

汽车后视镜流场的试验与数值研究

李启良¹, 杨志刚², 陈枫²

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 201804; 2. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 为了解后视镜的流场特性, 以风洞试验与数值计算为手段, 对后视镜的压力场与速度场进行测量和计算, 并将测量结果与数值计算结果进行比较, 评估两者的异同. 数值计算结果与风洞试验结果的平均静压与速度、脉动速度的标准差以及自功率谱密度的一致性表明, 所使用的数值计算方法具有可行性, 能够较为真实地反映出后视镜的流场特性, 数值计算结果与风洞试验结果能够相互验证. 试验段近地面的平均静压变化反映出后视镜尾部的流动状态, 能量耗散最为强烈的地方出现在远离后视镜约 1.0 倍后视镜直径的区域, 回流区域影响范围可达 3.0 倍后视镜直径. 后视镜尾部带有强烈的脉动速度, 剪切层侧的速度脉动比其他区域大, 个别测点脉动速度标准差数值可达来流速度的 0.3 倍, 它们的主要能量集中在中低频区域.

关键词: 汽车后视镜; 流场; 风洞试验; 大涡模拟

中图分类号: U 467.1

文献标识码: A

Experimental and Numerical Investigations of Flow Field of Automotive Rear View Mirror

LI Qiliang¹, YANG Zhigang², CHEN Feng²

(1. College of Aerospace Engineering and Mechanics, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Pressure and velocity fields of flow over an outside rear view mirror are investigated by wind tunnel test and numerical simulations, and their results are compared. The agreement of average static pressure and average velocity, standard deviation and power spectral density of fluctuating velocity between the results from wind tunnel test and the results from numerical simulations indicates that test results and numerical results validate each other, and the numerical simulation approach is feasible and can reflect the flow field characteristics of mirror. The features of the flow field downstream the mirror, as reflected by the average static

pressure distribution of test section floor, show that the position where the energy dissipation is the strongest is located at one diameter distance downstream of the mirror, and the recirculation zone can affect the flow field three diameters downstream of the mirror. High intensity fluctuating velocity can be found at the wake of mirror and their energy are focus on low and middle frequency. The strength of fluctuating velocity at the shear layer region is larger than other regions. At the shear layer region, the $\sigma(u')/u_{\text{进}}$ value can reach 0.3 at certain point.

Key words: automotive rear view mirror; flow field; wind tunnel test; large eddy simulation

后视镜自身结构以及在整车的特殊安装位置, 使后视镜的流动问题逐渐得到重视. 风洞试验和数值计算成为后视镜流动问题的 2 种主要研究手段, 并在近 10 年得到广泛的应用, 使后视镜流动问题的研究逐步深入.

早在 20 世纪 90 年代初, 国外就开始通过修改镜框和支架形状参数来研究后视镜气动阻力的影响因素^[1]. 近年来, 对后视镜流场脉动问题等后视镜非定常流动问题有所涉及. 文献[2]通过测量后视镜镜面压力脉动特性发现, 后视镜镜面的脉动压力分布并不均匀, 压力脉动的最大值出现在接近镜面下边缘的中心处, 最小值出现在镜面下边缘的拐角处. 文献[3]作者测量了 2 个后视镜尾部平均压力和脉动压力, 并使用 PIV (particle image velocimetry) 测量了尾部速度脉动特性, 发现后视镜尾部平均静压系数对雷诺数相当敏感, 不同后视镜形状导致其尾部脉动压力差异较大. 国内在这方面重视不够, 尚未见相关文献报道. 普通后视镜流动问题数值计算可见文献[4-5], 文献作者基于定常流动与非定常流动

收稿日期: 2010-04-07

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203)

第一作者: 李启良(1980—), 男, 博士后, 主要研究方向为汽车空气动力学与气动噪声. E-mail: lq10804@hotmail.com

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

的计算方法,分别考察了后视镜各种参数对其气动阻力和压力脉动的影响.

后视镜的流动机理是揭开后视镜产生气动噪声的关键所在.国外给出一些试验观察的结果,但结论的正确性尚有待进一步探讨,国内在这方面基本空白.在数值计算方面,国内外对后视镜非定常流动数值计算所做工作仅处于方法的评估阶段,对如何描述后视镜非定常流场尚未给出合理的答案.为此,本文使用风洞试验与大涡模拟方法研究汽车后视镜压力与速度特性,结合风洞试验结果与数值计算结果探讨后视镜的流动机理,旨在加深对后视镜流动机理的认识.

1 试验与数值计算方法

1.1 试验方法

1/2 缩比的普通后视镜与桑塔纳 3000 后视镜的流场测量在图 1 所示的模型风洞中进行.模型风洞风速由风机电机控制,其最大喷口风速为 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.考虑到模型风洞运行和传感器量程等因素,选取 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的喷口风速进行试验.

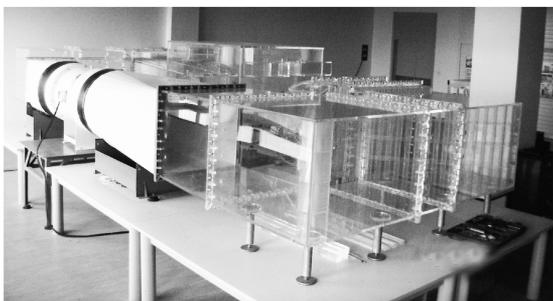
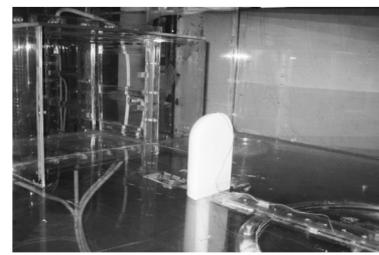


图 1 模型风洞示意图

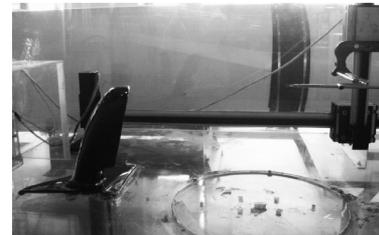
Fig.1 Schematic of model wind tunnel

试验使用静压管对后视镜表面以及试验段近地面进行多点静压测量,并利用三维热线风速仪对后视镜尾部进行多点速度测量,如图 2 所示.由图 2 可见,普通后视镜由半圆柱和四分之一球组成,圆柱直径 D 与高 H 均为 0.1 m .桑塔纳 3000 后视镜形状较为复杂,其镜框宽约为 0.22 m ,高约为 0.12 m .

在试验过程中,首先将风洞收集口角度调整为 15° ,因为该角度对应试验段流场质量较好^[6].然后,按照预先设定好的测点位置对 1/2 缩比的普通后视镜表面与试验段近地面进行静压测量,对后视镜尾部进行速度测量;图 3a 为部分测点位置.在桑塔纳 3000 后视镜试验中,对试验段近地面进行静压测量,尾部进行速度测量;图 3b 为部分测点位置.



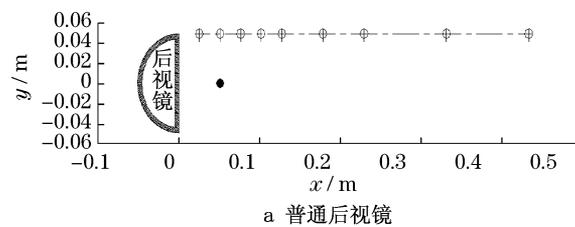
a 压力测量



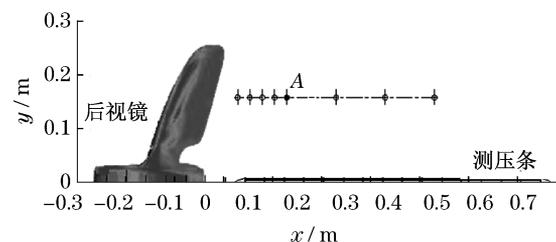
b 速度测量

图 2 后视镜的风洞试验

Fig.2 Wind tunnel test of rear view mirror



a 普通后视镜



b 桑塔纳3000后视镜

图 3 测点布置

Fig.3 Test points positions

1.2 数值计算方法

在数值计算中,选取与试验相对应的工况.几何建模立足于模型风洞具体结构和尺寸,选取模型风洞一部分进行模拟,其计算区域由收缩段、试验段、收集口、扩散段等组成,如图 4 所示.为了使下游流动不出现回流,人为增加长度为 1.0 m 的延伸段.后视镜安装在试验段上,距喷口约 0.2 m 处.为了更好求解洞壁和后视镜边界层,在它们表面创建边界层网格,其中第一层网格到后视镜壁面和到风洞壁面的量纲一的距离 y^+ 分别为 5 和 10.对于形状简单的普通后视镜,整个计算区域创建能提高数值精度的六面体网格,网格总数约为 410 万个.对于桑塔纳 3000 后视镜,绝大部分区域创建六面体网格,仅在靠

近后视镜区域创建四面体网格,网格总数约为 550 万个。

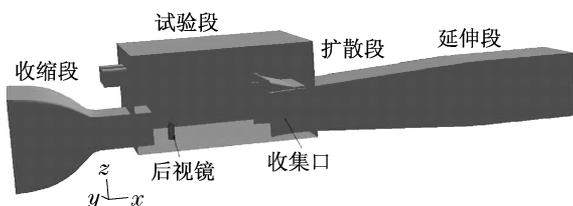


图4 计算区域示意图

Fig.4 Schematic of computational domains

计算首先使用 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 框架中的可实现 $k-\epsilon$ 两方程涡粘性传输模型^[7] 得到流场的准定常解,然后基于该准定常解,使用 LES (large eddy simulation)^[8] 进行非定常流动计算. 通过试算确定非定常时间步长为 5×10^{-4} s, 每一个时间步内进行 25 次子迭代. 通过分析残差、监测后视镜表面静压系数,以及后视镜尾部速度等参数,确定每个时间步长内子迭代收敛,所设定的时间步长能保证流动准周期内有足够样本点. 通过分析监控点在 0~0.5 s 的变化过程确定当计算时间超过 0.5 s 后,流动处于动态稳定. 整个计算一共进行 3 000 个时间步长,最后的 2 000 个时间步长的计算结果用于非定常流场的数据分析. 应该指出的是,计算所采用的时间步长能保证所有测点在准周期内有足够的点. 因为在给定的入口速度下,流体流过后视镜所需的时间约为 0.002 s,而流过整个计算域所需的时间约为 0.2 s. 上述计算均在惠普 XW8400 工作站(8 个 2.33 GHz 的 CPU 和 16 G 内存)完成,所需的计算时间约为 800 h.

2 结果分析与讨论

2.1 定常流场

尽管绕后视镜的流动是典型的非定常流动,但是了解该流动的平均特性也是有意义的. 测点的静压系数如下:

$$c_p = \frac{p_i - p_{os}}{p_{od}} \quad (1)$$

式中: c_p 为当地静压系数; p_i 为当地静压值, Pa; p_{os} 为喷口处的平均静压, Pa; p_{od} 为喷口处的平均动压, Pa.

2.1.1 平均静压系数

选取普通后视镜前脸与后脸,且距试验段地面距离为 0.1 m 的测点,图 5a 给出它们平均静压系数

的试验与数值结果. 从图中可以看出,试验与数值结果在所选取的测点上变化趋势一致,大多数测点的具体数值非常接近. 例如,后脸测点的平均静压系数的试验与数值结果均在 $-0.5 \sim -0.4$ 变化.

对于桑塔纳 3000 的后视镜,比较了试验段近地面的平均静压系数,如图 5b 所示. 尽管后视镜形状变得复杂,但是其基本流动现象仍然相同,即表面的边界层分离后在后视镜尾部形成了各种尺度的漩涡,这些漩涡通过耗散不断消耗流体的机械能使当地压力降低. 反映到图中的静压系数变化曲线上就是, x 在 0.04~0.30 m 的区域内,当地的平均静压系数从 -0.42 增加到 0.10; 当 $x > 0.30$ m 后,当地压力几乎不变,流体已经恢复到主流状态. 在捕捉尾流的静压方面,试验与数值不仅变化趋势一致,具体数值也相差不大. 仍能发现试验段在有后视镜时,测点的静压变化较大,这进一步说明尾部漩涡是造成当地静压变化的根本原因.

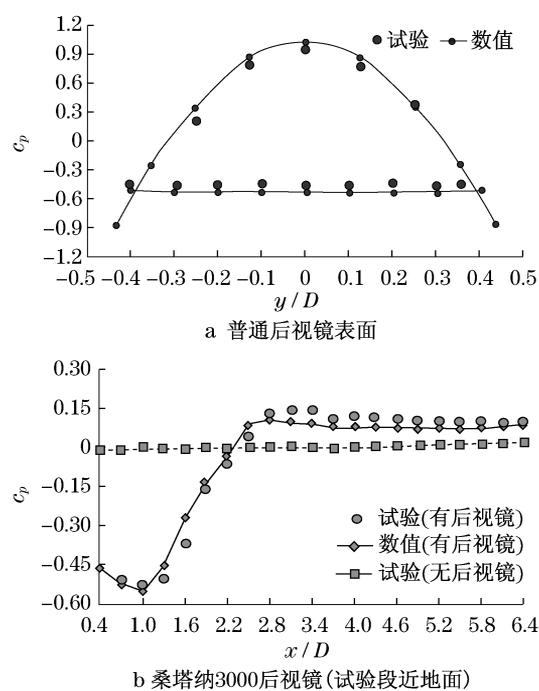


图5 平均静压系数

Fig.5 Average static pressure coefficients

2.1.2 平均速度

对热线采集到不同时刻的速度进行统计平均可得到不同测点的平均速度. 图 6 分别给出普通后视镜以及桑塔纳 3000 后视镜尾部主流方向量纲一的速度 \bar{u}/u_{in} (\bar{u} 为主流方向平均速度, u_{in} 为进口速度). 图 6a 所示测点的试验与数值结果变化趋势一致,除少数测点的具体数值差异较大外,其它测点相

差较小. 图中的曲线反映出, 当 $x < 1.00D$ (D 为普通后视镜当量直径, 即为 0.1 m), 当地主流速度仅为来流速度的 0.25 倍, 且增长较慢. 当 $x > 1.00D$, 当地主流速度快速增加, 量纲一的主流速度从 0.25 增加到 0.95 , 且增长率较大. 当 $x > 2.25D$, 当地主流速度与来流速度差异较小, 可近似认为融入来流速度. 对于形状复杂的后视镜尾部的速度测量, 试验与数值同样给出相同的变化趋势, 数值差异也较小. 图 6b 中的曲线显示出, 当 $x > 0.1\text{ m}$ 时, 当地主流速度逐渐恢复到来流速度, 并近似保持不变.

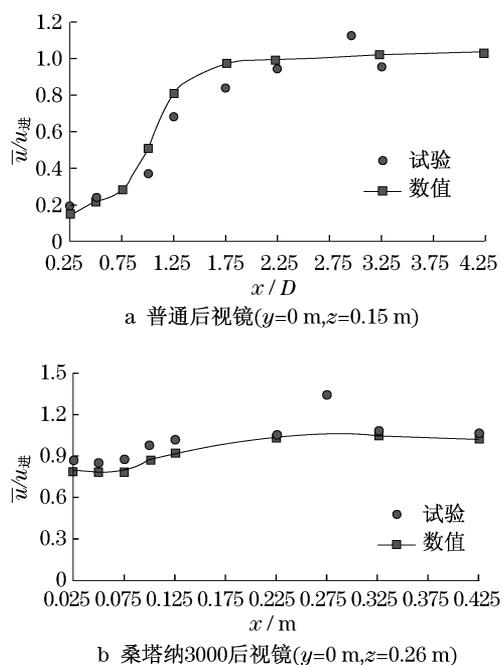


图 6 量纲一的速度分布

Fig. 6 Dimensionless velocity distributions

2.2 非定常流场

在后视镜非定常流场分析中, 主要基于热线采集到的测点脉动速度. 为了定量评估脉动速度的大小, 引入了脉动速度的标准差, 其定义如式(2)所示. 它是统计意义下的物理量, 其数值越大, 表明此处脉动速度越剧烈.

$$\sigma(u') = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: $\sigma(u')$ 为某测点的脉动速度的标准差; u_i 为 i 时刻下某测点的速度; \bar{u} 为某测点的平均速度; n 为样本数目.

2.2.1 标准差

分别选取图 3a 与图 3b 所示位于后视镜尾部

一排测点进行脉动速度标准差进行比较, 它们随测点位置的变化曲线如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 随着测点远离后视镜, 测点的脉动速度标准差数值呈现先增加后减少的变化趋势, 试验与数值所得结果相吻合. 普通后视镜的尾部一排测点脉动速度标准差的最大值出现在距后脸约 $2.00D$ 处, 大小约为来流速度的 0.3 倍. 该排测点由于处于剪切层区域, 速度脉动较强烈, 正如图 7a 显示的几个测点脉动速度标准差数值均超过来流速度的 0.20 倍, 仅在远离后视镜 $4.00D$ 后, 速度脉动降低到较低的水平. 桑塔纳 3000 后视镜的尾部一排测点脉动速度标准差数值在 $0.1 \sim 0.2$ 之间变化, 该排测点在 $x = 0.225\text{ m}$ 出现最大值.

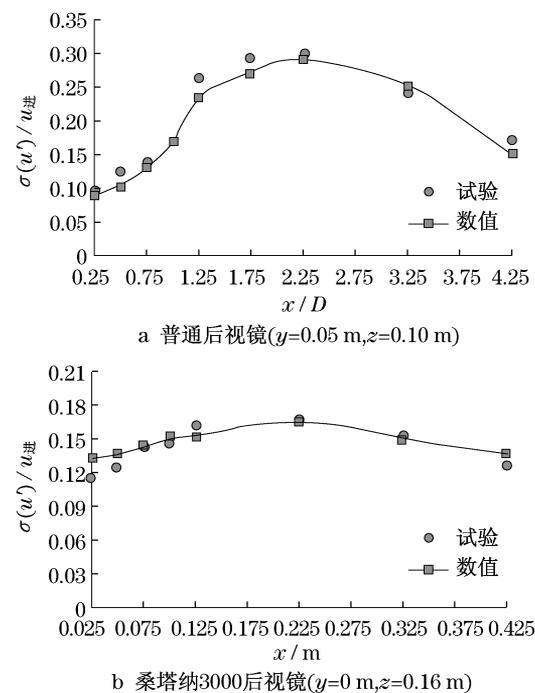


图 7 量纲一的脉动速度标准差

Fig. 7 Dimensionless standard deviation of fluctuating velocity

2.2.2 自功率谱密度

图 8 为测点 A 的自功率谱密度 PSD (power spectral density) 变化曲线. 从图 8 可以看出, 无论对于结构简单的普通后视镜还是对于结构复杂的桑塔纳 3000 后视镜, 试验与数值分析均捕捉到流场中的主要频率. 尽管不同频率下, 测点的 PSD 数值有些差异, 但是从它们的大小能推断出速度脉动的主要能量集中在中低频区域.

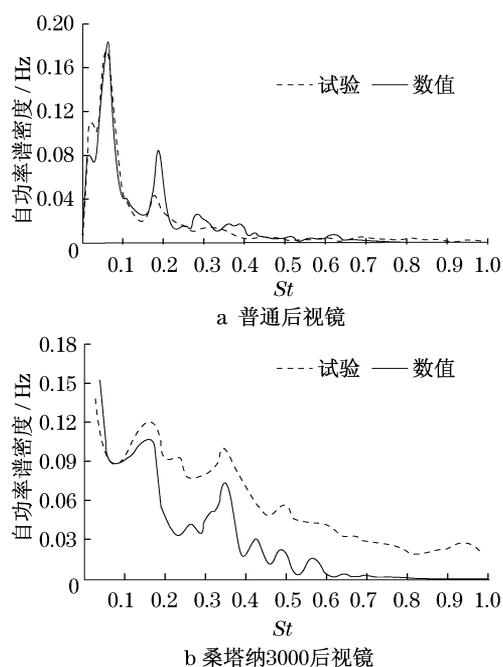


图8 测点A自功率谱密度

Fig.8 Power spectral density of test point A

3 结论

对普通后视镜和桑塔纳3000后视镜的流场特性进行风洞试验与数值研究,结果表明,本文所采用的数值计算方法不仅能再现形状较为简单的后视镜的流场特性,也能再现真实形状的后视镜的流场特性。

在普通后视镜平均速度场中,当 $x < 1.00D$ 时,当地量纲一的主流速度先缓慢增加到0.25;当 $2.25D > x > 1.00D$ 后,当地量纲一的主流速度从0.25快速增加到0.95。随着远离后视镜后脸,当地主流速度恢复到来流速度。后视镜尾部带有强烈的脉动速度,个别测点脉动速度标准差数值可达来流

的0.3倍,它们的主要能量集中在中低频区域。桑塔纳3000后视镜尾部有着与之相似的流场特性。

参考文献:

- [1] Ehlert G J, Chapman R J, Thomas R S. Wind noise and aerodynamic drag optimization of outside rear view mirrors[C] // Social Automotive Engineering. [S. L.]: SAE, 1993: 931292.
- [2] Jaitlee R, Alam F, Watkins S. Pressure fluctuations on automotive rear view mirrors [C] // Social Automotive Engineering. [S. L.]: SAE, 2007: 2007-01-0899.
- [3] Khalighi B, Johnson J P, Chen K H, et al. Experimental characterization of the unsteady flow field behind two outside rear view mirrors [C] // Social Automotive Engineering. [S. L.]: SAE, 2008: 2008-01-0476.
- [4] 陈枫,李启良,杨志刚.普通后视镜空气动力阻力数值分析[J].计算机辅助工程,2009,18(4):24.
CHEN Feng, LI Qiliang, YANG Zhigang. Numerical analysis on aerodynamic drag of generic rear view mirror [J]. Computer Aided Engineering, 2009, 18(4): 24.
- [5] 李启良,陈枫,杨志刚.后视镜表面压力特性的数值分析[J].计算机辅助工程,2009,18(3):36.
LI Qiliang, CHEN Feng, YANG Zhigang. Numerical analysis on surface pressure characteristics of rear view mirror [J]. Computer Aided Engineering, 2009, 18(3): 36.
- [6] 李启良,郑志强,贾青,等.两种改善汽车风洞轴向静压系数的方法[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(3):422.
LI Qiliang, ZHENG Zhiqiang, JIA Qing, et al. Two methods to improve the axial static pressure coefficient of automotive wind tunnel [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(3): 422.
- [7] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation [J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3): 227.
- [8] 张兆顺,崔桂香,许春晓.湍流大涡数值模拟的理论和应用 [M].北京:清华大学出版社,2008.
ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Theory and application of large eddy simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.