

整车气动声学风洞数值模拟

付 强^{1,3}, 杨志刚¹, 梁长裘², 廖慧红², 杜丽娜²

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 吉利汽车研究院(宁波)有限公司, 宁波 315336;

3. 中汽创智科技股份有限公司, 南京 211100)

摘要: 通过实际测量建立气动声学风洞计算域模型, 考虑了试验段与外界的联通、脉动压力和瞬态气流交换, 以便更好地重现风洞试验段流场的流动特性和非定常特性。将数值模拟结果与风洞实测结果在速度分布、静压梯度、风洞压力平衡口流场、缓冲口流场等具有代表性的流动和压力等特征物理量进行对比分析, 结果表明: 风洞计算域的数值模拟结果能够较好的贴合风洞的实际流动特征。使用实车模型分别在风洞计算与传统长方体计算域进行数值模拟计算, 并与风洞试验结果进行对比分析, 结果显示: 应用风洞计算域的数值模拟结果更接近风洞试验结果。

关键词: 汽车空气动力学; 汽车风洞; 数值模拟; 风洞计算域; 流场

中图分类号: U462.1

文献标志码: A

buffer flow outlet and other representative flows and pressures shows that the numerical simulation results in the wind tunnel simulation domain can better fit the actual flow characteristics of the wind tunnel. The real vehicle model is used to conduct numerical simulation in the wind tunnel simulation domain and the traditional cuboid simulation domain respectively, and the results are compared with the wind tunnel test results. The results show that the numerical simulation results in the wind tunnel calculation domain are closer to the wind tunnel test results.

Key words: vehicle aerodynamic; vehicle wind tunnel; numerical simulation; wind tunnel domain; flow field

Numerical Simulation of Aerodynamics and Aeroacoustics Wind Tunnel for Whole Vehicle

FU Qiang^{1,3}, YANG Zhigang¹, LIANG Changqiu², LIAO Huihong², DU Linan²

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Geely Automobile Research Institute (Ningbo), Ningbo 315336, China; 3. China Automotive Innovation Corporation, Nanjing 211100, China)

Abstract: In this paper, the simulation domain of the aerodynamics and aeroacoustics wind tunnel is established through actual measurement, taking into account the connection between the test section and the outside world, the fluctuating pressure, and the transient air flow exchange, so as to better reproduce the flow characteristics and unsteady characteristics of the flow field in the test section of the wind tunnel. The comparison between the numerical simulation results and the wind tunnel measurement results in the characteristic physical quantities such as velocity distribution, static pressure gradient, wind tunnel pressure balance outlet,

空风洞是汽车风洞评价和标定的基础状态, 与风洞流场品质和特性相关的主要参数均通过试验方法在空风洞状态下获得, 并作为主要指标进行标定和评价。汽车风洞是一个复杂的非标测试系统, 即使是同一辆车, 在不同风洞进行试验, 很可能获得的试验结果也不相同^[1-2]。而数值模拟是使用数值方法求解湍流流动, 但汽车的流动是典型的三维湍流, 是高度复杂的非线性流动, 具有随机性、扩散性、耗散性、有旋等基本特征, 目前工程应用上仍需选择湍流模型进行近似求解^[3]。

国外在使用数值模拟方法进行风洞研究方面开展较早。杨志刚等^[4-5]应用数值模拟对通用风洞压力梯度及阻塞比进行研究, 并提出修正建议。Fischer^[6-7]针对FKFS比例模型风洞的模拟研究持续数年, 使用PowerFLOW数值模拟软件模拟了阻力、升力、模型简化等对结果的影响, 并与代表开放路面(代表车辆行驶在平坦、干燥、无阻塞、无干扰的自然环境)的传统长方体计算域的差异等方面进行研究, 结果表明, 风洞计算域在考虑一定修正的前提下, 较

传统长方体计算域更贴近试验结果。但是,由于全细节整车模型、全细节风洞模型的复杂性等因素,围绕整车风洞及基于风洞计算域的整车尺度的数值模拟较少。目前,针对同济大学风洞的数值模拟多集中于1:15的模型风洞方面^[8-10],与整车风洞模拟尚有差距。

本文首先通过实测建立同济大学气动声学风洞计算域并对空风洞进行数值模拟,其结果与空风洞实际标定所用的指标进行对比,证明数值模拟能够对风洞中流体发生、发展过程进行再现;随后针对三种不同类型车型在风洞计算域中数值模拟,并与长方体计算域及风洞实测结果进行对比,获得开放路面和风洞实际流场的差异,总结风洞计算域的研究应用场景。

1 同济大学风洞及风洞计算域

1.1 同济大学风洞及风洞计算域模型

一般的,汽车风洞的标定均以空风洞流场为主要标定目标和手段,按照湍流强度、压力梯度、速度梯度等指标针对空风洞进行标定。数值模拟能够再现空风洞的特征指标是进行后续有车模拟和结果对比的前提和基础,否则即使模拟结果与风洞试验结果相近,也无法证明二者之间的相关性。

同济大学风洞是典型的3/4开式回流汽车风洞^[1],驻室所包含的试验段是主要功能部分。测量从收缩段断面开始作为来流入口,到扩散段近拐角处终止,作为压力出口。喷口是试验段气流的出口;喷口下端有剪切口,作为第一段边界层处理装置;喷口上方开口为压力平衡口,与外界大气相通,作为整个风洞系统的压力基准;集气口及扩散段是回流气流的入口和通道;收集口两侧开有流量补偿口,保证整个风洞系统的质量守恒;缓冲口是风洞系统脉动缓冲调节功能区在驻室的出口^[11],如图1所示。

以上与风洞流场直接相关的各功能模块均根据实际测量尺寸进行建模。考虑到地面效应模拟的复杂性^[12]和数值模拟技术的限制,风洞模型为地面静

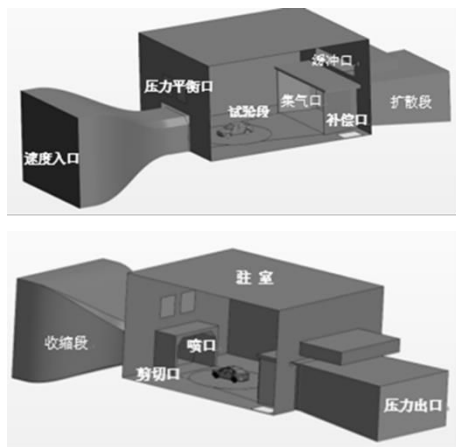


图1 风洞计算域

Fig.1 Schematic of wind tunnel numerical model

止,没有体现风洞五带系统和除剪切口外的其他边界层处理系统。

1.2 数值模拟及结果对比

本文采用STAR-CCM+11.06软件,使用切割体 Trimmer 体网格,通过前期大量的数值模拟实践,针对STAR-CCM+的不同湍流模型、不同网格策略对结果影响等方面进行了对比,考虑到计算效率和结果稳定性等因素,最终采用了稳态k-epsilon进行计算。网格策略对结果的敏感性也进行了验证,本文的网格策略在稳态计算中能够保证结果稳定性,风阻值波动不超过0.002,风洞计算域与长方体计算域保持了同样的尺寸和数值的加密区设置,最大可能的保证了数值误差对结果的影响。最终选择策略的体网格数在1亿左右,体网格分布示例见图2。基于某Cross车型的湍流模型和网格策略的对比见表1。

1.2.1 静压梯度对比

风洞受空间限制会导致试验段静压分布不均匀引起静压梯度,其是衡量风洞流场品质的重要指标之一^[12]。同济大学风洞静压梯度测量时速为140 km/h,数值模拟速度与其等效一致(注:上海地面交通工具风洞中心风洞调试总结.上海地面交通工具风洞中心年会报告,2011,图3部分数据及图6(a)同出处)。

表1 不同网格策略及湍流模型的计算时间和结果差异

Tab.1 Difference of simulation time and results between different volume strategies and turbulence models

网格尺寸/mm	边界层: 层数、厚度/mm	基于体网格 增长率	基于面网格 增长率	体网格数 量/万	时间步数	时间步长/s	湍流模型	计算时间/ (cpu·h)	结果(与基 准差值)
32 ~ 256	20,5	Mediu—m	Mediu—m	6610	—	—	k-ε	1 440	基准
32 ~ 256	20,5	Mediu—m	fast	6305	—	—	k-ε	1 440	0.001
32 ~ 256	20,5	slow	no	15225	—	—	k-ε	1 440	0.001
16 ~ 256	20,5	very slow	fast	28635	—	—	k-ε	8 640	0.001

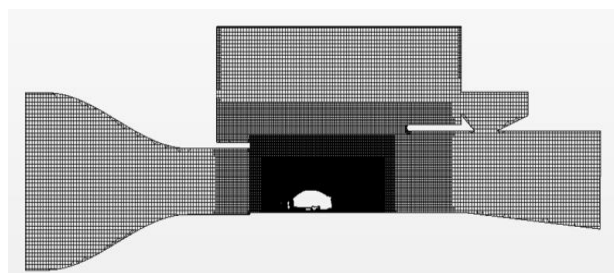
图2 风洞计算域 $Y=0$ 截面体网格分布图Fig.2 Picture of volume mesh at wind tunnel domain $Y=0$ section

图3为静压梯度对比图^[13-14],在主要试验段内($X=-5\,000\sim 5\,000\text{ mm}$)基本与风洞测量静压一致。静压梯度前部差异主要来自风洞测量时具有边界层控制和路面模拟系统^[15]。数值模拟中针对边界层的粗糙度设置、五带系统的地面移动设置等方面均进行过大量尝试,但对结果影响有限,且在粗糙度、平

整度等方面与物理实际也有一定偏差,故该部分暂作为误差项;同时,风洞边界层控制均为局部关键区域控制,无法覆盖全部有效试验区域,故风洞系统的边界层在控制区域外均为自由发展边界层,与速度和压力分布、地面粗糙度和不平度等密切相关。该部分也是数值模拟与风洞试验的系统误差之一,同时也是不同风洞之间、风洞与开放路面之间的系统误差之一。

后部差异源自收集口(风洞实际可调)及缓冲区的误差。由于数值模拟模型的压力出口在近扩散段拐角处,且为压力出口,与实际存在一定差异。缓冲区是为了降低风洞低频颤振的风险,其尺寸和形状由于风洞模型测量的限制也没有实现完全模拟,仅做到了流场趋势一致,这部分也构成了系统误差。但从主要试验段的静压梯度分布及与世界其他主流风洞对比看,数值模拟针对风洞流场做到了较好的还原,也好于多数的欧美风洞。

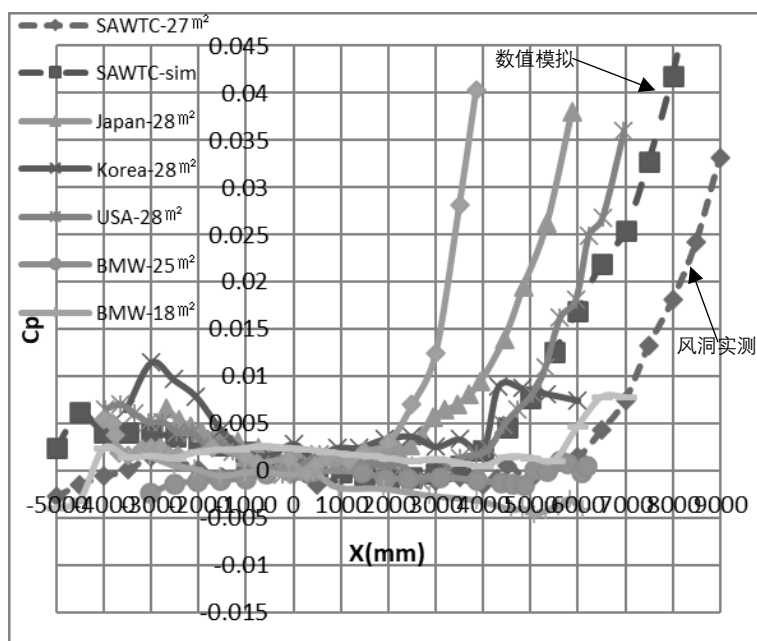


图3 静压梯度对比

Fig.3 Comparison of static pressure gradient

1.2.2 压力平衡口速度对比

压力平衡口是整个风洞系统最重要的参考点,只有压力平衡口稳定,才能表征整个系统是稳定的。从图4可见压力平衡口速度呈现气流交换的形态,整个压力平衡口流量在 $-1\sim 1\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 间震荡,处于动态平衡。在压力平衡口使用手持式叶轮风速仪进行速度测量,结果显示平衡口有速度波动,数值模拟与风洞实测数字比较接近,分别在 0.6 、 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,测点见图5,测量结果见图6。

1.2.3 速度云图对比

由于空间限制和静压梯度的存在,会导致一定的速度梯度。速度梯度能够更直观的表征整个流场的速度分布情况,其均匀性也是风洞的重要指标之一。在 $X=0$ 处 X 向的切面速度云图对比看,在主要试验区域,风洞实测与数值模拟的速度分布基本一致,见图7。

1.2.4 缓冲口速度对比分析

由于风洞结构需要,同济大学风洞具有较大空

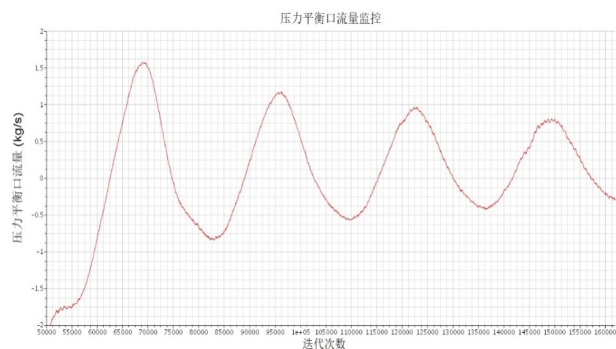


图4 数值模拟流量监控

Fig.4 Simulation mass flow minor the pressure balance outlet

间的缓冲空间^[10],模型中针对缓冲口进行了简化还原。从速度云图8可见,缓冲口主要流动表现为由扩散段向驻室流动,且速度不均匀,与图9丝带法测量实测物理现象相符合,有较大速度流出。

由上述对静压梯度、速度分布、压力平衡口和缓冲口等风洞主要指标的对比分析可见,数值模拟与风洞实测结果在数值和趋势上都具有很好的一致性,数值模拟基本能够真实反应空风洞的实际流动特性和压力分布。

2 风洞数值模拟与试验结果对比

2.1 模拟车型及长方体计算域

试验车辆的尺寸和形状对风洞试验结果及风洞标定均有较大影响。与正投影面积直接相关的阻塞比是主要参数之一^[1]。本文研究3个车型分别为三厢车、跨界车和MPV,正投影面积分别为 2.21 m^2 、 2.40 m^2 和 3.20 m^2 ,基本涵盖了常见的车型和投影面积,具有代表性。

为对比车辆在风洞中的风阻系数(以下简称风阻)与开放路面行驶的差异,同时对这3款车型在常用的长方体计算域中进行数值模拟,计算域尺寸为 $60\text{ m}\times 20\text{ m}\times 12\text{ m}$,阻塞比小于1%,见图10。

2.2 结果对比

结果对比见表2,由表可见风洞计算域在结果上更贴近风洞试验结果。需要说明的是,本文研究三厢车数值模型使用的是扫描的真实轮胎,与实车最为接近;跨界车和MPV使用的是光滑表面的模拟轮胎。实车存在的间隙、面差及泄漏等影响风阻的因素,在数值模拟模型中难以全部体现出来,也会构成不确定的误差项。

2.3 比较分析

三款车最终结果方面相差较小,但是风洞计算域和长方体计算域在阻力发展曲线、速度分布、表面静压等方面均有较大区别。

2.3.1 阻力发展曲线

阻力发展曲线的物理意义是沿阻力方向(车辆坐标X方向)的向前累计,即向流动方向求和,到最后为整车阻力。

图11横坐标为空气动力学坐标系下的X坐标,纵坐标为风阻系数,W代表风洞计算域,B代表长方体计算域,可以明显看出,当阻力累积到乘员舱后风洞计算域阻力值一直大于长方体计算域,到最后尾部区域曲线差值逐渐减小。

2.3.2 表面压力和表面速度

以三厢车为例,进行表面压力和表面速度的比较。从压力系数 $0.5\sim 1.0$ 可以看出风洞计算域前部压力略高于长方体计算域,而 $-0.5\sim 0$ 的尾部压力系数分布图上,风洞计算域也高于长方体计算域,总体上二者压差阻力相当,导致最终结果接近,见图12



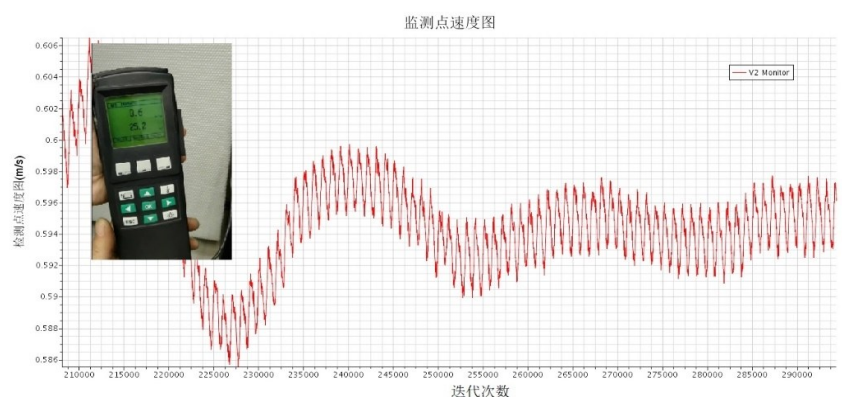
(a) 手持式叶轮风速仪



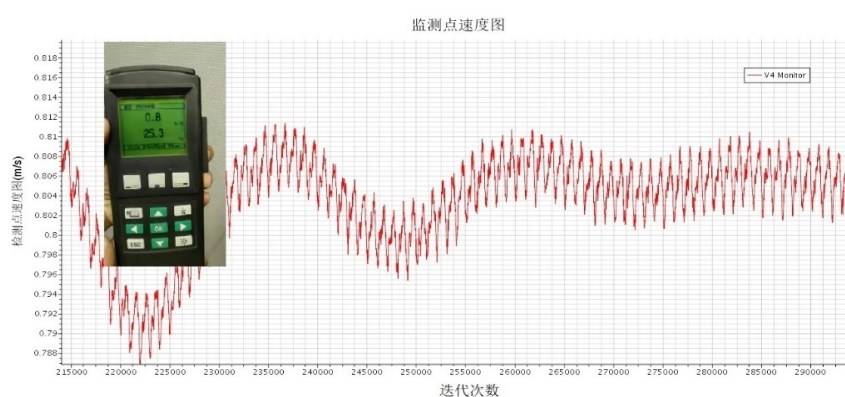
(b) 压力平衡口测点

图5 压力平衡口速度测量设备及测点

Fig.5 Speed measuring equipment and measuring points at pressure balance outlet



(a) 压力平衡口左侧测点数值模拟与风洞实测结果对比



(b) 压力平衡口右侧测点数值模拟与风洞实测结果对比

图6 压力平衡口速度测量对比

Fig.6 Comparison of speed measurement at pressure balance outlet

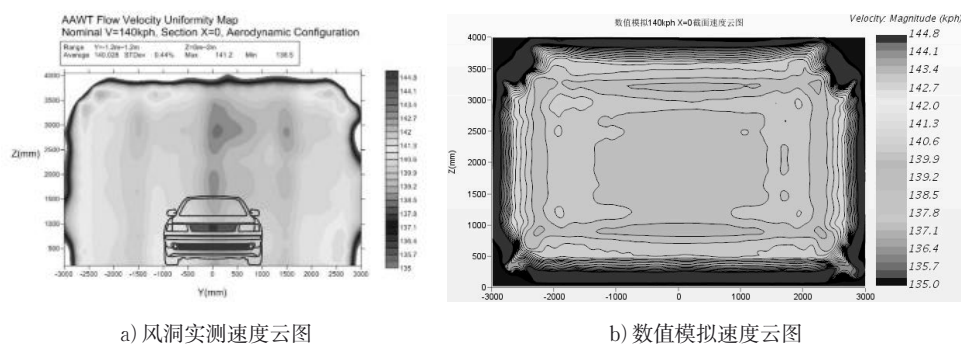
图7 $X=0$ 处 X 向实测速度与仿真速度云图对比Fig.7 section of $X=0$ X direction comparison about the velocity

表2 数值模拟结果与风洞结果插值对比

Tab 2 Interpolation comparison between simulation results and wind test results

车型	Δ —风洞计算域	Δ —长方体计算域
三厢车	-0.003	-0.005
跨界车	0.004	0.007
MPV	-0.002	-0.005

和图13。表面速度分布也可以看出两个计算域在轮心以上部位的速度分布基本一致,见图14。总压为0的等值面对比也可以看出,在轮心以下和尾部两个计算域的等值面有一定差别,见图15。

由以上分析可以看出,即使结果相近,车辆在风洞中和开放路面所受空气阻力仍有较大差别,特别是在车前和车后区域,但从整个风阻测量角度,前后差值基本可以相互抵消,风洞试验结果能够对真实

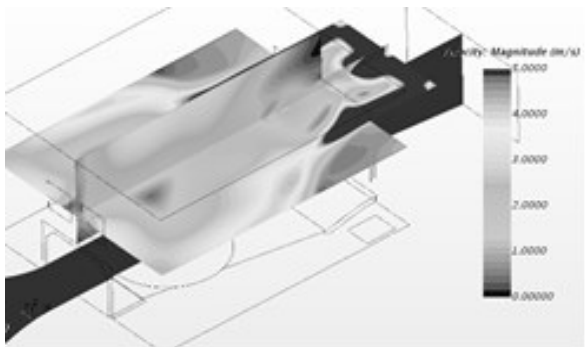


图8 缓冲口数值模拟速度云图对比
Fig.8 Velocity scalar of buffer region



图9 缓冲口丝带法测量
Fig.9 Wire test of buffer region

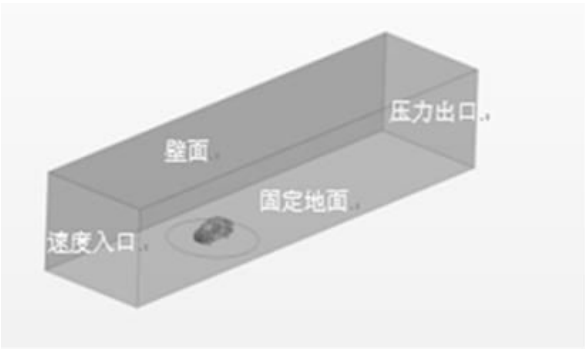


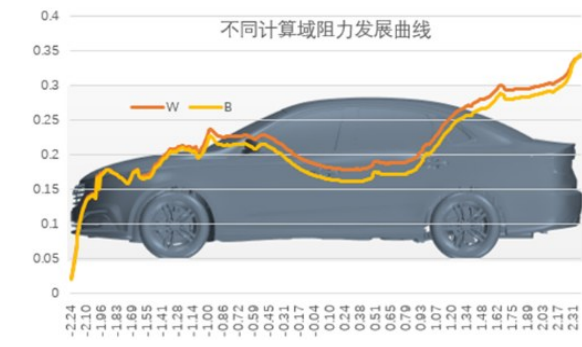
图10 长方体仿真计算域
Fig.10 Schematic of block domain

路面行驶工况进行较好的还原和评价。

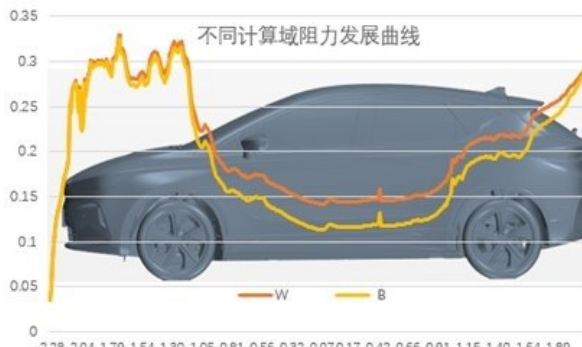
3 结论

(1) 静压梯度、风洞压力平衡口、缓冲口流场等流体及风洞重要指标对比分析表明风洞计算域能够较好的还原空风洞中流体的发生和发展,特别是平衡口流量的动态平衡是风洞数值模拟的重要指标之一。

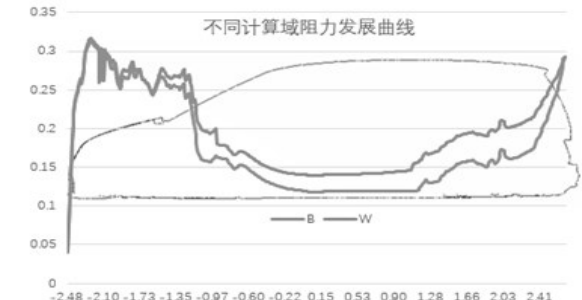
(2) 三款车型虽然结果相差不大,但风洞计算域代表的风洞流场与长方体计算域代表的开放路面



(a) 三厢车阻力发展曲线



(b) 跨界车阻力发展曲线



(c) MPV阻力发展曲线

图11 长方体仿真计算域
Fig.11 Schematic of block domain



(a) 长方体计算域 (b) 风洞计算域

图12 不同计算域静压系数0.5~1对比图
Fig.12 Comparison of static pressure 0.5~1

流场在速度及压力分布在车辆前部和后部区域有较大差异。

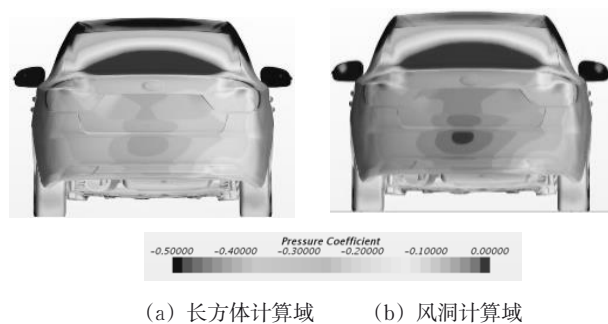


图13 不同计算域静压系数-0.5~0对比图

Fig.13 comparison of static pressure -0.5~0

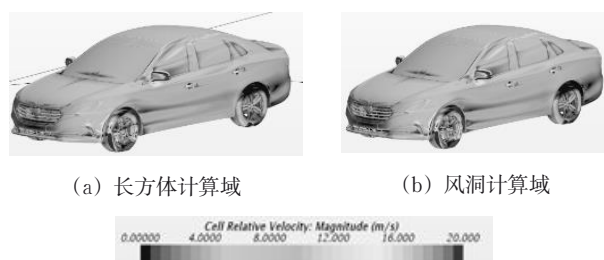


图14 不同计算域表面速度对比图

Fig.14 Comparison of cell velocity

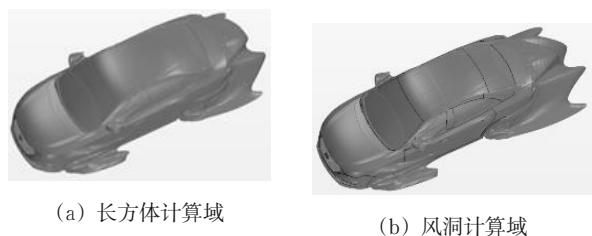


图15 不同计算域总压=0等值面对比图

Fig.15 Comparison of total pressure=0 ISO surface

(3) 风洞之间结果差异的对比多集中在结果数值统计及部分边界条件的影响上,风洞计算域可以提供包括有车工况在内全域的流场信息,可以作为风洞之间结果差异的研究手段。

参考文献:

- [1] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicles [M]. 4th ed. SAE book No.R-177, 1998.
- [2] THOMAS S. Aerodynamics of road vehicles [M]. 5th ed. SAE book No.R-430, 2016.
- [3] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
WANG Fujun. Analysis of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [4] YANG Z, SCHENKEL M, FADLER G. Corrections for the pressure gradient effects on vehicle aerodynamic drag [C]// SAE 2003 World Congress & Exhibition. SAE Technical

Paper 2003-01-0935, 2003. <https://doi.org/10.4271/2003-01-0935>. SAE Technical Paper, 2003-01-0935.

- [5] YANG Z, SCHENKEL M. Assessment of closed-wall wind tunnel blockage using CFD [C]// SAE 2004 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2004-01-0672. 2004. <https://doi.org/10.4271/2004-01-0672>.
- [6] FISCHER O, KUTHADA T, WIDDECKE N, *et al.* CFD investigations of wind tunnel interference effects [C]// SAE World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2007-01-1045, 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-1045>.
- [7] FISCHER O, KUTHADA T, MERCKER E, *et al.* CFD approach to evaluate wind-tunnel and model setup effects on aerodynamic drag and lift for detailed vehicles [C]// SAE 2010 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2010-01-0760, 2010. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0760>.
- [8] 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.* Numerical and experimental study on two methods to improve the axial static pressure coefficient of automotive wind tunnel [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(3): 422.
- [9] 贾青, 王毅刚, 杨志刚. 汽车风洞试验段非定常流场的试验 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40(1): 97.
JIA Qing, WANG Yigang, YANG Zhigang, *et al.* Test research of unsteady characteristic of flow inside test section of automotive wind tunnel [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(1): 97.
- [10] 贾青, 杨志刚, 李启良. 汽车风洞试验段流场的试验研究 [J]. 实验流体力学, 2011, 25(6): 33.
JIA Qing, YANG Zhigang, LI Qiliang. Test research of the flow field inside the test section of the automotive wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(6): 33.
- [11] 郑志强. 汽车气动声学风洞低频颤振现象研究及控制 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
ZHENG Zhiqiang. Study and control of buffeting phenomenon for automotive aero-acoustic wind tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [12] 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 tests [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609.
- [13] DUELL E, KHARAZI A, MULLER S, *et al.* The BMW AVZ wind tunnel center [C]// SAE 2010 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2010-01-0118, 2010. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0118>.
- [14] COGO BUCKISCH R, SCHWARTEKOPP B, PFISTERER J. Daimler aeroacoustic wind tunnel: 5 years of operational experience and recent improvements [C]// SAE World Congress. SAE Technical Paper 2018-01-5038, 2018. <https://doi.org/10.4271/2018-01-5038>.