.1, 0.15, 0.2 标准差下的 x 方向速度等值面
 Fig.10 Iso-surfaces for the standard deviation of velocity
 in the x-direction for 0.1, 0.15, and 0.2

(b)抽取整个流场中总压力系数为零的点,即 总压为零的等值面.图 11 为车身表面总压为零等 值面,其包括的区域面积越大说明分离现象可能越 严重,能量损失越多,阻力系数越大.图中总压力系 数为零的区域主要位于车轮、后风窗及车尾处,说 明这些位置能量损失最多,分离现象严重,阻力也 会相应更大.



Fig.11 An iso-surface of total pressure coefficient with 0

(c)在复杂流场中,通过显示特定负值 λ_2 等值 面来同时描述多个耦合的涡结构,它能清晰地显示 各位置分离涡的涡核结构,同时能完整地捕捉到游 离于流场中的杂乱小涡核结构.通常取 $\lambda_2 = -50$ 等 值面表示涡核位置,如图 12 所示,涡核主要集中在 车轮以及车身尾部区域,尤其是车身尾部涡核密集 且杂乱,而且涡量较大,其位置也与上文中提到的 C 柱涡和 D 涡的位置相对应.



频谱分析:车身表面共设置9个监测区域,分 别为发动机舱顶部和侧部、前、后风窗、侧窗,车顶、 车身侧面、行李箱盖表面以及尾流区域.通过采集 流场监测点速度并对其进行傅里叶变换,获得其频 谱,从而观察流经车身表面气流的振动频率.

通过对监测点的速度进行频谱分析,发现在发动机舱上部、车顶、侧窗和车身侧面处的涡结构存在明显的振动频率,且为同一峰值振动频率f=23 Hz,取其中一点的频谱分析图,如图 13 所示,图中明显的峰值出现 3 次,频率大致依次为 23 Hz、46 Hz 和 69 Hz,恰恰后面的两个频率都是 23 Hz 的整倍数,因此可以推断出它们是同一个涡结构的脱落频率.这些振动频率可能是车身侧面边界层内的涡结构振动产生的,由于车身侧面监测到振动频率,而发动机舱侧部未监测到振动频率,这说明车身侧面的振动频率可能是由于气流在 A 柱发生分离后形成的.



Fig.13 Vibration frequencies of vortex structures on the roof, top of the engine compartment, side windows, and body sides

另外,车身尾部气流脱离车身后,在车尾很长的侧上方区域内(图 14 圆点区域)发现明显的振动频率,频率值为 12 Hz,结合时均流场分析,推断尾部侧上方区域内的振动频率可能是 C 柱涡附近的不稳定涡结构振动形成的.



频谱分析可以用来表示流场中车身表面各位 置的压力脉动,压力脉动的单位为分贝(dB),分割 压力频率带宽,通常使用低频数据,这样可以使低 频结果可以被完整的得到.图 15(a)(b)是在不同倍 频带宽(11~22 Hz、22~44 Hz)下的车身表面压力脉 动结果,其中车轮、车身侧面下边缘、C柱周围、车顶 边缘以及车尾行李箱盖板处压力脉动值较大,光谱 能量值高,有较大水平的振动能量,进而可以推断 以上位置处的流场结构应该很复杂,涡结构间互相 影响,对阻力贡献较大.



2.4 基本模型仿真与实验对比分析

本课题组先前对 1/8MIRA 模型(阶背式车型、 快背式车型、方背式车型和皮卡车型)分别进行了 瞬态流场 PIV 试验^[16],无量纲化车体尺寸后,探索瞬 态流场结构. 本文将仿真结果与 PIV 试验选取的具 有代表性的截面处的流场数据对比,重新定义坐标 原点,位于车身尾部上沿对称中心,选取 x = -0.16 m,x = 0.4 m,z = 0.256 m 三个截面上的涡量进行对 比.如图 16 所示,x = -0.16 m 处截面,仿真结果和试 验数据有较高的对应性,都可以看到C柱涡和分离 涡在 x 方向存在分涡量,两对涡相对位置大体对应, 即 C 柱涡均处于分离涡的侧下方,另外涡结构的旋 向一致. 图 7 介绍了三对涡,C 柱涡和两对分离涡, 涡量图中只显示 C 柱涡和分离涡,中间最小的一对 涡没有被捕捉到,因为中间那对涡为不稳定涡结 构,产生在车顶气流发生分离初期,在随后的发展 过程中,被周围涡量较大的涡结构影响作用后逐渐 消失.

图 17 为 *x* = 0.4 m 截面的流场数据,存在三对反向旋转的涡结构,实验和仿真结果均有体现,在

车身尾部侧面存在两对旋向相反的涡结构,二者一上一下,上部的涡结构涡量明显是下部涡结构涡量 的2倍左右,以此推断其是由C柱涡与侧向分离涡 相互作用形成的,对阻力贡献最大.下部的涡结构 推断来自于D涡和沿上翘角分离出来的涡相互作 用而成,对阻力贡献比较大.而车身尾部中间位置 存在一对涡量直径很小的涡结构,旋向相反.





图 16 x=-0.16m 处仿真结果与实验结果 x 方向涡量对比 Fig.16 Comparison of simulation results and experimental results at x=-0.16 m in the x-direction





图 17 x = 0.4 m 处仿真结果与实验结果 x 方向涡量对比 Fig.17 Comparison of *x*-direction vorticity between simulation results and experimental results at *x* = 0.4 m

取车尾高度 z = 0.256 m 处截面对比 z 方向上 涡量,如图 18 所示,流场结构相似,从两侧窗流过 来的气流由于在后风窗处存在压力差而形成一对 漩涡结构.

通过以上对不同截面处的涡量对比分析可知, 仿真与 MIRA 模型实验的流场结构相似,涡核的数 量和位置都具有较好的一致性,说明仿真具有可 靠性.



图 18 z = 0.256 m 处仿真结果与实验结果 z 方向涡量对比 Fig.18 Comparison of z-direction vorticity between simulation results and experimental results at z = 0.256 m

3 结 论

1)时均流场仿真分析:车身侧面气流到达 C 柱 时形成 C 柱涡,沿后风窗向后向下延伸,形成一对 很长的拖拽涡,旋向相反,最终在逐渐远离车尾处 直径达到最大,对阻力影响很大;在侧窗处存在内 外两层多个涡核且涡量相反的涡结构;在车顶处气流分 离,分离涡内主要存在横向涡量,但由于受强烈的 C 柱涡影响,形成一定的 x 方向涡分量;在车尾上、下 沿处分别形成分离涡,其中车尾上沿形成的分离涡 在车尾中间起主要作用,车尾底部沿上翘角产生的 D 涡,与 C 柱涡旋向相反,且与 C 柱涡相互作用,相 对于 C 柱涡更偏向于外侧.

2)瞬态流场仿真分析:车轮、后风窗以及车尾 处存在复杂的流场结构,在瞬态流场中观察到的是 尺寸相对于时均流场结果较小、不稳定的涡核,涡 结构之间相互影响.监测点的频谱分析发现,车顶、 发动机舱顶部、侧窗和车身侧面主要振动频率为23 Hz;车身尾部侧上方区域存在12 Hz 振动频率;通过 对压力脉动分析得出结论,车尾和车轮以及车身侧 面下沿处存在较大振动,可推断这些位置处的流场 较为复杂.

3)本文通过对 MIRA 阶背式模型的仿真与 PIV 瞬态流场实验观测的流场结构进行对比分析,得到 仿真与实验的流场结构相似,涡核的数量和位置都 具有较好的一致性的结论,说明仿真的可靠性.

参考文献

- [1] HUCHO W H, JANSSEN L J, EMMELMANN H J. The optimization of body details-A method for reducing the areodynamic drag of road vehicle [J]. SAE Transaction, 1976, 85(2): 865–882.
- [2] CARR G W. Potential for aerodynamic drag reduction in car design [C]// Proceedings of an International Conference on Impact of Aerodynamics on Vehicle Design. London: Technological Advances in Vehicle Design, Special Publication SP, 1983;4-56.
- [3] NOUZAWA T, HIASA K, NAKAMURA T. Analysis of wake pattern for reducing aerodynamic drag of notchback model [C]//SAE paper 900318,1990.

- [4] JENKINS L N. An experimental investigation of the flow over the rear end of a notchback automobile configuration [C]//SAE paper. 2000-01-0489.
- [5] GILHOME B R, SAUNDERS J W, SHERIDAN J. Time averaged and unsteady near -wake analysis of cars [C]// SAE paper. 2001-01-1040.
- [6] GILHOME B R. Unsteady flow structures and forces over/on the rear window and boot lid of sedan automobiles [C]//Progress in Vehicle Aerodynamics III–unsteady Flow Effects. 2002.
- [7] LAWSON N J, GARRY K P, FAUCOMPRET N. An investigation of the flow characteristics in the boot deck region of a scale model notchback saloon vehicle [J]. Automobile Engineering, 2007, 221: 739-754.
- [8] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Ann Rev Fluid Mech, 1991, 23:261-304.
- [9] PICKERING C J, HALLIWELL N A. Speckle photography in fluid flows: signal recovery with two step processing [J]. Appl Optics, 1984,23(8):1128.
- [10] RAWNLSEY S M,TATCHELL D G. Application of the PHOEMICS code to the computation of the flow around automobiles [R]. London: Concentration Heat and Momentum, 1986.
- [11] HUTCHINGS B J, PIEN W. Computation of three –dimensional vehicle aerodynamics using FLUENT/BFC [C]//Proceedings of the Second International Conference on Supercomputing Applications in the Automotive Industry.1988:233-255.
- [12] KATAOKA T, CHINA H, NAKAGAWA K, et al. Numerical simulation of road vehicle aerodynamics and effect of aerodynamic devices[C]//SAE paper. 1991:151—163.
- [13] HAJILOO A, WILLIAMS J, HACKETT J E, et al. Limited mesh refinement study of the aerodynamic flow around a car-like shape [C]//SAE paper.1996:63-73.
- [14] AHMED S R, BAUMERT W. The structure of wake flow behind road vehicles [C]//Aerodynamics of Transportation – ASME–CSME Conference. 1979:93–103.
- [15] 伍奕桦. 非光滑单元体结构对车身气动特性的影响分析[D]. 长沙:湖南大学机械与载运工程学院,2014:26.
 WU Y H. The analysis of non-smooth unit structure effects on vehicle aerodynamic characteristic [D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2014:26. (In Chinese)
- [16] 王子杰. 典型轿车瞬态气动特性实验研究[D].长春:吉林大学 汽车工程学院,2016:35-47.
 WANG Z J. Experiment investigation on transient aerodynamics characteristics of typical car reference model [D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2016:35-47. (In Chinese)