

小尺寸缩比模型车风洞试验及数值验证

朱 晖^{1,2}, 杨志刚¹

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 采用已证明有效性的计算流体力学(CFD)方法, 对小尺寸缩比模型车的风洞试验方案进行设计和验证. 将风洞试验数据与数值仿真结果进行相互校核, 同时验证了风洞试验和数值仿真的可靠性, 并限定了此试验方案的适用范围. 基于试验和仿真的结果比较了 4 款模型车的气动阻力大小, 在揭示其内在机理的基础上明确了不同造型风格对气动阻力的影响.

关键词: 风洞试验; 缩比模型; 计算流体力学

中图分类号: O355; U461.1

文献标志码: A

Wind Tunnel Test of Small Size Scaled Vehicle Models and Numerical Validation

ZHU Hui^{1,2}, YANG Zhigang¹

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The wind tunnel test scheme of small size scaled vehicle models was designed and verified by computational fluid dynamics (CFD) method. By studying the wind tunnel test data and numerical simulation results, the reliability of the two methods and the application scope of the test scheme were defined. Based on the results of wind tunnel test and CFD, the difference of aerodynamic resistance of the four scaled vehicle models was demonstrated. By revealing the flow mechanism, the influence exerted by different style upon aerodynamic resistance was determined.

Key words: wind tunnel test; scaled model; computational fluid dynamics

价、时间节点及试验费用等问题, 不可能完全采用全尺寸模型或实车进行研究(在多方案优选阶段尤其是如此), 因此引入缩比模型成为必然^[3-4].

与 Ahmed Body 模型^[5]相比, MIRA(米拉)模型^[6]更接近于实际车辆, 所以本文采用 MIRA 模型作为标准验证车模, 用于校验计算流体力学(CFD)方法的可行性和准确性.

以 CFD 方法设计缩比模型风洞试验方案, 并对 MIRA 模型及 3 种电动车概念模型进行风洞试验, 在相互校核试验数据和仿真结果的基础上验证了风洞试验和仿真分析的有效性, 并获得相关结论.

1 试验支撑结构及模型安装

试验采用 1/4 缩比模型, 并在全尺寸风洞中完成测试任务, 由此带来模型支撑问题. 为保证试验安全性和有效性, 模型支撑的设计要点为: 与气动天平支杆刚性连接, 自重不能过大, 在试验中杜绝抖动和脱落现象的发生; 与缩比模型刚性连接, 在试验中杜绝模型抖动或脱落现象的出现; 能够模拟地面效应.

综合以上要求, 支撑系统设计为板型结构. 底板的尺寸要求为: 不能过小, 以避免对模型车外流场尤其是尾迹区发展的干扰; 不能过大, 避免自重过大以及由于自身气动受力大从而覆盖模型车气动受力的情况发生. 为了更好地模拟地面效应, 底板和模型车之间采用轮下连接法, 消除了其他连接方法(中心连接法、轮边或轮后连接法)对车体底部气流的干扰现象. 图 1 显示了模型支撑系统的构造形式、主要尺寸以及关键材质. 图 2 为支撑系统的 3D 数字模型.

支撑系统通过螺栓与天平支杆刚性连接, 在支撑系统的钢架上焊接 2 块开有定位孔的钢板, 作为模型的安装基准台面, 模型通过螺栓(安装在支撑系统反面)与支撑面进行刚性连接. 在所有部件连接完

风洞试验作为空气动力学研究的主要手段被广泛用于车型的开发和优化过程中^[1-2]. 考虑到模型造

收稿日期: 2012-10-19

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金(31115024); 上海市科学技术委员会项目(11DZ2260400)

第一作者: 朱 晖(1977—), 男, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhuhuisuccess@163.com

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

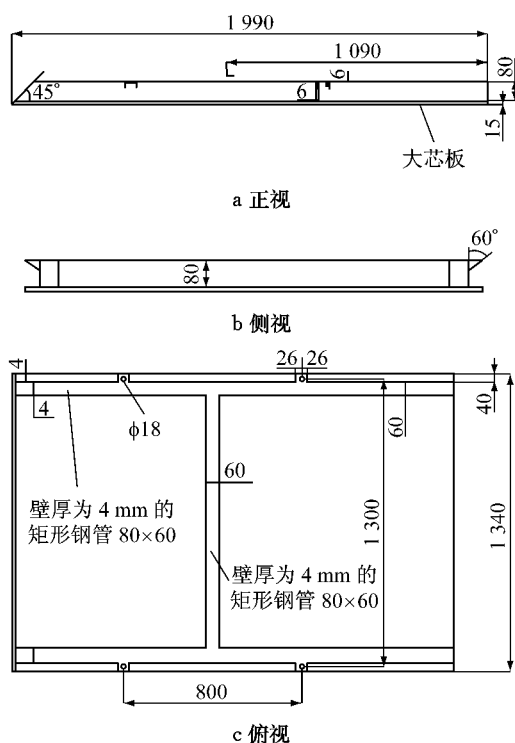


图 1 支撑系统三视图(单位:mm)

Fig.1 Three view of support system(unit: mm)

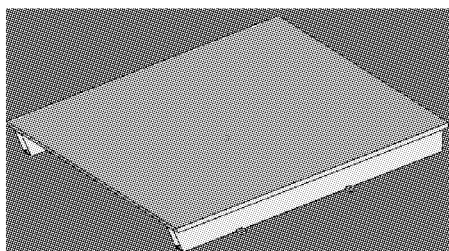


图 2 支撑系统数字模型

Fig.2 3D numeral mould of support system

毕后,通过支撑系统的腹板、泡沫板、胶泥以及胶带将支撑系统周界的孔洞、缝隙进行填补和密封,起整流作用。

缩比模型采用工程代木材料在五轴联动铣床上分块加工再粘接而成。图 3 为试验所涉及的缩比模型。从左到右分别为:MIRA 模型、模型 1、模型 2、模型 3,正投影面积分别为 0.115,0.129,0.111,0.130 m²。

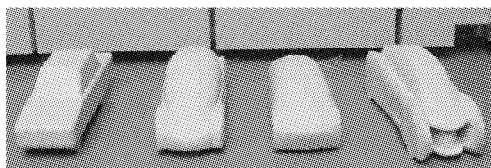


图 3 缩比模型

Fig.3 Physical body of scaled models

图 4 显示了支撑系统和 MIRA 模型在风洞中的实际安装情况,其他模型类似。

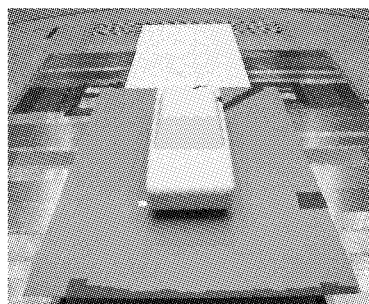


图 4 支撑系统和 MIRA 模型安装情况

Fig.4 Installation condition of MIRA model and support system

2 试验方案的 CFD 验证

在试验方案初步制定后,为保证试验的顺利进行,进行了试验方案的 CFD 验证工作,依据 CFD 仿真结果,在证明试验可行的基础上进入模型及支撑系统制作的试验步骤。

为确保仿真结果的可靠性,计算域必须包括具备所有特征(收缩段、喷口、驻室、收集口、扩散段等)的开口回流式整车风洞主体结构、天平支杆、支撑系统、缩比模型。图 5 显示了计算域的总体结构,图 6 显示了模型及支撑系统。

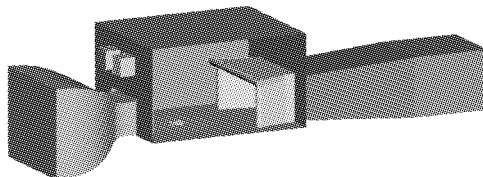


图 5 计算域结构

Fig.5 The structure of computational domain

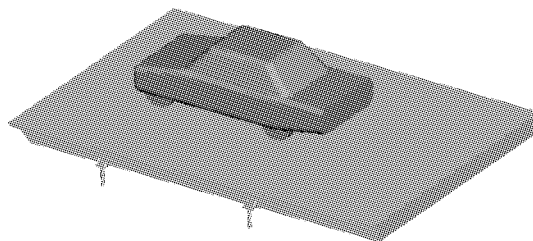


图 6 MIRA 模型及支撑系统

Fig.6 MIRA model and support system

采用 2~200 mm 的三角形网格对计算域各表面进行划分;采用棱柱体及四面体网格对计算域空间进行离散;以 $y^+ = 30 \sim 300$ 为标准控制第 1 层网格中心离壁面的法向高度,并对包含模型、支撑系统及天平支柱的子区域进行局部网格加密;体网格总数接近 3 000 万单元,中截面网格分布如图 7 所示。

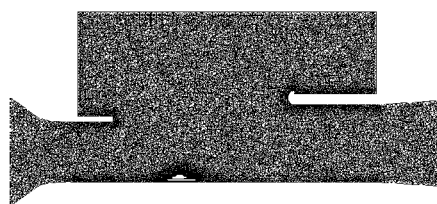


图 7 体网格内部结构

Fig. 7 Internal structure of volume mesh

数值计算采用可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型 (Realizable $k-\epsilon$ Model)^[6]. 与传统 $k-\epsilon$ 湍流模型相比, 该湍流模型引入湍流粘度变化公式 (不是常数), 并为耗散率增加了新的传输方程, 所以对旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流的解算能力较强.

进口边界条件为速度进口, x 向风速为 $100 \sim 250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, y 向风速和 z 向风速皆为零, 湍流强度为 0.3% , 与风洞实际流场品质一致; 出口采用出流出口; 压力平衡口采用进气口边界条件; 试验中移动带无法开启, 故采用固定壁面边界条件; 其他构造皆采用固定壁面边界. 采用非平衡壁面函数对近壁面流场进行求解.

以 Simplec 算法为基础, 迭代过程先采用一阶迎风格式, 再调至二阶迎风格式, 从而保证数值稳定性和截差精度. 松弛因子为默认值, 保持不变.

在进行缩比模型仿真之前, 对全尺寸 MIRA 模型在风洞中的流场进行了解算, 其仿真过程所涉及的网格结构及相关设置与针对缩比模型的仿真基本一致, 网格总数约为 2 100 万单元. 当流场核心速率为 $108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 计算所得 C_D (气动阻力系数) 值为 0.292, 与文献[7]中试验的 0.305 5 之间存在 4.41% 的误差, 表明仿真方法可行.

图 8 为中截面流场的速率云图, 图 8a 专用一个标尺, 图 8b~8e 合用一个标尺.

由图 8 可知: 气流从喷口射出, 绕过车体及支撑系统后, 经收集口汇流入扩散段, 由出口排出; 流动分层清晰, 在驻室上部未出现由数值误差所引起的串流现象, 说明仿真可靠、准确.

3 风洞试验及 CFD 分析结果

风洞试验的目的是比较模型 1、模型 2 及模型 3 的气动阻力大小. 在测力过程中对模型表面的压力也同时进行了测量. 模型车受力仅考虑支撑系统的直接干扰效应, 对二次干扰不作修正.

图 9 为 4 款模型车受力的风洞试验数据和数值计算结果.

由图 9 可知: 随着风速 (流场核心区平均风速) 的提高, 4 款模型车所受气动阻力皆上升, 但气动阻力系数却逐步下降, 与文献[1-2]中的规律一致; 数值计算结果与风洞试验值之间的误差基本控制在

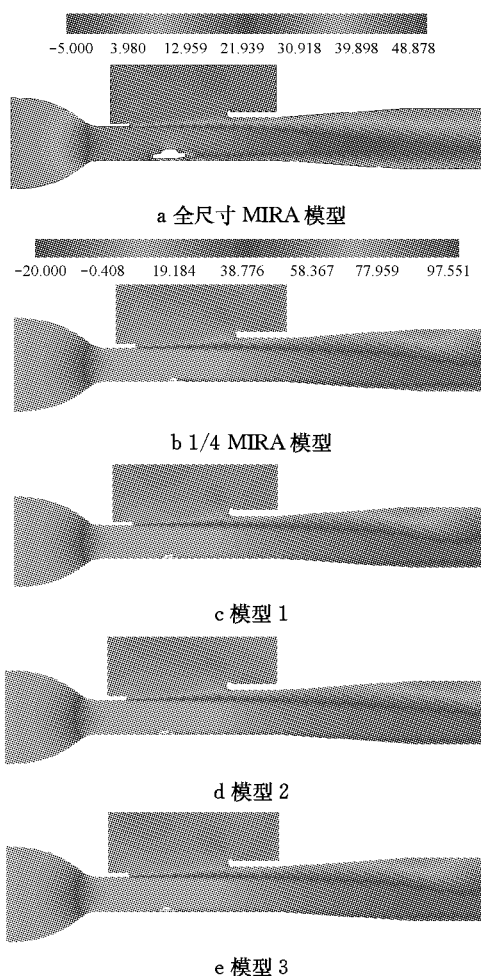


图 8 中截面速率云图

Fig. 8 Velocity contour of symmetry plan

5% 以内, 少数点在 7% 左右.

图 10 显示了 4 款模型车 C_D 值大小的相互关系, 与数值计算结果一致, 4 款模型车 C_D 值由大到小为: MIRA 模型、模型 1、模型 3、模型 2.

图 11 为 4 款模型车尾迹区的涡量云图. 由图 11 可知: MIRA 模型的尾迹区一直发展至大于 1 倍车长的远场, 由后风窗结构及车体背部引发的分涡系所融合成的巨大的涡团是能量损失的主要因素, 也是气动阻力的主要来源; 模型 1 和模型 3 尾迹区涡团结构基本相同, 由后窗造型所引发的分涡系皆注入尾迹区主涡系中, 但是由于模型 1 采用了局部分体式造型概念, 使得尾涡外扩现象突出, 且涉及区域广 (大于 1 倍车长), 从而使得模型 1 的气动阻力大于模型 3 的气动阻力; 模型 2 采用整体式造型, 无后窗造型所诱发的分涡系注入尾迹区主涡系中, 且尾涡结构控制良好, 所以其气动阻力最小.

图 12 显示了 4 款模型车背部测点 (部分) 处的压力试验值和数值计算结果.

2 种方法所揭示的压力随风速的变化规律一致: 随着风速的提高, 背部负压增加, 致使压差阻力增大, 从而使气动阻力增加. 数值计算结果与试验值吻

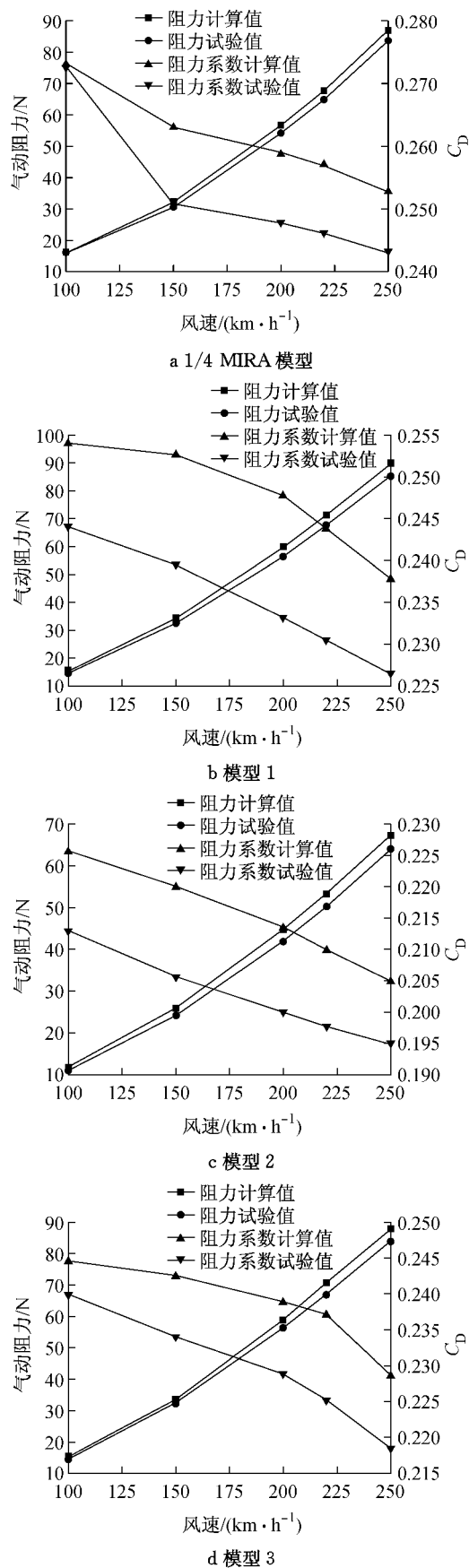


图 9 阻力及阻力系数
Fig.9 Drag force and C_p

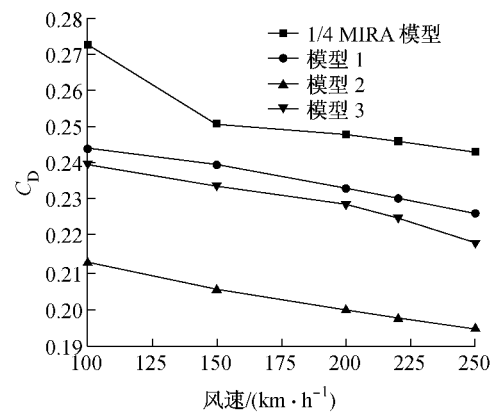
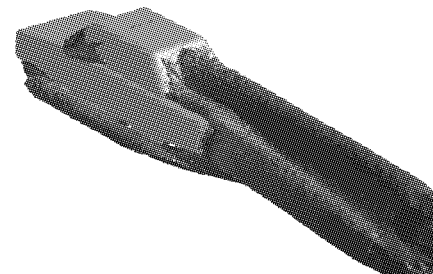
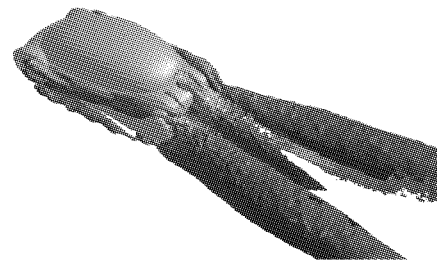


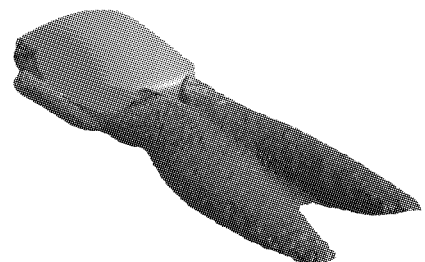
图 10 缩比模型的阻力系数试验值
Fig.10 Experimental C_p of scaled models



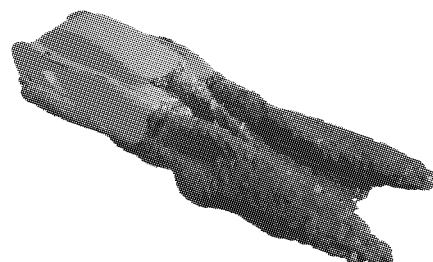
a 1/4 MIRA 模型



b 模型 1



c 模型 2



d 模型 3

图 11 涡量云图
Fig.11 Contour of vortex magnitude

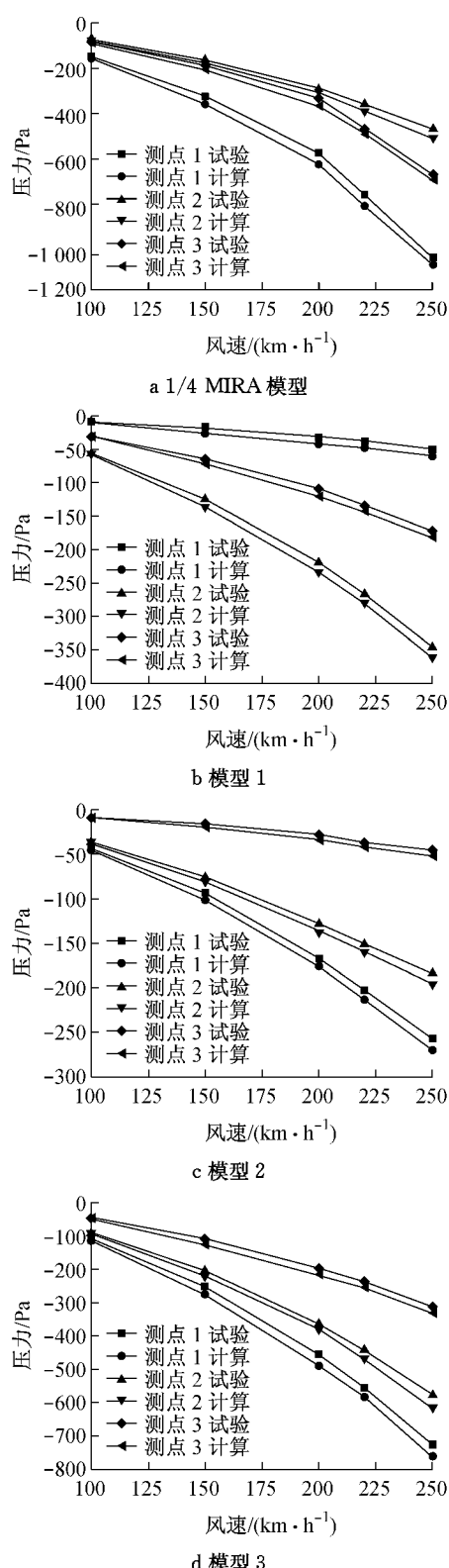


图12 测点处压力的试验值与计算值
Fig.12 Pressure value of the test points

合得较好,平均在5%的误差范围内,但是由于采用了贴片式测压系统,使得有些测点处压力值误差为6%~7%。

通过风洞试验和CFD分析的相互校核,从气动阻力的角度出发,由于存在雷诺数效应(雷诺数约为

4.58×10^5 , 偏低),且支撑系统二次干扰难以扣除^[8],使得通过该试验方案所得气动阻力试验值与实车的试验值偏差较大(缩比MIRA模型试验值小于实车试验值20.45%),所以1/4缩比模型的气动力试验无法替代全尺寸模型和实车的气动力试验。因此,该试验方案的适用范围为:在多方方案优选阶段比较缩比模型车气动阻力间的差异。

4 结论

通过对1/4缩比模型车风洞试验方案制定、试验结果分析及CFD的相关验证,得到以下结论:

(1) 试验中所涉及的支撑系统设计合理,能为概念车在多方方案选型(以气动阻力大小为判据)阶段提供可靠的试验支撑。

(2) CFD技术为试验方案的制定奠定了基础,与风洞试验技术相结合,通过探讨尾迹区涡结构的特征,揭示了不同模型车气动阻力之间差异的机理。

(3) 贴片式测压系统虽能降低模型制作难度,缩短试验准备时间,节约试验费用,但由于测压贴片及固定辅材对流场皆有干扰,所以在针对缩比模型的风洞试验中应尽量采用传统压力孔测压系统。

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. Aerodynamics of road vehicles [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] Hucho W H. Aerodynamics of road vehicles [M]. 4th ed. [S. l.]: SAE Inc, 2004.
- [3] Al-Gami A M, Bernal L P, Khalighi B. Experimental investigation of the near wake of a pick-up truck [C]//SAE. [S. l.]: SAE, 2003; 2003-01-0651.
- [4] 朱晖, 杨志刚. 类车体尾迹区流动的试验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(2): 24.
ZHU Hui, YANG Zhigang. Experimental study on the flow field in the wake of Ahmed model [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(2): 24.
- [5] Ahmed S R, Ramm R, Faltin G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake [C]//SAE. [S. l.]: SAE, 1984; 84-03-00.
- [6] 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]. Computer and Fluids, 1995, 24.
- [7] 庞加斌, 林志兴, 余卓平, 等. TJ-2 风洞汽车模型试验的修正方法[J]. 汽车工程, 2002, 24(5): 371.
PANG Jiabin, LIN Zhixing, YU Zhuoping. Correction methods for automotive model tests in TJ-2 wind tunnel [J]. Automotive Engineering, 2002, 24(5): 371.
- [8] 张英朝. 基于仿真与试验的汽车风洞修正研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
ZHANG Yingchao. Automotive wind tunnel corrections based on numerical simulation and test [D]. Changchun: Jilin University, 2010.