

引用格式: 黄永超, 古林强. 反射声对室内声景主观评价的影响初探[J]. 声学技术, 2022, 41(5): 751-756. [HUANG Yongchao, GU Linqiang. Preliminary research on the influence of floor reflected sound on subjective evaluation of indoor soundscape[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(5): 751-756.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.05.018

反射声对室内声景主观评价的影响初探

黄永超, 古林强

(广州大学建筑与城市规划学院, 广东广州 510006)

摘要: 梳理了近年来地面反射声和室内声景观的研究情况, 结合实验心理学以及室内声景观主观评价等研究框架, 通过三个基于反射声感知的声学可听化实验, 确定了在四间房间内人耳对有无地面反射声参与的三种声音信号的绝对感觉阈。结果表明语音信号高于本底噪声 10 dB(A)即可被察觉, 而水流声及音乐声高于本底噪声 17 dB(A)才能够被明显察觉, 最后结合实验结果对地面反射声的处理给出了建议。

关键词: 室内反射声; 室内声景观; 室内声场; 可听化

中图分类号: TU112

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-05-0751-06

Preliminary research on the influence of floor reflected sound on subjective evaluation of indoor soundscape

HUANG Yongchao, GU Linqiang

(College of architecture and urban planning, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: The research situation of indoor soundscape and floor reflected sound in recent years are introduced in this paper. By combining experimental psychological study and subjective evaluation of indoor soundscape, the absolute thresholds for sensation of human to three kinds of sound signals with or without floor reflection in four rooms are determined through three auralization experiments based on reflected sound perception. The results show that the human voice signal can be detected when it is 10 dB(A) higher than the background noise, while the stream sound and music sound can be significantly detected only when it is 17 dB(A) higher than the background noise. Finally, suggestions for processing floor reflection are given according to the experimental results.

Key words: indoor reflection; indoor soundscape; room acoustics; auralization

0 引言

声景观是“群体或个人在声境中感知、体验或理解的声环境”^[1]。据此定义, 声景观的基础研究框架对于室内外声环境都是适用的, 但室内外声场存在着明显差异, 封闭空间的特征是一个混响声场, 可以放大声音^[2], 因此室内声景观的研究应该基于室内声场的客观特征, 结合室内声景观的研究框架进行。

密集的早期反射声是导致室内声场区别于室外声场的最主要因素, 本文回顾了室内反射声以及室内声景观的研究进展, 通过基于反射声感知的声学可听化实验, 运用实验心理学的方法, 考察了房间里人耳对于不同声源信号反射声的A计权声压级的绝对感觉阈, 并结合室内声景观的研究框架和方

法, 研究了反射声对于室内声景的主观评价影响。

1 反射声相关研究

1.1 20世纪90年代至21世纪初

Borenus等^[3]率先提出主观听力测试对于室内场所声学实验的重要性, 小型声学场所的研究不应该仅仅局限于各项声学参数的指标。随后Bech等通过实验研究了反射声对于音色的影响, 以及反射声对于差别阈限(Just Noticed Difference, JND)和绝对感觉阈(Threshold Detection, TD)的影响^[4-5]。Toole等认为, 人们对纵向反射声的察觉力不亚于横向反射声, 前者主要会影响音色, 而后者则是对空间感有着更多的贡献^[6]。

1.2 21世纪初至今

随着室内声场计算机数字仿真技术的发展, 空间声技术成为近年来声学领域的前沿课题。空间声主要基于三种原理和方法, 分别是物理声场的精确

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-04-04

作者简介: 黄永超(1994—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 研究方向为建筑声学。

通信作者: 古林强, E-mail: glq@gzhu.edu.cn

重构方法、心理声学与物理声场的近似重放方法与双耳声信号的精确重放方法^[7], 比较常见的是通过软件模拟或测量技术获得声场脉冲响应(Impulse Response, IR)和头相关脉冲响应(Head-Related Impulse Response, HRIR), 两者结合即构成双耳房间脉冲响应(Binaural Room Impulse Response, BRIR), 再与声源信号进行卷积, 得到立体声信号^[8-9]。

Imamura等^[10]将9种不同的房间信号响应与3种音乐卷积, 形成27种刺激信号, 使用对偶比较法(7阶), 让受试者对两个信号进行比对, 聚焦于直达声和早期反射声的干涉图像, 并且调查了多类早期反射声是如何影响受试者的主观听力表现。目前, 采用可听化实验来进行声学现象与主观评价的研究成为学界主流。

2 室内声景观相关研究

室内外声景存在着明显的区别, 因此有必要用不同的方法研究室内声场, 并根据室内声景观和室内噪声控制的阈值界限, 决定采取噪声控制的方法还是声景观的方法来改善室内声环境^[2]。在进行室内声景观的主观评价时, 评价模型应该根据主成分分析选取适当的维度, Torresin等^[11]通过实验, 确定了居住区室内声景观评价的三个主成分, 分别是舒适度、活泼度、熟悉度, 主观评价应围绕这三个维度来设计问卷。

3 可听化实验

3.1 实验背景

为考察反射声对室内声景观主观评价的影响, 本文设置了三个实验: (1)让实验人员比较纯音、语音以及音乐信号在有无反射声参与情况下的差异, 并做出偏好度评价。(2)在实验1的前提下, 选出人耳能够听出显著差异的信号, 根据实际房间进行软件建模, 进行声压级绝对感觉阈的测量, 目的是探究在实际情况中人耳能够察觉到反射声参与的最小声压级。(3)是基于室内声景观主观评价框架以及GB/T 16463—1996《广播节目声音质量主观评价方法和技术指标要求》^[12]进行室内声景观在有无反射声参与两种情况下的主观评价。

3.2 实验1

3.2.1 实验素材与实验方法

为了模拟日常的情景, 采用了三种音频信号作

为实验素材, 分别是语音、音乐声以及1 000 Hz纯音。

将实验房间模型(尺寸为: 4 665 mm×7 725 mm×4 356 mm)导入Odeon软件, 如图1所示。音源位置位于实验室中间贴近一侧墙壁, 距离地面高1 700 mm的位置, 坐标为 $P_2(0, 2\ 333, 1\ 700)$ mm, 接收点位于音源正前方4 m的位置, 坐标为 $P_1(4\ 000, 2\ 333, 1\ 700)$ mm。在材料的选择方面, 首先使用全吸收材料模拟自由场环境, 使用Odeon软件进行实验房间脉冲响应的运算分析并得到双耳房间脉冲响应(BRIR), 然后将材料更换为全反射材料, 再次进行同样的运算, 得到有反射声参与的声场环境下的BRIR如图2所示; 然后将之前的三个音频信号与脉冲响应进行卷积运算得到实验用的三组实验

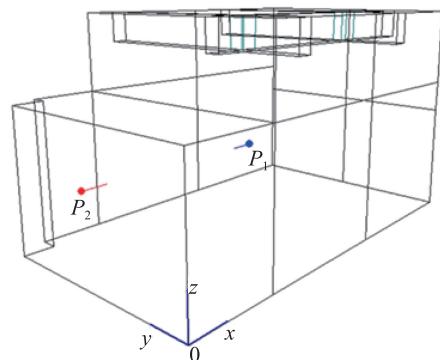


图1 Odeon软件中的实验房间模型

Fig.1 The model of experimental room in Odeon software

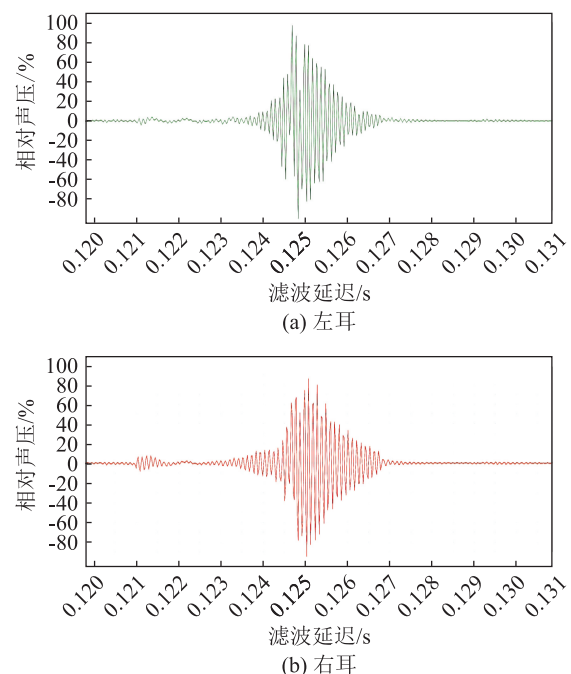


图2 有反射声参与的声场环境下的BRIR函数

Fig.2 BRIR function in sound field environment with reflection

素材。

在实验方法上，本次实验使用强制选择法，将经过不同响应处理的同一素材配对后进行区分度的判读，设定了“喜欢1”“喜欢2”以及“没有区别”三个选项，要求受试者在对比听完一组信号后，选择上述选项中的一个。此次试验受试者的年龄范围在22~41岁之间，共23位，其中男性14位，女性9位，均为高校的在读学生及教师。在实验前对受试者进行了统一的实验控件操作培训。

3.2.2 实验结果及分析

在区分三种信号有无地面反射的实验结果中，对于语音及音乐信号，受试者能够以较大的概率区分出有无反射声所带来的差异，语音信号的概率为95.0%，音乐信号为87.5%；而对于1 000 Hz的纯音信号，受试者能够区分出的概率下降至37.5%，在女性受试者中这一数据甚至更低，仅有12.5%。在能够区别显著差异的基础上进行有无反射声的偏爱度分析后，对于语音和音乐，受试者的偏爱度分布相对均匀，分别有55.3%和51.4%的受试者偏爱无反射声的信号。但在1 000 Hz纯音信号中，受试者更加偏爱有反射声参与的纯音信号，有80%的受试者偏爱有反射声的信号。原因可能是由于自然界中极少存在纯音信号，经反射声处理后，产生了近似室内的听音效果。人们对于不熟悉的声倾向于有反射声的参与以加强熟悉度，这点将在后续的实验予以验证。

表1 对三种信号区分有无地面反射的实验结果

Table 1 Experimental results of distinguishing the three signals with or without ground reflection

实验信号	$P_{\text{无法区分}}/\%$	$P_{\text{可以区分}}/\%$	$P_{\text{偏爱有反射声}}/\%$	$P_{\text{偏爱无反射声}}/\%$
语音	5.00	95.00	44.70	55.30
音乐	12.50	87.50	48.60	51.40
1 000 Hz纯音	62.50	37.50	80.00	20.00

3.3 实验2

3.3.1 实验素材与实验方法

根据实验1的结果，人耳并不能明显区分纯音信号在有无反射声参与下所带来的差异，因此在进行绝对感觉阈的测量时，选取了语音、音乐和室内声景观常用的水流声作为实验信号。为模拟实际听音环境，以文献[13]中1~4号房间的实际测量情况进行Odeon软件建模，并将界面处理成与实际情况相同以及全吸收(全反射)两种工况，得到每间房间的两组有无反射声参与的脉冲响应，再与三种音频信号进行卷积。

为确定人耳能察觉到反射声差异的声压级阈限值，采用实验心理学中测量绝对阈限的阶梯法^[4]。将同一声压级的有无反射声参与的两组信号进行配对，供被试者进行听音，若被试者能够(不能够)听出这对信号的区别，下一组信号则以1 dB(A)的强度递减(递增)，直至完成30次，并计算转折点平均声压级，即为此次试验测得的绝对感觉阈。考虑到实验室本底噪声为25 dB(A)，为排除本底噪声的影响，本次实验的最小声压级设为35 dB(A)^[15]，考虑到正常交谈声的范围，同时为了保证实验人员听力不受损，最终确定本次声压级的范围为35~64 dB(A)。此次试验受试者的年龄范围在20~28岁之间，共20位，其中男性11位，女性9位，均为高校的在读学生，每个房间对应5位受试者。

3.3.2 实验结果及分析

人耳对反射声的绝对感觉阈结果如表2所示。可以看出对于1号、2号以及4号房间，语音信号的反射声绝对感觉阈最低，用小于水流声和音乐声信号，这与之前的实验结论一致，即对于越是熟悉的声音，人耳越是能敏锐地捕捉到室内反射声带来的差异。此外，3号房间的数据与之前的结论完全相反，在这里语音信号的反射声绝对感觉阈最高，其次是音乐，水流声最低，这意味着在某些特殊形体的房间里(如3号房间形状不规则，且层高较高)，对于越是熟悉的声音，人耳反倒不容易察觉出反射声带来的差异。

表2 人耳对于反射声的绝对感觉阈(dB(A))

Table 2 The absolute sensation thresholds of the human ear to the floor reflected sound (dB(A))

实验房间	语音	音乐	水流
房间1	35.6	42.1	47.2
房间2	39.0	50.0	40.8
房间3	56.3	43.0	39.9
房间4	37.9	52.3	57.7

值得一提的是，此次试验过程中，语音的出现最小声压级的概率为37.5%，即可听阈即为反射声的绝对感觉阈，而这一现象在音乐信号中为12.5%，水流信号中的概率是25%；此外，后两者与语音信号相比，均出现过最大声压级的情况，且出现概率均为12.5%，这种情况表明受试者始终无法辨别出反射声带来的差异。以上两种情况的出现，验证了前文观点的同时，也表明人耳对于反射声的绝对感觉阈受到房间尺寸、房间反射面声学参数以及听者个体差异的影响较大，甚至同一个体在不同房间的绝对感觉阈会出现偏移。

3.4 实验3

3.4.1 实验素材与实验方法

上述实验已经初步考察了人耳对于反射声的感知程度，接下来将针对三种信号声源(语音、音乐、水流声)，在有无反射声参与的两种情况下进行主观评价。主观评价的第一部分为文献[12]中室内声景观的评价标准，一共有5个互为正交的声感知维度，按照规范要求使用7阶语义细分量表供被试在听音时打分^[6]。第二部分是《广播节目声音质量主观评价方法和技术指标要求》中对于录音制品的评价^[12]。

此次试验受试者的年龄范围在20~28岁之间，共46位，其中男性20位，女性26位，均为高校的在读学生。在实验前进行统一的实验培训，并统一进行实验，最终回收有效问卷43份。

3.4.2 实验结果及分析

GB/T 16463—1996框架下的声音质量主观评价结果如图3~5所示，图中纵坐标为占总人数的占比。

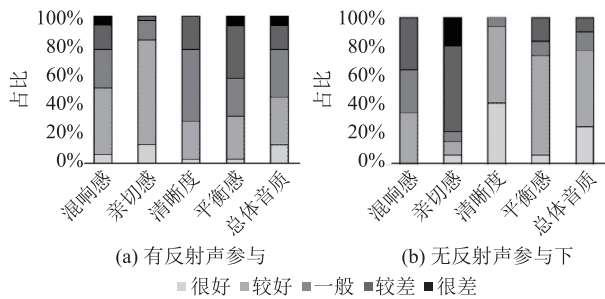


图3 按照GB/T 16463—1996要求的语音信号主观评价结果
Fig.3 Subjective evaluation results of human voice signals in accordance with GB/T 16463—1996

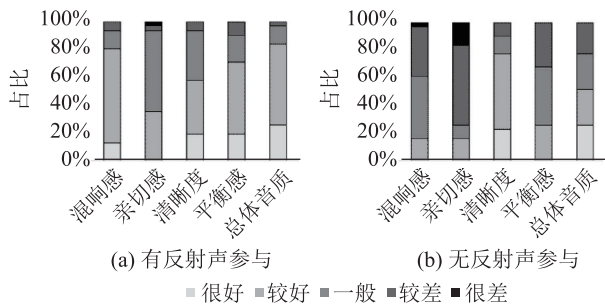


图4 按照GB/T 16463—1996要求的音乐信号主观评价结果
Fig.4 Subjective evaluation results of music signals in accordance with GB/T 16463—1996

室内声景框架下的主观评价结果如图6~8所示。

在《广播节目声音质量主观评价方法和技术指标要求》评价标准下，对于语音和音乐声信号而言，反射声能够显著加强混响感，语音信号混响感评价提升了16.13个百分点；音乐声信号混响感评

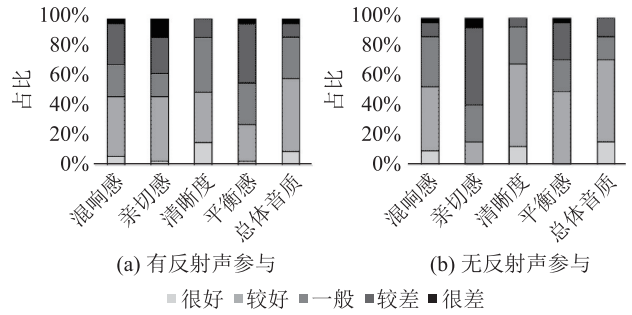


图5 按照GB/T 16463—1996要求的水流信号主观评价结果
Fig.5 Subjective evaluation results of stream sound signal in accordance with GB/T 16463—1996

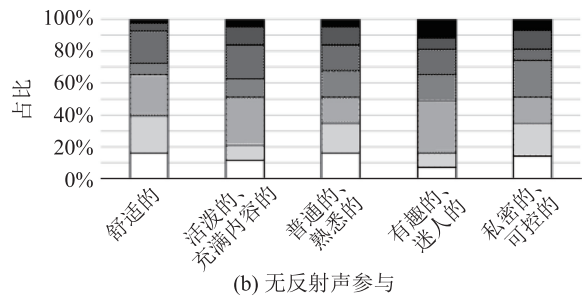
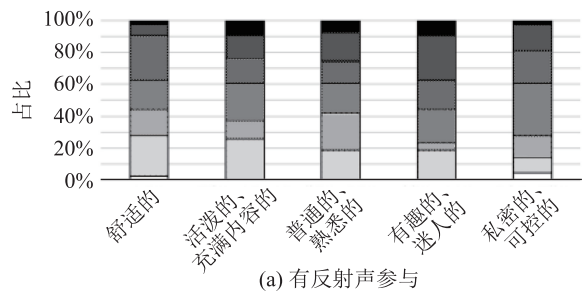


图6 按照室内声景评价的语音信号主观评价结果
Fig.6 Subjective evaluation results of human voice signals in accordance with indoor soundscape evaluation

价提升了64.51个百分点；而对于水流信号，反射声会小幅降低混响感，降幅为6.25个百分点。对于平衡感，反射声的介入会使语音和水流信号的平衡感分别降低41.93个百分点和21.87个百分点；但会使音乐声信号的平衡感提高45.15个百分点。此外，无论是哪种声音信号，反射声会降低清晰度，语音信号受影响最大，清晰度降幅为64.51个百分点，音乐和水流信号受影响相对较少，降幅分别为19.36个百分点和18.74个百分点。但对总体音质的贡献不相同，对语音和水流来说，反射声会降低总体音质，降幅分别为32.26个百分点和12.5个百分点；而对音乐来说，反射声则会提高25.81个百分点的总体音质。最后，反射声都能够提升距离感，客观上造成亲切感的降低，语音信号亲切感降低了73.74个百分点；音乐声信号亲切感降低了67.73个百分点；水流声信号亲切感降低了31.25个百分点。不过亲切感的偏好是十分主观的，有些被试表现出

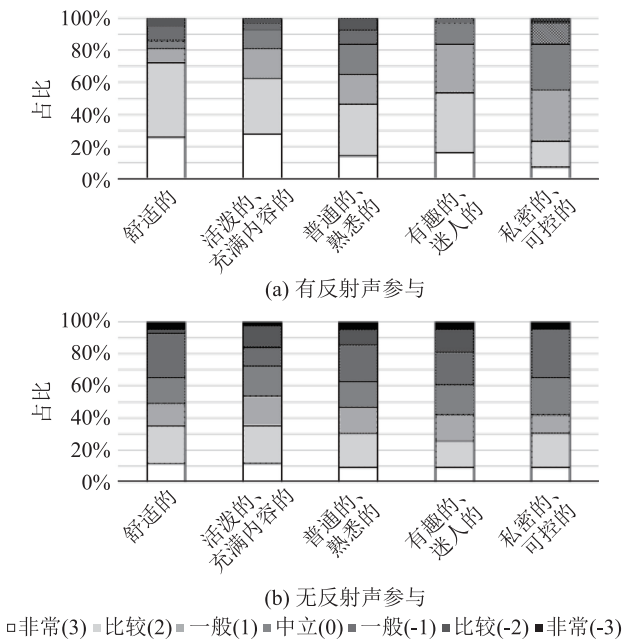


图7 按照室内声景评价的音乐信号主观评价结果
Fig.7 Subjective evaluation results of music signals in accordance with indoor soundscape evaluation

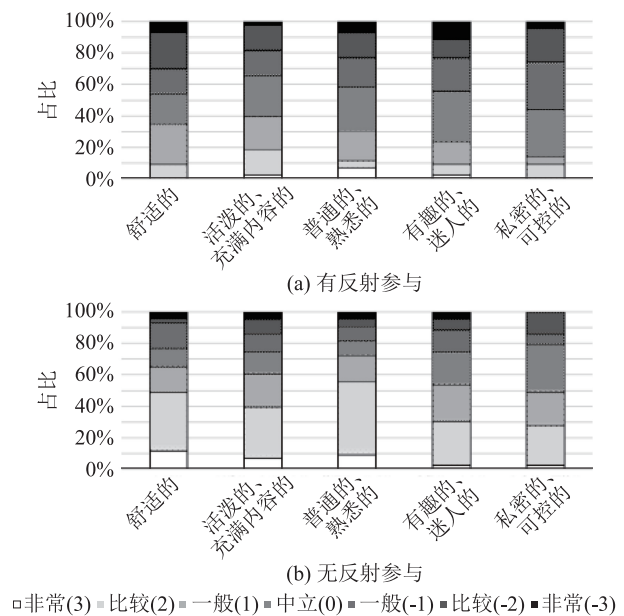


图8 按照室内声景评价的水流信号主观评价结果
Fig.8 Subjective evaluation results of stream sound signal in accordance with indoor soundscape evaluation

喜欢较远的音乐声以及较近的语音。

在室内声景观的评价框架下，反射声会降低人们对语音信号的舒适度(20.93个百分点)；同时也会小幅降低人们对语音信号的熟悉程度(9.3个百分点)。反射声还会影响到私密性，使声音变得不可控(降低23.26个百分点)；并且语音信号的活泼程度和迷人程度也都会降低13.95个百分点和25.59个百分点。对于音乐信号，人们更熟悉有反射声参与的情况，熟悉度会提高18.6个百分点；且反射声的

参与会显著提高舒适度(32.55个百分点)、活泼度(27.9个百分点)以及有趣程度(41.86个百分点)，反之人们会觉得音乐声有些失控。对于水流声而言，人们更熟悉没有反射声参与的情况，反射声会降低熟悉度(41.86个百分点)，这与我们的生活经验是相符的，因为水流声往往在户外，周围缺乏反射声，一旦有了反射声的参与，水流声会变得入侵且失控(34.89个百分点)，继而降低舒适度(30.24个百分点)、活泼感和(20.93个百分点)迷人感(30.24个百分点)，听众的体验会变得很差。

4 结果与讨论

本文的研究首先通过实验1初步验证了不同音频信号加入反射声对于人耳主观听觉的影响，对于人们越是熟悉的声音，这种影响越能够被分辨出来。

实验2结合实际房间的吸声材料布置与构造，通过阶梯法测得了三种声音信号有无反射声参与的最小绝对感觉阈，其中除特殊构造的房间外，其余房间的语音信号绝对感觉阈最低，高于本底噪声10 dB(A)左右即可被察觉，对于敏感人群甚至更低，绝对感觉阈等于可听阈。水流声及音乐信号，对于大部分人而言，高于本底噪声17 dB(A)才开始察觉到反射声的贡献，这进一步定量地阐释了实验1的结论。

最后通过两种不同研究框架下的主观评价，给出了反射声应当被处理的场景——即尽量使之符合人们的过往听觉经验及听觉预期来提高主观熟悉度。如在室内声景普遍是水流等自然声音时，应当给予反射声一定的吸声处理，来模拟人们在户外听到的自然的声音，以加强听众对于此类声景观的熟悉程度，进而加强其他正向的主观感受。对于室内声环境普遍是音乐的场景下，适当的反射声可以加强音乐的音质，符合人们的主观经验以及期待。而对于声环境主要是人与人交谈的场合时，反射声会降低私密性并损伤熟悉度，但具体的取舍要根据实际的用途来进行判定，如语言类演艺场所可以不用考虑处理反射声，而人们习惯低语的卧室、办公室应当给予一定的处理来保证舒适度。

本文的研究仍有值得进一步深入的地方。首先，研究中所采用的可听化实验方法是有一定局限性的，尽管软件模拟了反射声带来的影响，但是在用耳机回放时，所有的声音都是通过耳机的膜片进行一维的径向振动向外辐射的，丢失了空间信息，会出现重放声像的位置畸变、头中定位等问题。

其次, 本实验旨在考虑仅有反射声参与的情况下对室内声场及人耳主观感受的影响, 因此房间模型均为空场条件, 在实际的生活中, 室内物体对反射声也有很大的影响, 在以后的研究中应予以考虑。

参 考 文 献

- [1] Acoustics-Soundscape-Part 1: Definition and conceptual framework: DS/ISO 12913-1-2014[S/OL]. 2014. <https://www.iso.org/standard/52161.html>.
- [2] TORRESIN S, ALETTA F, BABICH F, et al. Acoustics for supportive and healthy buildings: emerging themes on indoor soundscape research[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(15): 6054.
- [3] J. Borenus, Seppo U, Korhonen, et al. New Aspects on Listening Room Design.//Audio Engineering Society, Helsinki, 1985: Paper 2184[J].
- [4] BECH S. Timbral aspects of reproduced sound in small rooms. I[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, **97**(3): 1717-1726.
- [5] BECH S. Audibility of individual reflections in a complete sound field. II[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, **97**(5): 3320.
- [6] TOOLE. *Sound Reproduction-loudspeaker and Rooms*[M]. Burlington: Focal Press, 2008: 72-73.
- [7] 谢菠菝. 空间声原理及其相关的物理、听觉问题[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2022, **52**(4): 34-49.
XIE Bosun. Principle of spatial sound and related physical and auditory problems[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2022, **52**(4): 34-49.
- [8] 曾向阳. 室内声场计算机模拟发展40年(1968—2008)[J]. *电声技术*, 2008, **32**(S1): 12-17, 23.
ZENG Xiangyang. Forty years of development of room acoustic computer simulation[J]. *Audio Engineering*, 2008, **32**(S1): 12-17, 23.
- [9] 孟子厚. 声音制作中的虚拟技术[J]. *电声技术*, 1997, **21**(5): 6-10.
- [10] IMAMURA H, MARUI A, KAMEKAWA T, et al. Influence of first reflections in listening room on subjective listener impression of reproduced sound, May 3, 2013[C]// Roma, 2013.
- [11] TORRESIN S, ALBATI R, ALETTA F, et al. Indoor soundscape assessment: a principal components model of acoustic perception in residential buildings[J]. *Building and Environment*, 2020, **182**: 107152.
- [12] 国家技术监督局. 广播节目声音质量主观评价方法和技术指标要求: GB/T 16463—1996[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [13] 古林强, 谢璇. 家庭听音室的房间响应横向比较及改善建议[J]. *电声技术*, 2020, **44**(6): 16-23.
GU Linqiang, XIE Xuan. Horizontal comparison of room response in home listening room and suggestions for improvement[J]. *Audio Engineering*, 2020, **44**(6): 16-23.
- [14] 孟子厚. 音质主观评价的实验心理学方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [15] 钟祥瑞. *建筑吸声材料与隔声材料*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [16] Acoustics-Soundscape-Part 2: Data Collection and Reporting Requirements: ISO 12913-1-2018[S/OL]. 2018. <https://www.iso.org/standard/75267.html>.