

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.08.022

大型客车座舱语言清晰度试验研究

黄子璇¹, 熊嘉慧², 邵社刚^{3,4}, 路可欣^{*3,4}, 袁旻恣^{3,4}

(1. 江西省公路工程检测中心, 江西 南昌 330200; 2. 江西省交通工程集团建设有限公司, 江西 南昌 330200;
3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 4. 国家环境保护道路交通噪声控制工程技术中心, 北京 100088)

摘要: 大型客车座舱语言清晰度对乘坐体验及驾驶安全具有重要影响。以48座柴油营运客车为例, 结合座舱内声压级、混响时间、座舱内外空气隔声量等客观声学参量, 将客观评价融入主观研究中。构建量化评价模型, 连续采集静止和恒定车速运行的噪声数据, 揭示多种复杂激励源共同作用下的大型客车座舱内真实声环境。分析听音者位置、发音者性别及运行工况对语言清晰度的影响, 避免因语言清晰度造成的信息误解、误判。结果表明: 不同区域的噪声幅值差别较大, 语言清晰度随距发音者位置的增大而减小, 呈现非正态分布; 乘客区后部座舱声环境最差, 且为语言清晰度分析阈值边界值, 乘客区前部与中部的声环境较好且无显著差异; 由于时长、基音及能量多方面的不同, 使用女发音者优于男发音者, 女发音者的语言清晰度效果较好且更稳定; 在相同性别发音者的情况下, 语言清晰度与运行速度呈现负相关, 当车速达到60 km/h时, 整体数据波动较大, 语言清晰度数据波动达到峰值, 平均得分降至74.6。本研究对降低大型客车座舱内噪声干扰、改善座舱内声环境提供积极的指导意义, 适用于大型客车内声环境的优化设计。

关键词: 汽车工程; 座舱内声环境; 语言清晰度; 大型客车; 声压级

中图分类号: U469.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 08-0206-09

Experimental Study on Speech Articulation in Large Bus Cabin

HUANG Zi-xuan¹, XIONG Jia-hui², SHAO She-gang^{3,4}, LU Ke-xin^{*3,4}, YUAN Min-min^{3,4}

(1. Jiangxi Highway Engineering Testing Center, Nanchang, Jiangxi 330200, China;

2. Jiangxi Transportation Engineering Group Construction Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330200, China;

3. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

4. National Environmental Protection Engineering and Technology Center for Road Traffic Noise Control, Beijing 100088, China)

Abstract: The speech articulation in large bus cabin has the significant influence on the riding experience and driving safety. This study took the 48-seat bus for example, and combined objective acoustic parameters, e. g., sound pressure level in cabin, reverberation time, and airborne sound insulation inside and outside cabin. The objective evaluation was integrated into subjective research. The quantitative evaluation models were constructed. The noise data from stationary and constant speed operation were continuously collected. It was revealed that the real acoustic environment inside the large bus cabin was influenced by the multiple complex excitation sources. The influence of listeners' position, pronouncers' gender, and operating conditions on speech articulation were analyzed to avoid the misunderstanding and misjudgment caused by speech articulation. The result indicates that the noise amplitude vary considerably in different regions. The speech intelligibility decreases with the distance increasing from the articulator's position, showing the non-normal distribution. The acoustic environment in the rear cabin of passenger area is the worst, and it is the

收稿日期: 2024-01-14

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (2023-9051)

作者简介: 黄子璇 (1999-), 女, 江西南昌人, 硕士. (1799711902@qq.com)

* 通讯作者: 路可欣 (1995-), 女, 北京人, 硕士. (kx.lu@rioh.cn)

threshold boundary value for speech articulation analysis. The acoustic environment in the front and center of passenger area is better and not significantly different. Due to the differences in duration, pitch and energy, the female speakers have better and more stable speech articulation than male speakers. In the case of speakers of same gender, there is a negative correlation between speech articulation and running speed. When the vehicle speed reaches 60 km/h, the overall data fluctuates greatly. The fluctuation of speech articulation data reaches peak with an average score dropping to 74.6. This study provides positive guidance for reducing noise interference in the large bus cabin and improving the acoustic environment inside cabin. It is suitable for optimizing the sound environment inside large bus.

Key words: automotive engineering; cabin acoustic environment; speech articulation; large bus; sound pressure level

0 引言

随着中国城市化进程加快^[1],大型客车作为道路交通的重要工具,座舱内声环境问题日益突出,这将极大影响乘客的乘车体验^[2],也会削弱座舱内广播系统信息传达,对语言清晰度造成影响,导致座舱内人员对信息的误解、误判及关键信息的遮蔽^[2-4]。尤其当行驶过程中遇泥石流、火灾等突发状况时,清晰、准确的语音传递可大幅缓解伤亡人数及财产损失。因此,语言清晰度不仅是改善座舱内声环境的重要指标,还是保证乘客生命财产安全的基本要求^[5-7]。

语言传输指数(Speech Transmission Index, STI)是充分反映密闭空间声场特性及信噪比对语言清晰度影响可靠、客观的评价参量^[8-9]。早在20世纪70年代,Steeneken等^[10]提出调制转移函数(Modulation Transfer Function, MTF),通过对测量声音传输系统的MTF得到STI,并研究了11种语言的语言清晰度与STI的相关性^[11],论证了STI可用于语言清晰度评价。但由于大型客车有别于普通密闭环境,其内部是多种复杂激励源共同作用下的宽频带噪声,具有内部空间大、边界条件复杂、影响因素多的特点,座舱内声环境差异化明显^[12-13],此外由于相关标准在测试过程、数据处理等方面具有严格要求,限制了评价参量在实际中的应用,因此传统的语言清晰度评价指标并不适用于大型客车座舱内的声环境,而针对座舱内声学物理参量进行研究才是获取真实座舱内声环境、掌握大型客车座舱语言清晰度的前提与基础^[13]。20世纪80年代,座舱内声环境关注点集中在降低声压的能量,以使A计权声压级满足愈加严格的噪声法规^[14]。Ford等^[15]对6种不同车型在4种恒定速度下25~10 000 Hz范围内1/3倍频段的A和B计权声压级进行测量,利用

A加权网络表述座舱内噪声并衡量座舱内噪声主观反应。Xu等^[16]以低频各等矩形频带的声压级为变量,以听音者主观感受为优化目标,建立座舱内声环境优化模型。但传统的A计权声压级往往忽略车体结构振动引起的低频噪声,对低频噪声成分衰减极大,相同声压级下不同听音者感受也不相同。因此A计权声压级并非影响大型客车座舱声环境的唯一评价参量。Escobar等^[17]利用17个礼堂和多功能会议室对声学参数进行分析,发现相比于背景噪声,混响时间对语言清晰度的影响更大。彭健新等^[18]对不同混响时间的室内语言清晰度进行研究,表明室内混响时间越短语言清晰度得分越高。Simone等^[19]通过降低意大利64所学校的正立面隔声量,从而改变室内声压级以提升语言清晰度。龚胤文等^[20]基于波动理论建立双层弧度板空腔结构隔声理论模型,加大舷窗空腔厚度及曲率半径,以达到着重提升舱内语言清晰度的目的。由此可见,除了传统的A计权声压级外,混响时间^[21-22]、隔声量^[23]也是影响座舱内声环境的重要声学评价指标。但以往研究多集中在实验室测试分析,且结果通常直接用作车体结构隔声材料的选择依据,却鲜有结合大客车实际座舱内环境,针对车辆不同工况及位置下的声环境分别进行研究,导致座舱内声环境差,语言清晰度欠佳^[24]。

为解决上述问题,本研究结合大型客车座舱特点,除了考虑座舱内声压级这一传统声学指标外,引入混响时间、座舱内外空气隔声量,实现座舱内声环境的客观量化评价。基于此对不同工况下的语言清晰度进行研究,结合客观声环境量化模型增加语言清晰度研究的准确性,旨在用更丰富的维度描述语言清晰度,为降低大型客车座舱内噪声干扰、改善座舱内声环境提供积极的指导。

1 试验设计与方法

为探究大型客车座舱语言清晰度实况,本研究采用某48座柴油营运客车进行相关试验,参照《客车内噪声限值及测量方法》(GB/T 25982—2010),采用数据采集与分析系统B&K LAN-XI 3160、功率放大器B&K 2716、全指向性声源B&K 4292-L等试验设备,针对座舱内声压级、混响时间、座舱内外空气隔声量对声环境进行量化分析,为座舱内语言清晰度研究奠定基础。在充分掌握大型客车座舱声环境情况后,参照《声学语言清晰度测试方法》(GB/T 15508—1995),研

究听音者位置、发音者性别、车辆运行工况等不同工况下的语言清晰度情况。

2 大型客车座舱声环境研究

大型客车座舱声环境测试区域如图1所示,从声功能区角度将座舱内划分为驾驶区及乘客区。其中乘客区共12排,具有空间面积大、可容纳乘客多、流动性强等特点。不同点位的声环境差异性较大,因此将乘客区进行细化,即1~4排为前部;5~8排为中部;9~12排为后部。测试内容包括静止和恒定车速运行下的噪声数据连续采集。

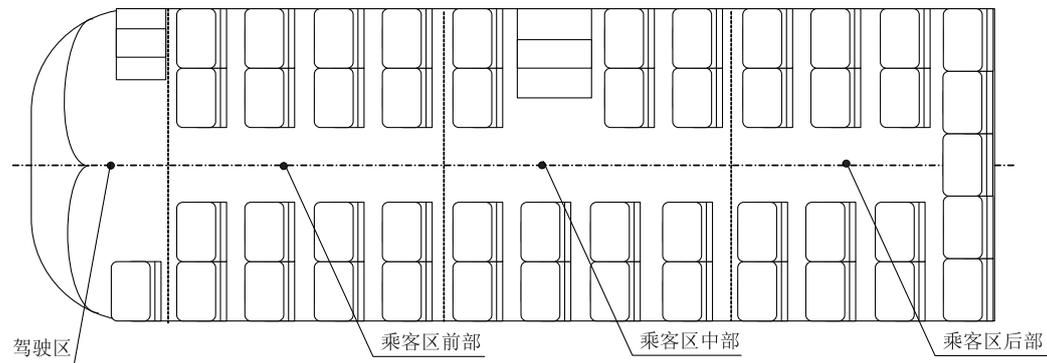


图1 大型客车座舱声环境测试区域

Fig. 1 Acoustic environment test area in large bus cabin

2.1 座舱内声压级研究

为探究大型客车座舱声环境状况,使用B&K 4189型传声器对车内声压级进行测量,在驾驶区及乘客区选取具有代表性的接收点位置 $N_1 \sim N_4$,具体位置如表1和图2所示。其中,传声器置于座椅表面与靠背表面的交线以上0.7 m、距座椅的中心面上右侧0.2 m处,模拟乘客坐姿状态下人耳处位置,传声器与车体呈弹性连接,并指向车行驶方向。

表1 座舱内接收点布点图

Tab. 1 Layout diagram of microphone in cabin

区域	接收点位置	符号
驾驶区	驾驶员座位处	N_1
乘客区前部	第1排临近过道座位处	N_2
乘客区中部	第7排临近过道座位处	N_3
乘客区后部	第11排临近过道座位处	N_4

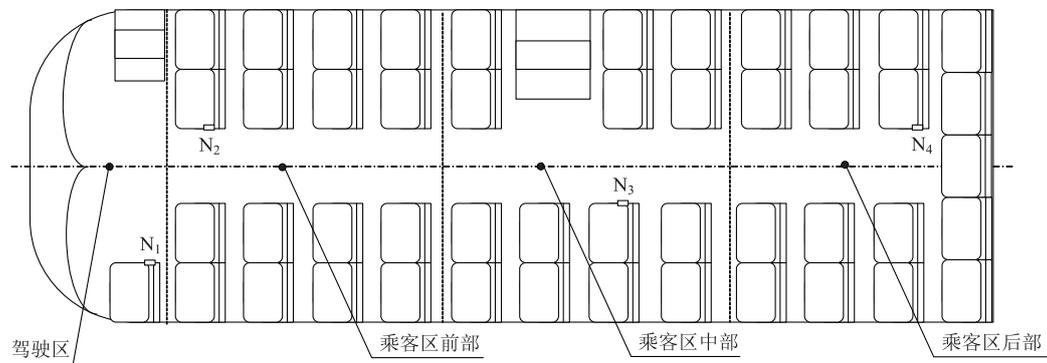


图2 座舱内声压级测试布点图

Fig. 2 Layout diagram of sound pressure level test points in cabin

本试验测量采集时间均为60 s,客车分别以静止及20~100 km/h每隔10 km/h车速匀速行驶。测

试前,使用B & K 4231型声校准器对每个传声器进行声学校准,试验选在干燥且平直、周围无建筑物

的路段进行, 背景噪声小于 50 dB, 测试时风速小于 5 m/s, 每种工况至少进行 3 次有效测量, 不同运行工况下 A 计权声压级的测试结果如表 2 所示。

表 2 不同运行工况下 A 计权声压级测试结果 (单位: dB)

Tab. 2 A-weighted sound pressure level test results under different operating conditions (unit: dB)

运行速度/(km·h ⁻¹)	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄
0	85.7	74.7	76.8	79.8
20	93.0	84.6	82.3	86.9
30	92.2	85.1	82.0	86.2
40	95.4	86.8	86.3	89.8
50	95.7	86.7	85.8	89.2
60	98.9	89.6	88.2	92.3
70	99.9	88.8	90.3	93.4
80	103.5	89.3	91.7	94.7
90	103.2	92.0	92.3	96.3
100	106.0	92.0	94.2	96.5

为更直观地表述运行工况对车内不同位置声压级的影响, 以 A 计权声压级为研究对象, 绘制不同车内位置 A 计权声压级随运行速度的关系图, 如图 3 所示。

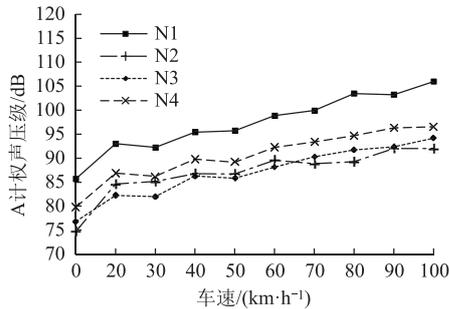


图 3 运行速度对 A 计权声压级的影响

Fig. 3 Influence of operating speed on A-weighted sound pressure level

由图 3 可见, 随车速的增加, A 计权声压级整体呈现上升趋势, 二者存在正相关性, 且均在

100 km/h 取得声压级最大幅值。静止工况下, 声压级保持在 74.7~85.7 dB; 运行工况下, 声压级保持在 82.0~106.0 dB。二者最大差值达到 24.0 dB。对比乘客区与驾驶区, 任何运行工况下, 驾驶区 N₁ 声压级均为最高, 保持在 85.7~106.0 dB; 乘客区声压级保持在 74.7~96.5 dB; 当运行至 80 km/h 时, 最大差值达到 14.2 dB。对比乘客区不同位置声压级变化, 不同运行工况下, 后部 N₄ 声压级最高, 保持在 79.8~96.5 dB, 乘客区其他位置声压级保持在 74.7~94.2 dB, 当运行至 80 km/h 时, 最大差值可达 5.5 dB。由此可见, 大型客车座舱内 A 计权声压级 N₁ 和 N₄ 处的贡献量较大, 且 N₁>N₄, 而乘客区前部 N₂ 与中部 N₃ 的声压级相对较小, 且不存在显著变化差异。

2.2 座舱内混响时间研究

将车辆处于静止状态, 座舱内布设 1 个全指向性声源及 3 个传声器, 结合测试中发音者位置常固定于乘客区中部的试验特点, 将全指向性声源置于乘客区中部, 为深入研究座舱混响时间情况, 保持球形声源高度不变, 依次移动球源至车辆的前、中、后部, 测试声源在不同位置的混响时间, 如图 4 所示。

每种工况重复测量 3 次, 并对测试结果进行多次平均, 减小试验误差。试验过程中保持传声器距地板的距离均为 1.2 m, 传声器与声源间距大于 1.0 m, 得到 125~5 000 Hz 不同频率范围内的混响时间, 测试结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 混响时间随频率的增大整体呈现衰减趋势, 混响时间差值凸现在 125~400 Hz 频段内, 当频率为 160 Hz 时, 混响时间达到峰值 4.4 s; 在 400~1 000 Hz 频段范围内, 混响时间保持在 1.83~1.91 s, 无显著差异; 在 1 000~5 000 Hz 频段范围内, 混响时间由 1.83 s 降至 0.82 s, 呈下降趋势。

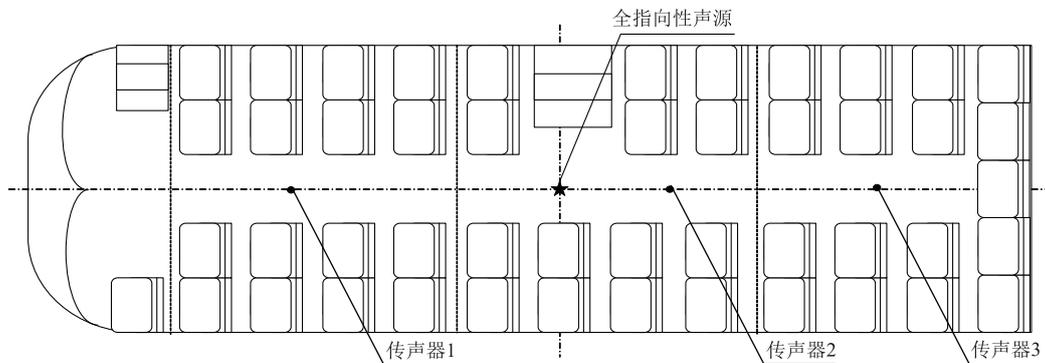


图 4 座舱内混响时间测试布点图

Fig. 4 Layout diagram of reverberation time test points in cabin

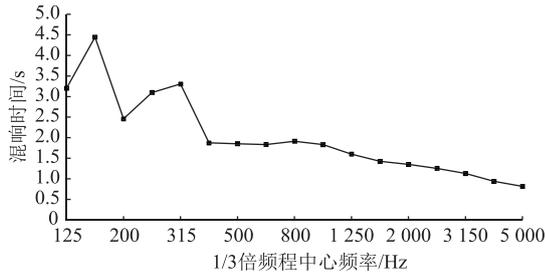


图5 不同频率下座舱内混响时间变化趋势

Fig. 5 Variation trend of reverberation time at different frequencies in cabin

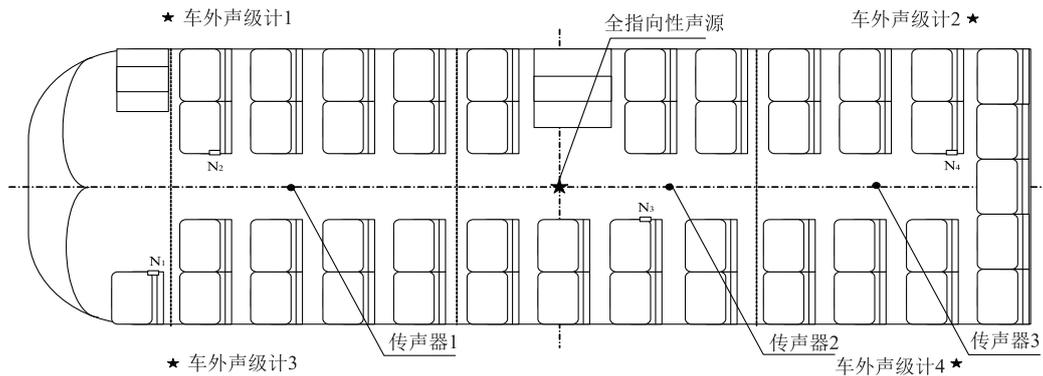


图6 座舱内隔声量测试布点图

Fig. 6 Layout diagram of sound insulation test points in cabin

况, 每种工况测量重复3次, 基于2.2节混响时间的结果, 测试如图7所示。

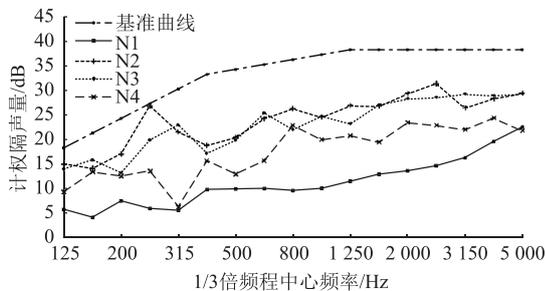


图7 不同位置与计权隔声量的关系

Fig. 7 Relation between different positions and weighted sound insulations

由图7可以看出, 随频率增加, 隔声量呈现上升趋势, 二者存在正相关性, 且均在2500~5000 Hz频段范围内出现隔声量峰值, 隔声量最高达到31.4 dB。对比乘客区与驾驶区, 在125~5000 Hz整个频段范围内, 驾驶区 N_1 的隔声量均处于最低值, 保持在4.1~22.5 dB, 乘客区的隔声量保持在4.0~31.4 dB, 当在250 Hz时, 最大差值达到20.9 dB; 对比乘客区不同位置隔声量, 在125~5000 Hz整个频段范围内, 后部 N_4 的隔声量最低, 保持在5.3~24.3 dB, 乘客区其他位置的隔声量保持在4.0~31.4 dB, 当在

2.3 座舱内外空气隔声量研究

将车辆处于静止状态, 并在车外布设4个声级计, 高度均距地面垂直方向1.2 m, 置于每个车轮外廓0.5 m处。声级计同时指向被测客车, 参考轴平行于地面, 座舱内布设3个传声器及1个全指向性声源, 且保持距地板的距离均为1.2 m, 传声器与声源间距大于1.0 m, 测试时记录下每个测点处传声器的噪声信号, 如图6所示。

每组数据测完, 调整座舱内球源位置, 将其分别置于前、中、后部, 测试不同工况下的隔声量情

况, 最大差值17.7 dB。由此可见, 大型客车座舱内隔声量 N_1 和 N_4 处的贡献量较小, 且 N_1 小于 N_4 , 而乘客区前部 N_2 与 N_3 的声压级较大, 且不存在显著变化差异。

2.4 大型客车座舱声环境分析

大型客车空间尺度大, 驾驶区和乘客区处于独立分割的物理空间, 在绿色出行的倡导下, 乘客区具有人员距离近、流动性大的特点, 座舱内声环境更为复杂, 对乘客区整体进行研究意义不大。为解决这一问题, 对乘客区进行细化, 着眼于大型客车声环境特性, 利用座舱内声压级、混响时间、座舱内外空气隔声量进行分析, 经研究表明驾驶区声环境最差, 乘客区后部次之, 乘客区前部和中部无较大差异, 这也为提升语言清晰度试验的可信度奠定了前期的科学基础。

3 大型客车座舱语言清晰度研究

基于2.4节座舱声环境研究成果, 结合声压级、混响时间、隔声量3个客观评价参量, 揭示座舱内声场特性, 采用汉语清晰度测试音节表作为试验语料, 分别对听音者位置、发音者性别、运行工况等多维度对大型客车座舱语言清晰度进行深入研究。

为保证车辆运行的安全性, 不考虑驾驶区, 仅针对乘客区前、中、后部的语言清晰度进行分析。选用听力正常的 6 男 6 女, 共 12 位听音者, 平均分布于乘客区, 记为 $S_1 \sim S_{12}$, 选用无语言缺陷的 1 男

1 女作为发音者, 记为 S_0 , 置于乘客区中部, 如图 8 所示, 发音者采用标准发话声压级, 声压级保持在 (65 ± 3) dB, 并以 4 音节/s 的朗读速度进行测试。

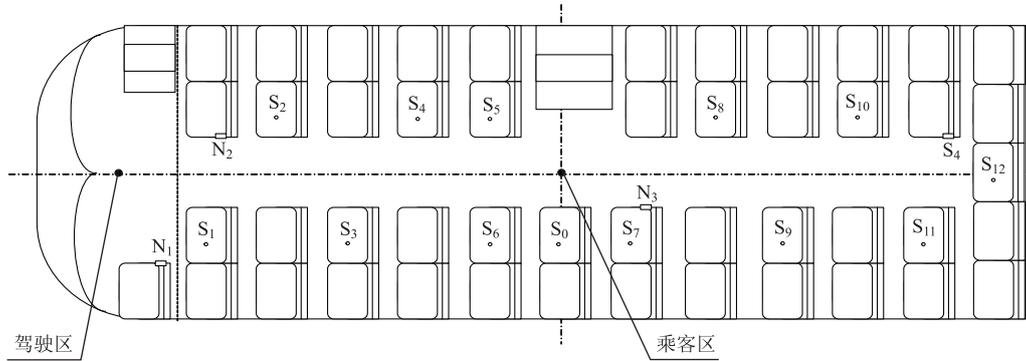


图 8 大型客车座舱语言清晰度测试布点图

Fig. 8 Layout diagram for speech articulation test in large bus cabin

3.1 听音者位置对语言清晰度影响分析

为保证行车过程中的驾驶安全, 以 30 km/h 的运行工况为研究对象, 两两配对比较组间数据, 并进行显著性分析。其中, 显著性分析通常采用标准

差、半级差和邻差法, 而邻差法更适用于本研究这种工况在 25 种以下的试验。因此, 采用女发音者基于邻差法对听音者位置与语言清晰度进行显著性研究, 结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 30 km/h 工况下不同听音者位置的语言清晰度分析

Tab. 3 Speech articulation analysis on different listeners' position under 30 km/h working condition

不同听音者位置	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}
平均语言清晰度得分	78.7	80.0	82.7	86.7	88.0	100.0	98.7	85.3	85.3	80.0	69.3	65.3

表 4 不同听音者位置的语言清晰度显著性分析

Tab. 4 Significant analysis on speech articulation at different listeners' position

不同听音者位置	组内平均语言清晰度得分差										
	$ S_i - S_1 $ ($i > 1$)	$ S_i - S_2 $ ($i > 2$)	$ S_i - S_3 $ ($i > 3$)	$ S_i - S_4 $ ($i > 4$)	$ S_i - S_5 $ ($i > 5$)	$ S_i - S_6 $ ($i > 6$)	$ S_i - S_7 $ ($i > 7$)	$ S_i - S_8 $ ($i > 8$)	$ S_i - S_9 $ ($i > 9$)	$ S_i - S_{10} $ ($i > 10$)	$ S_{12} - S_{11} $
S_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S_2	1.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S_3	4.0	2.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S_4	8.0	6.7	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—
S_5	9.3	8.0	5.3	1.3	—	—	—	—	—	—	—
S_6	21.3	20.0	17.3	13.3	12.0	—	—	—	—	—	—
S_7	20.0	18.7	16.0	12.0	10.7	1.3	—	—	—	—	—
S_8	6.7	5.3	2.7	1.3	2.7	14.7	13.3	—	—	—	—
S_9	6.7	5.3	2.7	1.3	2.7	14.7	13.3	0	—	—	—
S_{10}	1.3	0.0	2.7	6.7	8.0	20.0	18.7	5.3	5.3	—	—
S_{11}	9.3	10.7	13.3	17.3	18.7	30.7	29.3	16.0	16.0	10.7	—
S_{12}	13.3	14.7	17.3	21.3	22.7	34.7	33.3	20.0	20.0	14.7	4.0

由表 3 和表 4 可见, 与其他发音者位置相比, S_6 和 S_7 的平均语言清晰度得分最高为最佳的听音位置。 S_6 和 S_7 的语言清晰度也与 S_1 和 S_5 及 $S_8 \sim S_{12}$ 存在显著差异。 S_6 和 S_7 可作为语言清晰度变化拐点, 即为临界值。综上可以确定靠近发音者的听音者可

获得较为理想的听音效果。

而 S_1 和 S_{12} 分别位于乘客区前部和后部, 均离发音者距离最远, 但二者差异显著, S_{12} 虽不构成拐点, 但为分析阈值边界值, 基于前文研究成果可知, 仅乘客区而言, 其后部的声环境最差, 因此造成在

离发音者同等距离的情况下,乘客区后部的语言清晰度最差。

3.2 发音者性别对语言清晰度影响分析

由于男女发音者在时长、基音及能量诸多方面存在显著差异,《音响系统设备16个部分:用语音传输

指数对语音可理解度进行客观评价》(IEC 60268-16:2003)中^[25]也表明男女声对语言清晰度的影响,为更好地了解大型客车座舱内语言清晰度情况,除了考虑声环境影响外,以静止工况下发音者性别为参考指标对语言清晰度进行分析,结果如表5所示。

表5 发音者性别对语言清晰度的影响

Tab. 5 Influence of pronouncer's gender on speech articulation

发音者 性别	语言清晰度得分												平均语言清 晰度得分	测试标 准差
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂		
女	92.0	92.0	94.7	93.3	98.7	10.0	10.0	96.0	96.0	92.0	88.0	86.7	94.3	4.3
男	93.3	93.3	98.7	98.7	100.0	97.3	100.0	94.7	93.3	89.3	88.0	40.0	90.6	16.4

由表5可见,距发音者最近的S₆和S₇语言清晰度得分保持在97.3~100,最高得分达到100,随距离发音者的距离增加而整体呈现下降趋势,最低降至40.0。其次,乘客区后部S₈~S₁₂处听音者的语言清晰度得分保持在86.7~96.0,乘客区前部S₁~S₅处听音者的语言清晰度得分保持在92.0~98.7,前者明显低于后者,最大差值达到12.0。基于前文研究结果,A计权声压级与语言清晰度呈现负相关性,隔声量与语言清晰度呈现正相关性。此外,男发音者在S₁₂处语言清晰度得分仅40,其得分与全体平均语言清晰度得分相差大于3倍标准差,S₁₂处为异常

值,因此须剔除;在女发音者的工况下,经计算其12位听音者平均语言清晰度得分为94.3,标准差为4.3,无剔除值,得分均有效且稳定,相关研究也曾表明女性发音者语言清晰度更佳。

3.3 运行工况对语言清晰度影响分析

此外,由于客车在不同运行工况下,座舱内噪声水平、频谱特征、振动情况等均发生不同程度的改变,对语言清晰度的干扰程度也不同,因此本节对不同运行工况下的语言清晰度进行相关性研究,同时为保证语言清晰度相关性分析的有效性,均选取女发音者,结果如表6所示。

表6 不同运行工况下的语言清晰度相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis on speech articulation under different operating conditions

车速/ (km·h ⁻¹)	语言清晰度得分												平均语言清 晰度得分	测试标 准差
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂		
静止	92.0	92.0	94.7	93.3	98.7	100.0	100.0	96.0	96.0	92.0	88.0	86.7	94.1	4.3
30	74.7	85.3	88.0	89.3	88.0	92.0	89.3	89.3	86.7	78.7	80.0	66.7	84.0	7.5
45	76.0	77.3	80.0	86.7	84.0	89.3	92.0	86.7	93.3	86.7	74.7	64.0	81.4	9.2
60	66.7	77.3	80.0	86.7	84.0	90.7	85.3	80.0	69.3	76.0	66.7	56.0	74.6	9.5

为更直观地研究座舱内语言清晰度与车速、位置的相关性,绘制了语言清晰度与客车运行速度的关系图(见图9)。由表5和图9可见,当客车静止时,平均语言清晰度得分为94.1,标准差为4.3,成绩较高且稳定。随着大型客车速度的提升,平均语言清晰度得分及标准差发生明显变化,当车速达到60 km/h时,座舱内语言清晰度受影响最严重,平均语言清晰度得分降至74.6,整体数据也出现较大波动,标准差达到9.5。

4 结论

本研究通过声压级、混响时间、空气隔声量等参量,分析大型客车座舱内声环境特点,为语言清晰度的改善提供依据,具有理论研究与实际应用的双重意

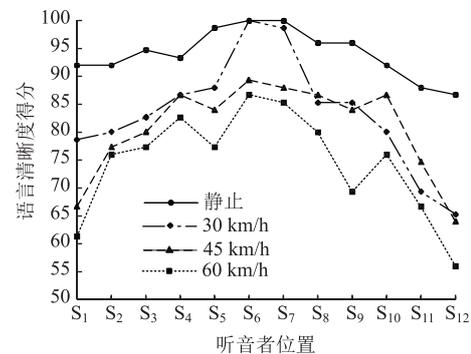


图9 语言清晰度与运行速度关系

Fig. 9 Relation between speech articulation and running speed

义,适用于指导大型客车内声环境优化设计。

(1) 通过引入声压级、混响时间、座舱内外隔

声量等参量,构建量化评价模型,揭示多种复杂激励源共同作用下的大型客车座舱内真实声环境。

(2) 座舱内声环境差异显著,不同区域的噪声幅值差别较大。驾驶区和乘客区后部为声环境薄弱部位,乘客区前部与中部的声环境较好且无显著差异。

(3) 声源处于座舱中部时,语言清晰度呈现非正态分布。临近发音者的位置语言清晰度最佳,可作为语言清晰度变化拐点,即为临界值;远离发音者且位于声环境最差的乘客区后部为分析阈值边界值,座舱后部为语言清晰度薄弱位置。

(4) 男女发音者在时长、基音及能量诸多方面存在显著差异,使用女发音者优于男发音者,女发音者的语言清晰度效果较好且更稳定。

参考文献:

References:

- [1] 黄述芳,胡厚琪,华夏,等. 交通大通道扩容工程噪声影响及控制研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (增2): 62-67.
HUANG Shu-fang, HU Hou-qi, HUA Xia, et al. Study on Noise Impact and Control of Expansion Project of Large Traffic Throughfare [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (S2): 62-67.
- [2] CHIESA A. Experimental Studies on Noise Inside Cars [J]. Journal of Sound and Vibration, 1964, 1 (2): 211-214, 215-225.
- [3] BRIZON C J D S, MEDEIROS E B. Combining Subjective and Objective Assessments to Improve Acoustic Comfort Evaluation of Motor Cars [J]. Applied Acoustics, 2012, 73 (9): 913-920.
- [4] 路可欣,朱海东,祝梅良,等. 基于多因子有序加权法的声屏障材料选择 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (增2): 72-76.
LU Ke-xin, ZHU Hai-dong, ZHU Mei-liang, et al. Selection of Sound Barrier Material Based on Multi-factor Ordered Weighting Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (S2): 72-76.
- [5] ZHANG Y Y, OU D Y, CHEN C X, et al. Effects of Speech Intelligibility and Work Modality on Scientific Reading Productivity in Open-plan Offices [J/OL]. Building and Environment, 2023, 244: 110734. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110734>.
- [6] NATHWANI K, RICHARD G, DAVID B, et al. Speech Intelligibility Improvement in Car Noise Environment by Voice Transformation [J]. Speech Communication, 2017, 91: 17-27.
- [7] RYOTA S, YOSHIHARU S. Evaluation of Speech Intelligibility of Sound Fields in Passenger Train Compartments [J]. Acoustical Science and Technology, 2009, 30 (5): 379-382.
- [8] LINDA L, MIAO R. The Effect of Listener Head Orientation on Front-to-rear Speech Intelligibility in an Automotive Cabin [J/OL]. Applied Acoustics, 2023, 211: 109517. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109517>.
- [9] LINDA L, YU G Z. Effect of Speaker Orientation on Speech Intelligibility in an Automotive Environment [J/OL]. Applied Acoustics, 2023, 205: 109269. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109269>
- [10] STEENEKEN H, HOUTGAST T. A Physical Method for Measuring Speech-transmission Quality [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67 (1): 318-326.
- [11] HOUTGAST T, STEENKEN H J M. A Multi-language Evaluation of the RASTI-method for Estimating Speech Intelligibility in Auditoria [J]. Acta Acustica United with Acustica, 1984, 54 (4): 185-199.
- [12] 姜顺明,周涛,王奕轩,等. 车内声品质多维度主动声学设计 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (9): 107-112.
JIANG Shun-ming, ZHOU Tao, WANG Yi-xuan, et al. Multi-dimension Active Acoustic Design of Interior Sound Quality [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41 (9): 107-112.
- [13] ALQDAH K S. Experimental Investigation of Noise Pollution Level Emerged from the Most Common Use Car in Saudi Arabia [J]. Energy Procedia, 2013, 36: 939-947.
- [14] SCHNEIDER M, WILHELM M, ALT N, et al. Development of Vehicle Sound Quality-targets and Methods [C] // Proceedings of SAE Noise and Vibration Conference and Exposition. Traverse City: FEV Motorentechnik GmbH & Co. KG, 1995.
- [15] FORD R D, HUGHES G M, SAUNDERS D J. The Measurement of Noise Inside Cars [J]. Applied Acoustics, 1970, 3 (1): 69-84.
- [16] XU Z M, XIA X J, LAI S Y, et al. Improvement of Interior Sound Quality for Passenger Car based on Optimization of Sound Pressure Distribution in Low Frequency [J]. Applied Acoustics, 2018, 130: 43-51.
- [17] ESCOBAR V G, MORILLAS J M B. Analysis of Intelligibility and Reverberation Time Recommendations in

- Educational Rooms [J]. *Applied Acoustics*, 2015, 96: 1–10.
- [18] 彭健新, 王丹. 扩声系统对小学教室汉语语言清晰度的影响 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45 (6): 25–30.
- PENG Jian-xin, WANG Dan. Effect of Sound Reinforcement System on Chinese Language Articulation in Primary School Classrooms [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45 (6): 25–30.
- [19] SIMONE S, ARIANNA A, GIULIA C, et al. Effect of Outdoor Noise and Facade Sound Insulation on Indoor Acoustic Environment of Italian Schools [J]. *Applied Acoustics*, 2017, 126: 120–130.
- [20] 龚胤文, 葛剑敏. 基于波动理论的高速磁浮列车舷窗隔声性能 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48 (6): 57–63.
- GONG Yin-wen, GE Jian-min. Sound Insulation Performance of Portholes of High-speed Maglev Trains Based on Wave Theory [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48 (6): 57–63.
- [21] SAHER K, BULUNUZ M, KELMENDI J, et al. Assessment of Speech Intelligibility During Different Teaching Activities in Classrooms with and Without Acoustic Treatment [J]. *Applied Acoustics*, 2023, 207: 109346. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109346>.
- [22] KANG S X, MAK C M, OU A Y, et al. Effects of Speech Intelligibility and Reverberation Time on the Serial Recall Task in Chinese Open-plan Offices: A Laboratory Study [J]. *Applied Acoustics*, 2023, 208: 109378. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109378>.
- [23] HAYATO S, MASAYUKI M, YASUSHI H, et al. Relationship Between Sound Insulation Performance of Walls and Word Intelligibility Scores [J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73 (1): 43–49.
- [24] 李晔, 王瑞乾, 徐秋婷, 等. 基于心理声学的高速列车车内噪声预测及选材方法 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54 (12): 78–85.
- LI Ye, WANG Rui-qian, XU Qiu-ting, et al. Noise Prediction and Material Selection Method of High-speed Train Based on Psychoacoustics [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54 (12): 78–85.
- [25] 陈楠, 贺前华. 非线性加权能量特征在英语词重音检测中的应用 [J]. *声学学报*, 2008 (6): 520–525.
- CHEN Nan, HE Qian-hua. Application of Nonlinear Weighted Energy Feature in English Word Stress Detection [J]. *Journal of Acoustics*, 2008 (6): 520–525.