

汽车风洞双车试验来流湍流特征研究

周建文¹, 黄滔¹, 徐磊¹, 叶斌²

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122; 2. 广州汽车集团股份有限公司, 广州 511434)

摘要: 基于自主研发的真实道路来流参数测量系统, 对多地区、多场景真实道路行驶来流湍流强度进行了测试, 发现车辆道路行驶时来流湍流强度远高于风洞水平, 道路平均湍流强度为4%, 沿海地区湍流强度最高可达20%, 在跟车或超车时湍流强度可达28%。在汽车风洞内模拟了道路行驶跟车、超车等试验场景, 对测试车辆气流环境进行了采集分析。结果表明, 跟车和超车时, 后车来流湍流强度较高且伴随有速度损失, 湍流强度及速度损失大小与前车尺寸和跟车距离有关, 湍流强度分布范围为2%~33%, 与道路实测相当, 且速度损失最大为19%。进一步探究了前车放置角度、风洞风速对后车来流湍流强度的影响规律, 建立对后车来流湍流强度定量调节的方法。完成了双车风噪测试, 结果表明, 风洞内高湍流强度环境车内风噪测试调制频谱结果与道路行驶测试结果相符, 车内风噪频谱曲线差异主要集中在小于70 Hz的低频段。

关键词: 空气动力学; 道路试验; 湍流度; 汽车风洞; 双车试验; 调制度

中图分类号: U467.1; O355 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2023.02.08

Study on Incoming Turbulent Flow Characteristics Based on Two-Vehicle Test in Automotive Wind Tunnel

ZHOU Jianwen¹, HUANG Tao¹, XU Lei¹, YE Bin²

(1. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China;
2. Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract: Tests were conducted with the self-developed measurement system in multiple areas and scenarios to obtain the parameter values in the real-road air flow environment. The analysis revealed that the vehicles on the road experience a higher turbulent intensity of the incoming flow than those tested in the wind tunnel. The average turbulent intensity was 4% and the intensity reached as high as 20% in the coastal areas and 28% when vehicles followed or overtook each other. Vehicular tests of following and overtaking were carried out in the automotive wind tunnel, and the airflow condition of the test vehicles was collected and analyzed, showing that the incoming turbulence intensity of the following vehicle was higher which caused a decrease in speed. The turbulence intensity and velocity loss are related to the size of the followed vehicle and the following distance. The turbulent intensity distribution ranges from 2% to 33% and the maximum velocity loss is 19%. The influence of the front vehicle's placement angle and wind tunnel wind speed on the turbulence intensity of the rear vehicle was further investigated and a method to quantitatively adjust the

收稿日期: 2022-11-21 改稿日期: 2022-12-14

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0100100)

参考文献引用格式:

周建文, 黄滔, 徐磊, 等. 汽车风洞双车试验来流湍流特征研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(2): 201-209.

ZHOU Jianwen, HUANG Tao, XU Lei, et al. Study on Incoming Turbulent Flow Characteristics Based on Two-Vehicle Test in Automotive Wind Tunnel[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(2): 201-209. (in Chinese)



turbulence intensity of incoming flow was developed. The two-vehicle aero-acoustic test has been completed in the wind tunnel. The results show that the modulation spectra of cabin noise in the high turbulence intensity environment are consistent well with the on-road test results. The differences in the spectrum curves of cabin noise are mainly concentrated in the low frequency range of less than 70 Hz.

Keywords: aerodynamics; road test; turbulent; automotive wind tunnel; two-vehicle test; modulation

随着汽车电动化的推进,汽车续航里程焦虑及风噪声问题愈发凸显,而汽车空气动力性能则是影响车辆续驶和风噪声的重要因素。车辆在真实道路行驶时,来流湍流强度是影响汽车空气动力性能表现的重要参数^[1],受到大气自然风、道路两侧结构以及道路其他交通工具的影响,行驶车辆所遭遇的来流往往具有较高湍流强度水平。随着道路行驶车流量不断增加,前车高湍流强度尾流对车辆空气动力性能的影响会越来越明显。而当前汽车空气动力性能开发测试绝大多数是在湍流强度水平极低的汽车风洞中完成的,此种情况在真实道路行驶中极少出现。开发环境的不一致将会导致开发结果的准确性和开发方案实际应用的有效性出现差异,这是车辆实际行驶时空气动力性能不及开发预期而导致消费者产生里程焦虑、风噪声投诉抱怨的重要原因之一。因此,探索车辆真实道路行驶环境参数,并在风洞试验开发阶段复现行驶场景或环境,是当前空气动力性能开发的热点研究内容。

在真实道路行驶环境参数研究与分析方面,许多学者研究了道路行驶时来流参数不稳定的原因以及它们对车辆空气动力性能的影响^[2-11]。其中,WOJCIAK等^[7]、WORDLEY^[8-9]等较早开展了相关研究,探究了车辆道路行驶时的流场情况,研究发现不同道路行驶环境的湍流强度不同,在高速公路行驶时湍流强度可达9%。WATKINS等^[10]研究发现道路行驶环境下的湍流会显著影响车辆的空气动力学性能,从而导致车辆动力损耗和风噪声水平的评估出现偏差。曾祥懿等^[3]研究发现来流非稳态流场参数具有明显的区域分布特征。OETTLE等^[5]测量了道路行驶车辆车内风噪声压级,研究发现不同造型车辆对来流湍流强度表现出不同的敏感性。

在风洞非稳态流动试验研究方面,研究人员提出了许多方法模拟风洞内道路行驶环境,包括障碍物产生不稳定气流的被动方法^[12-15],以及利用翼型、叶片产生不同湍流强度来流的主动方法^[16-22]。其中,THOMPSON等^[14]在风洞内完成了高湍流度环境风噪试验,研究发现将车辆放置在风洞剪切层中的测试结果更能反映道路行驶的声音调制现象。TERAKADO等^[18]利用在喷口处安装翼型方法,能产生高达13%湍流强度的气流,并能调试得到与道路风速、偏航角接近的测试环境。

当前,对于在汽车风洞内产生高湍流强度气流环境,模拟真实道路行驶湍流强度环境的研究,主要通过风洞内增加固定装置产生高湍流度气流,从而定性分析与低湍流度相比,二者空气动力学试验结果的差异。而探究跟车、超车等实际场景的气流非定常特征变化,定量地分析前车对后车行驶气流环境的影响规律,对于了解不同道路场景下行驶车辆空气动力性能真实变化具有重要作用,但目前对相关工作的报道。本研究是在整车气动-声学风洞中开展双车试验,模拟道路行驶中的跟车、超车场景,对测试车辆遭遇的气流湍流环境进行了详细分析。进一步研究了前车车辆尺寸、放置角度以及风洞风速变化对后车来流湍流强度的影响规律,完成了不同湍流强度水平来流环境下的风洞风噪试验。

1 真实道路来流湍流强度测量

1.1 测试装备

为了获取真实道路行驶时车辆遭遇非稳态来流的情况,研发了真实道路来流参数测量系统,采集真实道路来流参数。真实道路来流参数测量系统集成了总压探针、眼镜蛇探针、五孔探针,以及用于

记录车辆行驶速度的GPS传感器和用于记录周围行车环境的多视角行车记录仪。各传感器连接至同一个数采（东华DH5902N）并进行同步采集，采样频率为1 000 Hz。行车记录仪单独录像，在测量前与数据采集用电脑统一起始时刻。

总压探针、眼镜蛇探针、五孔探针在车辆的安装位置如图1所示，位于车辆发动机盖后端，分别用于测量来流合成速度、湍流强度以及来流偏航角。经过CFD仿真分析验证，该安装位置（图2中的位置2）所在地速度与远场速度接近，选定该处近似等效于前方自由来流流场。



图1 真实道路来流参数测量系统

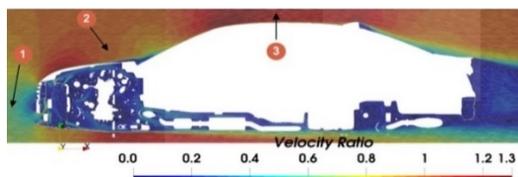


图2 CFD仿真中截面无量纲速度分布云图

1.2 道路来流特性分析

在进行道路采集试验前，对安装有真实道路来流参数测量系统的试验车辆进行了风洞标定，修正了各采集物理量在系统安装位置当地与远场间的差异。

研究团队开展了中国部分地区的真实道路来流信息采集工作，包括重庆、广州、深圳、海南、上海、浙江等地区，涵盖山间高速、沿海高速、城市高速、跨海大桥、隧道等典型道路环境。采集得到总计约50 h、3 000 km路程的有效试验数据，包含道路来流实际风速、角度、湍流度等信息，而本文将重点对道路湍流度特征进行讨论。

图3为综合道路来流湍流强度与湍流积分尺度

分布图。其中，横轴为湍流积分尺度分布值，湍流积分尺度大表明湍流扩散能力较强；纵轴为湍流强度分布值，湍流强度高表明流场的脉动强度高。由图可知，汽车在道路上行驶时，受到自然风、道路两侧的结构以及其他行驶车辆的影响，通常遭遇的来流环境是非定常的，不稳定的环境导致了湍流强度和湍流积分尺度的增加。相对风洞内低湍流强度稳定来流，真实道路来流湍流强度高100倍数量级，高湍流积分尺度也表明真实道路流场往往存在大的流动结构。图4展示了各城市部分路段以及跟车、超车典型行驶场景对应测得平均湍流强度水平的分布情况，可以发现沿海地区来流湍流强度相对重庆地区较高，平均在4%以上，最高接近20%。在跟车和超车行驶场景，测得最高的来流湍流强度水平，平均分别为16%、11%，最高可达28%、17%。

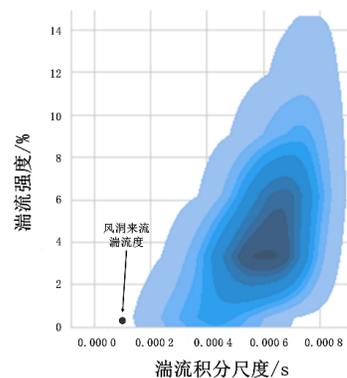


图3 道路来流湍流强度与湍流积分尺度分布

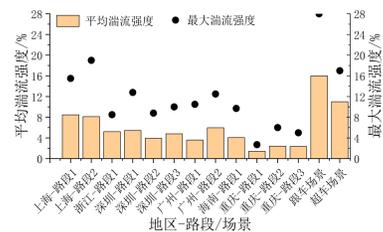


图4 部分路段平均湍流强度分布

2 风洞双车试验及结果分析

2.1 前后双车风洞试验方法

本研究将使用前后双车风洞试验方法，即利用前车尾流在风洞中产生高湍流强度来流，这是在风

洞内快速获得高湍流强度来流测试环境的方法之一，并可实现对跟车、超车等特定真实道路行驶场景进行模拟。

如图 5 所示，安装有真实道路来流测量系统的试验车辆（图中蓝色车辆）将被放置于气动-声学风洞试验段后部区域。测试段前部天平转台区域将放置其他背景车辆（图中黑色车辆），通过图 6 CFD 分析结果可知，气流经过前车后将会发展成不稳定、高湍流强度状态，而试验车辆将处于前车高湍流强度的尾流区域中，以实现跟车、超车状态的模拟。

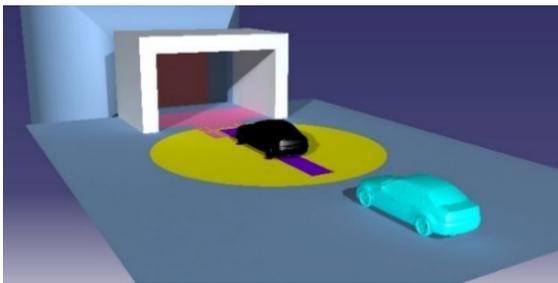


图 5 风洞内进行前后双车试验示意图

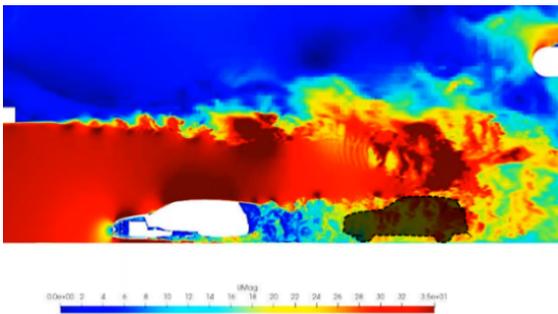


图 6 试验车（后车）位于背景车辆（前车）尾流区域示意图

2.2 跟车、超车试验结果分析与讨论

双车风洞试验在一座汽车整车气动-声学风洞中完成。表 1 展示了该风洞测试段在不同流速下转盘中心点处对应的流向湍流强度值。可以看出风洞常规测试产生的来流为低湍流强度气流，而车辆道路行驶遭遇的来流主要为高湍流强度气流，两者差异较大。

表 1 不同流速下风洞测试段流向湍流强度测试值

流速 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	16.67	30.56	44.44
湍流强度 / %	0.023	0.019	0.029

为了在风洞内复现道路跟车、超车行驶时车辆遭遇来流的高湍流强度特性，在风洞内模拟进行了双车试验，试验车辆置于背景车辆正后方或斜后方，并在不同跟车距离下完成来流参数测量，图 7 为风洞内跟车、超车试验现场图。



图 7 风洞跟车、超车试验测试现场

图 8 展示了跟车场景不同跟车距离工况下，试验车辆测得来流湍流强度和速度大小的分布情况。随着跟车距离从 3 m 增大至 6 m，试验车辆受背景车辆尾流的影响逐渐减弱，测得来流湍流强度依次减小（从 33% 减小至 19%）。由于试验车辆处于背景车辆尾流低压区中，测得来流速度值相对风洞来流值有所减小，各跟车距离下减小量基本一致，约为 20%。

分析跟车场景和车辆尺寸对试验车辆气流环境的影响，结果如图 9 所示。当背景车辆为 SUV 或轿车时，试验车辆测得来流湍流强度和速度值差异较大。相对轿车，背景车辆为 SUV 时导致的非定常尾流区域将更大，对后方试验车辆来流影响更剧烈，测得湍流强度为轿车的 3 倍，测得速度损失值为轿车的 3.5 倍。

超车场景不同距离工况下的试验车辆来流湍流强度和速度分布结果，如图 10 所示。当双车距离较近时（距离为 3 m、4 m），试验车辆来流主要受背景车辆侧面气流影响，湍流强度水平较低；当双车距离较远时（距离为 5 m、6 m），试验车辆来流

受背景车辆尾流影响较大，湍流强度变大。由于同时受背景车辆侧面和尾部气流的影响，试验车辆来流速度损失量随前后双车距离变化无明显趋势，部分距离出现速度增加现象。

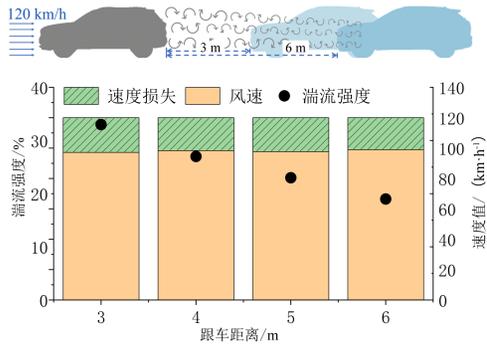


图 8 不同跟车距离下试验车辆来流湍流强度和速度分布

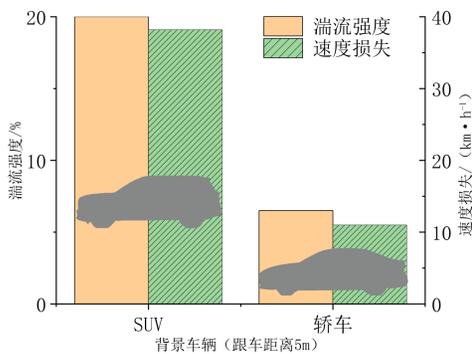


图 9 不同背景车辆对应试验车辆来流湍流强度和速度分布

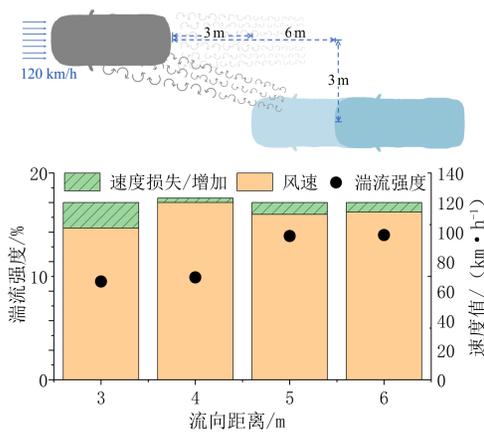


图 10 超车场景不同流向距离下试验车辆来流湍流强度和速度分布

2.3 风洞内双车试验湍流强度调节研究

基于跟车场景双车试验结果，通过更改前车车型（尺寸）、放置角度，采集并分析后车遭遇来流

的湍流强度、速度及角度分布规律，以实现在风洞内制造与真实道路来流湍流强度匹配的高湍流强度测试环境。

图 11~12 分别展示了跟车距离为 5 m 时，前车分别为 SUV 和轿车在不同放置角度状态下，后车测得来流湍流强度和速度大小的分布情况。综合两图可知，前车放置角度对后车来流湍流强度的影响基本一致，随着放置角度的增大，试验车辆来流受前车尾流的影响而变弱，测得来流湍流强度变小。同时，伴随前车尾流影响的减弱，试验车辆来流的速度损失值随前车放置角度的增大而减小。由于气流流经 SUV 后形成的尾涡相比流经尺寸较小的轿车，涡尺寸更大，影响范围更广。因此，相比轿车（图 12），当前车为 SUV（图 11）时，试验车辆的湍流强度和速度损失上限值较大，随前车放置角度的变化更敏感。

利用在前方放置不同尺寸车型、不同摆放角度的车辆，以及结合第 3.2 节中跟车、超车场景分析结果，能满足在风洞内实现高湍流度来流测试环境的需求，湍流度分布区间为 2%~33%，且分布较为规律，易于调试得到与真实道路来流湍流强度水平相当的测试场景。

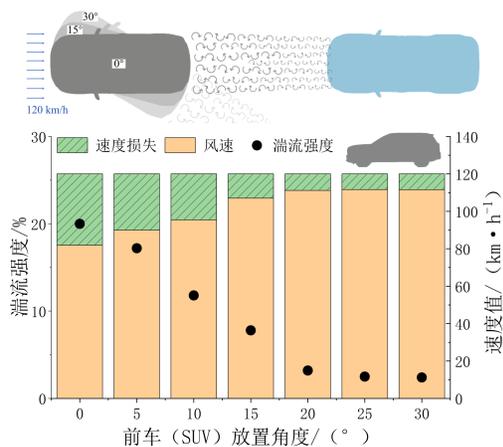


图 11 不同前车放置角度下后车来流湍流强度和速度分布

此外，研究了不同来流湍流强度下，改变风洞风速对后车来流湍流强度的影响，测试结果如图 13 所示（跟车距离为 5 m）。结果表明，在前车状态不

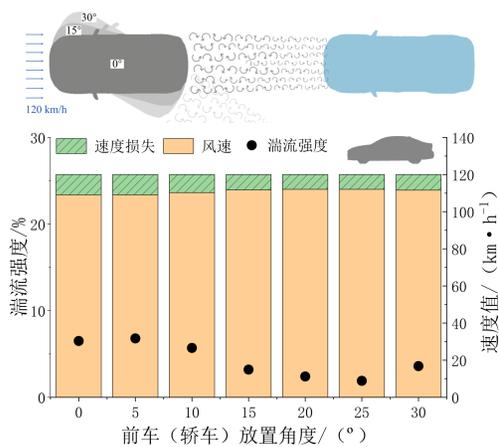


图 12 不同前车放置角度下后车来流湍流强度和速度分布

变的情况下, 可通过改变风洞风速, 对后车测得来流速度大小进行调整(速度 1 至速度 2), 从而完成各湍流强度水平对应速度损失的补偿, 对测得来流湍流强度的影响较小, 前后两次测得来流湍流强度值(湍流度 1、湍流度 2)基本一致。因此, 在保证后车来流可调恒定湍流强度下, 可以通过改变风洞风速, 以弥补后车的速度亏损值。

图 14 展示了后车来流角度随前车放置角度变化下的分布规律(跟车距离为 5 m)。测试结果表明, 后车测得来流角度与前车的尺寸(造型)相关, 前车尺寸越大, 测得来流角度值最大值越大且变化范围越大。随着前车放置角度从 0° 开始增大, 后车测得来流角度开始快速增大, 并在放置角度为 10° (角度为负为逆时针转动) 时达到最大值。前车放置角度大于 10° 后, 前车尾流对后车影响逐渐

变小, 后车测得来流角度开始变小并在前车约 20° 后趋于平稳, 前车为 SUV 时, 后车来流角度恒定于 6° ; 前车为轿车时, 后车来流角度恒定于 3° 。

如图 15 所示, 通过对后车放置角度进行调整, 以获得来流角度随放置角度的分布规律。由图 16 中的测试结果可知, 后车不同放置角度状态下对应测得的来流角度随来流湍流强度变化的趋势基本一致。因此, 可以通过调整后车的放置角度, 保证在不同湍流强度水平下后车来流角度一致, 以实现恒定后车来流角度, 从而调节湍流度变化的效果。

2.4 双车风噪试验结果分析与讨论

汽车在道路行驶时, 车内听到的风噪声往往与在风洞中测试得到的风噪声不同。由于受自然风和道路其他交通工具的影响, 真实道路行驶车辆遭遇来流具有高湍流强度属性。连续变化的来流速度大小、偏角, 将会对车内风噪声产生调制作用^[14], 这是引起道路行驶与风洞试验车内风噪声主观感受差异的主要原因。

对道路、风洞试验结果进行调制分析, 调制中心频率为 4 000 Hz。图 17 展示了道路测试、风洞常规测试以及风洞双车测试调制分析结果对比图, 图中展示了 0~30 Hz 调制频率段的调制结果, 该频率段对主观感受脉动强度影响较大。道路行驶来流湍流强度为 7.2% 等的车内噪声调制频谱, 如图 17a 所示, 频谱图显示总体的调制度较高, 尤其是 2~6 Hz 的频率段; 风洞内常规风噪测试结果的调制频谱, 如图 17b 所示, 来流湍流强度水平较低, 在所

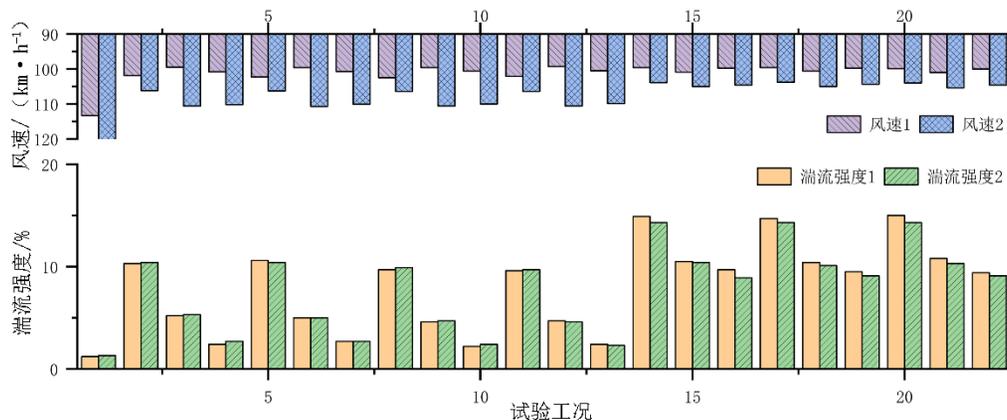


图 13 各工况风洞风速变化对应湍流强度变化

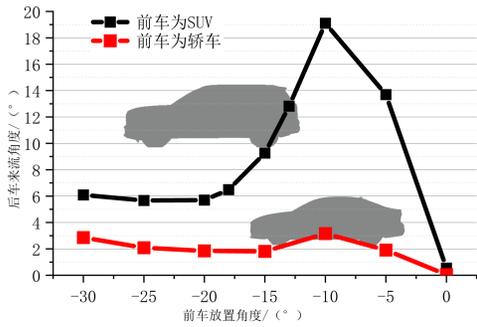


图 14 后车来流角度随前车放置角度变化分布

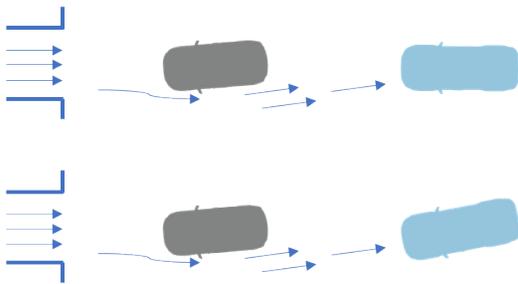


图 15 不同后车放置角度示意图

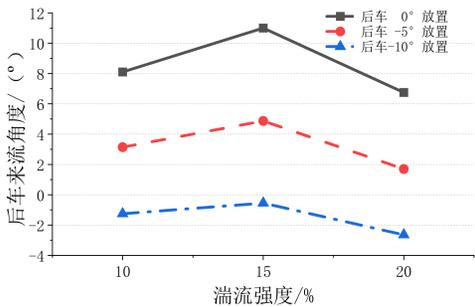
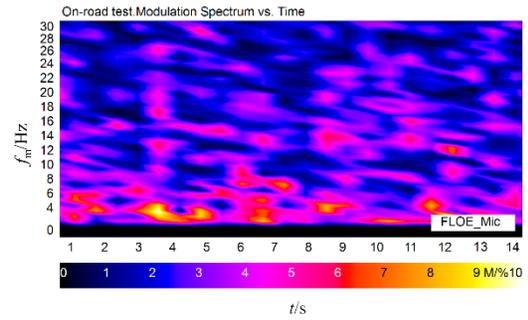


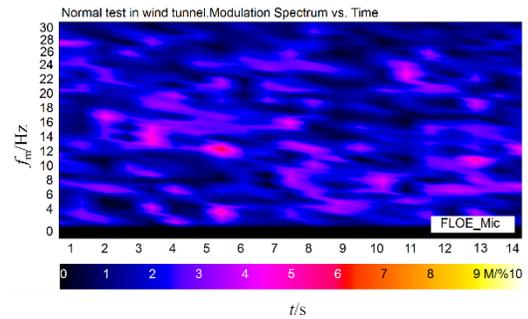
图 16 后车放置角度对后车来流角度的影响

有的调制频率段的调制度均较低；风洞内进行双车试验的车内风噪测试结果调制频谱，如图 17c 所示，应用 3.2 节的来流湍流强度调节方法，建立与道路行驶来流湍流强度接近水平的测试环境并完成测试。双车试验调制频谱图体现了与道路试验调制频谱相符的较高调制度，且同样在 2~6 Hz 频率段内展示了突出的调制强度。说明在风洞内进行高端流度风噪试验能复现车辆在道路行驶时的调制现象。

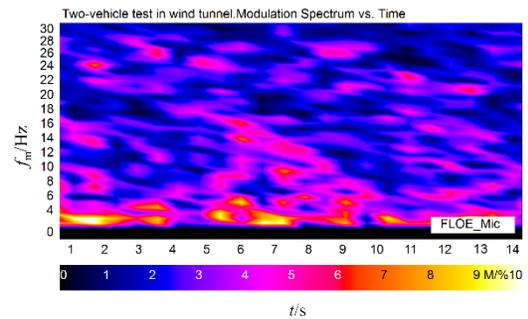
风洞内双车风噪试验中，来流湍流强度分别为 20%、10%、1% 时的车内噪声频谱曲线对比，如图 18 所示，由频谱曲线对比图可以得到 3 次试验频谱曲线差异，主要集中于小于 70 Hz 的低频段内，与主观感受低频脉动差异相符。



(a) $T_u=7.2\%$



(b) $T_u<1.0\%$



(c) $T_u=7.1\%$

图 17 不同测试场景调制频谱对比

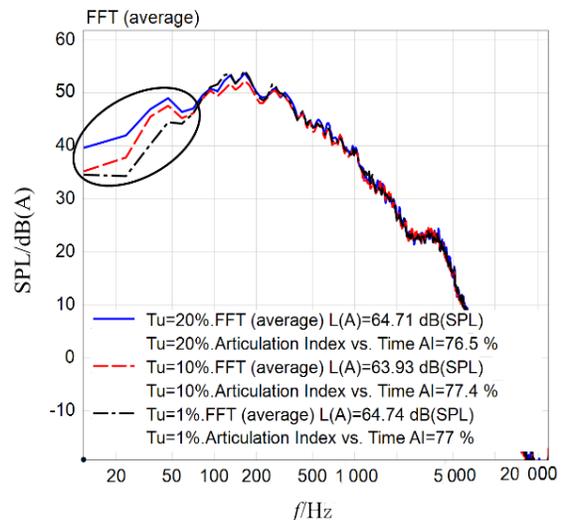


图 18 有无前车车内风噪频谱曲线对比

3 结论

本文系统性地对风洞双车试验来流湍流特征进行了研究分析,完成了相关道路试验以及风洞试验,并获得以下结论:

(1) 完成了多地区、多场景的道路试验。测试结果表明,真实道路来流为高湍流强度来流,平均湍流强度为4%,沿海地区平均湍流强度为5.5%,部分湍流强度最大接近20%;在跟车和超车行驶场景下,受前车尾流影响,来流湍流强度相对于无前车场景较大,最大可达28%。

(2) 在风洞内完成了跟车、超车行驶场景模拟试验,研究发现在跟车行驶时,遭遇来流的湍流强度和速度随背景车辆尺寸和跟车距离相关。较大尺寸的尾涡或较近的跟车距离,均会使试验车辆来流湍流强度以及速度损失值变大。超车场景相对跟车场景,试验车辆处于背景车辆斜后方,受背景车辆尾流影响较小,来流湍流强度相应较小。

(3) 不同尺寸背景车辆,结合不同的放置角度,可使试验车辆获得不同湍流强度水平来流,湍流强度变化区间为2%~33%,满足模拟真实道路来流高湍流强度测试环境的要求。对应地,不同背景车辆放置角度会导致试验车辆来流速度值、角度值的不同。经试验验证,这可通过改变风洞风速和试验车辆放置角度,保证在不同湍流强度下,来流速度、角度一致。

(4) 风洞高湍流强度风噪试验结果表明,来流湍流强度水平相当的风洞风噪测试结果能够反映道路试验测试结果的调制频谱,且分析结果吻合较好。不同湍流强度车内风噪测试结果频谱曲线差异主要集中在小于70 Hz的低频段。

4 展望

通过完成风洞内双车试验,获得了双车场景下来流湍流度特征分布情况,完成了其对车内风噪声影响的初步研究分析。相关结论对于深入研究实际行驶场景中汽车气动阻力、气动噪声特性具有较好的指导意义。

以本研究为基础,将继续深入开展来流湍流度水平对于车内噪声影响的研究分析工作。探究非稳态风噪性能测试主客观参数的相关性,建立非稳态风洞风噪测试与真实道路风噪评价体系,为获得非稳态风噪环境下的高敏感度关键设计位置,以及针对性地建立高鲁棒性设计方案奠定理论和试验基础。

进一步应用联合测量技术对双车行驶场景进行流场、气动力等数据采集,深入发掘、分析非稳态气动来流下的整车受力特征、力与流场关联性,建立双车行驶场景的非稳态气动测试数据库,为真实道路行驶场景下的车辆空气动力性能开发提供参考依据。

参考文献 (References)

- [1] MANKOWSKI O A. The Wind Tunnel Simulation and Effect of Turbulent Air Flow on Automotive Aerodynamics [D].UK:Durham University,2013.
- [2] ZHU Guangxia, LIU Xin, LIU Lulu, et al. Effect of Natural Wind on the Transiting Test for Measuring the Aerodynamic Coefficients of Structures [J]. Symmetry, 2021,13(8):1493.
- [3] 曾祥懿,补涵,肖凌,等.考虑来流偏角的汽车道路行驶阻力研究[J].汽车工程学报,2022,12(2):170-179.
ZENG Xiangyi, BU Han, XIAO Ling, et al. Study on Vehicle Road Resistance Considering Incoming Flow Yaw Angle [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022,12(2):170-179.(in Chinese)
- [4] D'HOOGHE A, REBBECK L, PALIN R, et al. Application of Real-World Wind Conditions for Assessing Aerodynamic Drag for on-Road Range Prediction [C]//SAE Technical Papers,2015-01-0551,2015.
- [5] OETTLE N R, SIMS-WILLIAMS D B, DOMINY R G, et al. The Effects of Unsteady On-Road Flow Conditions on Cabin Noise: Spectral and Geometric Dependence [C]//SAE Technical Papers,2011-01-0159,2011.
- [6] OETTLE N, SIMS-WILLIAMS D, DOMINY R, et al. The Effects of Unsteady on-Road Flow Conditions on Cabin Noise [C]//SAE Technical Papers,2010-01-0289,2010.
- [7] WOJCIAK J, INDINGER T, ADAMS N, et al. Experi-

- mental Study of on-Road Aerodynamics During Crosswind Gusts [C]//8th MIRA Vehicle Aerodynamics Conference, October 13–14, Grove, UK; 2010.
- [8] WORDLEY S, SAUNDERS J. On-Road Turbulence: Part 2 [C]//SAE Technical Papers, 2009–01–0002, 2009.
- [9] WORDLEY S, SAUNDERS J. On-Road Turbulence [C]//SAE Technical Papers, 2008–01–0475, 2008.
- [10] WATKINS S, COOPER K R. The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles, Part Two: Effects on Vehicle Development and Simulation of Turbulence [C]//SAE Technical Papers, 2007–01–1237, 2007.
- [11] 刘立宁, 郗学峰, 杜广生, 等. 侧风条件下加速超车过程车辆气动特性 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 174–179.
LIU Lining, CHI Xuefeng, DU Guangsheng, et al. Aerodynamic Characteristics of Vans During Accelerated Overtaking Process in Crosswinds [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(1): 174–179. (in Chinese)
- [12] BAO D, JIA Q, YANG Z. Effect of Vortex Generator on Flow Field Quality in 3/4 Open Jet Automotive Wind Tunnel [C]//SAE Technical Papers, 2017–01–1530, 2017.
- [13] 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 Technical Papers, 2015–01–1555, 2015.
- [14] THOMPSON M, WATKINS S, KIM J. Wind-Tunnel and on-Road Wind Noise: Comparison and Replication [C]//SAE Technical Papers, 2013–01–1255, 2013.
- [15] KRAMPOL S, RIEGEL M, WIEDEMANN J. A Procedure to Simulate the Turbulent Noise Interior of Cars [C]//International Conference on Acoustics (NAG/DAGA 2009), March 23–26, 2009, Rotterdam, the Netherlands. 2009: 596–598.
- [16] STOLL D, WIEDEMANN J. Active Crosswind Generation and Its Effect on the Unsteady Aerodynamic Vehicle Properties Determined in an Open Jet Wind Tunnel [C]//SAE Technical Papers, 2018–01–0722, 2018.
- [17] YAMASHITA T, MAKIHARA T, MAEDA K, et al. Unsteady Aerodynamic Response of a Vehicle by Natural Wind Generator of a Full-Scale Wind Tunnel [C]//SAE Technical Papers, 2017–01–1549, 2017.
- [18] TERAOKADO S, MAKIHARA T, SUGIYAMA T, et al. Experimental Investigation of Aeroacoustic Cabin Noise in Unsteady Flow by Means of a New Turbulence Generating Device [C]//SAE Technical Papers, 2017–01–1545, 2017.
- [19] STOLL D, SCHOENLEBER C, WITTMIEIER F, et al. Investigation of Aerodynamic Drag in Turbulent Flow Conditions [C]//SAE Technical Papers, 2016–01–1605, 2016.
- [20] BLUMRICH R, WIDDECKE N, WIEDEMANN J, et al. New FKFS Technology at the Full-Scale Aeroacoustic Wind Tunnel of University of Stuttgart [C]//SAE Technical Papers, 2015–01–1557, 2015.
- [21] MANKOWSKI O A, SIMS-WILLIAMS D B, DOMINY R G. A Wind Tunnel Simulation Facility for on-Road Transients [C]//SAE Technical Papers, 2014–01–0587, 2014.
- [22] DOMENIC S, DANIEL S, MATTHIAS R, 等. 开口射流风洞主动湍流产生过程中动态射流特性 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(S1): 14–19.
DOMENIC S, DANIEL S, MATTHIAS R, et al. Dynamic Jet Behavior During Active Turbulence Generation in Open Jet Wind Tunnels [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(S1): 14–19. (in Chinese)

作者简介



周建文 (1977–), 男, 四川简阳人, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为汽车整车开发技术。

Tel: 18602357721

E-mail: zhoujianwen@caeri.com.cn