

# Ahmed 模型的流固耦合数值计算方法 探索与实验验证

沈 沉<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1</sup>

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 泛亚汽车技术中心, 上海 201201)

**摘要:**流固耦合效应会影响汽车行驶安全性,对该效应的数值模拟方法的可信度需要验证。以 Ahmed 模型作为数值仿真和实验验证的对象,数值计算是流体计算与结构计算两部分耦合,配合风洞实验的位移、压力测量技术与流场显示技术(烟流法、丝线法)与之比较,数值模拟与实验所得位移结果之间的差异始终在 20% 以内。从流场结构角度分析得到流固耦合效应影响气动力的机理主要在于流场中涡的拓扑结构变化。为将来数值研究时变侧风下车辆的流固耦合问题提供实验及理论依据。

**关键词:**流固耦合; ALE; 风洞实验; 验证

**中图分类号:** O355; U461.1

**文献标识码:** A

## Numerical methods exploration and experimental validation of Ahmed model with consideration of fluid-solid-interaction effect

Shen Chen<sup>1,2</sup>, Yang Zhigang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;  
2. Pan Asia Technical Automotive Center, Shanghai 201201, China)

**Abstract:** Fluid-solid interaction (FSI) between the crosswind and the moving vehicle exerts an impact on driving safety. The reliability of the FSI numerical simulation method needs to be verified. Numerical simulation method and wind-tunnel test method are used with an Ahmed model in the research. Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) method is applied to the Ahmed model FSI numerical simulation under crosswinds at velocities of 20m/s, 25m/s, 30m/s, 35m/s, and 40m/s. Through comparison between numerical solution of the Ahmed model and experimental results, it can be claimed that the displacement difference is less than 20%. The experimental methods contain pressure and deformation measurements and flow visualization technique (plume-tracer technique and thread-tracer technique). The flow visualization results are compared with the numerical results to verify the reliability. After the comparison of the coupled and uncoupled numerical results, it is found that variation in aerodynamic forces is mainly caused by ever-changing topologic structure of vortices. In this paper, it is found that: (1) FSI effect mainly intensifies the aerodynamic lift force on the vehicle under crosswind condition (especially at a velocity higher than 25m/s). (2) Aerodynamic lift force increase is mainly caused by the topological change of the separation bubble above the Ahmed body. FSI effect significantly expands the scale of the separation bubble. (3) Under crosswind condition, FSI effect will increase the rolling trend, so the actual vehicle security is lower than the yield of numerical results with FSI effect unconsidered. Therefore, the use of non-coupling calculation results as a design basis is somewhat risky. The present study has laid a theoretical foundation for the upcoming research on the two-way FSI effect on vehicle under time-dependent crosswind condition. In short, the work aims to quantify crosswind acceleration effect and fluid-structure interaction effect of aerodynamic

收稿日期: 2013-01-30; 修订日期: 2013-11-17

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划(2011CB711200)

通讯作者: 杨志刚, E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

引用格式: Shen C., Yang Z G. Numerical methods exploration and experimental validation of Ahmed model with consideration of fluid-solid-interaction effect. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(4): 37-42. 沈 沉, 杨志刚. Ahmed 模型的流固耦合数值计算方法探索与实验验证. *实验流体力学*, 2014, 28(4): 37-42.

force, to provide a method to research the real vehicle crosswind stability in a finer and more precise way, and to provide a reference to simulate the vehicle travelling status more thoroughly.

**Key words:** FSI; ALE formulation; wind tunnel test; verification

## 0 引言

现今的主流汽车侧风空气动力学研究极少考虑侧风对汽车悬架的形变和悬挂质量侧倾的影响,而车身悬架的形变会导致气动侧力与升力的变化(对于高宽比较大的双层客车尤为明显),从而对车辆的行驶安全性产生影响。虽然一些研究对相关现象做了实验和仿真<sup>[1-2]</sup>,但研究中对悬挂质量侧倾的量化研究还是不够的,分析方法也仅仅局限于系统动力学的范畴,因此所得的结论无法从流动机理层面得到解释。随着计算机性能的不断增强以及计算机仿真技术的不断进步,在汽车侧风分析时流体与结构的耦合是必要且可行的。

但由于流体与固体耦合数值仿真时,固体与流体采用的算法与网格往往不同(弱耦合),耦合界面两侧参数传递需要插值处理,且耦合的计算过程中流场计算与结构计算必须反复交换参数,因此流固耦合数值计算的可信度明显低于纯流场数值计算。

实验目的在于验证客车复杂模型的流固耦合计算结果,为下一步使用数值方法研究车辆在时变侧风下的流固耦合效应,并量化预测流固耦合对气动力的贡献提供实验依据。这里采用较简单的 Ahmed 模型<sup>[3]</sup>作为数值仿真和实验验证的对象,以验证流固耦合数值计算方法在车辆问题上的可用性。

## 1 数值计算

### 1.1 模型概述

采用后倾角为  $25^\circ$  的 Ahmed 模型作为计算及实验对象,车长为 260mm。由于对应的实验是在风洞中完成的,流场部分计算域如图 1 所示,考虑到与验证实验相吻合,来流偏航角为  $90^\circ$ ,喷口速度分别取为 20m/s、25m/s、30m/s、35m/s、40m/s。

结构部分参考汽车系统动力学的四自由度模型,底部由 4 个弹性系数均为 3921N/m 的弹簧作为支撑,支撑长度为 20mm,模型其余部分看作刚体,总重为 705 克。

### 1.2 数值方法

实际流动具有非定常特性,与弹性结构耦合会导致结构抖振。但由于结构抖振幅度相对于其位移很

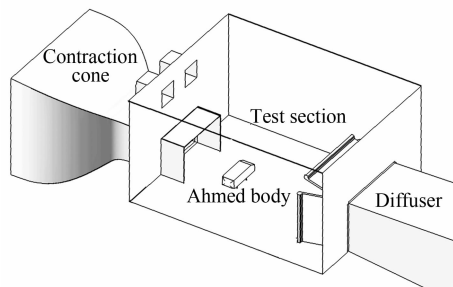


图 1 模拟风洞环境的数值模拟的计算域示意图  
Fig. 1 Computational domain of numerical simulation

小,这里认为整个系统处于准定常状态(本文 4.1 中有叙述);且由于验证实验的条件所限,实验仪器无法测量结构抖振引起的微小的瞬时流场结构变化;此外,非定常计算须捕捉瞬时细观涡结构,流固耦合模拟的每个时间步需要反复迭代至少 20 次以上,计算成本很高。综上所述,这里采用了定常的弱耦合方法来计算。

流固耦合数值计算方法有很多,对于此类较复杂的实际工程问题,使用任意 Lagrange-Euler(ALE)方法最合适<sup>[4]</sup>。流固耦合的数值计算分为流体计算与结构(固体)计算两部分,流体部分采用任意 ALE 有限体积法<sup>[5]</sup>,车体固体结构部分采用有限单元法,数值计算从流场部分开始,两部分交替迭代求解。流体计算采用有限体积法,应用带尺度自适应(Scalable)壁面函数<sup>[6]</sup>的标准  $k-\epsilon$  湍流模型,计算域的半自由流场边界使用不可穿透边界条件。结构计算采用有限单元法,由于整个工况下模型位移均在线性范围以内,求解时无须启用几何非线性迭代。结构表面位移参数与流场壁面压力参数分别通过界面保形插值(Profile Preserving Interpolation)和守恒插值<sup>[7]</sup>(Conservative Interpolation)方式传递,传递松弛因子均取为 0.8,耦合迭代 100 次使耦合残差降低至  $10^{-6}$ 。

固体部分和流体部分网格如图 2 所示,流场部分网格数约 200 万,固体部分单元数约为 4 万。ALE 法涉及到网格变形,流场部分须应用动网格技术。由于耦合计算前后流场计算域的几何关系属于拓扑同胚,且变形量不大,所以仅采用弹簧近似光滑模型<sup>[8]</sup>(Spring-Based Smoothing Model)实施动网格操作,令网格弹性系数为 0.6、边界点松弛因子为 0.5,每次流固界面传递参数迭代 110 次,以获得较好的网格质量。

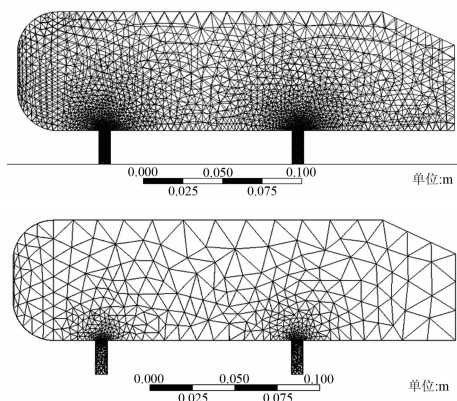


图2 Ahmed 模型流场界面网格与固体表面网格  
Fig. 2 Mesh distribution on interface of fluid and solid

## 2 验证实验

### 2.1 结构与机构的设计与安装

以同济大学地面交通工具风洞中心空气动力学模型风洞(1:15 缩比)作为实验台架,模型风洞在建设前后开展了大量的研究<sup>[9-11]</sup>。地板设计的尺寸与实验台架匹配,前段伸入喷口并倒圆角以减弱地板前缘对气流的扰动,图3表示 Ahmed 模型在风洞中的安装位置。

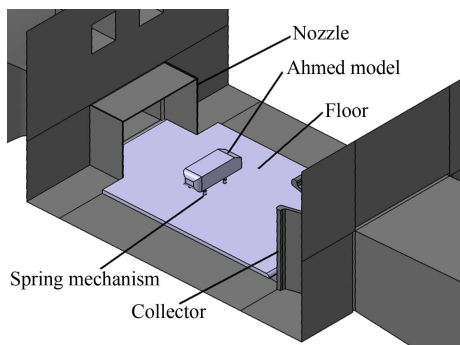


图3 风洞中模型安装位置示意图  
Fig. 3 Installation of the model in the wind tunnel

模拟悬架系统的弹簧机构设计如图4所示。加工与安装过程分为地板加工、铜套加工、弹簧模型装配等3大类共14道工序。为降低铜套内壁与弹簧之间摩擦力,使用润滑油对其实施润滑。

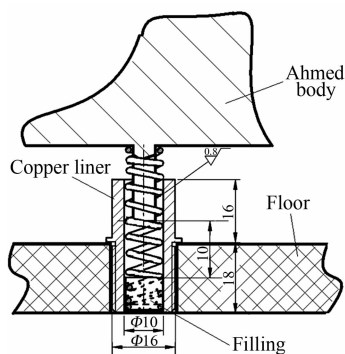


图4 模拟悬架变形的弹性机构设计  
Fig. 4 Mechanism design to simulate suspension system

实验前连接控制器、风机设备、压力传感器、模数转换器、五通道数据采集器等设备,并使用 Pitot 管标定风洞喷口风速,将实验中的风速误差控制在1%以内(如图5)。将3.1介绍的结构与机构安装入模型风洞后开始加载与测量。

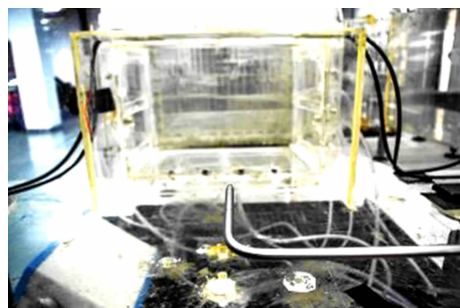


图5 空风洞的标定  
Fig. 5 Calibration of the empty wind tunnel

### 2.2 实验测量方法

#### (1) 位移测定方法

采用固定位置的长焦镜头(等效焦距约200mm)记录车体位置,并测量车底与底面高度与夹角变化,从而可以推算出车体每点的位移。测定的位移参数是本次验证实验与数值模拟进行比较最主要的参数。

#### (2) 压力测定方法

为了与数值模拟结果作对照,在车顶后方取一排间距为5mm的测点(共20个,最近测点距车顶背风缘15mm)。皮托管是实验中易于获得的测压器材,这里使用皮托管的侧孔测量压力(图6);可将经过分量处理后的数值模拟结果与测得的压力相比较。

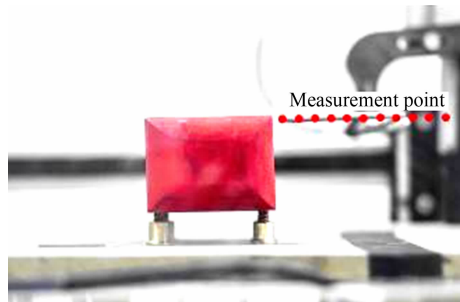


图6 压力测量装置  
Fig. 6 Pressure measurement

#### (3) 流动显示技术

烟流法可显示脉线,从而反映流场结构;通过比较烟流图像与数值模拟结果,可以在一定程度上验证数值计算的可信度。烟流法的发烟装置如图7所示。此外还应用了丝线法显示流场,通过观测丝线的摆动,可以推测前后驻点的几何位置,并将其与数值模拟得到的驻点位置比较。由于烟流法与丝线法要求在较低的流速下进行,实验时来流速度取5m/s。



图 7 烟流导入装置  
Fig. 7 Plume-tracer technique

### 3 实验与计算的结果比较

#### 3.1 侧倾位移

从实验结果来看,来流速度从 20m/s 至 40m/s,车体抖振幅度始终小于总位移量的 5%,这说明 2.2 中使用准定常数值计算方法来处理此类问题是合理的。实验拍摄的模型位移型态如图 8 所示,并与数值模拟结果相比较(如图 9)。



图 8 20m/s 和 40m/s 侧风时实验拍摄的模型位移型态  
Fig. 8 Experimental deformation under 20m/s and 40m/s crosswind

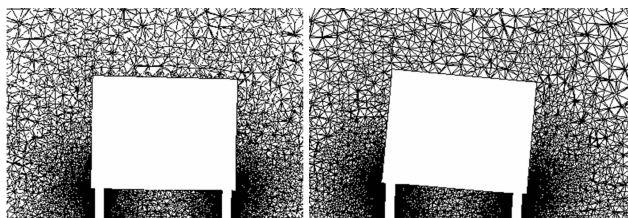


图 9 20m/s 和 40m/s 数值模拟的流体域网格变形结果  
Fig. 9 Simulated deformation under 20m/s and 40m/s crosswind

可见数值模拟结果与实验结果趋势一致,数值模拟的车体侧倾角度略大于实验测量结果,他们之间的对比关系如图 10 所示。由于悬架模拟机构中的铜套与弹簧不可避免地存在接触摩擦,且侧风风速加载顺

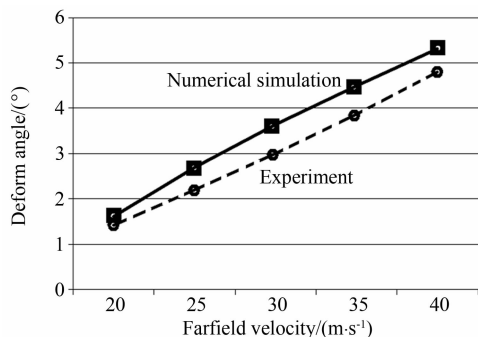


图 10 车体变形的实验与数值模拟结果比较  
Fig. 10 Comparison of experimental and numerical results of deformation

序为从小到大逐步加载,因此该摩擦阻碍了变形的发展,导致实验变形结果较小。随着侧风风速的加大,两者差值趋于稳定。

#### 3.2 流场压力

以来流速度为 20m/s 为例,图 11 显示了车顶后方测点的数值与实验压力值的结果比较。两者趋势一致,两者之间的误差主要是由于实验中 Pitot 管对流场的干扰引起的。

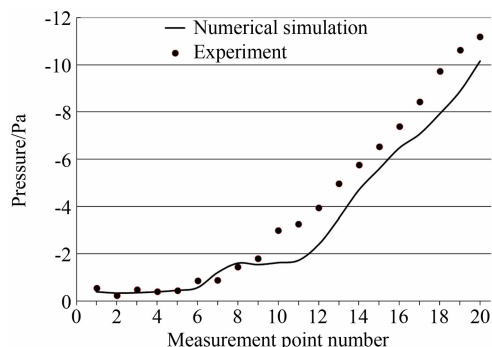


图 11 车顶后方测点的压力值比较  
Fig. 11 Comparison of experimental and numerical results of pressure leeward side

#### 3.3 流动显示

采用烟流法显示流场脉线,并将之与数值计算的流线图相比较来验证流场结构计算的准确性。

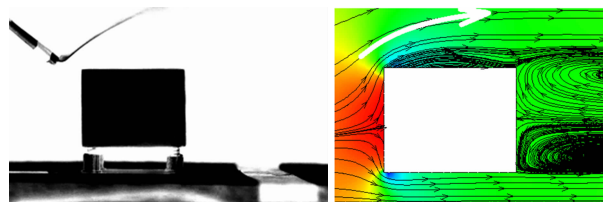


图 12 实验与数值模拟的流场结构比较  
Fig. 12 Comparison of Plume-tracer result and numerical flow field structure

丝线法可显示模型表面驻点、分离点、附着点的位置,对分析流场结构有辅助作用。图 13 是后附着点的纵向位置与数值模拟结果的比较,两者的后附着点位置大约相差 2%。

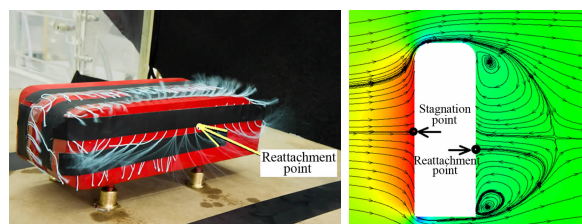


图 13 丝线法观测的后附着点位置与数值模拟结果相比较  
Fig. 13 Comparison of thread-tracer result and numerical flow field structure

综上,验证了计算结果的可用性。由于非耦合实验过程中车身不侧倾而耦合实验时车有侧倾,但目前本实验的测量手段难以量化两种工况下的区别,所以仅从数值模拟角度对耦合和非耦合的流场结构做比



较,并讨论其机理。

4 两种计算方法的差异与其机理分析

4.1 气动广义力差异

为了比较耦合与非耦合之间的差异,并找到其原因,对照计算了相应速度下传统计算方法得到的不计流固耦合的情况。非耦合计算方法与本文 2.2 中的方法类似,只是结构不参与求解计算,因此无须使用动网格技术。

以来流速度 30m/s 为例,计及流固耦合效应与不计流固耦合效应的气动六分力如表 1 所示。从结果来看,不计流固耦合时计算的气动升力有很大误差,其值小于实际情况的一半;可见对于 Ahmed 模型侧风问题而言,流固耦合对气动升力有重要影响。

表 1 各广义气动力的比较

Table 1 Comparison of the generalized aerodynamic forces	耦合计算	非耦合计算	差异
侧力(N)	12.38	11.96	-3.39%
升力(N)	3.374	1.439	-57.35%
侧倾力矩(N×m)	0.6823	0.6643	-2.64%
横摆力矩(N×m)	0.0960	0.0907	-5.52%

4.2 流场拓扑结构及其分析

由于车身在气动力下会产生形变(如图 14),这种流场形状的变化导致流场涡结构的变化。模型的顶部流场结构变化是造成升力明显变化的主要原因。从下图可以观察到:两者的拓扑结构是不同的,计及流固耦合效应时顶部附体涡结构更为复杂,且车身变形造成顶部分离泡尺度明显大于不计流固耦合时的情况,且该附体涡的强度也更高,导致车顶压力较低,气动升力更大。

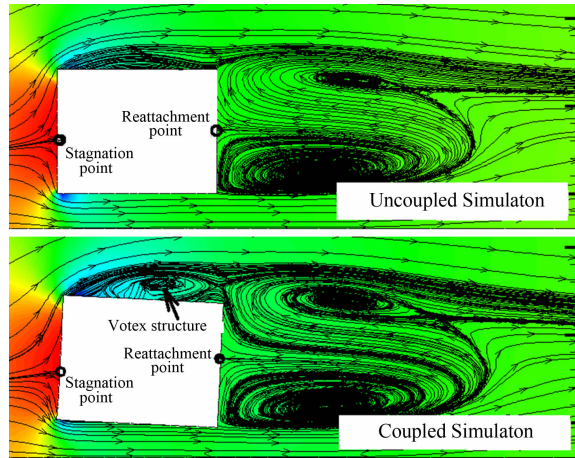


图 14 耦合和非耦合计算的流场结构比较

Fig. 14 Comparison of flow field structures by uncoupled and coupled simulations

流场的再附着对壁面的压力分布有重要影响。根据分离流理论,可以通过车体表面油流图来判别顶部流再附着点位置。图 15 比较了两种计算方法的模型顶部流场的再附着情况。不计耦合效应时,车体顶面没有显著的再附着现象,压力变化较均匀;而计及耦合时顶面再附着明显(与前文所述的分离泡和顶部流场结构吻合),这导致车体顶面压力变化更剧烈,产生的气动侧倾力矩也增大。从图中可以看出形变对压力分布的影响(对顶部云图的分离噪点做了少量后期处理):计及流固耦合效应时顶面低压区面积更大,整体压力更低,导致车体气动升力增加;且顶面压力沿纵向和横向分布都更不均匀,导致车体气动力矩增加,故而加重侧倾趋势,这也可以从表 1 看出。

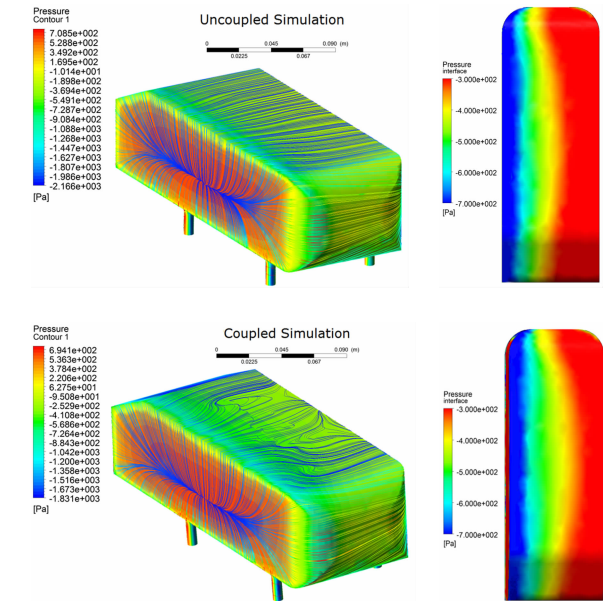


图 15 顶部油流图和顶部压力分布比较

Fig. 15 Comparison of top surface pressure results by uncoupled and coupled simulations

探讨绕流流场的结构可从比较前驻点与后附着点的位置入手,前驻点与后附着点位置的变化主要影响模型的气动力矩。为了消除车体变形的影响并着重观察车体附近流场,表 2 采用了前驻点与后附着点对于车体的相对高度进行比较,可见两者计算的后附着点高度差大于前驻点高度差,即耦合计算的后附着点较非耦合计算方法有明显提升,说明耦合计算的车体周围的速度环量大于非耦合计算的结果,解释了耦合计算高升力和高气动侧倾转矩的原因。

表 2 前驻点与后附着点位置比较

Table 2 Comparison of the flow field structures	耦合计算	非耦合计算	差异
前驻点相对高度	0.5653	0.5795	2.50%
后附着点相对高度	0.6712	0.6363	-5.21%

此外,车底流速变化也会对气动力产生影响,变形导致模型底部流速降低,流动被滞止,底部压力升高,也是造成流固耦合效应会提高升力的原因之一。

## 5 结论与展望

通过仿真与实验验证相结合的方法,我们得到以下结论:

(1) 实验与数值模拟结果基本吻合,两者变形结果差别始终在 20%以内,对于工程问题而言,数值模拟结果具有参考意义。

(2) 流固耦合效应造成的升力变化最为显著,侧风较大(大于 25m/s)时,传统方法预测的升力不到计及流固耦合时的一半,侧风引起的流固耦合效应导致的升力变化不应忽略。

(3) 气动升力变化的主要原因在于顶部分离泡的拓扑结构发生改变,流固耦合效应使分离泡尺度显著扩大;此外,车底流场的变化也是原因之一。

(4) 侧风环境下,流固耦合效应会加重车辆侧倾的趋势,所以实际的车辆行驶安全性低于不计流固耦合效应的数值计算结果。因此,使用非耦合计算结果作为设计依据偏于冒险。

目前的验证工作仅针对类车体纯侧风的工况展开,下一步工作将以时变侧风为研究对象研究行驶状态下车辆<sup>[12]</sup>宏观气动力与结构的耦合效应;此外,还可以结合大涡模拟和多体动力学研究路面激振与气动力的细观耦合效应。但目前来看,流体与结构耦合的汽车侧风研究方法并未受到广泛应用,致使汽车侧风研究存在局限性,纯系统动力学和纯空气动力学都无法完全模拟实际车辆行驶时的状况。

**致谢:**感谢上海地面交通工具风洞中心的单希壮教授对实验的指导;感谢夏超、李宝玉、刘洋研究生对实验的帮助。

## 参考文献:

- [1] 谷正气,王和毅,罗荣锋,等. 计及风压中心漂移的汽车侧风稳定性研究[J]. 湖南大学学报, 2005, 32(3): 70-73.  
Gu Zhengqi, Wang Heyi, Luo Rongfeng, et al. Study on automobile cross-wind stability in consideration of pressure center's shift[J]. Journal of Hunan university (Natural Sciences), 2005, 32(3): 70-73.
- [2] 海贵春,谷正气,王和毅,等. 侧风对汽车高速行驶性能影响的仿真研究[J]. 湖南大学学报, 2006, 33(2): 4.  
Hai Guichun, Gu Zhengqi, Wang Heyi, et al. Research on the effect of crosswinds on the stability of high speed vehicles[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2006, 33(2): 40-43.

- [3] Ahmed S R, Ramm R, Faltin G. Some salient features of the time-average ground vehicle wake[C]//SAE Technical Papers. Detroit: SAE World Congress & Exhibition, 1984: 840300.
- [4] 朱洪来,白象忠. 流固耦合问题的描述方法及分类简化准则[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 92-99.  
Zhu Honglai, Bai Xiangzhong. Description method and simplified classification rule for fluid-solid interaction problems[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 92-99.
- [5] 蒋莉,沈孟育. 求解流体与结构相互作用问题的 ALE 有限体积方法[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2000, 15(2): 148-155.  
Jiang Li, Shen Mengyu. ALE finite volume computations of fluid-structure interaction problems[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 2000, 15(2): 148-155.
- [6] Grotjans H, Menter F R. Wall functions for general application CFD codes[C]//ECCOMAS 98 Proceedings of the Fourth European Computational Fluid Dynamics Conference, 1998: 1112-1117.
- [7] Galpin P F, Broberg R B, Hutchinson B R. Three-dimensional navier stokes predictions of steady-state rotor/stator interaction with pitch change[C]//3rd Annual Conference of the CFD, Society of Canada, Banff, Alberta, Canada, Advanced Scientific Computing Ltd, June 25-27, 1995.
- [8] Degand C, Farhat C. A three-dimensional torsional spring analogy method for unstructured dynamic meshes[J]. Computers and Structures, 2002, 80(3-4): 305-316.
- [9] 李启良,杨帆,杨志刚. 两种湍流模型在风洞拐角流场计算中的应用及比较[J]. 计算机辅助工程, 2009, 18(1): 38-42.  
Li Qiliang, Yang Fan, Yang Zhigang. Application and comparison of calculation of two turbulence models on flow field of wind tunnel corner[J]. Computer Aided Engineering, 2009, 18(1): 38-42.
- [10] 杨志刚,李启良,杨帆. 抽吸气体回送位置及流量比例对整车风洞试验段流场影响的研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(4): 283-286.  
Yang Zhigang, Li Qiliang, Yang Fan. A study on the effects of drawn-air flow-back location and flow ratio on the flow field in the test section of full scale wind tunnel[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(4): 283-286.
- [11] 李启良,杨志刚. 计算流体力学在气动-声学风洞设计中的应用[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(3): 373-377.  
Li Qiliang, Yang Zhigang. Application of CFD for the design of aeroacoustic wind tunnel[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(3): 373-377.
- [12] Chen Shen, Zhu Hui, Yang Zhigang. Study on the aerodynamics mechanism of passenger car under unsteady crosswind[C]//Advanced Materials Research, 631-632(2013), 2012. 12: 809-816.

## 作者简介:



沈 沉(1988-),男,上海人,硕士。研究方向:空气动力学及流固耦合。通信地址:上海市平阳路 50 弄 44 号 1503 室(201102)。E-mail:sc@sccax.net。

(编辑:张巧芸)