

整车风洞力/压同测实验方法研究

周 华^{1,2}, 朱 晖^{1,2}, 杨志刚^{1,2}

(1. 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804)

摘要: 依托开口式整车风洞, 以阶背式 MIRA (Motor Industry Research Association) 模型为实验对象, 通过雷诺数扫掠测试, 确定了力/压分测和力/压同测时气动力数据误差的变化规律; 基于偏航工况下气动力的测试数据, 明确了力/压分测和力/压同测时气动力数据误差的分布规律. 依据计算流体力学的仿真结果, 从流动机理层面剖析了误差产生的原因. 最后, 对力/压同测法在风洞实验中的具体实施及适用范围进行了总结.

关键词: 风洞实验; MIRA 车体; 流动机理

中图分类号: O355; U461.1

文献标志码: A

Simultaneous Test Method of Force/Pressure in Full-Scale Automotive Wind Tunnel

ZHOU Hua^{1,2}, ZHU Hui^{1,2}, YANG Zhigang^{1,2}

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China)

Abstract: In full-scale automotive wind tunnel with open-jet test section, targeting notchback MIRA body, variation law and distribution rule of force/pressure test data error between simultaneously testing method and respectively testing method were revealed by wind tunnel test in a range of Reynolds number and yaw angle. The error was subsequently explained by computational fluid dynamics in view of flow mechanism. Finally, the specific implementation and application scope of force/pressure simultaneously testing method in full-scale automotive wind tunnel were concluded.

Key words: wind tunnel test; Motor Industry Research Association(MIRA) body; flow mechanism

可概括为: 实验对象的设计准则^[4]; 支架设计及干扰的修正^[5]; 实验设备的研发^[6-7]; 在保证实验数据准确性的前提下, 对现有测试手段进行有机整合^[8-9].

鉴于飞行器自身的结构、功能及力学特性, 其普遍的风洞实验方案为: 闭口式风洞、缩比模型结合尾支撑^[10]; 自然实现了气动力及表面压力的同时测量(力/压同测, 如分别测量简称: 力/压分测). 而依据汽车的结构及运动环境特点, 通常采用开口式风洞结合地面支撑的方案对其进行风洞实验^[11], 并采用力/压分测的实验技术.

MIRA 模型由英国汽车工业研究联合会(Motor Industry Research Association)研发定型, 该模型真实反映了汽车的基本形态, 因而在国际上被广泛采用以研究汽车空气动力学相关问题^[12], 本文基于阶背式 MIRA 模型对相关问题进行研究.

1 实验设施及相关设备

本次实验在同济大学地面交通工具风洞中心开口回流式整车风洞中完成. 该风洞开口试验段长度 15 m, 喷口横截面宽 6.5 m, 高 4.25 m, 配置五带移动路面系统及转盘(转角 $\pm 180^\circ$), 五带路面、转盘结合气动天平构成完整的气动测力系统. 试验段风速 0~250 km·h⁻¹ 连续可调, 气流湍流度 0.1%. 喷口及试验段部分构造如图 1 所示.

图 2 所示天平为六分量应变式汽车专用天平, 用以测量汽车所受气动阻力(F_x)、侧力(F_y)、升力(F_z)、侧倾力矩(M_x)、俯仰力矩(M_y)和横摆力矩(M_z); 天平测量分量信息见表 1.

2 实验模型及连接方式

实验模型为全尺寸标准三厢 MIRA 模型, 长

风洞实验作为汽车空气动力学研究及车型研发的必要手段^[1-3], 其自身的实验技术发展一直是研究的热点. 在风洞本体结构确定的前提下, 其研究内容

收稿日期: 2015-04-25

基金项目: 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台(14DZ2291400)

第一作者: 周 华(1987—), 女, 博士生, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: 537506970@qq.com

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 工学博士, 教授主要研究方向为流体力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

4 165 mm;宽 1 625 mm;高 1 421 mm;轴距 2 540 mm;轮距 1 270 mm;正投影面积 1.856 m²;试验风速 80 km·h⁻¹, $Re=6.2 \times 10^6$,在此雷诺数水平下满足测试车型的气动力系数在自动模化区^[13-16].轮胎采用简易半轮胎构造,如图 3 所示.



图1 实验段构造

Fig.1 Configuration of test section

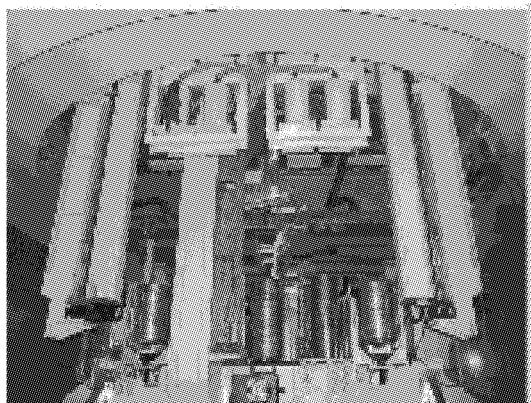


图2 测力天平

Fig.2 Force balance

表1 天平分量信息

Tab.1 Information of balance components

分量	量程	精度/%	准度/%	分辨率
F_x/N	-1 500/7 000	0.005	0.050	0.070
F_y/N	-9 000/9 000	0.010	0.050	0.180
F_z/N	-17 000/6 000	0.007	0.050	0.227
$M_x/N \cdot m$	-13 000/13 000	0.010	0.050	0.260
$M_y/N \cdot m$	-7 500/13 000	0.010	0.050	0.260
$M_z/N \cdot m$	-11 000/11 000	0.010	0.050	0.010

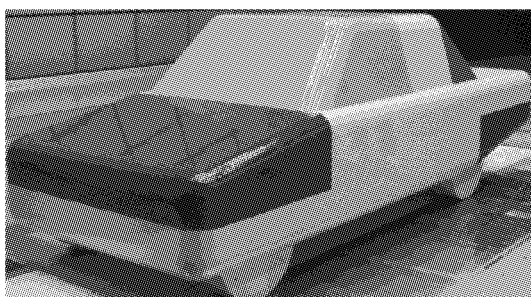


图3 MIRA 实验模型

Fig.3 MIRA Model for wind tunnel test

模型型面采用五轴数控加工中心完成,加工精度为 0.5 mm;各组件独立加工,见图 3.在水平校准台上将各组件与车身连接并整形;模型整体拼接完毕且外敷三层面漆后,进行表面机器磨光处理,最大限度地保证实体模型与数字模型的一致性.

为消除支架干扰,采用轮下连接方式将车模固定于风洞实验段转盘上,如图 4 所示,同时使用保形盖板遮蔽轮底连接口,确保轮边流场不受干扰.



图4 车轮连接方式

Fig.4 Fixing method of wheels

在对风洞天平支撑系统调直调平后,将模型的加工基准面(车轮内部)与天平支撑系统连接,如此保证模型在风洞中的位置中直水平.

3 模型气动实验结果

图 5 显示实验测量坐标系:X 方向为阻力方向,Y 方向为侧向力方向,Z 方向为升力方向;X 方向的力矩为侧倾力矩,Y 方向的力矩为矩俯仰力矩,Z 方向的力为横摆力矩.

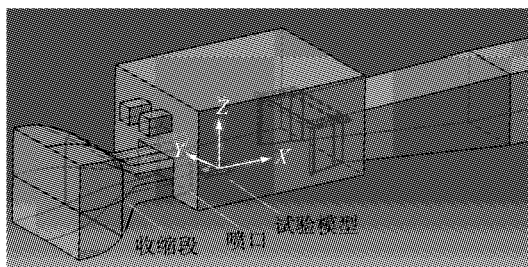


图5 实验坐标系

Fig.5 Coordinate system of wind tunnel test

气动力 F 计算公式为 $F = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S C_F$,气动力矩

M 计算公式为 $M = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S L C_M$.式中: ρ 为空气密度; V_∞ 为来流速度; S 为模型截面积; L 为模型长度; C_F 为气动力系数; C_M 为气动力矩系数.

为保证基准气动力数据的可靠性,实验采用两步法:①测试无表面压力测量引线时的气动力;②将

压力扫描阀导线引出车体并与车体左后轮及转盘贴合后,测试模型气动力数据,如图6所示.实验过程涵盖偏航工况,偏航角范围 $[-20^\circ, 20^\circ]$,正偏航取顺时针方向,负偏航取逆时针方向.

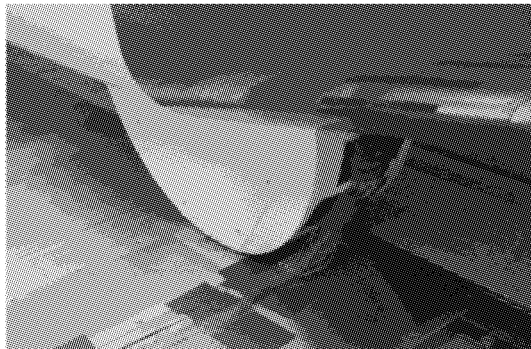


图6 扫描阀导线引出方式

Fig.6 Route of wires from pressure scanner valve

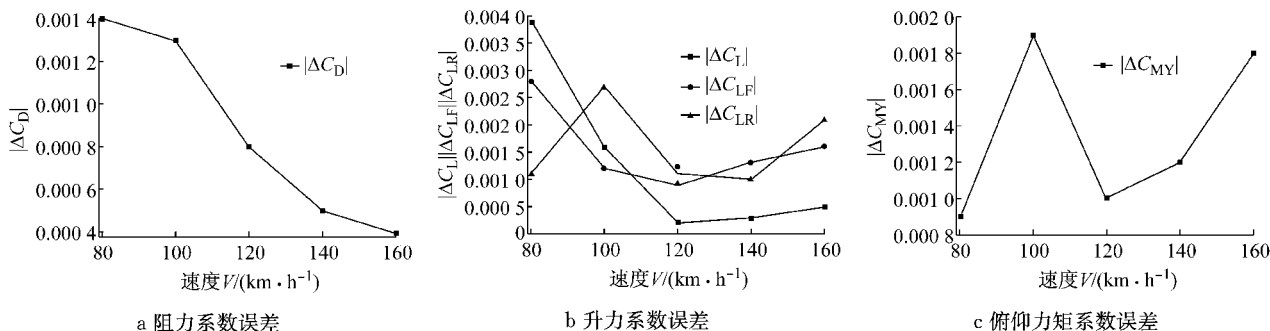


图7 气动力/力矩系数误差

Fig.7 Error between coefficients of aerodynamic force/moment in two groups of tests

图8显示了偏航工况下两种实验状态气动力系数误差,需要说明的是:风速保持 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 不变;正偏航工况下,地面管线完全处在迎风侧,负偏航工

况下,地面管线在一定程度上被车体掩盖,部分处于背风侧.正负工况下误差绝对值最大值见表2.

由图8及表2可知:对于 C_D , C_{LF} , C_S 和 C_{MZ} ,在

表2 误差绝对值最大值

Tab.2 Maximum of absolute value of error

状态	$ \Delta C_D $	$ \Delta C_L $	$ \Delta C_{LF} $	$ \Delta C_{LR} $	$ \Delta C_S $	$ \Delta C_{MX} $	$ \Delta C_{MY} $	$ \Delta C_{MZ} $
正偏航	0.002 9	0.019	0.004 2	0.019	0.006	0.002 6	0.009 1	0.001 7
负偏航	0.005 9	0.004 6	0.003 8	0.003 6	0.012 3	0.000 8	0.003 7	0.002 5

注: $\Delta C_D = C_{D,FP} - C_{D,F}$,其他类推.

正偏航工况下实验值与力/压分测的结果更吻合;对于 C_L , C_{LR} ,侧倾力矩系数 C_{MX} 和横摆力矩系数 C_{MY} 在负偏航工况下实验值与力/压分测的结果更吻合,以误差绝对值0.005为准,对于 C_{LF} , C_{MX} 和 C_{MZ} ,可认为在正负偏航工况下的实验值皆与力/压分测时结果吻合.

4 局部流场分析

采用计算流体力学(CFD)方法对流场相关信息

进行解算,着重分析偏航工况下地面上压力扫描阀导线对车体空气动力学性能的影响,本文以 9° 偏航作为典型例子进行数值分析.

参照图6所示引线方式,在左侧后轮及转盘位置构造凸台结构以模拟引线,凸台结构、车轮及面网格分布如图9所示,凸台面网格保持5 mm不变,车轮面网格尺度范围 $[5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}]$,管线宽度80 mm,厚度30 mm,从车身侧面延长出来900 mm.

计算域形状如图10所示,入口离车头3倍车长,出口离车尾6倍车长(L),左右离车侧面各7.5

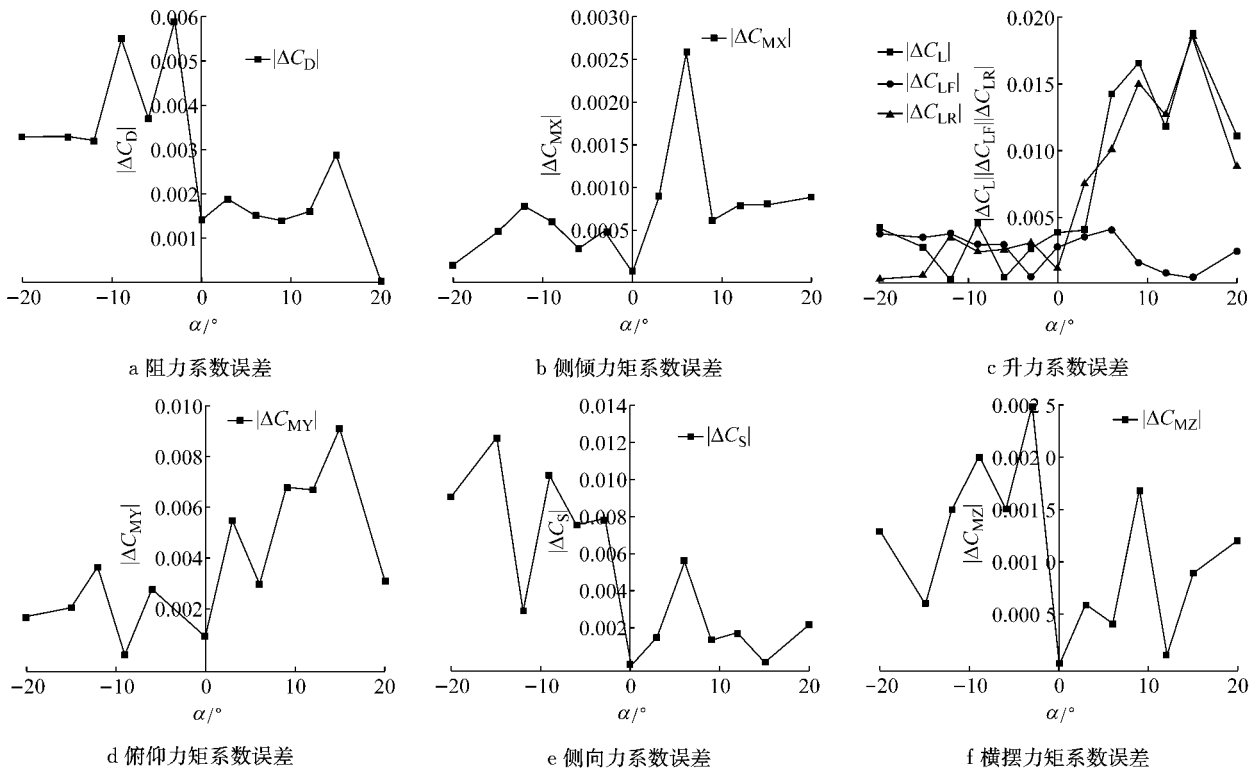


图8 气动力/力矩系数误差(偏航工况)

Fig.8 Error of aerodynamic force/moment coefficient under yaw conditions

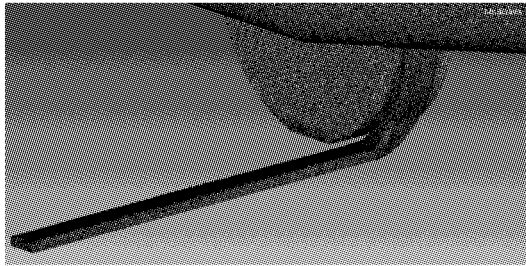


图9 局部面网格

Fig.9 Surface mesh of left rear wheel and wires

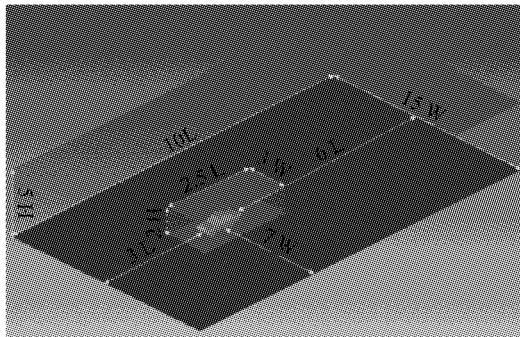


图10 计算域设置

Fig.10 Parameters of computational domain

倍车宽(W),顶部离车顶4倍车高(H).体网格采用4/5/6面体混合网格结构(如图11所示),网格总数约2000万单元.数值仿真采用双侧进/出口方案模拟偏航工况,相关边界条件设置及湍流模型选取见

文献^[17-18].

图12和图13显示了在偏航 $\pm 9^\circ$ 时,有引线和无引线两种状态下,车体表面压力分布的差别.

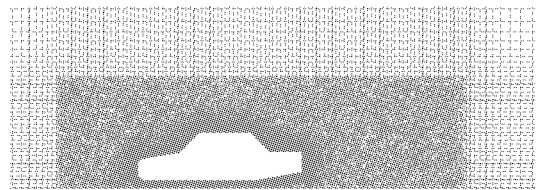


图11 体网格结构

Fig.11 Structure of volume mesh

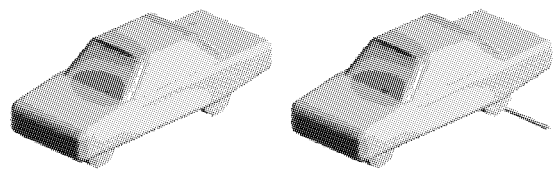
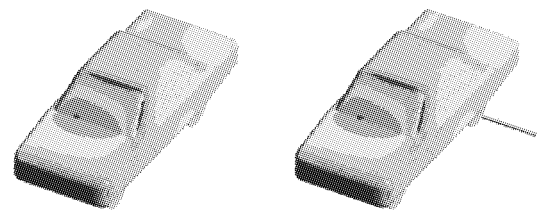
a 偏航角 $+9^\circ$; $V=80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ b 偏航角 -9° ; $V=80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 图12 正负 9° 偏航车身表面压力分布

Fig.12 Pressure contour on body surface

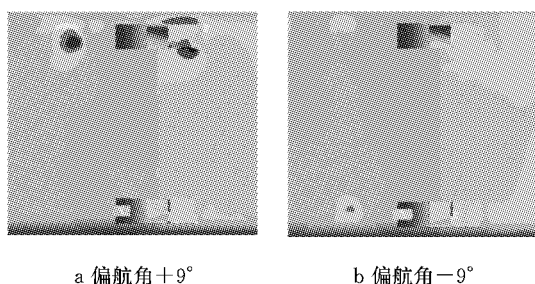


图13 正负9°偏航车身底部后轮区域力压同测减去仅测力的压力差值分布

Fig.13 Pressure difference contour on underbody

由图12~图13可知: +9°偏航时,引线的存在对车身上部、尾部和侧部的压力分布影响较小,但改变了车身底部后半区域的压力分布,这是因为车身侧面底部气流在绕过引线时边界层脱落产生涡流,该涡流在车身底部上翘角部分产生局部低压。

从车身表面切应力流线图(如图14所示)和等值面涡量图(如图15, $Q=3\ 500\ s^{-2}$)可以看出,管线的存在都是对背风侧后轮区域的流场影响较大,且

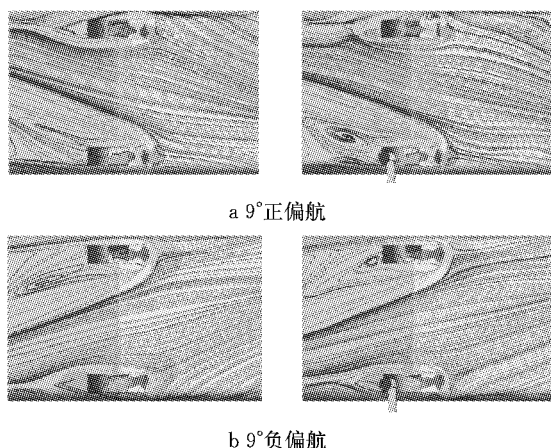


图14 正负9°偏航车身底部切应力流线图

Fig.14 Wall shear streamline on underbody

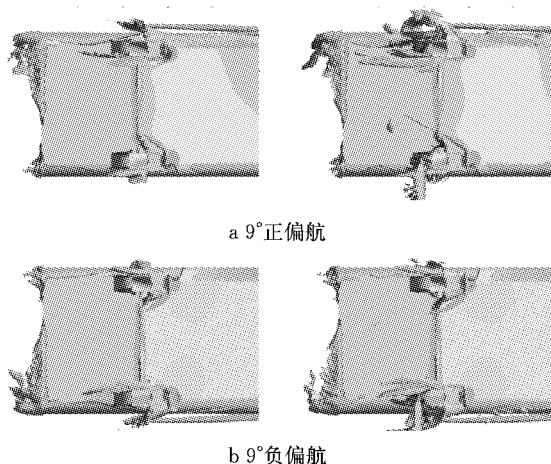


图15 正负9°偏航车身底部涡等值面上速度分布

Fig.15 Velocity contour of iso-surface Q on underbody

管线存在时左右偏航流场不具有很好的对称性。结合试验结果,认为在进行偏航试验时单侧偏航试验可行性不佳,需要对左右偏航都进行扫略,但由于管线存在造成的左右偏航流场不完全对称的影响,建议对试验结果的处理方面:气动阻力取正偏航试验值;气动升力取负偏航试验值;侧向力取正偏航试验值;侧倾力矩取负偏航试验值;俯仰力矩取负偏航试验值;横摆力矩取正偏航试验值。

5 结论

(1) 对于无偏航工况,采用本实验所用扫描阀导线引出方式,力/压同测与力/压分测的数据误差绝对值可控制在0.004以内。

(2) 对于偏航工况,采用本实验所用扫描阀导线引出方式,在进行正负偏航扫略的基础上,以图7为参照,选取力/压同测数据,可保证误差绝对值控制在0.006以内。

(3) 该力/压同测法以临地面钝体外部绕流气动力数据为基础建立,对于细长体、流线体等其他构型的风洞实验来说,该方法有待进一步研究证实。

在保证精度的基础上,采用力/压同测法可减少近一半的测试时间(含连接测压管及二次起风时间),由于风洞测试费用与测试时间成正比,进而节省了近一半的测试费用;对于风洞测试单位,在相同的测试周期内增加近一半的客户,经济效益和社会效益显著。

参考文献:

- [1] Hucho W, Sovran G. Aerodynamics of road vehicles [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1993, 25:485.
- [2] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京:人民交通出版社, 2005. GU Zhengqi. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [3] 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.
- [4] Mahmoud Khaled, Hicham El Hage, Fabien Harambat, et al. Some innovative concepts for car drag reduction: a parametric analysis of aerodynamic forces on a simplified body[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 107: 36.
- [5] 张英朝, 张喆, 李杰. 汽车风洞支撑干扰扣除方法研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(3):16. ZHANG Yingchao, ZHANG Zhe, LI Jie. Method to eliminate the interference of model support in automotive wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(3):

- 16.
- [6] 张英朝,李杰,刘畅,等. 汽车风洞的PIV试验技术[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(S1):83.
ZHANG Yingchao, LI Jie, LIU Chang, *et al.* Technology of particle image velocimetry test in automotive wind tunnel[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(S1):83.
- [7] Cogotti A. Evolution of performance of an automotive wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96:667.
- [8] 庞加斌,刘晓晖,陈力,等. 汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述[J]. 汽车工程,2009,31(7):609.
PANG Jiabin, LIU Xiaohui, CHEN Li, *et al.* A review on Reynolds number, blockage and boundary layer effect in automotive wind tunnel test[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609.
- [9] 李启良,杨志刚,陈力. 汽车气动升力风洞试验值的修正方法[J]. 汽车工程,2015,37(1):88.
LI Qiliang, YANG Zhigang, CHEN Li. Correction method for the wind tunnel test value of vehicle aerodynamic lift[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(1):88.
- [10] 李浩. 风洞虚拟飞行试验相似准则和模拟方法研究[M]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2012.
LI Hao. Study on the similarity criteria and simulation method of the wind tunnel based virtual flight testing[M]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2012.
- [11] 张海峰. 基于湍流模型的汽车气动特性研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.
ZHANG Haifeng. Analysis of vehicle aerodynamics performance based on turbulent model[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [12] SAE Standard Committee. Aerodynamic testing of road vehicles open throat wind tunnel adjustment[S]. [S.l.]: SAE, 1990: J2071-199003.
- [13] Shinri Muto, Hideo Sakai. Aerodynamic correlation tests between the MIRA and JARI wind tunnels [C]//SAE. [S.l.]: SAE, 1986: 860094.
- [14] Jeffrey Hoffman, Bill Martindale, Stephen Arnette, *et al.* Effect of test section configuration on aerodynamic drag measurements[C]//SAE. [S.l.]: SAE, 2001: 2001-01-0631.
- [15] Phil Newnham, Martin Passmomre, Jeff Howell, *et al.* On the optimisation of road vehicle leading edge radius in varying levels of free stream turbulence [C] // SAE. [S.l.]: SAE, 2006: 2006-01-1029.
- [16] A. P. Gaylard, J. P. Howell, and K. P. Garry. Observation of flow asymmetry over the rear of notchback vehicles[C]//SAE. [S.l.]: SAE, 2007: 2007-01-0900.
- [17] 谷正气,姜乐华,吴军,等. 汽车绕流的数值分析及计算机模拟[J]. 空气动力学学报,2000,18(2):188.
GU Zhengqi, JIANG Lehua, WU Jun, *et al.* Numerical analysis and simulation of flow around automobiles[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(2):188.
- [18] 龚旭,谷正气,李振磊,等. 侧风状态下轿车气动特性数值模拟方法的研究[J]. 汽车工程,2010,32(1):13.
GONG Xu, GU Zhengqi, LI Zhenlei, *et al.* Aerodynamic numerical simulation research of cars under crosswind[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(1):13.