

Ahmed 模型不同后背倾角下的流场及 气动噪声研究

贺银芝, 吕 越, 龙良活, 杨志刚

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 应用雷诺时均法 Realizable $k - \epsilon$ 的湍流模型对 Ahmed 模型在不同后背倾角下进行了定常流场的分析, 并进行流场的大涡模拟 (LES) 计算. 基于流场的压力脉动和速度脉动分布, 获取并分析了模型表面压力脉动级分布及远场气动噪声特性, 并对远场噪声与模型气动阻力的关系进行了探讨. 结果表明, 不同后背倾角模型中气流分离特征差异较大, 导致模型尾部压力脉动强度差异明显, 从而影响辐射至远场的噪声能量及其分布, 且噪声能量与模型的气动阻力具有一定的关系. 合理设计后背倾角, 对于尾部气动噪声的控制非常重要.

关键词: 气动噪声; Ahmed 模型; 脉动压力; 大涡模拟

中图分类号: U462.1

文献标志码: A

Investigation of Flow Characteristics and Aerodynamic Noise for an Ahmed Body with Different Rear Slant Angles

HE Yinzhi, LÜ Yue, LONG Lianghuo, YANG Zhigang

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

Abstract: The realizable $k - \epsilon$ method was used for steady simulation of external airflow of Ahmed model with different rear slant angles, and the large eddy simulation (LES) method was employed for transient simulation. Based on the pressure and velocity fluctuation distribution, Ahmed body surface pressure fluctuation level distribution and aerodynamic noise characteristics in the far-field were studied. Furthermore, the relationship between wind noise radiated in the far-field and aerodynamic drag was studied. The results show that there is a significant difference between model rear pressure and velocity fluctuation distribution of Ahmed model at different rear slant angles due to different flow separation pattern, which influences the noise power radiated to the far-

field and its distribution. Additionally, there exists a certain relationship between noise power and aerodynamic drag. Therefore, optimizing rear slant angle is very important for rear wind noise control.

Key words: aerodynamic noise; Ahmed model; pressure fluctuation; large eddy simulation

随着汽车行驶速度的提高, 气动噪声已成为影响汽车乘坐舒适性的重要因素之一. 研究表明, 当车速大于等于 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 气动噪声将成为车辆噪声的主要噪声源^[1-2]. 因此, 高速风激励下的气动噪声逐渐成为研究的热点, 对气动噪声有重要影响的车身结构参数也随之受到广泛关注. Kouneis 等^[3]曾运用风洞试验方法研究了非定常流动对汽车的车内噪声和远场噪声的影响. Mark Thompson 等^[4]利用风洞试验以及道路实车试验测得某一款车型在不同速度以及偏航角下的气动噪声. 风洞试验方法可以获得较为准确的噪声声场分布结果, 但风洞试验成本较高, 而道路试验又受到很多不确定环境因素的影响. 比较而言, 通过数值仿真方法模拟汽车气动噪声既可以节省成本, 又能够较好地分析复杂噪声问题的机理. Takashi Kamioka 等^[5]通过数值仿真方法探究了气动噪声的产生机理, 并通过与风洞试验结果对比, 验证了应用数值仿真方法研究气动噪声的可行性.

在数值计算时, 由于汽车外形结构复杂, 导致模型网格数量较多, 仿真时间较长, 并且完整的汽车模型中影响汽车远场噪声的因素较多, 不能针对某一特定结构参数对汽车气动噪声产生的机理进行深入探究. Ahmed body (类车体) 是一种简化的汽车模型, 其结构简单, 并且被广泛应用于研究尾部造型的

收稿日期: 2016-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51575394)

第一作者: 贺银芝(1972—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为气动声学、车辆噪声与振动控制.

E-mail: heyinzhi@tongji.edu.cn

变化对尾流结构及气动阻力的影响^[6-13],但对于辐射到远场的气动噪声的研究较少.其中,Sajjad^[14]通过数值仿真方法研究了模型尾部后背倾角、下摆角、上摆角、尾部长度 4 个参数对气动噪声的影响,发现后背倾角是影响气动噪声的主要因素.本文在对 Ahmed body 模型进行尾部流场分析的基础上,主要计算了 Ahmed body 不同后背倾角下的流场压力脉动分布、模型表面压力脉动级分布以及远场噪声分布,并分析探究其对气动噪声的影响及产生机理;同时,探究不同风速下,汽车后背倾角产生的气动噪声特点,为汽车尾部噪声的控制提供参考.

1 数值计算方法

1.1 模型参数

为了准确地反映出不同尾部流场下气动噪声的实际情况,需要对 Ahmed 模型后背倾角进行合理的设计选择.研究发现^[15],Ahmed 模型不同尾部倾角会对尾部流场产生很大的影响,其中 12.5° 和 30.0° 为两个重要的临界角.当 $\alpha < 12.5^\circ$ 时,气流会附着在模型尾部斜面上,从尾部斜面产生的气流与从模型两侧产生的气流一起在尾部形成一对旋向相反的拖曳涡.当 $12.5^\circ < \alpha < 30.0^\circ$ 时,气流在斜面上边沿发生分离,然后在斜面上发生再附着,并且仍会在尾部形成对称的拖曳涡,且强度大于第一种情况.当 $\alpha > 30.0^\circ$ 时,气流在斜面上边分离后将不会再发生附着,尾部拖曳涡基本消失.因此,研究不同尾部倾角产生的尾部流场对气动阻力以及远场噪声的影响时,选择后背倾角分别为 10° 、 25° 、 35° 这 3 类 Ahmed 模型进行研究.同时为研究来流速度对模型表面压力脉动及尾部噪声的影响,对 25° 倾角的 Ahmed 模型分别模拟 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 3 种不同的来流速度.

如图 1 所示,Ahmed 模型尺寸长、宽、高分别为 $1\,044 \text{ mm}$ 、 389 mm 、 288 mm ,头部倒圆角半径为 100 mm ,离地间隙 50 mm .由于本文主要考虑后背倾角对远场噪声的影响,所以没有进行支柱支撑.

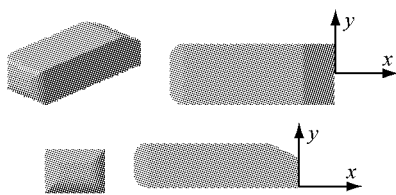


图 1 类车体模型
Fig.1 Ahmed model

1.2 数值模型与网格处理

Ahmed 模型放置在一个长度为 10 倍车长(其中车前 3 倍车长,车后 6 倍车长),宽度为 7 倍车宽(模型左右各 3 倍车宽),高度为 5 倍车高,即长、宽、高分别为 10.4 m 、 2.72 m 、 1.44 m 的虚拟风洞中.为提高计算精度以及更好地得到壁面边界层,Ahmed 模型表面边界层采用五面体网格划分,其他计算域部分采用四面体网格.考虑到边界层的计算准确度,大涡模拟(LES)要求 y^+ 值尽量减小,理想状态 y^+ 值小于 5.其中, y^+ 表示第一层网格质心至壁面的量纲一距离.本次计算 y^+ 取 3,但为反映边界层的特性,又要求保证边界层网格的第一层厚度与 Ahmed 表面的网格长度比大于 $1:100$,由于本文中模型表面网格为 $2 \sim 3 \text{ mm}$,实际长度比取 $1:60$,所以边界层第一层厚度为 0.05 mm ,共生成边界层 15 层,边界层网格几何增长率为 1.2.为保证模型附近流场的计算精度,在模型周围 3 倍车长、2.5 倍车宽、1.5 倍车高的计算域范围内保持网格密度较大,外围计算域因对模型附件流场影响较小,故适当放宽网格密度.3 种模型均采用相同的网格处理方法,网格单元总数约为 1 500 万,其网格模型如图 2 所示.

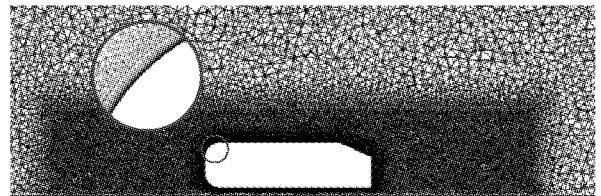


图 2 类车体中截面网格
Fig.2 Cross-section grid of Ahmed model

1.3 数值模拟方法

为验证数值计算方法的准确性,文中参考 Strachan^[16]试验条件设置来流速度为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时为探讨来流速度对汽车尾部流场及气动噪声的影响,增加来流速度 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的工况,模型的计算设置如表 1 所示.

计算首先采用雷诺时均法 Realizable $k - \epsilon$ 的湍流模型进行二阶精度的定常模拟计算,获得流场的定常解.基于该定常解,采用 LES 进行非定常计算.由于非定常流场中步长的选择需与声场的求解结合起来,一个时间序列做快速傅里叶变换后,可分析结果的最高频率为 $1/2\Delta t$,其中 Δt 表示时间步长.本研究所关注噪声频率范围取为 $20 \sim 1\,500 \text{ Hz}$,时间步长取为 0.0002 s ,其中单个时间步长内迭代 15 次,这样可以很好地捕捉到 $1\,500 \text{ Hz}$ 以下的噪声能量.

表 1 边界条件设置

Tab.1 Boundary conditions

边界位置	边界条件	设置
计算域前部	速度入口	$v_0=25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_1=20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_2=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_3=40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 湍流强度小于 1%
计算域后部	压力出口	单一出口, 湍流强度小于 1%
模型表面、计算域底面	壁面	固定壁面
计算域侧面、顶面	对称面	标准对称面

通过分析残差、监测模型后背倾角处静压系数以及流场速度等参数,发现当计算迭代超过 2 500 步后,流动趋于稳定.故数据采集从 2 500 步开始,即提取 2 500 步至 5 000 步的计算结果,作为计算数据,进行分析处理.

2 尾部流场数值计算结果分析

2.1 尾部流场分析

图 3 为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下,后背倾角分别为 10° 、 25° 、 35° Ahmed 模型的速度流线图.从图中可以看出,Ahmed 10° 模型中,由于气流附着在模型尾部斜面上,模型顶部气流与底部气流在尾部汇合,形成 Q1 和 Q2 两个不对称的上、下漩涡区. Ahmed 25° 模型中,尾流同样在模型尾部形成 Q3 和 Q4 两个漩涡区,同时尾部后背倾角处气流发生再附着并形成分离泡,出现一个小涡 D. Ahmed 35° 模型中,气流在斜面上分离后将不会再发生附着,所以在尾部后背倾角处未出现分离泡.

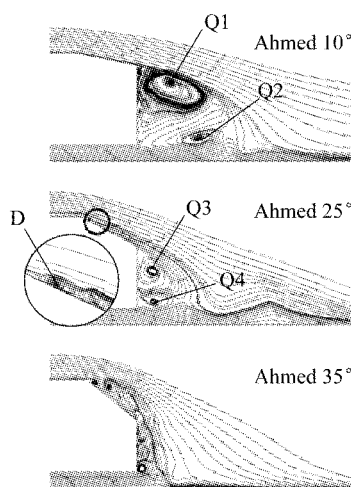
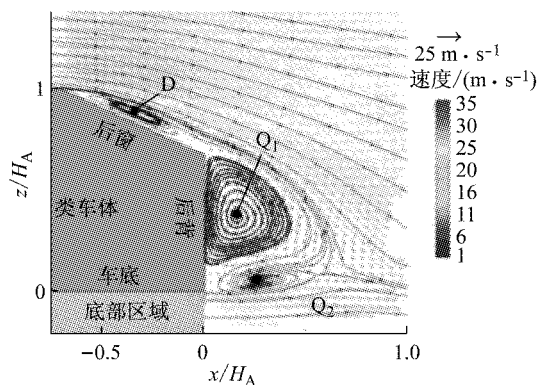


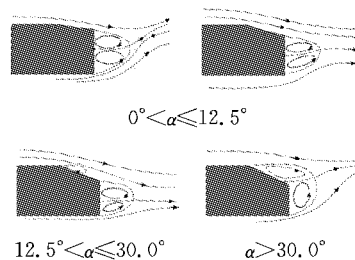
图 3 不同后背倾角模型尾部速度流线图

Fig.3 Velocity streamline of the wake of Ahmed model at different rear slant angles

将计算结果与 Ahmed 25° 模型 PIV (particle image velocimetry, 粒子图像测速仪) 试验结果^[17]以及 Ahmed 模型尾涡拓扑结构^[18]进行对比,如图 4 所示.图中, H_A 为车体高度.由图可知,计算所得数据与试验数据及规律一致.



a 文献[17]



b 文献[18]

图 4 PIV 试验所测 Ahmed 25° 模型速度流线图^[17]及 Ahmed 模型不同后背倾角下的流线拓扑结构图^[18]Fig.4 Velocity streamline of Ahmed body at a rear slant angle of 25° based on PIV test results^[17] and streamline topology structure of Ahmed body at different rear slant angles^[18]

在 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 来流速度下, Ahmed 25° 模型的 Oxy 平面上取 $x/L=0$ 、 $z/L=0.26$ 的一条直线数据.文中, L 为车长 1.044 m , U_∞ 为来流速度 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, v 为 z 方向速度,对其 z 方向的速度进行量纲一处理,与 Strachan^[16]的试验结果进行对比.同时也对 Ahmed 模型气动阻力系数进行了比较,其结果如图 5 和图 6 所示.可以看出,仿真湍流结果比 Strachan 的试验结果略低 $0.1U_\infty$,同时在气动阻力柱状图中可以发现仿真与试验结果相差较小.

通过对计算结果和试验数据进行定性及定量的对比分析,验证了本文模型大涡模拟湍流模型以及边界条件设置的准确性.为进一步进行 Ahmed 模型不同后背倾角及来流速度下的流场特征及相关的气动噪声分析奠定了基础.

2.2 压力脉动分析

高速来流下的 Ahmed 模型尾部会出现气流分

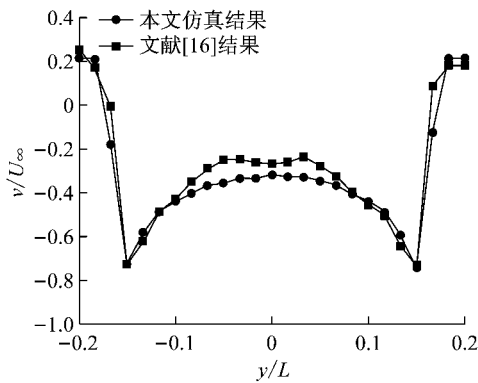


图 5 Ahmed 25°模型 z 方向流动速度量纲一图与文献[16]试验数据对比

Fig. 5 Comparison of simulated result and test data from Ref.[16] of z direction of normalized flow velocity

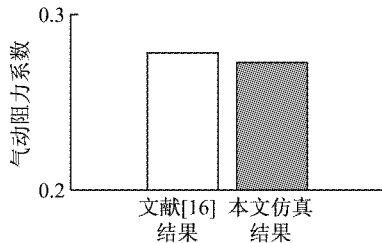


图 6 本文气动阻力系数仿真与文献[16]试验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulated C_D and test result from Ref.[16]

离现象,由此产生的流场漩涡将导致模型尾部出现较大的压力脉动和速度脉动.为更好地分析该脉动现象,采用标准差对其进行定量评估,其定义如下式:

$$\sigma(\varphi') = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中: $\sigma(\varphi')$ 为某测点变量标准差,其数值越大,表示该处脉动越剧烈; φ_i 为第 i 个时刻某测点的变量值; $\bar{\varphi}$ 为该测点的平均值; n 表示样本数.

计算软件 Fluent 中压力脉动值为 $\Delta P = \varphi_i - \bar{\varphi}$, 而均方根值计算公式为

$$\sigma(\varphi') = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta P^2}{n-1}} \quad (2)$$

对比公式(1)、(2)可得,压力的标准差值即为压力脉动的均方根值,故选取压力脉动的均方根值来评估压力脉动大小.

图 7 为不同后背倾角下压力脉动的均方根云图.可以发现,3 个模型的尾流在靠近地面处均出现了很强的压力脉动,且随着后背倾角的增大逐渐向

模型靠近,此区域剧烈的压力脉动为模型顶部气流与底部气流汇合而产生,且压力脉动剧烈区随气流汇合位置改变而改变.

Ahmed 35°模型在上拐角处出现了相对于另外两个模型强度较大的压力脉动,这是由于 Ahmed 35°模型中顶部气流在倾角处发生完全分离而产生. Ahmed 10°和 Ahmed 25°模型中的顶部气流因未在拐角处发生气流的完全分离,故没有出现较为剧烈的压力脉动.

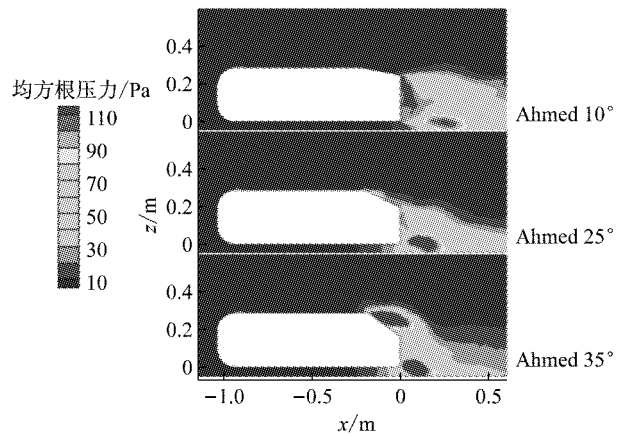


图 7 不同后背倾角时截面压力脉动均方根云图

Fig. 7 RMS pressure contour of cross-section at different rear slant angles

Ahmed 25°模型在不同来流速度下的压力脉动均方根云图如图 8 所示.可以看出,压力脉动强度随来流速度的增大而逐渐增大,且脉动区域不断向外扩延.但随着来流速度的提高,尾部的压力脉动的分布规律较相似.

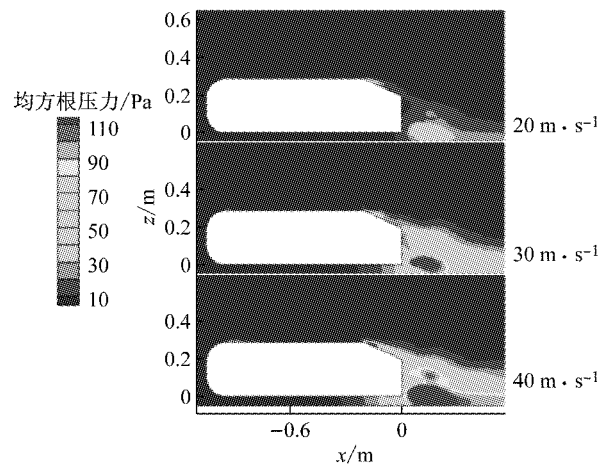


图 8 不同来流速度下中截面压力脉动均方根云图

Fig. 8 RMS pressure contour of cross-section at different wind speeds

2.3 速度脉动分析

图 9 为来流速度 $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同后背倾

角模型的中截面速度脉动均方根云图. 可以发现, 上下两部分气流在尾部汇合产生的漩涡致使模型尾部的速度脉动较为强烈, 其中 Ahmed 35°模型在后背倾角处也出现了强烈的速度波动, 这是由于气流流经拐角较大的斜面拐点时发生了气流的完全分离所引起的.

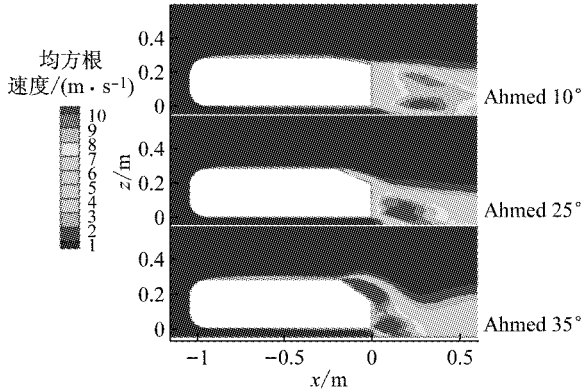


图 9 不同后背倾角时截面速度脉动均方根云图
Fig.9 RMS velocity contour of cross-section at different rear slant angles

为进一步探讨模型尾部速度脉动分布规律, 继续对 Ahmed 25°模型分别施加 20 m · s⁻¹、30 m · s⁻¹和 40 m · s⁻¹的来流速度, 并计算其速度脉动, 其均方根结果如图 10 所示. 可以发现, 不同速度流场下的速度脉动分布趋势基本相同, 脉动较大区域均为后背倾角处以及尾部区域. 但随着来流速度的增大, 速度脉动有逐渐增强的趋势, 但其空间分布规律较相似.

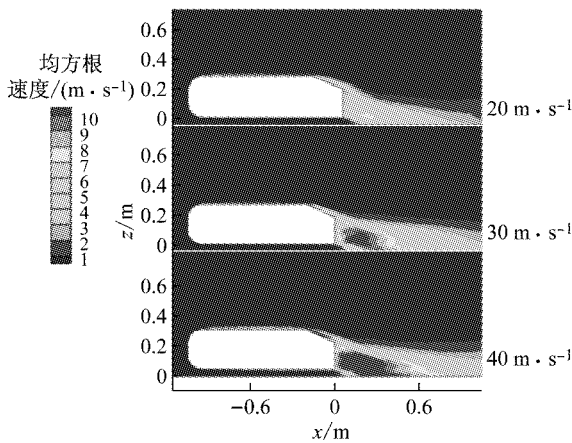


图 10 不同速度下截面速度脉动均方根云图
Fig.10 RMS velocity contour of cross-section at different wind speeds

3 气动噪声数值计算结果分析

为探究汽车后背倾角产生噪声的规律, 基于以

上压力脉动及速度脉动分析计算, 进一步研究模型近场压力脉动级, 也称伪声压级 (pseudo sound pressure level, SPL)分布规律及远场声辐射特点.

3.1 模型表面压力脉动级分析

3.1.1 后背倾角影响

基于 LES 所得的 30 m · s⁻¹来流速度下的模型表面压力数据结果, 计算不同后背倾角模型的表面压力脉动级. 计算结果如图 11 所示.

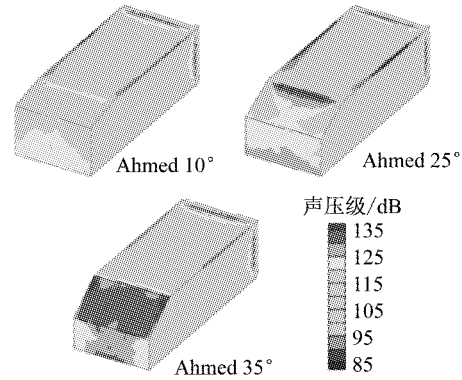


图 11 不同后背倾角模型表面压力脉动级云图
Fig.11 Contour of SPL on Ahmed body surface at different rear slant angles

由图 11 可以发现, 模型尾部压力脉动级较大区域主要集中在模型尾部靠近地面处和斜背上拐角处, 其中 Ahmed 35°模型在后背倾角处有较大的压力脉动级分布, 这是由于在后背上拐角处发生气流完全分离所致. 所得结果与上文所述模型的近场压力脉动分布结果吻合.

3.1.2 来流速度影响

为了更好地探寻 Ahmed 模型表面压力脉动级的分布规律, 继续研究来流速度对模型尾部压力脉动级分布的影响. 图 12 为不同来流速度下 Ahmed 25°模型表面的压力脉动级分布云图. 可以发现, 不同风速下的模型表面压力脉动级分布规律较一致, 均出现在模型的后背上拐角处和尾部靠近地面处, 且随着风速的增大, 压力脉动级逐渐增大, 后背处高压脉动级分布区由上拐角处向下扩延, 尾部的高压力脉动级区由底部向上扩延.

3.2 远场声辐射计算及分析

为研究高速行驶下汽车的远场噪声特性, 在完成大涡模拟后, 根据基本的涡声理论, 使用 FW-H 声学模型计算远场噪声. 远场噪声的 3 个监测点布置如图 13 所示. 3 个测点水平方向每隔 0.5 m 均匀分布, 分别布置于车头、车身中部和车尾处, 离地高度均为 0.288 m, 距离模型边缘的横向距离为 2 m. 如前所述, 计算时间步长取为 0.000 2 s, 测点频谱分析

截止频率到 1 500 Hz.

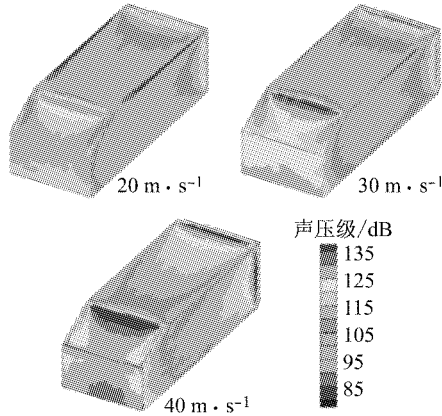


图 12 不同来流速度下模型表面压力脉动级云图

Fig.12 Contour of SPL at different wind speeds

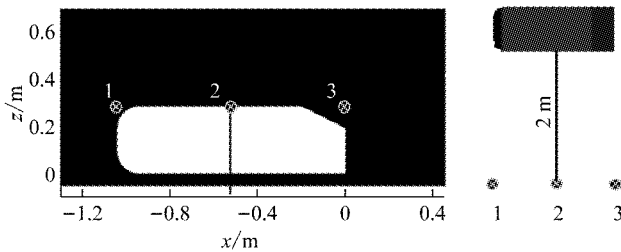


图 13 远场噪声监测点位置示意图

Fig.13 Location of monitoring points of far-field

3.2.1 后背倾角影响

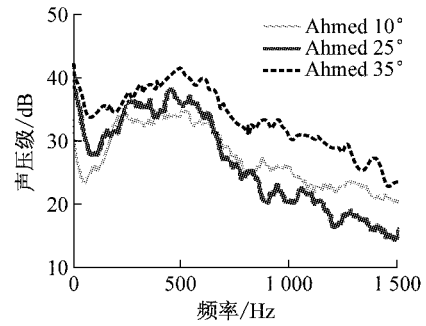
监测 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 来流速度下不同后背倾角模型中的远场噪声,图 14 为在不同模型中测点 1、2、3 处所测得的噪声声压级频谱图.从图中可以看出,远场噪声的声压级具有如下特征:①声能量主要集中于低频段,随频率的增大,噪声能量逐渐降低;②在低频段(750 Hz 以下),随着后背倾角的增大,远场声压级逐渐增大;在 750 Hz 以上的较高频段,Ahmed 35° 模型的声压级仍然最大,但 Ahmed 10° 模型的声压级却大于 Ahmed 25° 模型的声压级.

由此可以看出,Ahmed 模型后背倾角产生的噪声中低频成分占据主导地位,所以低频段噪声将是汽车尾部噪声控制的主要目标.同时可以发现,过大或过小地设计后背倾角都不利于尾部较高频段噪声控制,在汽车设计阶段需合理选择后背倾角.

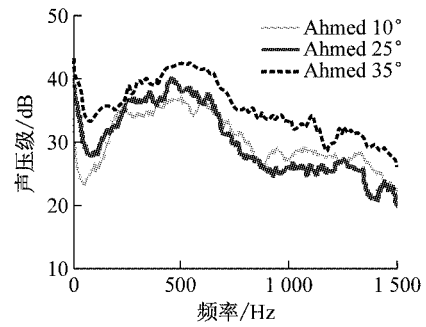
3.2.2 来流速度影响

图 15 为 Ahmed 25° 模型中各测点在不同来流速度下的声压级频谱图.可以看出,不同来流速度下,Ahmed 模型产生的远场噪声的频谱特征有一定程度的相似,尤其在低频段,但在较高频段则有较大差异.不同来流速度下,声能量仍然主要集中于低频区.同时可以看出,随着风速的增大,整个频段的声

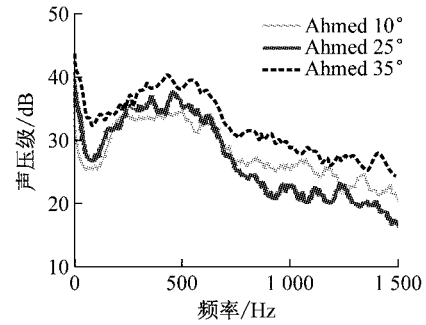
压级均有增大的趋势.



a 测点 1



b 测点 2



c 测点 3

图 14 不同后背倾角下远场测点声压级频谱

Fig.14 SPL spectra of monitoring points of far-field at different rear slant angles

3.2.3 Ahmed 模型远场噪声分布规律

为探寻 Ahmed 模型中远场噪声声压级的分布规律,分别求不同后背倾角下和不同来流速度下,3 个测点处的总声压级,并列于表 2 中.

可以发现,同一风速相同后背倾角下,远场噪声总声压级由前向后有依次增大的趋势,测点 2 和测点 3 的总声压级远大于测点 1,但测点 2 和测点 3 的差距并不大;相同后背倾角下,随着速度的提高,各测点总声压级逐渐增大;相同速度下,随着后背倾角的增大,各测点总声压级也逐渐增大.

分析以上现象,由于后部测点距离模型的后背部更近,由后背附近的流场产生的噪声的传播距离也更近,所以由此可推测,模型尾部的流动形态对远

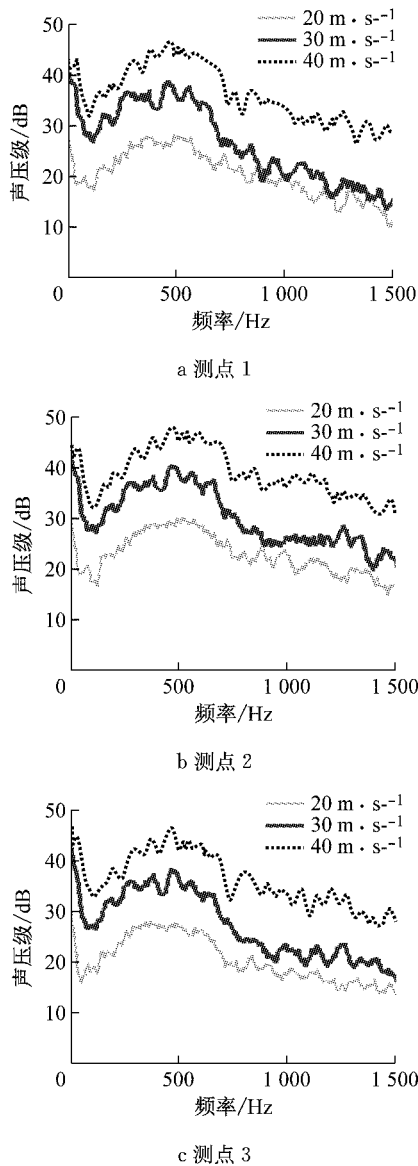


图 15 不同风速下远场测点声压级频谱

Fig. 15 SPL spectra of monitoring points of far-field at different wind speeds

表 2 不同后背倾角及风速下 Ahmed 模型远场测点总声压级

Tab. 2 OASPL of monitoring points of far-field of Ahmed model at different rear slant angles and different wind speeds

后背倾角/ (°)	风速/ (m · s ⁻¹)	总声压级/dB		
		测点 1	测点 2	测点 3
25	20	47.2	52.1	53.8
25	30	56.2	60.5	61.0
25	40	63.9	66.4	66.6
10	30	54.5	56.0	56.2
35	30	60.1	62.6	63.7

场噪声的影响远大于模型前部。相同后背倾角下,随着风速的提高,模型尾部的压力脉动及速度脉动越来越强,由此引起的声源强度也越高,传播到远场的

噪声能量也相应越多。同理,相同速度下,随着后背倾角的增大,模型尾部的压力脉动及速度脉动也越来越强,由此产生的声源辐射到远场的噪声级也越高。

3.3 远场噪声与气动阻力的关系

有研究表明^[19-20],汽车的气动阻力与车速的平方成正比。随着车速的增加,汽车要消耗相当一部分功率克服气动阻力。影响车辆气动阻力的主要因素是车辆尾部的流动分离以及尾流结构。为了研究远场噪声与气动阻力的关系,在非定常计算中也对气动阻力进行了求解。

经过数值模拟,得到不同尾部倾角模型气动阻力系数,对比 30 m · s⁻¹ 风速下,测点 1、测点 2 和测点 3 处的远场噪声数值,其结果如表 3 所示。可以发现,随着后背倾角的增大,模型的气动阻力和远场噪声值均有不同程度的提高。这也在一定程度上说明,模型尾部的流动性态一方面是气动阻力的主要影响因素,另一方面也是远场气动噪声的重要影响因素,且二者在相同工况变化条件下具有较一致的变化规律。

表 3 不同后背倾角下气动阻力与气动噪声对比图

Tab. 3 Comparison of aerodynamic drag and aerodynamic noise of Ahmed body at different rear slant angles

后背倾角/ (°)	气动阻力 系数	总声压级/dB		
		测点 1	测点 2	测点 3
10	0.231	54.5	56.0	56.2
25	0.273	56.2	60.5	61.0
35	0.400	60.1	62.6	63.7

4 结论

本文对 Ahmed 模型分别使用不同后背倾角在不同风速下进行了流场的大涡模拟计算,获取并分析了模型表面压力脉动级分布及远场的气动噪声特性,并对远场噪声与气动阻力的关系进行了初步探讨,得到以下主要结论:

(1) 模型尾部的气流分离所产生的压力脉动是气动噪声产生的根本原因。尾部的压力脉动强度越高,辐射到远场的气动噪声能量越多。

(2) 模型后背倾角对模型尾部表面压力脉动和气动噪声能量影响显著。不同后背倾角下的来流在模型拐角处的分离形态以及模型后部上、下层气流汇合的差异,会导致模型尾部表现出截然不同的压力分布。过大的后背倾角会导致尾部噪声明显增大,

但过小的后背倾角会使较高频区的噪声能量明显增强.因此设计合理的后背倾角,调节尾部流动形态,对于尾部气动噪声的控制极为重要.

(3) 相同后背倾角下,随着来流速度的提高,模型尾部的压力脉动强度逐渐增大,但压力脉动的空间分布规律较为相似.由此产生的远场气动噪声的能量随着速度的提高也逐渐增大,但频谱特征也有一定程度的相似,尤其在低频段.

(4) 同一风速下,随着模型后背倾角的增大,模型的远场噪声及气动阻力值均有不同程度的提高,二者具有较一致的变化规律.

参考文献:

- [1] HUCHO W, SOVRAN G. Aerodynamics of road vehicles [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 25(1): 485.
- [2] WATANABE M, HARITA M, HAYASHI E. The effect of body shape on wind noise [C] // 1978 Automotive Engineering Congress and Exposition. Detroit: SAE, 1978: 780266.
- [3] KOUNENIS C, SIMS-WILLIAMS D, DOMINY R, *et al.* The effects of unsteady flow conditions on vehicle in cabin and external noise generation [C] // SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2015: 2015-01-1555.
- [4] MARK T, SIMON W, JONGMAN K. Wind-tunnel and on-road wind noise: comparison and replication [C] // SAE 2013 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2013: 2013-01-1255.
- [5] YE L, TAKASHI K, TAKAHIDE N, *et al.* Evaluation of aerodynamic noise generated in production vehicle using experiment and numerical simulation [J]. SAE Transactions, 2003, 112(6): 1377.
- [6] TUNAY T, SAHIN B, AKILLI H. Experimental and numerical studies of the flow around the Ahmed body [J]. Wind and Structures, 2013, 17(5): 515.
- [7] BRUNEAU C H, CREUSÉ E, GILLIÉRON P, *et al.* Effect of the vortex dynamics on the drag coefficient of a square back Ahmed body: application to the flow control [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2014, 45: 1.
- [8] KRAJNOVIC S. Large eddy simulation exploration of passive flow control around an Ahmed body [J]. Journal of Fluids Engineering, 2014, 136(12): 121103.
- [9] HUMINIC A, HUMINIC G. Computational study of flow in the underbody diffuser for a simplified car model [C] // SAE 2010 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2010: 2010-01-0119.
- [10] HANFENG W, YU Z, CHAO Z, *et al.* Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 148: 34.
- [11] KEOGH J, BARBER T, DIASINOS S, *et al.* The aerodynamic effects on a cornering Ahmed body [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 154: 34.
- [12] TUNAY T, SAHIN B, OZBOLAT V. Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57: 165.
- [13] SERRE E, MINGUEZ M, PASQUETTI R, *et al.* On simulating the turbulent flow around the Ahmed body; a French - German collaborative evaluation of LES and DES [J]. Computers & Fluids, 2013, 78: 10.
- [14] SAJJAD B. Aerodynamic drag and noise minimization of rear end parameters in a simplified car model utilizing robust parameter design method [C] // SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2015: 2015-01-1360.
- [15] AHMED S R, RAMM G, FALTIN G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake [C] // SAE International Congress and Exposition. Detroit: SAE, 1984: 840300.
- [16] STRACHAN R K, KNOWLES K, LAWSON N J. The vortex structure behind an Ahmed reference model in the presence of a moving ground plane [J]. Experiments in fluids, 2007, 42(5): 659.
- [17] KOURTA A, LECLERC C. Characterization of synthetic jet actuation with application to Ahmed body wake [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 192: 13.
- [18] 李士伟.类客车体气动特性及减阻措施的试验研究和数值模拟[D].绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2010.
- LI Shiwei. Experimental study and numerical simulation of the aerodynamics performance and drag reduction measures for the bus-like body [D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2010.
- [19] 傅立敏.汽车空气动力学[M].北京:机械工业出版社,2006.
- FU Limin. Automobile aerodynamic [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [20] 谷正气.汽车空气动力学[M].北京:人民交通出版社,2005.
- GU Zhengqi. Automobile aerodynamic [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.