

基于流固双向耦合的轿车气动与流致振动特性

胡兴军,王泽伟,于果,刘飞,兰巍[†],余天明,桑涛
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室,吉林长春130022)

摘要:传统流体力学数值仿真不考虑车身弹性结构与外流场之间的相互作用,致使得到的结果与真实情况不符.以某实车模型为研究对象,对其进行考虑流固耦合效应的CFD仿真,并在气动阻力、气动升力、流场结构等方面与传统流体数值仿真结果对比,结果表明:流固耦合效应对气动升力影响较大,随车速增加两种仿真方法差异率可达到38%,直接关系到车辆稳定性及安全性.利用流固耦合CFD数值仿真探究整车风激振特性,证明了实车振动幅值主要影响因素为风激振频率及作用力大小.进一步通过对车辆弹性结构的刚度优化改善汽车风激振现象,从而提高乘员的舒适度.

关键词:汽车空气动力学;双向流固耦合;数值仿真;流场;安全性

中图分类号:U461.1 **文献标志码:**A

Automobile Aerodynamic and Flow Induced Vibration Characteristics Based on Bidirectional Fluid-structure Interaction

HU Xingjun, WANG Zewei, YU Guo, LIU Fei, LAN Wei[†], YU Tianming, SANG Tao
(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The traditional numerical simulation of fluid mechanics does not consider the interaction between the elastic structure of the car body and the external flow field, which makes the results inconsistent with the real situation. Taking a real vehicle model as the research object, the CFD simulation considering the effect of fluid-structure interaction is carried out, and the results of aerodynamic drag, aerodynamic lift, flow field structure and other aspects are compared with the traditional fluid numerical simulation results. The results show that the fluid-solid coupling effect has a greater impact on the aerodynamic lift, and the difference between the two simulation methods can reach 38% with the increase of vehicle speed, which is directly related to vehicle stability and safety. Using fluid-structure coupling CFD numerical simulation to explore the characteristics of wind-induced vibration of the whole vehicle, it is proved that the main influencing factors of the actual vehicle vibration amplitude are the wind-induced vibration frequency and the magnitude of the force. Moreover, the stiffness of the vehicle elastic structure is optimized to improve the wind-induced vibration of the vehicle, so as to improve the comfort of passengers.

Key words: automobile aerodynamics; bidirectional fluid-solid interaction; numerical simulation; flow field; safety

* 收稿日期:2021-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875238), National Natural Science Foundation of China(51875238)

作者简介:胡兴军(1976—),男,重庆人,吉林大学教授,博士生导师

[†] 通信联系人, E-mail: lanwei@jlu.edu.cn

汽车空气动力学由于影响汽车的燃油经济性,操纵稳定性及安全性等已经成为汽车开发中不可缺少的一部分,传统计算流体力学仿真只考虑流体对车辆的气动特性影响,忽略了车辆振动与外流场的耦合作用,从而导致得到的数据与实际情况存在一定偏差.尤其在高速行驶工况下,流固耦合效应加剧将更加影响车辆行驶的稳定性.因此,在计算流体力学中考虑流固耦合效应,采用流体与固体软件协同仿真的方法^[1],使数值仿真结果更为精准,可以更好地开展车辆气动特性和振动特性研究.对提高车辆的稳定性、舒适性设计提供参考依据.

许多研究人员进行了流固耦合相关研究,文献[2]在时域内对剪切三角翼的流固耦合效应进行了研究.文献[3]对汽车外后视镜风致振机理与特性采用流固耦合手段进行了探究.文献[4]建立了风-车(列车)-桥耦合系统模型,研究环境风对耦合系统的振动影响,计算结果表明流致振动现象严重影响车辆稳定性.李田^[5]利用任意拉格朗日欧拉法实现列车的流固耦合仿真,指出了风激振对高速列车运行安全性的影响.当前的流固耦合数值仿真研究对象一般为列车、机翼或建筑等,对汽车实车研究多采用单纯空气动力学、多体动力学方法或者单向流固耦合数值仿真研究.

针对以上所述关于车辆流固耦合气动及流致振动研究的不足,本文以某实车模型为研究对象,将考虑双向流固耦合效应的数值仿真与传统计算流体力学仿真进行对比,探究两者流场及气动力差异的产生机理,并进行整车风激振特性研究.

1 流固耦合理论基础

流固耦合数值仿真需要将流体域与固体域联立协同求解,两相交界面上的数据传递是关键问题所在.由于固体域与流体域计算采用的分别是拉格朗日和欧拉描述方式,在仿真过程中,当固体产生较大位移时,两者交界面上的节点不再重合,因此仿真出错.为解决此问题,采用任意拉格朗日欧拉(ALE)法^[6]即引入参考坐标系,可以连续追踪边界,交界面的网格节点跟随固体结构节点运动,防止网格畸变.此外,流固耦合交接面上需要满足位移与力平衡的动力学条件^[7-8].

$$d_f = d_s \quad (1)$$

式中: d_f 、 d_s 为流体节点与固体节点位移.

$$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau}_f = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau}_s \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}_{(fs)}$ 为应力(流体/固体); \mathbf{n} 为单位法向量分量.

节点坐标可以在流体中通过已知的运动学条件求得,在流固交界面上将积分计算出的合力施加到对应固体节点上^[9]:

$$F_{(t)} = \int h^d \boldsymbol{\tau}_f \cdot d_s \quad (3)$$

式中: h^d 为固体节点位移; d_s 为微元面积.

流固耦合体系里解向量为:

$$X = (X_f, X_s) \quad (4)$$

$X_{s,t}$ 是耦合交界面节点上的解,分别位于固体与流体上.

已知 $d_s = d_s(X_s)$, $\boldsymbol{\tau}_f = \boldsymbol{\tau}_f(X_f)$,耦合系统的有限元方程式如下所示:

$$F[X] = \begin{bmatrix} F_f[X_f, d_s(X_s)] \\ F_s[X_s, \boldsymbol{\tau}_f(X_f)] \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

式中, F_f 是流体方程; F_s 是结构方程.

进行流固耦合瞬态仿真计算时,固体的变形会影响流场结构,因此在流体计算时需要用动网格技术来完成网格的更新.相关动网格参数设置完成后,变形区域的网格即会进行自适应变形.本文中动网格方法采用迭代法,主要分为弹簧光滑,动态分层和局部网格重划三个模型,弹簧光滑模型核心思想为在计算中,假定网格节点之间为平衡状态下的弹簧系统,节点位移之后根据Hooke定律经过迭代确定新平衡状态下的网格节点坐标.动态分层模型多用结构化网格中,在网格运动边界根据其运动状态增减网格层数.局部网格重划模型主要应用于非结构网格中,对运动区域的网格插值计算进而重新划分.本文采用的主要为局部网格重划模型.

迭代法可以较好地处理结构大位移运动,适合车身姿态变化的情况,但不足的是由于需要进行大量插值计算,迭代动网格方法会延长计算时间,降低计算效率^[10-14].

2 基于流固耦合效应的车辆数值仿真

本章考虑流固耦合效应,对实车在流场中的气动力及风激振现象展开研究.

2.1 模型及网格参数

采用某轿车实车模型,长度×宽度×高度为4.4 m×2.0 m×1.5 m,正投影面积:2.18 m².对车辆的细节进行简化及平整化处理,并将实车的悬架及轮胎等效为弹性单元,使用贴体性好的5~20 mm尺寸渐变

三角形网格对模型进行网格划分,如图1所示.在轮胎和车体之间加入弹性阻尼单元以代替悬架和车轮等弹性结构,车身及其部件的形变忽略不计,并将车轮底部设置为固定端以便研究车身在流固耦合仿真中的位移情况,弹性阻尼单元根据实车条件等效刚度设为 $20\,000\text{ N/m}$,阻尼 $150\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,固体计算采用ABAQUS软件中瞬态隐式方法求解.

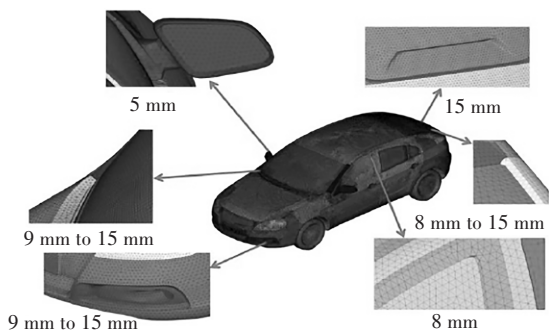


图1 实车网格划分

Fig.1 Real vehicle meshing

流固耦合计算对计算资源有一定要求,在保证精度的前提下,也要考虑硬件条件.流体软件使用STAR-CCM+,并对流体网格进行网格无关性验证,网格数量与阻力系数的关系见图2.随着流体网格数量逐渐增加,可以发现,当网格数超过900万时,阻力系数逐渐稳定在0.332左右,另外边界层厚度为面网格尺寸的1/3,层数设定为5层.最终确定流体域尺寸设为10倍车长,9倍车宽,5倍车高^[15-17],并设置两个加密区,最终使用20~300 mm的流体网格^[18-22].如图3所示,网格数量大约为910万.

本文采用瞬态流固耦合数值仿真,使用 $k-\omega$ SST湍流模型^[23],时间步长设为0.001 s,流体与固体的数据传递通过车身作为耦合交界面实现^[24].

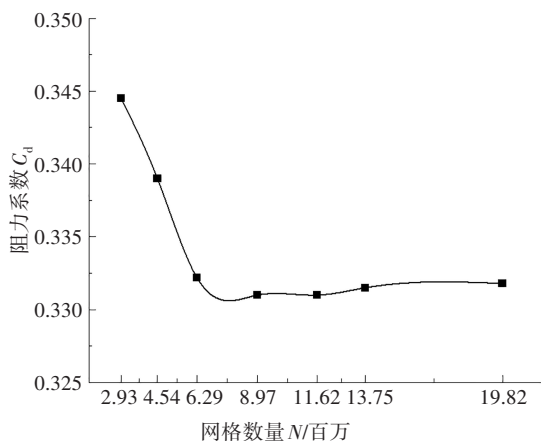


图2 阻力系数与流体网格数

Fig.2 Drag coefficient and fluid mesh number

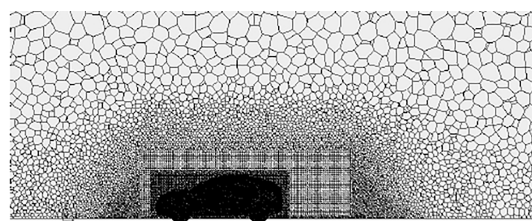
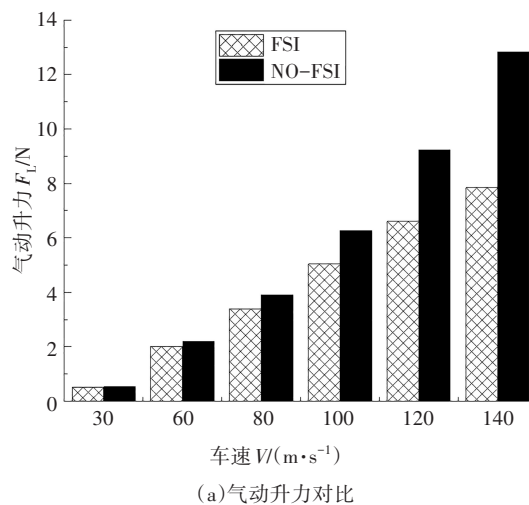


图3 车辆外流场网格方案

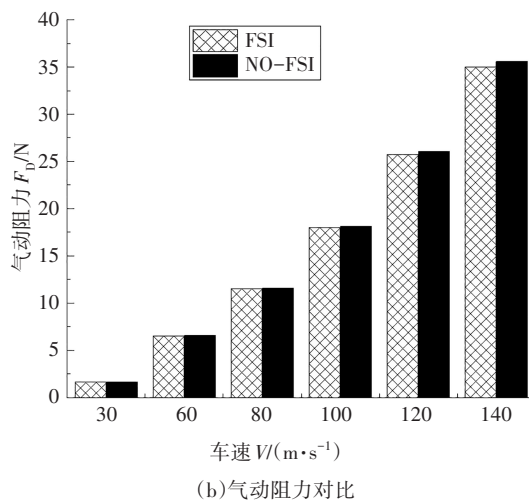
Fig.3 Grid scheme of vehicle flow field

2.2 气动性能分析

本节对整车气动阻力和气动升力展开研究,如图4所示分别为是否考虑流固耦合效应数值仿真中阻力与升力对比图.图5为升阻力差异率曲线,图6为两种仿真方法波动情况.图7为速度为120km/h时(常用高速工况)两种仿真方法的气动升力对比.(FSI为流固耦合,NO-FSI为非流固耦合)



(a)气动升力对比



(b)气动阻力对比

图4 两种仿真方法气动阻力与气动升力对比图

Fig.4 Comparison of aerodynamic drag and aerodynamic lift between two simulation methods

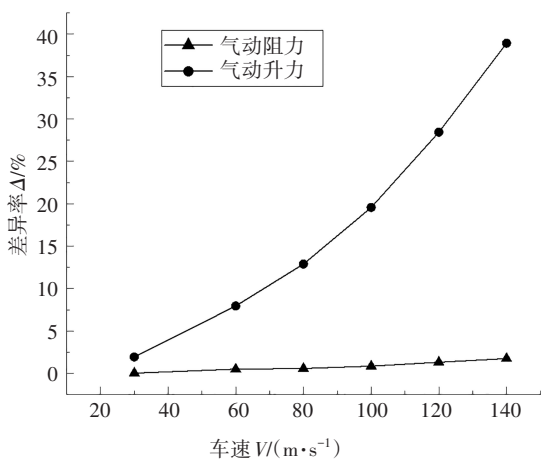


图5 升力阻力差异率曲线

Fig.5 The difference rate curve of lift resistance

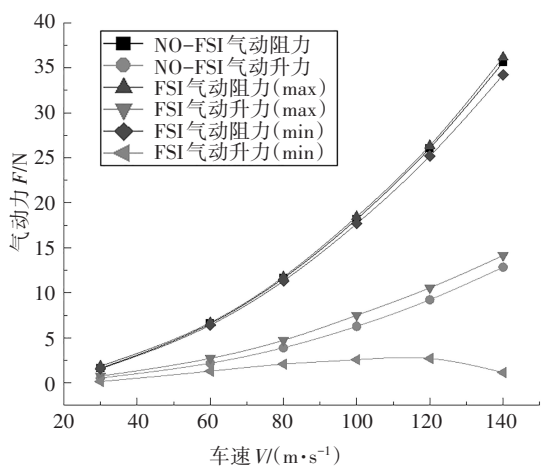


图6 整车升阻力波动情况

Fig.6 The fluctuation of the lift and drag of the whole vehicle

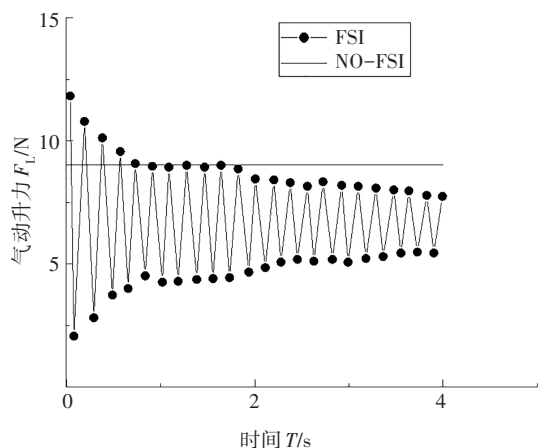


图7 不同仿真方法升力时域图(120 km/h)

Fig.7 Time-domain diagram of lift for different simulation methods (120 km/h)

在高速工况下,悬架受时变气动载荷影响以及

轮胎行驶过程中发生形变,进而车辆姿态改变量变大,改变了车辆周围外流场结构,气动力受此影响继而改变.

由图4图5可以看出,是否考虑流固耦合效应对车辆气动阻力影响较小,不同车速下差异率均在4%以下并且流固耦合数值仿真阻力值普遍较传统数值仿真偏小,相反地,流固耦合对气动升力的影响较气动阻力更加严重,数值仿真结果明显小于传统CFD数值仿真,随车速增大,差异率增大并且都在5%以上,最大可达到38.9%.气动升力直接影响车辆对地面的附着力,由图5图6可知,考虑流固耦合效应数值仿真变化与传统数值仿真相比更加剧烈,因此流固耦合CFD更能真实反映车辆行驶情况,为车辆稳定性设计提供参考.

为了更加明显体现气动力改变的原因,使用车头下移到最大时车底部速度矢量来对比分析两种仿真方法结果,如图7所示.

传统CFD仿真结果车底部流速保持在一个稳定的值,而流固耦合CFD仿真,车底部流速随时间变化,由图8可知,FSI车底部流速大于传统仿真流速.由伯努利原理,流速变大导致压力变小,即为流固耦合仿真升力小于非耦合仿真的原因.

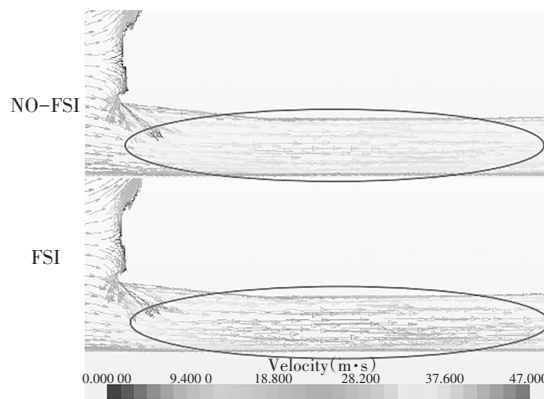


图8 整车速度矢量图

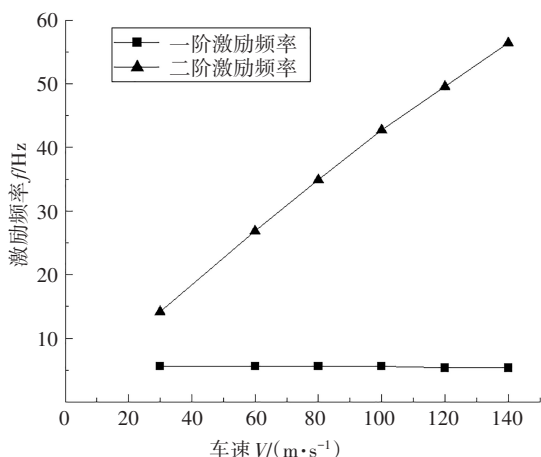
Fig.8 Vehicle speed vector graph

2.3 风激振特性分析

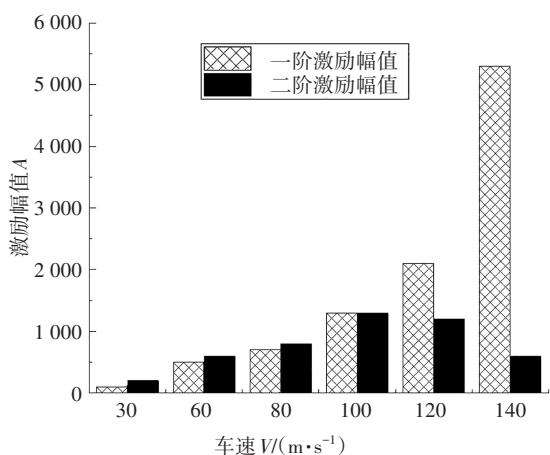
车身振动属于流致振动中的风激振,车体在流场中,雷诺数大于特定值时,会产生周期性的涡脱,作用在车体使其产生振动.主要分析车辆的气动升力频谱以及车身振动频谱.图9为车辆气动升力频谱分析,图10为车身振动频谱分析.

由图9可知,气动升力频谱有两阶频率,一阶为气动升力与车体的激励频率,随流固耦合效应而发

生改变. 车速在 100km/h 以上时振动频率逐渐下降至 5.4Hz, 其他工况下一阶振动频率基本保持稳定在 5.6Hz, 幅值则随车速逐渐增加. 二阶为气动升力自振频率, 随车速增加, 二阶振动幅值先增后减而频率一直呈现增加的趋势.



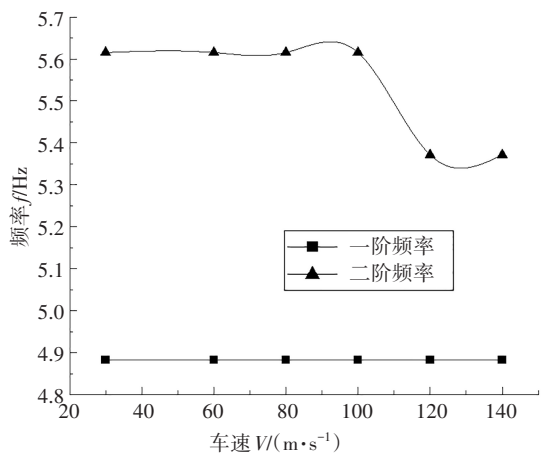
(a) 激励频率



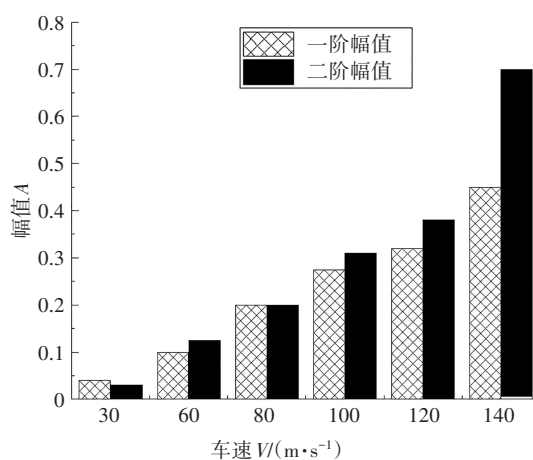
(b) 激励幅值

图 9 车辆气动升力频谱分析图

Fig.9 Spectrum analysis diagram of vehicle aerodynamic lift



(a) 车身振动频率



(b) 车身振动幅值

图 10 车辆结构振动频谱分析图

Fig.10 Vibration spectrum analysis diagram of vehicle structure

由图 10 可知, 整车一阶频率为固有频率, 二阶频率为风激振频率. 对整车进行模态分析得到车辆振动频率为 4.86 Hz, 对比仿真得到的一阶频率 4.88 Hz, 差别仅为 0.4%. 可以证明流固耦合仿真方法准确性. 车身振动幅值均随车速增加而增大, 一阶固有频率不随车速变化而改变. 对比图 4 图 5、图 9 图 10, 当车速较低小于 60 km/h 时, 气动升力较小导致流固耦合效应较弱, 此时气动升力体现出自振特性, 频率距离车身一阶固有频率较远, 因此振幅较小. 随着车速提高, 气动升力使车身姿态改变量增大, 流固耦合效应增强, 车身振幅增大, 该情况下幅值影响因素主要为激励作用力大小. 当速度继续增大到 100 km/h 以上时, 固有频率与气动升力频率接近, 升力振幅与车身振幅都迅速增大, 因为结构阻尼影响, 最终车身振幅达到一定阈值并趋于稳定, 在此工况下, 外界激励频率成为决定振幅的主要因素. 综上, 如果车辆高速工况下, 长时间车身处强烈振动下, 会影响车辆气动性能和造成部件的疲劳破坏. 因此根据考虑流固耦合效应的数值仿真方法可以准确获得车辆各种工况下流致振动情况, 为进一步优化汽车结构造型方面提供参考.

2.4 汽车风激振的改善措施

车辆风致振动会在一定程度上影响车辆稳定性和乘员的舒适性, 因此从车辆内部的弹性结构入手, 寻找最合适的悬架参数改善风激振现象.

表 1 为人体舒适度与加权加速度均方根 a_w 的评价标准^[25], a_w 为加权加速度均方根值.

如图 11 所示, 当车速小于 100 km/h, 气动力耦合效应较弱, 人体无不舒适反应, 当车速逐渐增大至

120 km/h,流固耦合效应增强,车辆与流场产生共振,随着振动强度的增加,人体不适感也随之增加.当车速继续增加,流固耦合效应更加剧烈,振动强度增加导致人体不适感大幅增加.

表1 舒适度评价标准

Tab.1 Comfort evaluation standard

加权加速度均方根 $a_w/(m \cdot s^{-2})$	人体舒适度
0.315~0.63	稍不舒适
0.5~1.0	较为不舒适
0.8~1.6	不舒适
1.25~2.5	非常不舒适

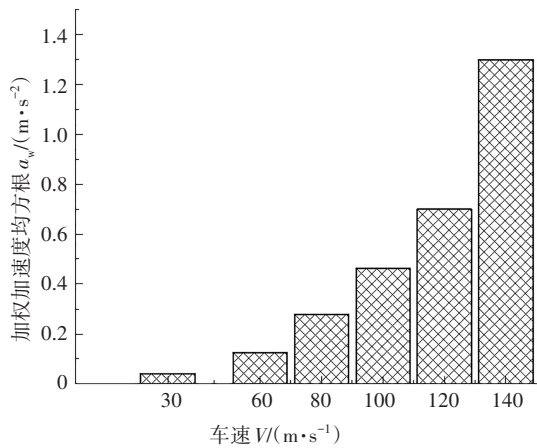


图11 各车速下 a_w 值

Fig.11 a_w value at different speeds

随着车辆高速化趋势发展,流致振动(风激振)对乘员舒适度和安全性影响越发增强,因此对此类振动寻找抑制的手段是有必要的.本节仅考虑悬架弹性刚度的对风激振情况的影响,从而得到不同刚度下的 a_w 值,如图12所示.

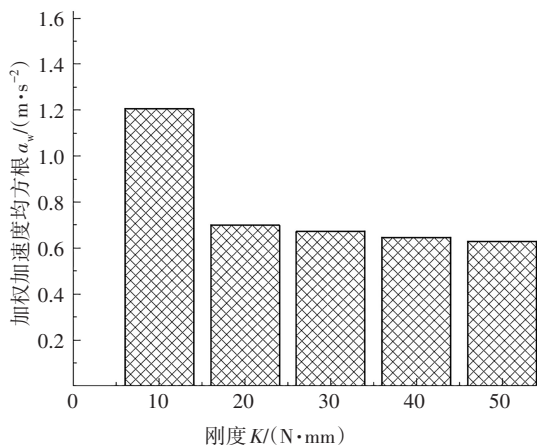


图12 a_w 随悬架刚度 K 变化趋势

Fig.12 a_w changes with suspension stiffness K

由图12可知,通过改变弹性元件刚度可有效提高人体舒适度.由于仅考虑了风激振的情况,如果要获得最佳悬架参数,需对其他因素(如路面,发动机激励)进行综合考虑.

3 结论

1)流固耦合效应对气动升力影响严重,对气动阻力影响较小,对二者的影响均随车速增加而增大.

2)流固耦合数值仿真对气动升力的预测更贴近真实情况,可以为车辆的稳定性和安全性提供更准确的参考.

3)模态分析和流固耦合仿真分别得到的车身振动频率差异率仅为0.4%,证明流固耦合仿真的准确性.影响车身振动的主要因素为外界激励频率及作用力大小,获得各工况下的车辆风激振特性,可以对车身结构进行进一步优化设计,依此对振动情况采取改善措施并提高乘员的舒适性.

参考文献

- [1] 朱文峰,林佩剑,周辉.高速流固耦合效应下车窗密封机理建模与分析[J].汽车工程,2015,37(12):1395-1399.
ZHU W F, LIN P J, ZHOU H. Modeling and analysis of window sealing mechanism under high-speed fluid-solid coupling effect [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(12): 1395-1399. (In Chinese)
- [2] KUMAR A A, MANOJ N, ONKAR A K, et al. Fluid-structure interaction analysis of a cropped delta wing [J]. Procedia Engineering, 2016, 144: 1205-1212.
- [3] 兰巍,和生泰,胡兴军,等.汽车外后视镜风致振机理与特性[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(10):10-18.
LAN W, HE S T, HU X J, et al. Wind-induced vibration mechanism and characteristics of automobile exterior mirrors [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(10): 10-18. (In Chinese)
- [4] 李永乐,向活跃,强士中.风-列车-桥系统耦合振动研究综述[J].中国公路学报,2018,31(7):24-37.
LI Y L, XIANG H Y, QIANG S Z. Review on coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 24-37. (In Chinese)
- [5] 李田.高速列车流固耦合计算方法及动力学性能研究[D].成都:西南交通大学,2012.
LI T. Approaches and dynamic performances of high-speed train fluid-structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (In Chinese)
- [6] KUHL E, HULSHOFF S, DE BORST R. An arbitrary Lagrangian Eulerian finite-element approach for fluid-structure interaction

- phenomena [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2003, 57(1): 117-142.
- [7] 钱若军,董石麟,袁行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. *空间结构*, 2008, 14(1): 3-15.
QIAN R J, DONG S L, YUAN X F. Advances in research on fluid-structure interaction theory [J]. *Spatial Structures*, 2008, 14(1): 3-15. (In Chinese)
- [8] 苏波,钱若军,袁行飞. 流固耦合界面信息传递理论和方法研究进展[J]. *空间结构*, 2010, 16(1): 3-10.
SU B, QIAN R J, YUAN X F. Advances in research on theory and method of data exchange on coupling interface for FSI analysis [J]. *Spatial Structures*, 2010, 16(1): 3-10. (In Chinese)
- [9] 陶莉莉. 基于流固耦合的高速客车气动特性研究[D]. 济南:山东大学, 2014.
TAO L L. Research on aerodynamic characteristics of high speed bus based on fluid-structure interaction [D]. Jinan: Shandong University, 2014. (In Chinese)
- [10] HELMIG J, KEY F, BEHR M, *et al.* Combining boundary-conforming finite element meshes on moving domains using a sliding mesh approach [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2021, 93(4): 1053-1073.
- [11] FOSSATI M, KHURRAM R A, HABASHI W G. An ALE mesh movement scheme for long-term in-flight ice accretion [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 68(8): 958-976.
- [12] SEVILLA R, GIL A J, WEBERSTADT M. A high-order stabilised ALE finite element formulation for the Euler equations on deformable domains [J]. *Computers & Structures*, 2017, 181: 89-102.
- [13] RAZZAGHI M M, MIRSAJEDI S M. A moving mesh method with defining deformable layers [J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2017, 17(2): 63.
- [14] PRUST L J. Moving and reactive boundary conditions in moving-mesh hydrodynamics [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 494(4): 4616-4626.
- [15] 康顺. 计算域对CFD模拟结果的影响[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(S1): 57-60.
KANG S. Influence of computational domain on the cfd results [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(S1): 57-60. (In Chinese)
- [16] SONG K S, KANG S O, JUN S O, *et al.* Aerodynamic design optimization of rear body shapes of a Sedan for drag reduction [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2012, 13(6): 905-914.
- [17] KANG S O, JUN S O, PARK H I, *et al.* Actively translating a rear diffuser device for the aerodynamic drag reduction of a passenger car [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2012, 13(4): 583-592.
- [18] 杨博,傅立敏. 轿车外流场网格生成策略及数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(4): 8-11.
YANG B, FU L M. Mesh generation strategies of the external flow field around a Sedan and the numerical simulation research [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(4): 8-11. (In Chinese)
- [19] 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
WANG F J. *Computational fluid dynamics analysis—CFD software principle and application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (In Chinese)
- [20] 傅立敏. 汽车空气动力学数值计算[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2000.
FU L M. *Numerical calculation of automobile aerodynamics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. (In Chinese)
- [21] 陈矛章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
CHEN M Z. *Fundamentals of viscous fluid dynamics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (In Chinese)
- [22] 张兆顺,崔桂香,许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
ZHANG Z S, CUI G X, XU C X. *Theory and modeling of turbulence* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (In Chinese)
- [23] 祝志文,袁涛,陈政清,等. 基于CFD仿真的平板非线性气动系统特征研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(1): 32-38.
ZHU Z W, YUAN T, CHEN Z Q, *et al.* Investigation on characteristics of nonlinear aerodynamic system of thin plate based on CFD simulations [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(1): 32-38. (In Chinese)
- [24] SCHROECK D, KRANTZ W, WIDDECKE N, *et al.* Unsteady aerodynamic properties of a vehicle model and their effect on driver and vehicle under side wind conditions [J]. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 2011, 4(1): 108-119.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 汽车平顺性试验方法:GB/T 4970—2009[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Method of running test—Automotive ride comfort: GB/T 4970—2009* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (In Chinese)