

MIRA 模型组尾部造型风洞试验研究

谷正气^{1,2}, 王师¹, 仇健¹, 张清林¹, 胡彭俊¹, 陈细军³

1. 湖南大学; 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082
2. 湖南工业大学机械工程学院, 湖南株洲 412007
3. 三一重工股份有限公司, 长沙 410100

摘要 汽车尾涡是整车气动阻力主要来源之一, 而汽车尾涡直接受尾部造型的影响。因此, 研究车身尾部造型对气动阻力的优化具有重要意义。以 MIRA 标准模型组为研究对象, 通过风洞试验, 运用表面压强测量技术和粒子图像测速 (PIV) 技术, 得到 MIRA 模型组各模型的阻力系数以及车身纵对称面表面压强分布和尾部速度流场, 并对此进行了定性、定量分析, 获得了模型组中各模型阻力系数变化与车身尾部造型的关系。试验结果表明, 在模型组中, 斜背的阻力系数最小, 阶梯背较大, 直背最大, 且这 3 种模型的尾部负压区、尾涡核距车身距离、尾涡扩散范围依次呈现增大趋势。

关键词 空气动力学; 风洞试验; MIRA 模型组; 尾部造型

中图分类号 U464.138+2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.08.011

Wind Tunnel Tests of MIRA Model Group for Study of Vehicle's Rear Shape

GU Zhengqi^{1,2}, WANG Shi¹, QIU Jian¹, ZHANG Qinglin¹, HU Pengjun¹, CHEN Xijun³

1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body; Hunan University, Changsha 410082, China
2. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan Province, China
3. SANY Group Pumping Institute, Changsha 410100, China

Abstract Automobile tail vortex is one of the main sources of vehicle's aerodynamic drag, and it is directly related to the shape of the rear vehicle body. MIRA standard model group was chosen in our study. Surface pressure measurement technique and Particle Image Velocimetry (PIV) technology were used in the wind tunnel tests to obtain the drag coefficient of the model group. The surface pressure distribution contour and the tail flow field on the longitudinal symmetry plane were obtained for qualitative and quantitative analyses of the model group and the relationship between the aerodynamic drag and the rear vehicle body shape is obtained. It is shown that: in the model group, the slope back model has the smallest resistance coefficient, the stepped back model has a slightly larger coefficient, and the straight back model has the largest; At the same time, in the tail negative pressure area, the distances between the tail vortex core and the vehicle body, and the tail vortex diffusion area see a tendency of increasing among these models.

Keywords aerodynamics; wind tunnel experiment; MIRA model group; rear vehicle body modeling

0 引言

汽车空气动力学是空气动力学的一个重要分支, 是空气动力学和车辆工程的交叉学科。随着中国汽车工业的发展以及节能减排政策的提出, 汽车空气动力学的作用日益突出。

气动阻力直接影响汽车的动力性和燃油经济性, 它由压差阻力、摩擦阻力、诱导阻力、干涉阻力和内流阻力构成^[1]。其

中压差阻力约占总气动阻力的 50%~65%, 压差阻力有时又称形状阻力, 这是因为其大小直接取决于物体的形状。要减小压差阻力, 主要依靠尾部造型的改变, 因为它是形成压差阻力的主要因素。

典型的尾部造型有斜背式、阶梯背式和方(平)背式。由于后部造型与气流状态的复杂性, 一般很难确切断言尾部造

收稿日期: 2010-12-27; 修回日期: 2011-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975083); 湖南省科技攻关计划重点项目(2009JT1014); 教育部长江学者与创新团队发展计划项目(531105050037); 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(61075001)

作者简介: 谷正气, 教授, 研究方向为汽车空气动力学、整车性能等, 电子信箱: guzhengqi63@126.com

型式样的优劣,但从理论上说,小斜背式(角度小于 30°)具有较小的气动阻力系数。

要研究车身尾部造型与气动阻力的变化关系,需要分析尾涡对气动阻力的影响,对此,国内已经进行了大量仿真分析^[4],但是很少得出尾涡与气动阻力之间变化的实质结论,并且缺乏试验验证。鉴于此,本文以湖南大学 HD-2 风洞为平台,利用国际标模 MIRA 模型组进行车尾气动特性试验研究。对比了 MIRA 模型组的阻力系数,分析了车身纵对称面上的压强大小、尾部速度流场的流线与云图,阐述了不同尾部造型式样导致汽车阻力系数大小变化的原因,为今后尾部造型优化提供依据。

1 试验设备与模型

1.1 试验风洞与气动六分力天平

在湖南大学风工程试验研究中心 HD-2 风洞中进行汽车模型风洞试验。该风洞是双列单回流闭式,试验段的横截面为矩形,宽 3m,高 2.5m,面积 7.5m^2 ,高速试验段长 17m,最大风速 58m/s ,收缩比 3.2。风洞洞体由风扇段、扩散段、收缩段、低速试验段、高速试验段、拐角导流片、稳定段、蜂窝器等部分组成。风洞动力系统由功率 620kW 的直流电机驱动,风扇系统由 9 片玻璃钢桨叶组成,调速系统采用西门子 6RA7090 型直流调速装置。风洞风速控制、数据采集与试验监视基本集中在主控制室,以实现全自动化系统控制。表 1 为风洞汽车试验段的主要技术参数。图 1 为 HD-2 风洞汽车试验段。

表 1 风洞汽车试验段主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of wind tunnel car testing

名称	数据	备注
最大风速	58m/s	空风洞
速度不均匀性	$\leq \pm 1\%$	占截面积 76% 以上
方向不均匀性	$\Delta\alpha \leq 0.5^\circ$ $\Delta\beta \leq 0.5^\circ$	五孔探针测量
紊流度	$\leq 0.2\%$	热线风速仪测量
高速试验段轴向静压梯度	0.00011m^{-1} 0.00016m^{-1}	风速 45m/s 时 风速 30m/s 时



图 1 风洞汽车试验段

Fig. 1 Wind tunnel car testing

天平是气动力测量的主要装置,也是风洞中最主要的测量装置之一,其功能为测量作用在汽车或汽车模型上的气动力和气动力矩。本次试验的天平为六分量浮框式应变汽车专用天平(图 2)。



图 2 汽车专用天平

Fig. 2 Vehicle special balance

1.2 车身测压设备和压力采集系统

对车身表面进行测压时,采用的设备有电子压力扫描阀、塑料套筒、软管和测压钢管。其中电子压力扫描阀采用 PSI 公司生产的 DTCnet 压力扫描阀,该系统由电子扫描压力传感器模块、测压点选通接口板、A/D 变换板、电子扫描静态测压系统的压力控制单元、数据采集控制单元和内存为 512MB 的计算机组成。每个测压模块含有 64 个压阻传感器,通过管口分别与模型表面测压点软管连接。当测压模块处于测量状态时,由计算机上的软件程序控制测压点选通接口,按规定的采样频率和采样持续时间分别与各测压模块不同传感器相连,此时的传感器电压信号和参考压力信号先经低通滤波器处理,变换后存入计算机内存中,待一个工况的全部数据测完后,再存入计算机硬盘中等待处理。

1.3 粒子图像测速系统

粒子图像测速(PIV)系统主要由激光光源和成像光路、电荷耦合器件(CCD)相机、直接反映流场特性的示踪粒子、图像分析处理 4 部分组成。

粒子图像测速的基本原理是^[5]:在流场中散播示踪粒子,用脉冲激光片光源照射所测流场区域,在 Δt 时间内(要求 Δt 足够小)通过连续两次或多次曝光,粒子的图像被记录在底片上或 CCD 相机上,摄取该区域粒子图像的帧序列,并记录相邻两帧图像序列之间的时间间隔 Δt ,进行图像相关分析,识别示踪粒子图像的位移 ΔS ,根据速度的定义 $V=\Delta S/\Delta t$,就可以得到流体的运动速度,进一步处理分析就可得到整个流场的速度场、涡量场、流线等流场的特性参数分布。图 3 为 PIV 系统原理图。

在实际应用中,对粒子图像进行分析时总是将图像分割成大小适中的询问区域,利用图像处理算法求得粒子图像在已知时间间隔内的位移 ΔX 和 ΔY ,由粒子图像和实际流场的放大系数 M ,可算出实际流场中对应区域的位移 Δx , Δy ,进而得出速度 u , v 。计算公式为

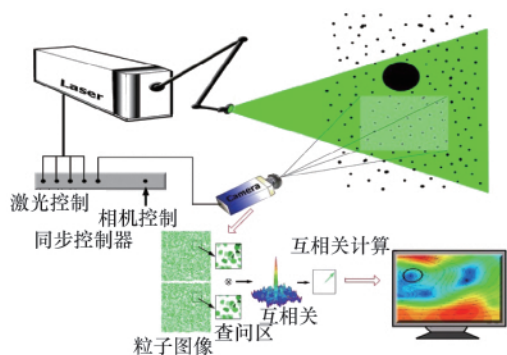


图 3 PIV 技术原理

Fig. 3 Principle of PIV measurement technique

$$\Delta x = \Delta X / M \quad \Delta y = \Delta Y / M$$

$$u = \Delta x / t \quad v = \Delta y / t$$

1.4 MIRA 模型

试验采用 MIRA 标准模型组,模型几何缩比均为 1/3。模型组用树脂加工而成,在车头及车身不变的情况下,更换不同尾部,分别模拟阶梯背、斜背和方背 3 种尾部结构的乘用车。模型组按照国际 MIRA 模型标准尺寸制定,统一的试验模型保证了数据的可比性^[6]。图 4 为阶梯背 MIRA 模型。



图 4 湖南大学阶梯背 MIRA 模型

Fig. 4 Stepped back MIRA model of Hunan University

2 试验结果与分析

2.1 阻力系数结果及对比分析

试验为零横摆角下的阻力系数,试验风速均取 30m/s,避免了雷诺数对测量的影响,路面模拟为有抽吸。通过试验得到 HD-2 风洞 MIRA 模型的阻力系数,并与斯图加特大学 IVK 风洞的 MIRA 模型阻力系数^[7]进行对比,结果如表 2 所示。由表 2 可知,斜背 MIRA 模型阻力系数为 0.2775,明显优

表 2 HD-2 风洞与 IVK 风洞阻力对比表

Table 2 Resistance Comparison between HD-2 wind tunnel and IVK wind tunnel

模型	HD-2 风洞阻力系数	IVK 风洞阻力系数	相对误差/%
斜背	0.2775	0.2795	-0.716
阶梯背	0.3220	0.3204	0.499
方背	0.3842	0.3874	-0.826

于阶梯背模型的 0.3220 和方背模型的 0.3842。3 种不同模型的相对误差最大为 0.826%,可见 HD-2 风洞试验数据具有很高的可信度。

2.2 压强测量结果与分析

在测量 MIRA 模型表面压强时,在模型纵对称面共设 46 个测压点,在模型前部、模型尾部和发动机罩与挡风玻璃连接处布置了较密集的测点,而其他位置布置较稀疏的测点,测压点分布如图 5 所示,测压设备连接如图 6 所示。

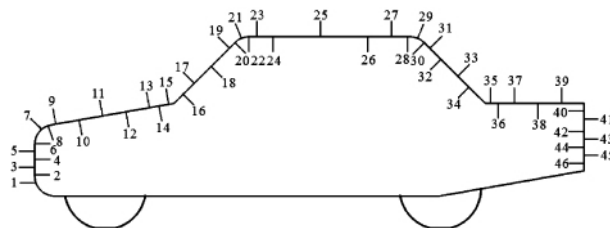


图 5 MIRA 模型纵对称面测压点分布

Fig. 5 Pressure measurement points on the longitudinal symmetry plane of MIRA model



图 6 测压设备连接

Fig. 6 Pressure measurement equipment arrangement

根据试验数据,处理后得到 MIRA 模型纵对称面表面压强(相对压强平均值)分布如图 7 所示,图中压向模型表面的压力为正压,从模型表面向外的压力为负压,剖面线的长短表示压强的大小。

由图 7 可以看出,由于车头造型不变,3 种尾部 MIRA 模型的车头压强变化趋势和大小基本相同。当气流到达 MIRA 模型车头部时,气流受到阻滞,因此模型车头部基本上是正压区,且正压最大值位于测点 4 附近,即车牌安装处。气流受阻滞之后,流向模型上方的气流在车头上缘出现局部分离流,而此时气流速度较大,因而在此区域将出现负压峰值,位于测点 9 附近,然后气流又重新附着于发动机罩上,气流减速,表面压强逐渐转化为正压。当气流继续流向挡风玻璃时,在发动机罩和挡风玻璃连接的凹角处同样发生流动分离和再附着现象,但由于此处气流受阻,流速较慢,因而在此处形成较大正压区,且该区正压峰值位于测点 16 附近。在气流达到挡风玻璃上缘时,又形成一个负压区域,且负压峰值出现

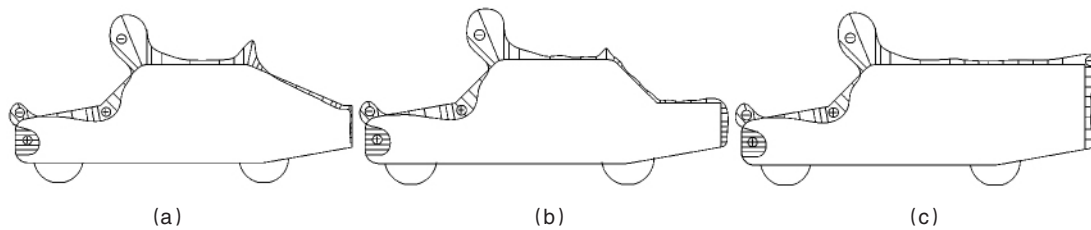


图7 斜背(a)、阶梯背(b)和方背(c)模型纵对称面表面压强

Fig. 7 Surface pressure on longitudinal symmetry plane of slope back (a), stepped back (b) and straight (c) model

在测点 21 附近,之后,气流流动较为顺畅,流速较快,形成负压区^[8]。而不同的尾部造型,当气流流至车顶末端时,斜背的气流最为顺畅,负压也最大,气流马上又附着在后窗上,流速减慢,能量损失最少,斜背模型尾部甚至出现局部正压区;阶梯背由于后窗倾角较大,气流在此处出现分离,并产生涡流,整个尾部均处于负压区;方背模型气流顺车顶流过,最后在尾部形成比较大的负压区。因为尾部的负压是压差阻力中构

成的一个重要部分,这样可以直观了解到为什么斜背阻力系数最小,而方背最大。

2.3 PIV 试验结果和分析

试验中测量区域为模型纵对称面(xy 平面)的尾部区域,为了能清晰了解 MIRA 模型组尾涡,测量的坐标系位于从模型的顶盖后缘靠前的位置起一直到车尾后 600mm 处,具体如图 8 所示。

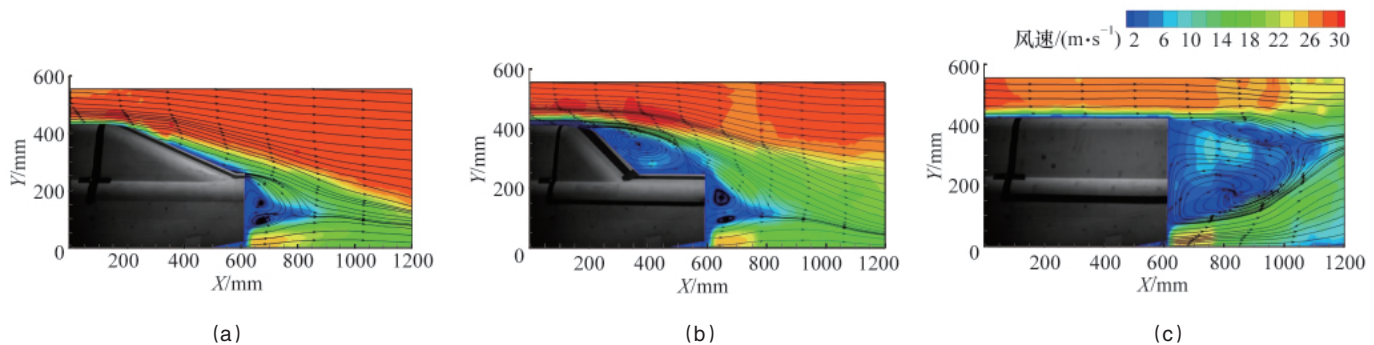


图8 斜背(a)、阶梯背(b)和方背(c)模型纵对称面速度流场

Fig. 8 Flow field on longitudinal symmetry plane of slope back (a), stepped back (b) and straight (c) model

由图 8 可以看出,汽车尾部的流场涡的形状、大小、位置随着尾部造型的不同而变化,且流场基本上可分为两部分,即由背部俯冲的“下洗”剪切气流和从车底部“上洗”剪切气流组成。为了便于分析,将靠近尾上部边缘顺时针旋转的涡定义为涡 A,下边缘逆时针旋转的涡定义为涡 B^[9-10]。

比较 3 组尾部造型速度流场图,可以看出,斜背和阶梯背尾部的涡核位置基本相似,涡 A 均位于 $X \approx 670\text{mm}$ 处,斜背涡 B 也位于 $X \approx 670\text{mm}$ 处,阶梯背涡 B 位于 $X \approx 680\text{mm}$ 处,离车身尾端很接近,但是方背涡 A 的涡核位于 $X \approx 900$ 处,方背涡 B 位于 $X \approx 850\text{mm}$ 处。对比各模型的阻力系数(表 3),总体来说,随着涡核位置的靠后,模型的阻力系数逐渐增大。斜背和阶梯背虽然涡核位置十分接近,但阶梯背后窗处由于气流分离产生的额外的涡而导致阻力系数比斜背大。

由图 8 所示 3 种尾部模型流场涡所延伸的长度来看,斜背尾涡边界坐标 $X \approx 860\text{mm}$,阶梯背尾涡边界坐标 $X \approx 890\text{mm}$,方背尾涡边界坐标 $X \approx 1150\text{mm}$,可知斜背和阶梯背尾涡扩散直径都很小,方背尾涡扩散范围明显大得多。由于涡的边界与周围气流有较大的相对速度,在气体黏性作用

下,涡的边界与周围空气产生较大剪切力作用,形成一定厚度的边界层^[11]。在这种边界层内存在着剧烈的能量交换,而能量耗散量会随着边界层区域的缩小而减少,从能量角度分析,斜背模型尾涡边界层区域最小,阻力最小,阶梯背其次,方背尾涡边界层区域最大,因此阻力系数最大。

3 结论

在汽车模型风洞中,利用气动六分力天平、测压系统、PIV 系统,对国际标模 MIRA 模型组气动阻力系数、车身压强、尾部对称面内的流场进行测量。通过所测试验数据,并对其速度场进行分析,得出不同尾部造型的 MIRA 模型,呈现不同形态的尾涡,且气动阻力系数也有很大差别的结论。

(1) 斜背比方背气动阻力系数小了 27.7%,充分论证了汽车尾部造型对其气动阻力系数影响的重大性。

(2) MIRA 模型组车身后部的纵对称面表面压强图基本不随尾部造型的变化而变化,影响气动阻力系数的是车尾压强大小。如何让气流沿后窗平滑通过,形成稳定的静涡流,而不让气流分离,将是车尾造型减阻优化的重点。

(3) MIRA 模型组气动阻力系数是由于汽车尾涡涡核的坐标以及涡的扩散范围不同而产生了差异。总体来讲, 涡核距车身尾端越远, 涡的扩散范围越广, 气动阻力系数越大。

(4) 可以考虑增加某种附加装置优化尾涡坐标及尾涡扩散范围, 从而达到降阻的目的。这对于减阻优化也具有一定借鉴意义。

参考文献 (References)

- [1] 谷正气. 汽车空气动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Gu Zhengqi. Car acta aerodynamic [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 刘长虹, 黄虎. 有限元法对汽车尾部外形的流体动力学分析方法探讨 [J]. 机床与液压, 2006(8): 197-198.
Liu Changhong, Huang Hu. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006(8): 197-198.
- [3] 傅立敏, 刘锡国. 典型汽车尾流结构的研究 [J]. 汽车工程, 1996, 18(6): 343-347.
Fu Limin, Liu Xiguo. *Automotive Engineering*, 1996, 18(6): 343-347.
- [4] 康宁, 乔军平. 斜背式轿车气动特性和三维分离流的研究 [J]. 车辆与动力技术, 2006(1): 19-21.
Kang Ning, Qiao Junping. *Vehicle & Power Technology*, 2006(1): 19-21.
- [5] 汪洋. 用 PIV 技术研究汽油机的缸内流场 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
Wang Yang. The research on cylinder flow field in gasoline engines by PIV technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [6] SAE. Surface vehicle information report [R/OL]. [2010-12-20]. <http://bzwxw.com/soft/UploadSoft/new5/SAE-J2344-1998.pdf>.
- [7] 宓加斌, 林志兴. TJ-2 风洞汽车模型试验的修正方法 [J]. 汽车工程, 2002, 24(5): 371-375.
Pang Jiabin, Lin Zhixing. *Automotive Engineering*, 2002, 24(5): 371-375.
- [8] 彭亚美. 中气轿车气动特性模型风洞试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
Peng Yamei. Experimental investigation on aerodynamic characteristics of Zhongqi car model in wind tunnel [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [9] Jinseok K, Sungcho K, Jaeyong S. PIV measurements of the wake behind a rear body of a road vehicle [C]. 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, Sept 21, 2005.
- [10] McCutcheon G, McColgan A H, Grant I. Wake studies of a model passenger car using PIV [C]. Motorsports Engineering Conference & Exhibition, Indianapolis, USA, Dec 2, 2002.
- [11] 陈细军, 谷正气, 何忆斌, 等. PIV 技术在汽车模型风洞中的应用 [J]. 汽车工程, 2009, 2(31): 170-174.
Chen Xijun, Gu Zhengqi, He Yibin, et al. *Automotive Engineering*, 2009, 2(31): 170-174.

(责任编辑 刘志远)



第九届中国智能机器人学术研讨会

时间: 2011年11月11-13日 地点: 深圳

主办: 中国人工智能学会

电 话: 027-87556242
 电子信箱: liwei0828@mail.hust.edu.cn
 网 址: caai.cn/contents/48/2358.html

