

汽车风洞实际流场对声源识别的干扰与修正

沈哲^{1,2,3†}, 余昊晟³, 王勇¹, 彭里奇³, 杨志刚^{2,3}

(1. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 401122;

2. 同济大学 机械工程博士后流动站, 上海 201804;

3. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要:为了提高汽车风洞外场声源识别精度,对因实际流场与空风洞之间区别产生的偏差进行分析.关注汽车绕流场与射流剪切层的速度分布,分别对车辆所在自由空间、空风洞与带实际车辆的风洞 3 种流场进行数值仿真及试验验证.通过无限薄剪切层及实际流场分层声传播模型,预测有无车辆两种风洞状态下的声漂移量,并与实际整车声学风洞声传播试验结果进行比较.结果表明,放入车辆后,风洞势流核心区因受汽车阻塞而流场速度分布不均匀,进而剪切层区域流场受到汽车绕流场干扰而外扩.进行实际流场分层修正后,车表后方声源漂移结果精度大幅提高,能有效提高实际风洞外场声源识别精度.

关键词:车辆噪声测量;风洞;阻塞效应;声源漂移

中图分类号:U467.1

文献标志码:A

Interference and Correction of Actual Flow Field of Automobile Wind Tunnel on Sound Source Identification

SHEN Zhe^{1,2,3†}, YU Haosheng³, WANG Yong¹, PENG Liqi³, YANG Zhigang^{2,3}

(1.State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing 401122, China;

2. Postdoctoral Station of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of outfield sound source identification in automobile wind tunnel, the deviation caused by the difference between actual flow field and empty wind tunnel is analyzed. Focusing on the velocity distribution of flow around vehicle and jet shear layer, numerical simulation and experimental verification were carried out on 3 kinds of flow fields, including free space where vehicle is located, empty wind tunnel and wind tunnel with actual vehicle. The amounts of sound drift in wind tunnel with or without vehicles were predicted by using infinite thin shear layer model and layered flow field sound propagation model. The predicted sound drift quantities were compared with actual full-scale acoustic wind tunnel sound propagation test results. The results show that, after vehicle was placed in the wind tunnel, the flow field velocity distribution in core area of potential flow was uneven due to obstruction of the vehicle, and then the flow field in shear layer was disturbed by flow field around vehicle. After strat-

* 收稿日期:2021-01-07

基金项目:汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放基金项目(NVH SKL-202003), State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology Open Fund Project(NVH SKL-202003);上海市重点实验室项目(18DZ2273300), Shanghai Key Laboratory Project(18DZ2273300)

作者简介:沈哲(1983—),男,江苏苏州人,同济大学在站博士后,工学博士

† 通信联系人, E-mail: zhe.shen@sawtc.com

ified correction of the actual flow field, the accuracy of sound drift quantity at rear sound source of vehicle body is greatly improved, which can effectively improve the identification accuracy of the actual wind tunnel.

Key words: vehicle noise measurement; wind tunnels; blockage effect; sound source drift

整车声学风洞是气动噪声研究的关键设施,开口式声学风洞中气动噪声源及其声传播特性是实验测量的重要内容之一.汽车产生的外噪声在向远场传播的过程中,受风洞流场影响,其传播的路径发生改变,产生声漂移现象^[1].风洞中汽车绕流场和射流剪切层相互干扰,实际流场与空风洞流场及汽车在自由空间流场不一致,进一步改变了声传播路径.因此,汽车风洞实际流场的存在导致的复杂声漂移成为准确了解汽车气动噪声源的重要技术障碍,有必要解决.

关于射流剪切层声传播的研究,最为经典的是 Amiet 剪切层修正理论^[2],该理论将剪切层简化成一个无限薄的涡壳面,以声折射定律和声速连续性推导,奠定了几何声学研究剪切层声折射的基础.近年来相关研究多为对 Amiet 理论剪切层修正和改进.文献[3-5]在 Amiet 理论基础上,提出三维剪切层修正方法.一些研究考虑了实际剪切层的厚度,提出改进模型或方法,是对此理论的验证或者完善^[6-7].Saradj^[8]提出射线追踪法,可对非均匀流场声漂移量进行修正.关于车辆绕流场对声传播的影响的文献较少.在汽车风洞测试中,车辆的阻塞效应会对风洞流场产生影响^[9-10].王毅刚等^[11]在推导声漂移问题时加入了汽车绕流场的影响,但并未考虑空风洞流场与车辆绕流场的相互干扰.

本文以实际整车气动声学风洞与真实车辆为研究对象,利用数值计算手段得到流场特性,分析带有真实车辆的风洞流场与自由空间车辆绕流场、空风洞流场的区别,建立汽车声学风洞中完整的声势流核心区到剪切层区再到远场流动区的传播模型,利用整车气动声学风洞与相应车辆进行了声源传播试验,对所提出模型进行验证,以期为汽车风洞噪声源定位测试提供修正方法.

1 声漂移及其修正方法

1.1 声漂移现象产生机理

在开放式消声风洞中进行声学测量时,传声器

位于势流核心区外部、消声室内的远场环境中^[12].这意味着描述离开势流核心区的声传播的射线路径将在到达传声器之前穿过剪切层.剪切层为势流核心区和远场流动区间的流体层,在垂直于平均流向的方向上存在速度梯度.声传播路径受到风洞流场的影响将发生折射,基于声源到传声器简单直线声传播模型得到的表观声源与实际声源的位置间有一定偏差,即声漂移现象.为了得到实际声源的准确位置,需要进行声漂移修正.

根据几何声学原理^[1],声经过两种不同介质的边界时,沿边界方向声传播的速度是连续的.声波速度由介质内的固有声速和流体速度组成,在边界两侧声速相等.

在低马赫数、单一介质流场中,流场中声速均为 C , θ_1' 和 θ_2' 表示剪切层流体静止时声传播的角度, θ_1 和 θ_2 表示声实际传播经过的角度,介质边界两侧速度分别为 U_1 、 U_2 , 马赫数分别为 M_1 、 M_2 , 如图 1 所示,根据 Snell 声折射定理^[13]:

$$\frac{1}{\cos\theta_1'} - \frac{1}{\cos\theta_2'} = M_1 - M_2 \quad (1)$$

第 k 层中实际传播角 θ_k 与静止空气声传播角 θ_k' 的关系可以用波对流关系式给出:

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_k'}{\cos \theta_k' - M_k} \quad (2)$$

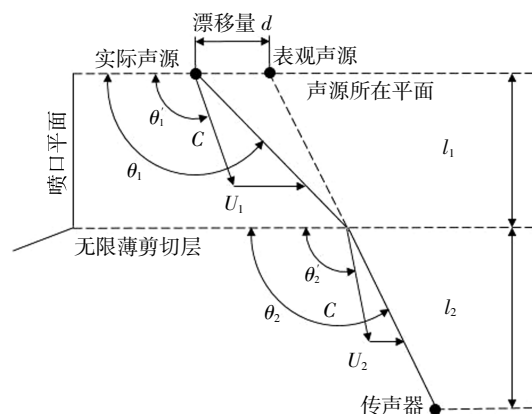


图 1 Amiet 无限薄剪切层法

Fig.1 Amiet infinite thin shear layer method

在 Amiet 基本模型中,射流剪切层被简化为无限薄,假设剪切层内侧是速度为 U_1 的均匀流场、剪切层外流场静止,即 $U_1 = 0$,求得声漂移量:

$$d = l_1(\cot \theta_2 - \cot \theta_1) \quad (3)$$

1.2 改进修正方法

1.2.1 分层修正

无限薄剪切层声漂移修正方法忽略了剪切层的厚度,因此在靠近喷口附近能更好预测剪切层对声传播的影响,远离喷口位置误差相对较大.此外,剪切层以内的流场速度并不是完全均匀,外部流场也并非完全静止,此部分对声折射的影响也应当考虑.

分层模型^[6]将流场分割成 n 层平行层的方法,对 Amiet 修正模型进行优化,如图 2 所示.用 k 和 $k+1$ 分别替代式(1)中的 1 和 2,得到:

$$\frac{1}{\cos \theta_k} - \frac{1}{\cos \theta_{k+1}} = M_k - M_{k+1} \quad (4)$$

由此可得到总的声漂移量:

$$d = - \sum_{k=1}^n l_k \cot \theta_k + \cot \theta_n \sum_{k=1}^n l_k \quad (5)$$

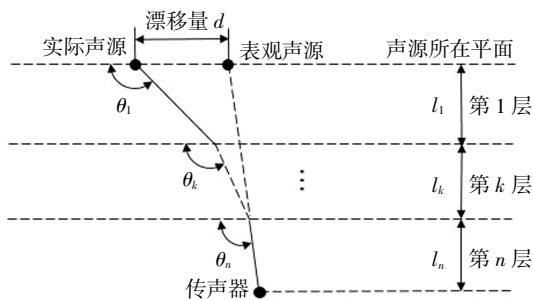


图 2 实际流场分层法

Fig.2 Actual layered flow field method

分层法使用的流场速度分布更接近实际情况,对声漂移量的预测更为精准.

1.2.2 多线修正

单线模型认为流场分层后,各层内不同位置的流速是一致的,而实际流场中,不同高度、沿流向不同距离流速分布不完全相同.例如风洞流场,距离喷口越远,剪切层厚度越厚,同时势流核心区受到外部流场侵蚀,范围越来越小.多线模型^[6]根据流场各处实际流速分布,通过上述声折射原理,推导声传播路径.相较于单线模型,多线模型更符合实际非均匀流场中的声传播,得到的声漂移量预测结果更为准确.对于圆形喷口等非二维剪切层情况,必须使用多线模型修正.

2 风洞流场分析

2.1 汽车风洞流场 3 种情况

2.1.1 数值风洞流场(自由空间)

根据相对运动关系,车辆以一定速度在实际道路行驶,可以等效为以该速度的气流吹向静止的汽车,其周围流场空间可近似看作仅受地面约束,其余方向无限延伸.为了模拟该流场条件,在数值模拟中通常采用自由空间流场模型,将车辆数模放置在足够大的计算域中,地面和车体表面设置为壁面,入口设置为均匀来流,出口设置为压力出口,其余流场边界设置为对称面.通过上述设置可以准确地模拟车辆与周围流场的相对运动情况.

2.1.2 空风洞流场

汽车风洞作为模拟车辆实际道路行驶的试验设施,其流场固有特性十分重要,实际 3/4 开口式风洞试验段的流场主要包括三部分:从喷口延伸出的势流核心区即测试区域、远离流动的远场静止区以及两者之间的剪切层区域.除了地面效应之外,风洞射流还受到收集口、试验段洞壁等影响,是一种典型的有限体积射流.

2.1.3 实际流场(带汽车的风洞)

在汽车风洞测试中,试验段放置了实际车辆,车辆绕流场与风洞流场相互影响,其流场特性与前两者均有不同,需根据风洞和被测汽车之间的几何关系具体分析.

2.2 流场仿真与验证

为了分析空风洞流场、车辆在自由空间流场、汽车风洞实际流场之间的差别,分别建立 3 种流场的数值仿真模型,以下主要以汽车风洞实际流场模型为例进行介绍.

汽车风洞实际流场几何建模立足于气动声学风洞实际结构和尺寸,由收缩段、试验段、收集口、扩散段等组成,并在试验段实际测试位置加入车辆数模.以喷口平面、风洞中心对称面、地面三者交点作为 x 、 y 、 z 方向的原点,建立模型,如图 3 所示.

网格方面,先使用 hypermesh 划分面网格,再用面网格生成体网格.面网格及体网格分别采用三角形网格和四面体网格.网格划分过程中,优先保证汽车绕流场、剪切层等影响声传播位置的网格密度.风洞网格最大尺寸为 200 mm,车身附近等关键位置最大尺寸 25 mm.在喷口内边沿、地面和汽车表面设置边界层网格,前两者和汽车表面第一层边界层网格

厚度分别为 1.6 mm 和 0.8 mm,增长率为 1.1,共 8 层边界层网格。

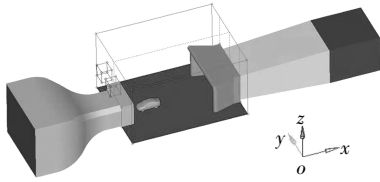


图3 汽车风洞实际流场几何模型
Fig.3 Geometric model of actual flow field in vehicle wind tunnel

数值仿真使用 Fluent 软件进行. 具体参数设置为: 入口类型选择为速度入口, 数值根据收缩比确定, 设为 4.876 m/s, 以获得喷口处 30 m/s 的速度, 与实际风洞测试一致, 同时湍流强度设置为 1%, 湍动黏性比设置为 10, 也与实际风洞保持一致; 出口类型设为 out-flow; 压力平衡口设为 inlet-vent; 其他全部设置为壁面 wall. 湍流模型选择 k -epsilon, 壁面函数选择非平衡壁面函数, 求解器选择 SIMPLEC 求解器.

在另外两种流场的数值模拟中, 风洞流场几何模型不包括车辆数模, 带车辆的自由空间流场几何模型计算区域尺寸分别为汽车长宽高的 10 倍、5 倍、5 倍. 两者的其他设置, 如在网格划分方法及湍流模型、数值格式等, 与汽车风洞实际流场模型保持一致. 空风洞流场、车辆在自由空间流场和带汽车的风洞流场的总网格数分别为 3 800 万、6 800 万和 6 500 万. 由于本文主要关注宏观速度场对声传播的影响, 局部流场的细微误差可忽略, 上述量级的网格获得的仿真结果精度完全能满足后续分析的要求.

在完成数值仿真后, 首先对仿真结果的准确性进行验证. 将空风洞剪切层位置风速仿真结果与热线风速仪测量结果进行对比, 如图 4 所示. 试验结果与仿真结果在整个剪切层区域吻合程度都很高, 可以认为仿真结果与实际流场较为一致.

2.3 速度场特性比较

由于声传播方向改变是由波对流产生, 主要受流体速度影响, 以下仅分析速度场. 此外, 风洞试验段中的流动以 x 向流动为主, 高度方向的速度分量引起的声折射是 z 向的, y 向速度分量对声漂移量影响很小, 在此不分析 y 、 z 向速度分量, 下文中流速均指沿 x 向分量.

2.3.1 流场整体分析

由于车辆后视镜后侧($x = 3.9$ m)到车辆 C 柱位置($x = 5.5$ m)是车辆侧面重要气动噪声源的主要所在区域, 同时避免地面反射对声源测量的影响, 重点

分析高度 $z = 1.1$ m 平面, 距离喷口 3.9 ~ 5.5 m 的流场, 该水平截面速度云图如图 5 所示.

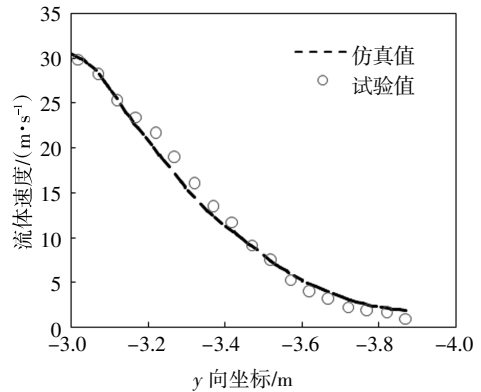


图4 仿真与试验得到剪切层时均速度对比
Fig.4 Comparison of time averaged velocity of shear layer obtained by simulation and experiment

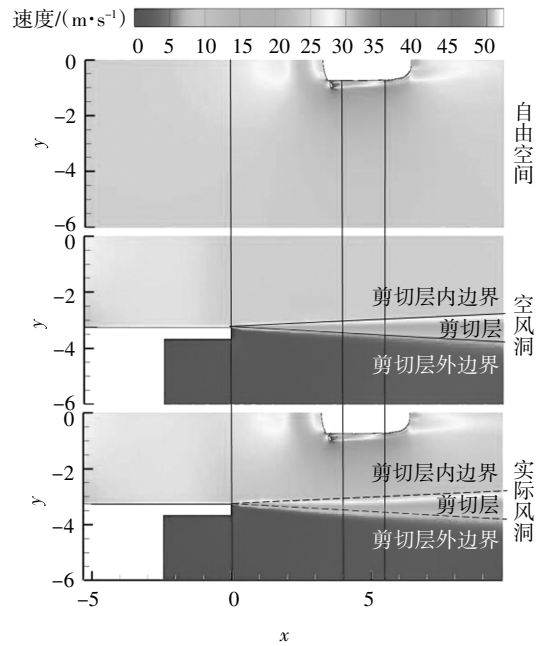


图5 3种流场下高度 1.1 m 横截面速度云图
Fig.5 Velocity contour of cross section with height of 1.1 m under three kinds of flow fields

由图 5 可见, 在空风洞和实际风洞流场中, 以喷口内边沿为起点, 速度有明显的梯度, 此处即为剪切层. $x = 3.9$ m 处 3 种流场流速沿横向分布如图 6 所示, 可见流速在该区域基本呈线性递减分布, 为了方便后续分析, 定义射流剪切层为速度分布在来流速度 10%~90% 的区域. 即速度 3 m/s 为剪切层外边界, 速度 27 m/s 为剪切层内边界, 即图 6 中竖直虚线分割位置. 此外, 剪切层内边界内侧为势流核心区区域, 剪切层外侧外部为远场流动区.

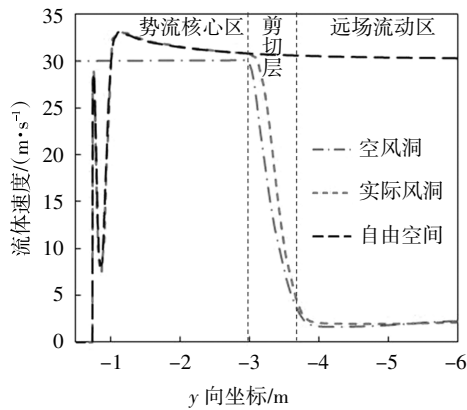


图 6 3 种流场流速沿横向分布

Fig.6 Lateral distribution of velocity under three flow fields

关于自由空间和实际风洞流场, 可以看到势流核心区的流场与自由空间流场流速分布几乎一致, 由内向外直到风洞射流剪切层内边界附近, 两者速度才出现明显分化, 说明汽车风洞能够很好地模拟车辆实际道路行驶情况. 由于两种流场情况在汽车绕流场附近基本相同, 以下分析仅给出实际流场的势流核心区结果.

2.3.2 势流核心区

在势流核心区, 从汽车车身表面位置, 速度为 0 经过车身表面边界层迅速增大, 随后经过一段速度波动区域. 由于汽车车身对气流的阻塞作用, 气流速度继续上升并超过空风洞下射流速度至最大值, 之后缓慢下降.

在上述速度波动区域, 气流速度变化较大, 会对声传播路径产生较大影响. 这里取距车身对称面 y 坐标范围 $-1.2 \sim -0.7$ m, 距离喷口不同距离下流场的气流速度分布, 如图 7 所示. 可以看到, 在距离喷口 1.95 m (车头位置) 处, 气流速度基本处于均匀状态; 在距离喷口 2.95 m, 接近前挡风玻璃处, 气流受到车身阻塞效应影响, 流速有所增大; 在距离喷口 3.9 m 处, 即后视镜后区域, 车身表面附近气流受到 A 柱影响, 速度波动最大; 距离喷口越远, 此影响越小. 在距离车身表面较远处, 各处气流速度趋于一致.

2.3.3 剪切层区域

为分析车辆放入后对风洞原始流场的影响, 根据上述定义的剪切层边界位置, 比较空风洞和实际流场两者的差别, 如图 8 所示. 可见空风洞剪切层边界位置与离喷口距离呈现良好的线性关系. 放入车辆后, 对前方的流场影响较小, 两者剪切层边界较为接近. 随后气流受到车辆影响, 实际流场下剪切层边界明显向外偏移, 且偏移量沿流向向外先增大后减小. 实际车辆的存在对风洞剪切层内边界影响更大,

使剪切层内边界向外偏移最大达 0.15 m, 对剪切层外边界影响较小, 使剪切层外边界向外偏移不超过 0.07 m. 由于车身较为复杂, 车身各部位对气流的影响程度不同, 所以剪切层边界位置产生不规则波动, 呈线性下降.

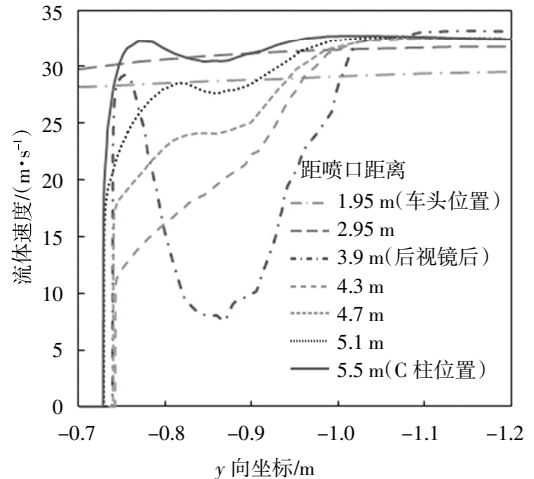


图 7 不同流向距离处流速沿横向分布

Fig.7 Lateral distribution of velocity at different flow distance

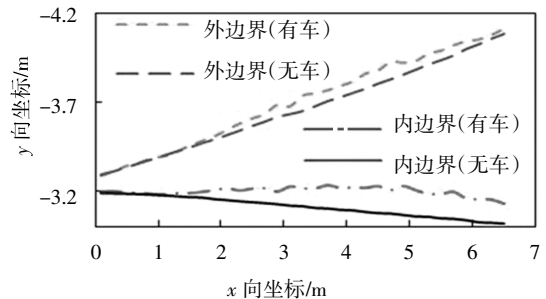


图 8 风洞中有无车辆剪切层位置对比

Fig.8 Comparison of shear layer position with or without vehicle in wind tunnel

3 声漂移量试验与预测分析

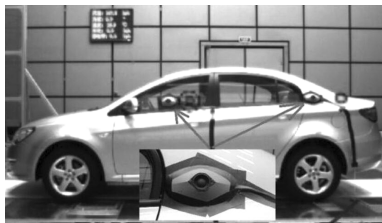
3.1 声传播试验

试验在同济大学-上海地面交通工具风洞中心整车气动声学风洞中完成. 该风洞为 3/4 开口回流风洞, 试验段背景噪声在 160 km/h 风速下低于 61 dB(A).

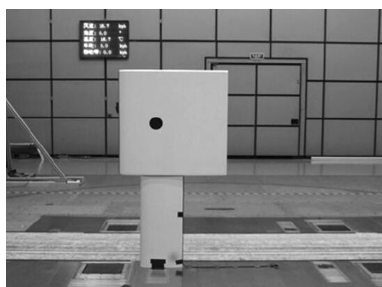
为了得到汽车风洞实际流场对声传播的影响, 将仿真同款车型置于试验段内, 在汽车表面距离喷口分别为 3.9 m 和 5.5 m 的位置上安装流线型扬声器, 高度距离地面 1.1 m, 与数值仿真设置相一致, 如图 9(a)所示.

为了得到空风洞流场对声传播的影响, 试验使

用一个具有良好的气动外形的翼型声源,经数值仿真验证,对整个流场扰动可忽略.声源位置分别为距离喷口 3.9 m 和 5.5 m,距离风洞中心对称面 0.62 m,声源高度 1.1 m,与汽车表面声源基本保持一致,如图 9(b)所示.



(a)汽车表面声源



(b)翼型整流罩声源

图9 噪声源定位测试中声源和安装效果

Fig.9 Sound source and installation effect in noise source location test

试验采用相位传声器阵列声源识别系统进行测量,具体参数如下:阵列尺寸为 1.8 m × 1.8 m,通道数 120;传感器采用阵列专用 1/4 英寸压力型传声器;数据采集系统为 120 通道高精度数采,单通道最大采样频率为 192 kHz;分析系统为基于波束成型技术的声源识别软件 Noise Image. 声源识别阵列被放置在距离射流中心线 5.57 m 处.

3.2 预测方法与设置

本文给出不同方法和流场条件对声漂移量预测值的影响,包括带扩散角修正的 Amiet 无限薄剪切层法和多种流场条件下的分层法计算声漂移量.计算过程中的声源与测点位置参数与实际测量保持一致.

在带扩散角 Amiet 无限薄剪切层方法中,将剪切层起点位置设为喷口壁面处,即 $y = -3.27$ m,扩散角为 2° ,取剪切层内侧速度为设置的试验风速 30 m/s,剪切层外侧速度为 0 m/s.

空风洞分层法和实际流场分层法分别取空风洞流场和实际流场仿真结果,将声源到传声器位置流场平均分为 1 000 层,每层流场厚度约为 5 mm,每层流场内部视为匀速.

为了分析实际流场中汽车绕流场作用和剪切层变化对声漂移的影响,还增加如下两种假设流场条件:1)仅考虑汽车绕流场影响的流场,设置为将空风洞情况下的剪切层内边界内的流场速度替换为实际风洞剪切层内的流场速度.2)仅考虑剪切层外扩影响的流场,设置为将实际流场情况下剪切层内边界内的流场替换速度为 30 m/s 的均匀流场.

3.3 结果分析

首先给出带扩散角的 Amiet 方法的预测结果与两种流场状态测量结果的比较,如表 1 所示.翼型声源测量可代表空风洞状态,车表声源测量代表实际流场状态.

表 1 Amiet 方法与实测比较

Tab.1 Comparison between Amiet method and measurement

方法	声漂移量/m		修正误差率/%	
	前声源	后声源	前声源	后声源
带扩散角 Amiet 修正	0.238	0.243	—	—
翼型声源测量	0.235	0.244	1.3	-0.4
车表声源测量	0.238	0.295	0.1	-17.6

空风洞实测结果前后声源漂移量差别较小,前后漂移量的差别主要是由扩散角引起的.使用带扩散角修正后 Amiet 方法对于空风洞声源漂移量的预测可以达到较高精度,前后声源误差率仅分别为 1.3%和-0.4%.实际流场实测结果声源漂移量前后声源差异较大,后部声源漂移试验值较翼型整流罩后声源漂移量有较大增幅.在此情况下,Amiet 修正在前声源处精度仍较好,预测值和试验值均为 0.238 m,误差率 0.1%是因预测值有效位数的显示引起;而车身表面后声源处漂移量实测为 0.295 m,Amiet 预测误差率较大,达到了-17.6%,说明在后声源处实际流场对声传播路线影响较空风洞流场有较大区别,Amiet 方法已不能很好地预测声漂移.

为定量分析不同流场条件对分层法声漂移量预测的影响,给出空风洞流场、仅考虑汽车绕流、仅考虑剪切层外扩、实际流场条件下,采用分层修正预测结果并与试验测量进行比较,如图 10 所示.

对于车表前声源漂移量的修正,各种预测方法得到的结果整体相近,误差均小于 3%.值得注意的是,仅考虑汽车绕流场的误差为-3.0%,是由后视镜外侧较大的逆向速度梯度产生的;仅考虑剪切层外扩误差为 1.1%,两者叠加会导致误差正负抵消,由此 Amiet 方法所得结果误差较小具有偶然因素.

对车表后声源漂移量的修正,Amiet 修正精度欠

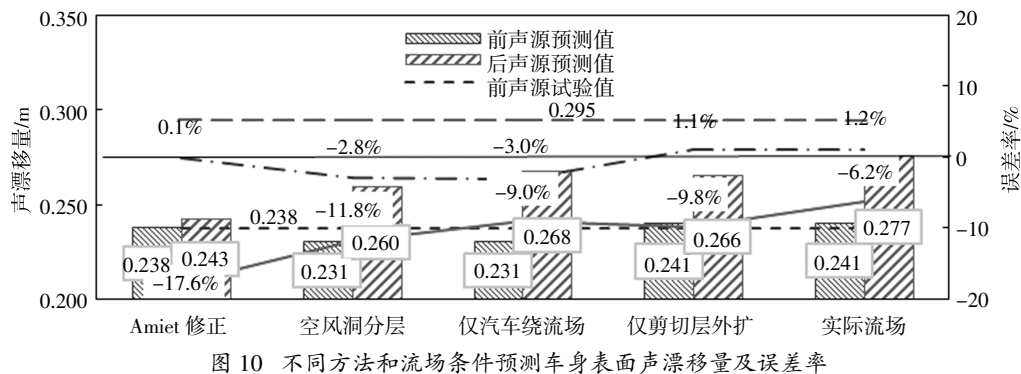


图 10 不同方法和流场条件预测车身表面声漂移量及误差率

Fig.10 Sound drift quantities and error rates of vehicle body predicted by different methods under different flow field conditions

佳,而使用空风洞分层法精度则略有提高.考虑实际流场,计入汽车绕流场和剪切层外扩的影响后,预测精度都有明显提高,而综合考虑两者影响后,预测精度更是大幅提高,误差仅为 Amiet 修正的 1/3.可见汽车后方绕流场和剪切层外扩叠加影响对声漂移量影响更为显著.

4 结论

通过对 3 种流场的分析和各流场条件下采用两种方法对声漂移量的预测和试验验证,得到以下结论:

1)实际风洞流场在势流核心区融合了汽车绕流场,车体表面附近速度场有与剪切层相反的速度梯度,该速度梯度在 A 柱附近的分离-再附着区域最为明显,沿流向逐渐减弱.因此绕流区车身后声传播规律有所不同,声漂移增量在车侧方从前至后有由负到正的上升趋势.

2)由于车辆对流场的阻塞作用,实际流场剪切层较空风洞流场有明显外扩,尤其剪切层内边界外扩更为显著,使实际声源至剪切层的距离增加,声漂移量随之变大.

3)带扩散角 Amiet 方法未计入实际流场影响,对车表后声源漂移量预测误差较大.采用分层模型并考虑上述流场影响因素后,预测精度改善明显,可在风洞测试中对现有修正方法进行改进.

参考文献

[1] AMIET R K. Correction of open jet wind tunnel measurements for shear layer refraction [C]// AIAA 2nd Aeroacoustics Conference. Hampton: AIAA, 1975: 1-10.
[2] AMIET R K. Refraction of sound by a shear layer [J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 58(4): 467-482.

[3] PORTEOUS R, GEYER T, MOREAU D J, *et al.* A correction method for acoustic source localization in convex shear layer geometries [J]. Applied Acoustics, 2018, 130: 128-132.
[4] 张俊龙, 李征初, 卢翔宇. 开口风洞剪切层对传声器及其阵列测量影响试验研究 [J]. 实验流体力学, 2018, 32(1): 71-77.
ZHANG J L, LI Z C, LU X Y. Experimental research on the influence of open jet shear layer on microphone and microphone array measurement [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(1): 71-77. (In Chinese)
[5] WANG L C, CHEN R Q, YOU Y C, *et al.* A unified correction method for the acoustic refraction (UCMAR) caused by a three dimensional shear layer [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2019, 105(5): 732-742.
[6] WANG Y G, YANG J S, YANG Y, *et al.* The effects of the jet-flow on sound propagation in low-speed wind tunnel [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226/227/228: 368-373.
[7] 沈哲, 王毅刚, 杨志刚, 等. 基于剪切层扇形分层模型的射流声传播分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 596-601.
SHEN Z, WANG Y G, YANG Z G, *et al.* Acoustic propagation analysis of jet flow based on stratified fan-shaped shear layer model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(4): 596-601. (In Chinese)
[8] SARRADJ E. A fast ray casting method for sound refraction at shear layers [J]. International Journal of Aeroacoustics, 2016, 16(1): 1475472X1668046.
[9] 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): 609-615.
PANG J B, LIU X H, CHEN L, *et al.* A review on Reynolds number, blockage and boundary layer effects in automotive wind tunnel tests [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609-615. (In Chinese)
[10] SODERBLOM D, ELOFSSON P, ANN H. Numerical investigation of blockage effects on heavy trucks in full scale test conditions [C]// SAE World Congress & Exhibition 2016. Warrendale: SAE International, 2016: 1-14.
[11] 王毅刚, 李方旭, 沈哲, 等. 风洞射流和汽车绕流对声传播的影响 [J]. 声学技术, 2017, 36(1): 57-63.
WANG Y G, LI F X, SHEN Z, *et al.* The influences of wind tunnel jet flow and airflow around vehicle on sound propagation [J]. Technical Acoustics, 2017, 36(1): 57-63. (In Chinese)
[12] WEI L, LI M, QIN S, *et al.* Sound source localization method in an environment with flow based on Amiet-IMACS [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 240-252.
[13] CRIGHTON D G, DOWLING A P, WILLIAMS F. Modern methods in analytical acoustics lecture notes [M]. Berlin: Springer, 1996: 527-530.