文章编号：0253-374X(2025)09-1457-05

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24132

同济气动声学风洞声场品质测试

庞加斌[1,2]，刘劲松[2]，邢　鹏[2]，李　泽[2]，李田田[2]

（1. 同济大学 汽车学院，上海 201804；2. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心，上海 201804）

摘要：气动声学风洞的声场品质包括试验段驻室自由声场、背景噪声和低频压力脉动3个方面指标。同济气动声学风洞声场测试结果显示，160 km·h^{-1}风速的背景噪声A计权总声压级为61 dB(A)，50～200 km·h^{-1}风速范围内的低频压力脉动系数小于0.5%；滚动路面系统的移动带抽吸在80 km·h^{-1}风速以下干扰背景噪声，但对低频压力脉动没有影响；按照ISO 3745:2012标准，试验段驻室自由声场截止频率低至50 Hz，且63 Hz及以上自由声场半径达到9 m。

关键词：气动声学风洞；自由射流剪切层；背景噪声；低频压力脉动；滚动路面系统

中图分类号：U467.1^{+}2　　**文献标志码**：A

Sound Field Performance Test of Tongji Aero-acoustic Wind Tunnel

PANG Jiabin[1,2], *LIU Jinsong*[2], *XING Peng*[2], *LI Ze*[2], *LI Tiantian*[2]

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The sound field performance for an automobile aero-acoustic wind tunnel comprises three aspects of free-sound field, background noise and low-frequency pressure fluctuation. The latest test results of Tongji Aero-acoustic Wind Tunnel has validated that the background noise OASPL at 160 km·h^{-1} wind speed is 61 dB(A), and the low-frequency pressure fluctuation coefficient is lower than 0.5% within the wind speed range from 50 to 200 km·h^{-1}. Meanwhile, it was found that the belt suction of rolling road systems adds the background noise below 80 km·h^{-1} wind speeds, yet no effects on the low-frequency pressure fluctuation. According to ISO 3745:2012, the cut-off frequency of the free-sound field is down to 50 Hz, while the radius of the free-sound field at and above 63 Hz cut-off frequencies reaches 9 m inside test section plenum.

Keywords: aero-acoustic wind tunnel; free-jet shear layer; background noise; low-frequency pressure fluctuation; rolling road system

汽车风洞用于真实道路上汽车行驶的空气动力环境模拟，是重要的汽车空气动力学性能开发试验设施。专业汽车风洞从1960年代开始发展至今，已经形成了相对固定的类别与型式，包括气动声学风洞、热环境风洞或缩比模型风洞，全部采用3/4开口试验段，其中地面装备路面模拟系统，而侧面与顶面存在自由射流剪切层，因此即便采用低噪声风机和具有流道消声的气动声学风洞，也存在背景噪声和低频压力脉动现象。

气动声学风洞的风机、流道和环境噪声须通过消声降噪措施被消除或隔离，试验段的背景噪声包括喷口出口的自由射流噪声、试验段地面的气流噪声和试验段机电设备噪声。自由射流噪声是汽车风洞背景噪声的主要组成部分。

开口风洞试验段内的低频压力脉动受自由射流剪切层和收集口边棱反射等非定常流动的影响，在收集口处形成喉口亥姆赫兹效应，低频压力脉动是开口风洞固有的物理属性，应被控制在合理水平。国内外整车气动声学风洞的喷口面积约在20～30 m^{2}范围内，160 km·h^{-1}风速下的背景噪声为60～65 dB(A)，低频压力脉动系数为0.5%～1.0%[1-6]。

背景噪声和低频压力脉动是气动声学风洞的两大重要声学品质指标，与风洞设计，特别是收集口型式及尺寸、洞体声学模态(包括谐振腔)有关。目前大量文献聚焦于背景噪声和低频压力脉动，关于试

收稿日期：2024-04-11

基金项目：国家重点研发计划(2022YFE0208000)；上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室开放课题(23DZ2229029)

第一作者：庞加斌，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为汽车风洞技术和汽车空气动力学。E-mail：pang@tongji.edu.cn

通信作者：刘劲松，工程师，主要研究方向为汽车风洞技术和汽车空气动力学。E-mail：liujinsong45@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

验段驻室的自由声场指标的讨论较少[7-13]。汽车风洞需要模拟的平坦开阔道路是半无穷大自由声场，因此气动声学风洞的试验段驻室应遵循半消声室的标准[14-15]。

同济大学上海地面交通工具风洞中心(SAWTC)的气动声学风洞建成于2009年，经过15年运行，有必要对其声场品质进行测试分析。

1 同济气动声学风洞

图1所示为同济气动声学风洞的平面布局，主要包括收缩段喷口、试验段驻室、收集口、第1扩散段、转角1、连接段1、转角2、风机过渡段、风机扩散段、主扩散段、转角3、连接段2、转角4、稳流舱等流道部段，以及流道内部换热器、蜂窝器、阻尼网和天平转盘移动带系统等关键设备。

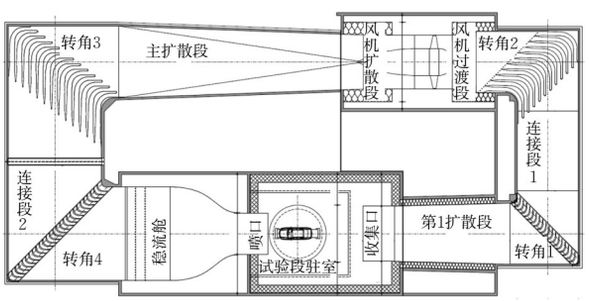

图1 平面布局

Fig.1 Plane layout

气动声学风洞长宽为94 m×44 m，其关键技术参数如表1所示。

表1 关键技术参数

Tab.1 Key technical parameters

参数名称	数值
喷口面积/m^2	27
喷口收缩比	6:1
试验段长度/m	15
收集口面积/m^2	59
驻室长度/m	24
驻室宽度/m	19
驻室高度/m	12
最大风速/(km·h^{-1})	250
风机直径/m	8.5
风机额定功率/kW	4 000

天平转盘移动带系统如图2所示。其中，中央移动带尺寸为7 m(长)×1.1 m(宽)，车轮转动单元尺寸为310 mm(长)×280 mm(宽)，中央移动带的高速运动要求高精度机械张紧和空气轴承吸附。

同济气动声学风洞的声场品质主要依靠以下消声降噪措施：

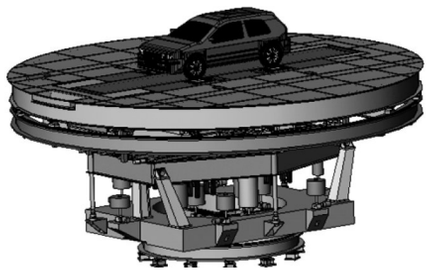

图2 天平转盘移动带系统

Fig.2 Balance turntable moving belt system

(1)流道消声采用风机前后的消声器、转角导流片消声器、收集口与第1扩散段壁面消声。

(2)试验段驻室消声采用满足ISO 3745:2012[14]和JJF 1147—2006[15]的宽带平板消声器，厚度0.35 m，截止频率50 Hz。

(3)充分利用试验段驻室上下游建筑空间，将喷口室设计为超大容积谐振腔、收集口到转角2的上方建筑空间设计为平衡流谐振腔，辅以收集口尺寸及角度优化，实现全风速范围的低频颤振抑制。

2 自由声场测试

气动声学风洞的试验段驻室应遵循半消声室测试标准[14-15]。

2.1 半消声室测试标准

气动声学风洞的试验段驻室设计参考标准ISO 3475:2012[14]和校准规范JJF 1147—2006[15]，符合半消声室的定义，即：地面反射面上方为自由声场空间，且半消声室室内本地噪声比测试声源的声压级低15 dB。

测试声源应为满足所有频率范围的无指向性点声源，认定的声中心为天平转盘中心，允许偏差满足如表2所示的要求。在所有频率范围内声源应有足够的声输出，使每个传声器路径上所有测点的声压级都比本地噪声高10 dB以上。测量过程中，包括信号发生器和功率放大器在内，任何1/3倍频带上的辐射声功率变化不可超过±0.5 dB。

表2 声压级测试值最大容许偏差

Tab.2 Maximum allowable deviation of sound pressure level test values

声场类型	1/3倍频/kHz	精确Ⅰ级偏差/dB
半消声(地面反射)	≤0.63	±2.5
	0.80～5.00	±2.0
	≥6.30	±3.0

传声器与声源之间至少有 5 条直线路径，直线路径的延长线穿过声源中心。其中，4 条路径为从声源至风洞房间角，是关键传声器路径，其余路径可根据实际测量需要安排。对于消声室或半消声室，4 条传声器与声源之间的关键直线路径应位于风洞内的工作区域。

测试声源信号为随机噪声，声压级中心频率范围为 50～10 kHz。

2.2　测试过程

考虑汽车风洞试验要求，标准声源位置选择在天平转盘中心，按照标准 ISO 3745：2012，布置 8 条测试路径。其中，B1L、B1R、B4L、B4R 从声源斜向上到驻室顶角，B2、B3L、B3R、B5 从声源垂直向上到驻室顶边，如图 3 所示。

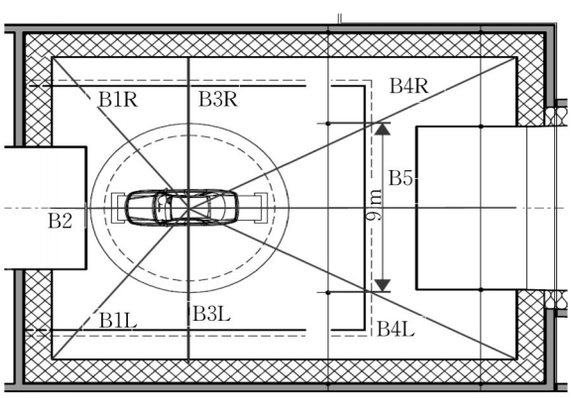

图 3　自由声场测试路径俯视图

Fig.3　Top view of free sound field test paths

测试仪器配置包括：

（1）400 Hz 以下采用 Norsonic 250 半球声源，400～4 000 Hz 区间采用 EV ND6X 口径 0.025 0 m 的高频辐射声源，4 kHz 以上采用 EV ND6X 口径 0.012 5 m 的高频辐射声源。

（2）自由声场麦克风型号为 GRAS 40AE，配置 26CA 前置放大器和 42AB 标定器，以及 Norsonic 双通道信号放大及分析仪。

2.3　测试结果

气动声学风洞的自由声场测点间距为 0.1 m。测量值与理论值最大容许偏差按标准 ISO 3745：2012 的精确Ⅰ级确定[14]，如表 2 所示。

图 4 所示为粉噪声源 1/3 倍频沿路径 B1L 声压级。试验结果符合宽带平板消声器的特点，低频段吸声效率低于高频段。

综合分析所有路径和频率的测试结果，以天平转盘中心为原点，同济气动声学风洞自由声场半径在 63 Hz 及以上时达到 9～12 m，对应 50 Hz 的自由声场半径约为 7 m。

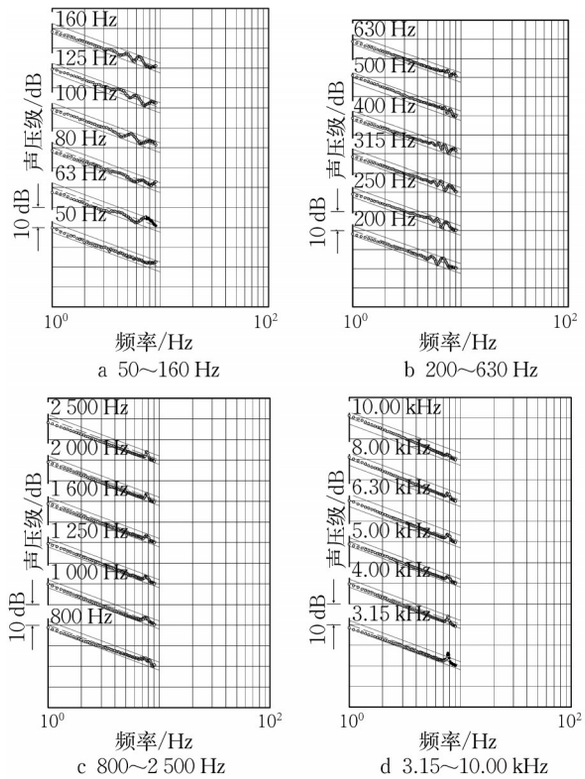

图 4　粉噪声源 1/3 倍频沿路径 B1L 声压级

Fig.4　B1L sound pressure level at 1/3 octave of the powder noise source

3　背景噪声和低频压力脉动

3.1　测点布置

背景噪声和低频压力脉动测点布置如图 3 所示。4 个测点偏离中心侧向距离 6 m，高度 1.5 m。纵向排列位置如图 5 所示。

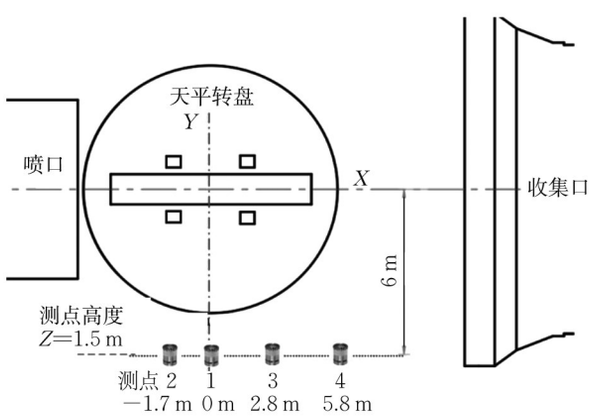

图 5　背景噪声和低频压力脉动测点布置

Fig.5　Test position of background noise and low-frequency pressure fluctuation

标准风噪试验要求流场具有平顺性和稳定性。对于干扰流场特性的地面缝隙进行密封处理,消除缝隙对流场边界层的干扰。

3.2 测试仪器

选择1/2英寸自由场麦克风B&K4966和GRAS 146AE作为测试仪器,A计权总声压级动态范围为18～135 dB(A),麦克风信号接入海德数据采集和分析软件。

3.3 测试结果分析

3.3.1 背景噪声

由图6可见,在160 km·h^{-1}风速下,同济气动声学风洞背景噪声A计权总声压级为61.4 dB(A),对应140 km·h^{-1}风速下背景噪声水平57.8 dB(A)。当风速大于140 km·h^{-1}时,风速每增加10 km·h^{-1},背景噪声水平约增大1.6～1.8 dB(A)。

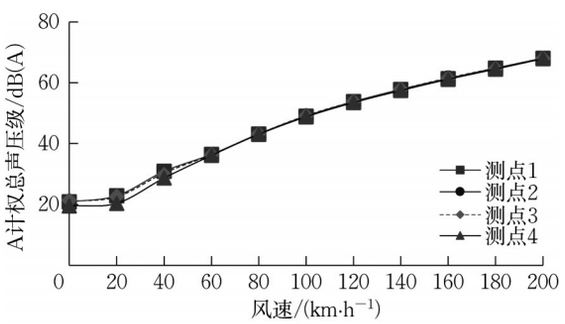

图6 背景噪声A计权总声压级

Fig.6 A-weighted overall sound pressure level of background noise

移动带抽吸系统关闭,抽吸电机待机与关闭时,160 km·h^{-1}风速下背景噪声频谱如图7所示。

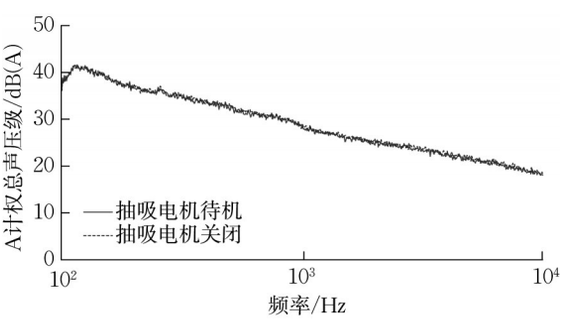

图7 背景噪声频谱

Fig.7 Background noise spectrum

无风条件下,同济气动声学风洞试验段的本地噪声为20～21 dB(A),显示风洞流道结构的高质量隔声隔振能力。

3.3.2 低频脉动压力

低频脉动压力通常指气流中随时间缓慢变化的压力波动成分,频率范围低于常规湍流或声学扰动的特征频率。脉动压力幅值表示为动压的百分比,通常用量纲一参数低频压力脉动系数表示。由图8可见,同济气动声学风洞的低频压力脉动系数小于0.5%。

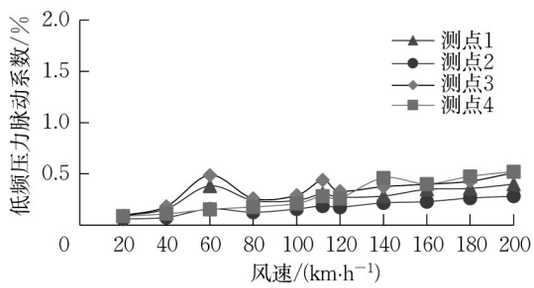

图8 低频压力脉动系数

Fig.8 Low-frequency pressure fluctuation coefficient

从图8还可以看出,低频压力脉动系数不会随着风速的变化而变化,出现明显峰值的速度主要集中在60、110、140 km·h^{-1}风速时,低频压力脉动系数幅值很小,曲线基本平顺,最大不超过0.5%。与近10年新建或升级的国际知名整车气动声学风洞对比发现,测点位置略有不同,喷口面积从22 m^{2}到31 m^2,140 km·h^{-1}风速下的背景噪声A计权总声压级水平在57～60 dB(A)区间内,低频压力脉动系数在0.4%～1.15%范围内波动,如表3所示。

表3 140 km·h^{-1}风速下不同气动声学风洞的背景噪声和低频压力脉动系数对比

Tab.3 Comparison of background noise and low-frequency pressure fluctuation coefficient at 140 km·h^{-1} between different wind tunnels

风洞	测点位置/m	A计权总声压级/dB(A)	低频压力脉动系数/%
同济(2009) SAWTC	(0,6,1.5)	57.8	0.50
日本(2013) Toyota[4]	(0,5,1.25)	58.0	0.70
德国(2015) FKFS[5]	(0,6,1.25)	59.7	0.50
德国(2013) Daimler[6]	(0,6,1.0)	57.2	0.50
德国(2014) Porsche[7]	(0,6,1.0)	58.3	0.40
美国(2022) Ford[8]	(0,6,0.75)		1.15
美国(2022) HALO[9]	(0,6,1.0)	57.0	0.45

由表3可见,各风洞在140 km·h^{-1}风速下的低频脉动压力系数基本在0.5%附近波动,仅美国Ford风洞为1.15%。这表明,同济气动声学风洞很好地

抑制了全风速范围内的低频颤振。

3.4　滚动路面系统影响

对同济气动声学风洞的背景噪声详细复测后发现,滚动路面系统的移动带抽吸对背景噪声频谱有影响。风速越低影响越大,80 km·h^{-1}以上风速时,基本无影响,如图9所示。

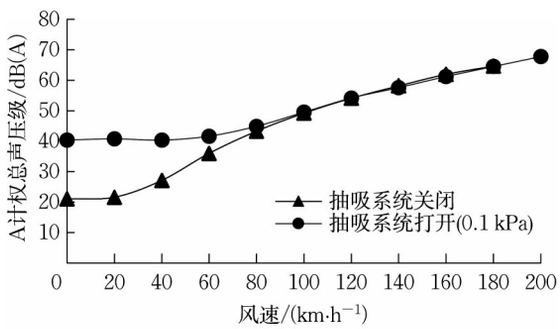

图9　抽吸系统打开或关闭工况下的背景噪声

Fig.9　Background noise in case of suction system on or off

从图10可以看出,在8 kHz时有窄带峰值产生,导致A计权总声压级的值升高(由21.59 dB(A)增大到40.78 dB(A))。经排查,确定该峰值来源于抽吸电机。在160 km·h^{-1}风速的背景噪声频谱中,啸叫带来的影响基本被风噪遮盖,如图11所示。

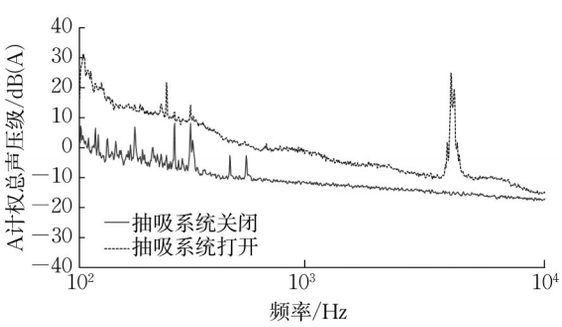

图10　抽吸系统打开或关闭工况下的背景噪声频谱(20 km·h^{-1})

Fig.10　Background noise spectrum in case of suction system on or off (20 km·h^{-1})

从图10、11可以得出,在低速(80 km·h^{-1}以下)时,移动带抽吸系统对风噪测试是有影响的,当风速不断增加时,移动带抽吸系统的表现被掩盖,曲线基本重合。然而,移动带抽吸噪声对近场测量的影响仍然不容忽视,应作为同济气动声学风洞后续降噪优化的重点。

移动带抽吸系统关闭,滚动路面系统运行或关闭时,同济气动声学风洞的低频压力脉动系数如图12所示。从图12可以看出,滚动路面系统运行对低频压力脉动系数均没有影响。

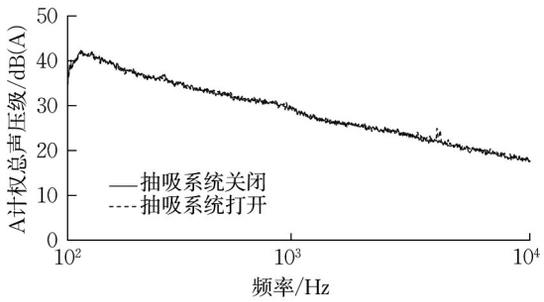

图11　抽吸系统打开或关闭工况下的背景噪声频谱(160 km·h^{-1})

Fig.11　Background noise spectrum in case of suction system on or off (160 km·h^{-1})

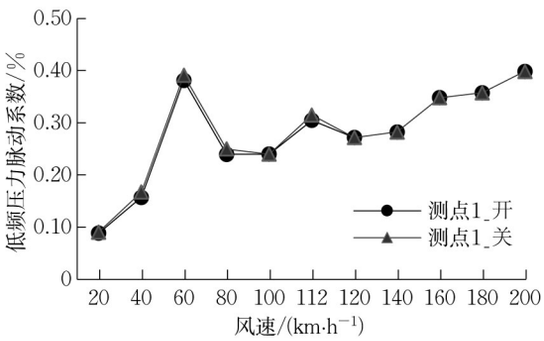

图12　滚动路面系统运行或关闭时的低频压力脉动系数

Fig.12　Low-frequency pressure fluctuation coefficient in case of rolling road system on or off

4　结论

(1)当标准风噪试验风速为140 km·h^{-1}时,试验段背景噪声A计权总声压级为57.8 dB(A);当标准风噪风速为160 km·h^{-1}时,试验段背景噪声A计权总声压级为61.4 dB(A)。

(2)20～200 km·h^{-1}风速范围内,低频压力脉动系数≤0.5%,且没有明显峰值。

(3)以天平转盘中心为标准粉噪声源位置,在63 Hz及以上频率时,至顶角和顶边8条路径的自由声场半径不低于9 m。

(4)背景噪声复测分析发现,滚动路面系统的移动带抽吸有附加噪声,在80 km·h^{-1}以下风速时,可增大风洞试 验段背景噪声。

作者贡献声明:

庞加斌:论文总体架构与逻辑设计,论文撰写。

刘劲松:试验设计,数据处理,论文撰写。

邢　鹏:论文审阅和修改。

李　泽:试验执行,数据处理。

李田田:试验指导。

(下转第1470页)