

文章编号: 1000-4750(2014)07-0203-05

时变侧风下双层客车的流固耦合数值模拟

沈 沉, 杨志刚

(同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘 要: 流固耦合效应会影响行驶安全性。利用任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法对某型客车 1:1 模型实施时变侧风下的流固耦合数值模拟。其中车辆使用系统六自由度动力学模型简化, 并选取了三种典型的侧风工况(线性、伪阶跃、正弦)分别模拟。对于各类工况, 通过耦合与非耦合计算的比较, 得到流固耦合效应对气动升力和俯仰力矩影响较显著。其机理在于流固耦合效应造成的流场结构的变化。有助于量化了解流固耦合效应对各个气动力的影响, 为更精细地模拟车辆行驶状态提供计算方法上的参考。

关键词: 流固耦合; ALE 方法; 客车; 侧风稳定性; 数值模拟

中图分类号: O355; U461.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.01.0066

NUMERICAL SIMULATION OF FLUID-SOLID-INTERACTIONS FOR DOUBLE-DECK COACH UNDER TIME-DEPENDENT CROSSWINDS

SHEN Chen, YANG Zhi-gang

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The fluid-solid interaction (FSI) between crosswind and moving vehicles has an impact on driving safety. An arbitrary Lagrange-Euler method is applied to the FSI numerical simulation of a 1:1 double-deck coach model. A dynamic model for six-degrees-of-freedom systems is put into use to simplify the coach model. The systems are simulated under three typical crosswind forms (linear cross-wind, pseudo-jump cross-wind, sine cross-wind) respectively. FSI effect influences the lift force and the yawing moment more notably than other components of general forces, caused by the change of a flow field structure. Through the research, how much the FSI effect influence the general forces respectively can be quantitatively known. It provides a reference to simulate the vehicle travelling status in a more precise way.

Key words: fluid-solid interact; ALE method; coach; crosswind stability; numerical simulation

侧风会造成悬架变形, 而悬架变形会改变车身的姿态, 导致其气动力改变。双层客车广泛应用于我国长途客运, 其行驶安全更是关系到大量乘客的安全。目前已有的研究无法就车身侧倾对流场结构的影响进行定量分析, 也未考虑车身与流场的耦合关系。由于过去的仿真手段和计算能力难以对整车流场-结构做准确的定量计算; 实验又相对复杂, 时变环境侧风难以在风洞实验中准确还原, 所以定量的车辆流固耦合效应研究较少。虽然, 一些研究对相关现象做了定性的实验和仿真^[1-4], 但研究中

悬挂质量侧倾的量化研究还较少, 分析方法也仅限于系统动力学的范畴, 而很少考虑结构变形对流场的耦合作用, 因此所得的结论无法从流动机理层面得到解释。基于已有的研究, 无法得知流固耦合效应对各个气动力分量有多大影响, 也无法确定了解其对于行驶安全的作用。因此, 结合流固耦合的数值手段, 更为贴近实际地研究双层客车侧风的行驶安全性是十分有必要的。对于实际行驶情况, 侧风往往不是恒定的。选取三种典型的时变自然侧风^[5](线性、伪阶跃、正弦)工况作为数值模拟的条件,

收稿日期: 2013-01-21; 修改日期: 2013-09-05

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划项目(2011CB711200)

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士, 博导, 从事车辆工程及空气动力学研究(E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn).

作者简介: 沈 沉(1988—), 男, 上海人, 硕士生, 从事空气动力学及流固耦合研究(E-mail: sc@sccax.net).

其模拟结果能更具代表性地反映客车的实际状态。

1 数值计算

1.1 计算思路

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^[6]。使用缩比模型模拟固然可以减小计算量,但是由量纲分析得出:缩比模型无法同时保持流场和结构的所有物理量的相似性;所以这里采用了某型双层客车 1:1 模型作为数值模拟对象。

建立该型双层客车模型,行驶速度为 30m/s。三种典型时变侧风工况(线性、伪阶跃、正弦)的最大侧风风速为 20m/s(如图 1)。

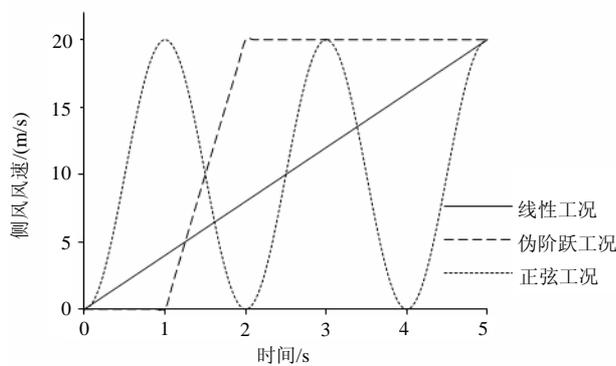


图 1 稳态侧风的入口速度随时间变化曲线
(线性、伪阶跃、正弦)

Fig.1 Velocity variation on the inlet
(linear, pseudo-jump, sine)

在计算中仅认为悬架会产生变形,而认为车身等部件为近似刚体;尽管如此,也需要对车身等部件做离散化处理,虽然划分的单元并不参与变形求解,但固体单元仍起到与流体界面传递并插值参数的作用,所以仍然属于有限单元法范畴。

1.2 数值模型

建立数字化模型后流场和结构分别划分非结构化网格(图 1),流场网格带边界层棱柱网格,客车外形尺寸 13.67m×2.55m×3.96m(长×宽×高),以定常流场计算验证流场网格无关性,网格数量约 200 万,固体部分单元数约 2.8 万。计算域布局如图 2。利用六自由度动力学模型简化车辆系统,六轮悬架系统为六自由度,车轮为零自由度。悬架系统用弹簧和阻尼替代,以达到模拟车辆系统动力学的效果。弹性系数和阻尼系数来源于实车所用的空气弹簧参数,车重取实车的满载重量。

由于求解目的是得到宏观物理量的变化,时间步长取 0.1s 即可,求解总时间为 5s;正面来流速度

为 30m/s;各种工况侧风风速如图 1,由于各工况均以 0 侧风风速为起始点,因此以接近 0 的侧风风速初速度初始化流场。计算可以得到各个时间步的客车气动力,流场速度、压力等参数的分布,单元的位移、速度、加速度、接地点应力等参数。

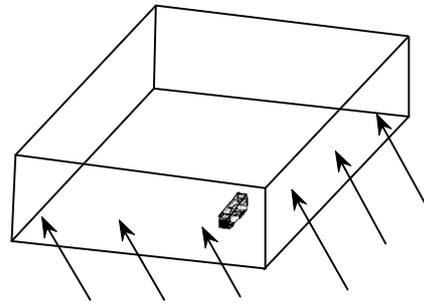


图 2 计算域及其布置

Fig.2 Layout of Computational domain

1.3 数值方法

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,流体部分采用有限体积法和 ALE 法,结构部分采用带单元插值的多体动力学方法,数值计算从流场部分开始,两部分交替求解。流体计算采用有限体积法,应用带尺度自适应(Scalable)壁面函数^[7]的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,计算域顶部的半自由流场边界使用不可穿透边界条件(对称边界条件),车身表面的边界条件为零速度壁面边界条件,地面采用移动壁面边界条件。结构计算采用有限单元法,由于整个工况下类车身位移均在线性范围内,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^[8](Conservative Interpolation)方式传递,传递松弛因子均取为 0.85,每个时间步流场迭代 30 次,流固耦合迭代 10 次使耦合残差降低至 10^{-5} 。

ALE 法涉及到网格变形,流场部分应用动网格技术。由于耦合与非耦合计算的流场结构差异可能较小,必须保持耦合与非耦合的计算网格拓扑关系一致且网格分布一致,才使计算结果具有可比性。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^[9](Spring-Based Smoothing Model)辅以网格重划技术(Remeshing)实施动网格操作,界面边界 50mm 内的所有边界层随车身一起运动以保持边界层网格质量。令网格弹性系数为 0.7、边界点松弛因子为 0.6,每次流固界面传递参数迭代 50 次,以获得较好的网格质量。

2 结果与分析

2.1 计算结果中结构部分比较

通过流固耦合数值模拟可以得到车身周围流场网格的变形情况以及车身网格变形规范化后的结果(图4), 规范化后的结果将实际计算变形放大, 以表示质点之间的位移相对关系。位移最大出现在车身顶部, 其位移以侧向为主。取车身顶部测点观察不同工况下测点侧向运动情况(图5、图6、图7)。根据计算, 三种工况中是最大侧向位移为121.4mm, 发生在伪阶跃工况的2.1s时刻。

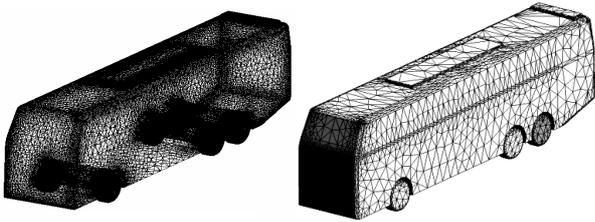


图3 流体界面网格与固体界面网格图
Fig.3 Mesh distribution on interface of fluid and solid

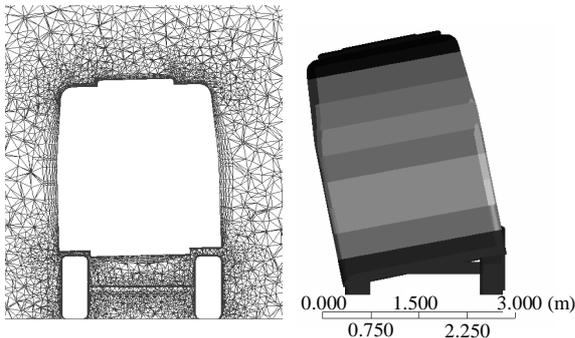


图4 实际和规范化变形结果(线性工况最大变形)
Fig.4 Actual and normalized deformation (last time step of linear)

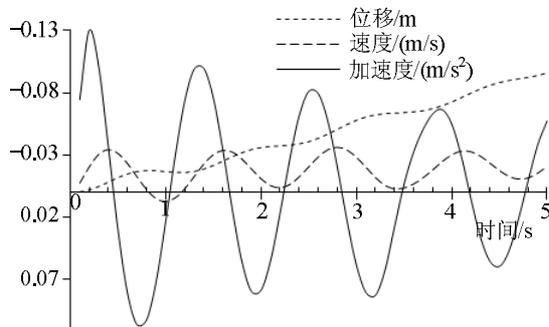


图5 线性侧风工况下车顶测点的运动学参数变化
Fig.5 Kinematic parameters change with time (linear)

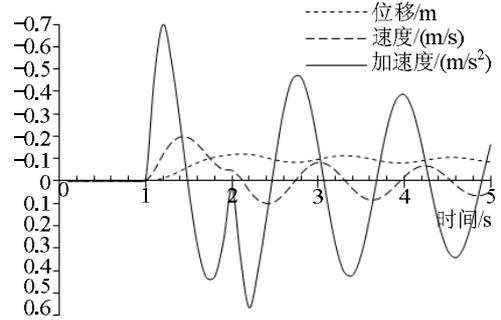


图6 伪阶跃侧风工况下车顶测点的运动学参数变化
Fig.6 Kinematic parameters change with time (pseudo-jump)

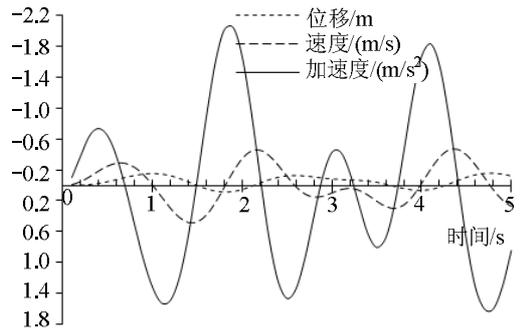


图7 正弦侧风工况下车顶测点的运动学参数变化
Fig.7 Kinematic parameters change with time (sine)

2.2 计算结果中流场部分比较

气动侧力和气动升力以压差部分为主, 粘性部分占0.5%左右。图8、图9、图10分别显示了耦合与非耦合两种计算方法得到的气动力(作为对照, 非耦合计算不考虑车身变形, 仅对流场求解)。可以看到气动升力的区别相对较大, 而其他两个分量在大多数时间中差异不大。伪阶跃工况2s时刻, 耦合计算结果高出非耦合计算结果约38%, 且此时气动侧力的差异也较大。

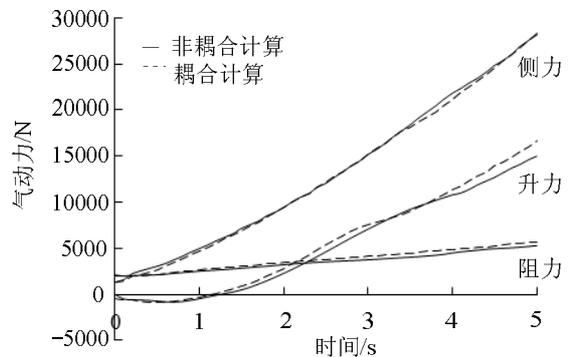


图8 线性侧风工况下两种计算方法的气动力比较
Fig.8 Aerodynamic force change with time (linear)

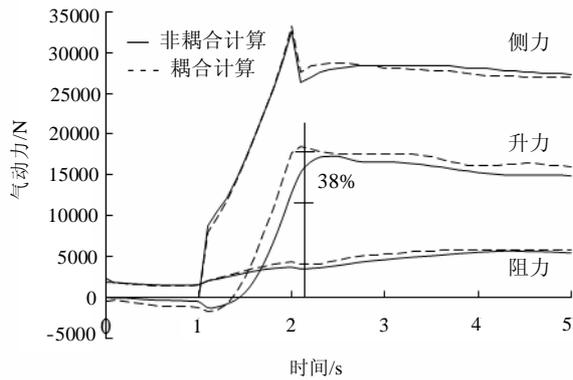


图 9 伪阶跃侧风工况下两种计算方法的气动力比较
Fig.9 Aerodynamic force change with time (pseudo-jump)

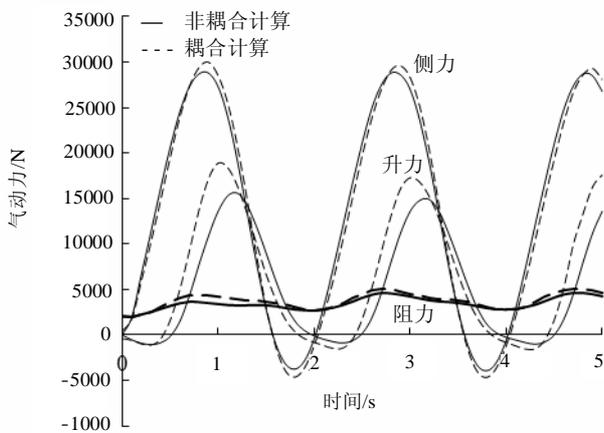


图 10 正弦侧风工况下两种计算方法的气动力比较
Fig.10 Aerodynamic force change with time (sine)

表 1 显示线性工况下 5s 时刻时,两种计算方法的力矩结果比较情况,矩心为底面中心的地面投影。大多数时间耦合对侧倾力矩和横摆力矩几乎没有影响,而对俯仰力矩的影响较大,通过分析计算云图可知,这是由于车身侧倾导致顶部分离泡增强,而分离泡在正面来流影响下在车身前部产生更大的低压区所引起的;而且由于矩心位置的选取关系到对气动力矩数值,其差异百分比仅供参考。但在伪阶跃这类侧风变化剧烈的工况下,两种方法计算得到的侧倾力矩也有较大差别。

表 1 线性工况下 5s 时刻时两种计算方法的力矩结果比较
Table 1 Comparison of moments at 5s by 2 methods (linear)

	侧倾力矩	俯仰力矩	横摆力矩
非耦合计算/(N·m)	51566	16197	56078
耦合计算/(N·m)	51196	21124	55705
差异/(%)	-0.72	30.42	-0.67

2.3 力学机理

非稳态流固耦合的力学机理较为复杂,但主要思路还是分别分析流场对结构的影响和结构对流场的影响。而其耦合关系是流场与结构相互影响造

成的。结构变形导致流场的变化,结构部分相对简单不做过多论述,这里主要讨论流场的变化。了解了气动力的变化后,就不难由系统动力学得出车身摆动的规律。

车身所受空气动力与其表面静压分布直接相关。由于这几种工况的空气动力学机理类似,这里仅以线性侧风 5s 时的车身静压分布为例说明问题。耦合计算与非耦合计算的车身表面静压分布如图 11 所示。浅色部分表示耦合计算的表面静压高于非耦合计算,而深色部分表示耦合计算低于非耦合计算。可见耦合的车顶低压区域面积较大(约占 70%),且车底表面以高压区域为主(约占 90%)。两种计算方法得到的升力差异主要体现于此。

耦合计算的上表面压力较低的区域主要分布在上风侧,从流动机理上来说,这是由于此处的流动分离现象更为严重造成;车身侧倾造成顶部分离泡尺寸与强度发生改变。

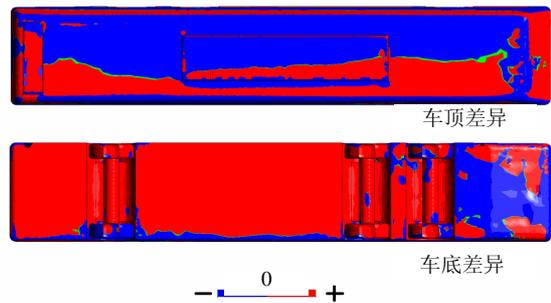


图 11 耦合计算与非耦合计算的车身表面静压分布差异 (线性工况, 5s 时刻)

Fig.11 Difference of static pressure distribution on the surface (linear crosswind at 5s)

图 12 比较了非耦合与耦合计算得到的垂向截面上的静压云图之间的差异。第三幅图中浅色部分代表耦合计算的静压高于非耦合计算,而深色部分表示耦合计算的静压低于非耦合计算。虽然流固耦合效应造成的总体变形并不太大,但是这种变形仍然加大了顶部气流分离,故顶面压力较低;而侧倾造成底部气流在流管变细时形成滞止效应,故底面压力较高(从图 8 可以看出)。

另外,如果用车身周围的速度环量来解释其升力的变化也是可行的。对于高速行驶的客车,升力的变化对车辆的操控性能有重要作用。

不同于气动升力的较大差异,其他两个方向的气动力受到涡结构的变化影响则要小得多,在投影面积几乎不变的情况下,其他两个气动力分量的变化要小得多。

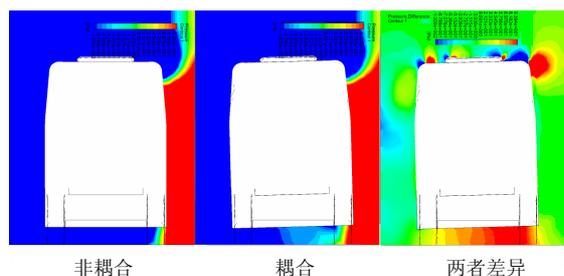


图 12 垂直截面上非耦合与耦合计算的静压云图及其比较 (线性工况, 5s 时刻)

Fig.12 Difference of static pressure distribution on the cross-section (linear crosswind at 5s)

由位势流理论, 车身本身的摆动速度和加速度相对流场会形成速度势和气动导数, 也会对车身产生附加的力的作用^[10]。这种有车身响应现象引起的气动侧力影响, 可通过分析图 5、图 6、图 7 速度与加速度对图 8、图 9、图 10 中气动侧力的变化“滞后”的影响得知。当然这种“滞后”也出现在其他工况中。

3 结论与展望

通过以上研究, 可以基本定量地了解流固耦合效应对于在时变侧风中行驶的客车的影响, 同时还可得到如下结论:

(1) 利用 ALE 流固耦合计算方法对实车进行数值模拟是可行的, 但其计算量远大于非耦合计算(计算时间大约多出一个数量级), 而且求解参数需要反复调试, 鲁棒性比非耦合计算差。

(2) 流固耦合效应造成的升力变化最为显著, 侧风很大且变化剧烈时, 流固耦合效应导致的升力变化不应忽略。

(3) 气动升力和俯仰力矩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扩大; 此外, 车底流场的变化也是原因之一。

(4) 车身本身的摆动速度和加速度相对流场会形成附加速度势和附加加速度, 也会对气动力产生一定影响。宏观反映在气动侧力变化的“滞后”现象。

(5) 侧风环境下, 流固耦合效应会增加车身所受升力和俯仰力矩, 从而加重车辆的失控或侧翻的趋势, 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客车设计依据偏于冒险。

将来, 随着计算机能力的进一步发展, 运算速度和运算资源会进一步提高。到时, 对更复杂的模

型使用大涡模拟方法, 考虑路面激励并捕捉细微动力学参数变化的流固耦合分析也将可以实现。

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 (Nature Science), 2005, 32(3): 70—73. (in Chinese)
- [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): 40—43.
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. (in Chinese)
- [3] Alexander A A, Brian S R, Walter W W. The influence of vehicle aerodynamic and control response characteristics on driver-vehicle performance [J]. SAE, 1979, 88(2): 1391—1399.
- [4] Richard H K, Jeffrey R H. Effects of crosswind on vehicle response—full-scale tests and analytical predictions [J]. SAE, 1980, 89(3): 2578—2590.
- [5] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 102.
Gu Zhengqi. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 102. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] Grotjans H, Menter F R. Wall functions for general application CFD codes [C]// Papailiou K D, et al. ECCOMAS 98 Proceedings of the Fourth European Computational Fluid Dynamics Conference, 1998: 1112—1117.
- [8] 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, by P.F. Galpin, R.B. Broberg and B.R. Hutchinson, June 25-27, 1995.
- [9] 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.
- [10] Shen Chen, Zhu Hui, Yang Zhigang. Study on the aerodynamics mechanism of passenger car under unsteady crosswind [C]. Advanced Materials Research, 631-632(2013), 2013: 809—816.