

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2022.02.003

QRD 位置对房间声场均匀度的影响研究

荣宁宁¹, 贾尚宏², 闵鹤群^{1*}

(1. 东南大学建筑学院, 南京, 210096; 2. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥, 230022)

摘要: QRD (Quadratic Remainder Diffuser) 作为调控房间声场均匀度的常见材料, 其在房间中的分布位置影响房间声场均匀度的调控效果. 研究了 QRD 在房间中不同的位置分布对房间声场均匀度的影响. 通过混响室实验测试的方法, 改变 QRD 在混响室中的分布位置, 测试了六种布置方案, 研究频域、时域分析 QRD 位置的改变对不同测点间声压级关系的影响. 结果发现: 频域内, S_p (声压级平方的标准差) 比 S_L (声压级的标准差) 描述声场均匀度更加合适, 尤其适用于低频声场; 随着频率的升高, S_L 对声场均匀度的描述准确度提高; 时域内, 当房间内 QRD 的面积一定时, 其均匀分布于房间的天花板或者侧墙时, 声场内各点的声压级标准差较小, 声场均匀度较好; 为发挥 QRD 低频吸声的优势, 应将其布置于房间低频模式声压值极大位置, 即降低由于共振频率引起房间声场不均匀的影响程度.

关键词: QRD, 声场均匀度, 位置, 频域, 时域

中图分类号: TU112

文献标志码: A

Research on the influence of QRD position on room sound field uniformity

Rong Ningning¹, Jia Shanghong², Min Hequn^{1*}

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing, 210096, China;

2. School of Architecture and Planning, Anhuijianzhu University, Hefei, 230022, China)

Abstract: QRD (Quadratic Remainder Diffuser) is a common material to control the sound field uniformity which of the distribution affects the uniformity of sound field in the room. This article describes the influence of QRD's different position distribution on the room's sound field uniformity through the method of experimental testing in the reverberation room. In the frequency and time domain, there are six layout schemes of the different distribution of QRD in the reverberation room, analyzing the influence of the change of QRD position through the sound pressure level relationship between different measuring points. In the frequency domain, the results show that S_p (standard deviation of the square of sound pressure level) is more suitable than S_L (standard deviation of sound pressure level) to describe the uniformity of the sound field, especially suitable for low-frequency sound fields. With the increase of frequency, the accuracy of S_L 's description of sound field uniformity is improved. In the time domain, when the QRDs are evenly distributed on the ceiling or side wall with the constant area in the room, the standard deviation of sound pressure level at each point in the sound field is smaller and the sound field uniformity is better. To take the advantage of low-frequency sound absorption of QRD, it should be arranged at the position where the sound pressure value is maximum in the low-frequency mode of the room, which can reduce the influence degree of uneven sound field in the room caused by resonance frequency.

Key words: QRD, sound field uniformity, position, frequency, time domain

基金项目: 国家自然科学基金(51408113), 江苏省自然科学基金(BK20140623)

收稿日期: 2021-02-03

* 通讯联系人, E-mail: hqmin@seu.edu.cn

二次余数扩散体(Quadratic Remainder Diffuser, QRD)具有低频吸声,高频扩散的结构特性,是房间声场设计中调控声场均匀度的常见新型材料^[1-2]. 室内声场扩散不均匀是混响室法测定吸声系数误差的主要原因之一,混响室采取有效的扩散措施使其衰变声场达到足够的扩散是进行较为准确的吸声系数测量的前提^[3]. 提高房间声场均匀度的传统方法一般为在房间中挂扩散板^[4],通过调试扩散板的角度和位置优化声场均匀度,费时费力. 目前,对于QRD的研究多聚焦于复合材料优化其本身性能,如拓宽材料的频带宽度、缩小材料的尺寸、提高材料的扩散性能. 蔡俊等^[5]将QRD结构与穿孔板结构进行组合,对不同穿孔率的复合结构进行实验研究得出规律,为扩散吸声结构的设计与研制提供依据. Guo and Min^[6-7]研究了一种子背腔深度序列基于QRD并联的组合式微穿孔板(Micro-Perforated Panel, MPP)吸声体,能获得可定制的吸声峰数量与位置,从而具有可覆盖语音全频段吸声带宽的潜力. 而QRD位置变化对声场均匀度的影响缺乏进一步的研究^[8-9].

对相同数量的QRD在混响实验室中不同布置方案对应的不同测点的时域和频域声压级进行测试. 通过各测点声压级之间的偏差分析,研究QRD位置改变对房间声场的均匀度的影响,为房间QRD的位置确定提供依据和建议. 相对于传统混响室声场调控的方法,为改善房间声场均匀度提供新思路,使其调试工程实践更省时省力. 同时,优化QRD的位置,有利于节约材料成本,达到更为理想的房间声场效果.

1 实验材料与声场均匀度

1.1 实验材料 常见的扩散体材料:施罗德扩散体(反射相位栅扩散体)、原根扩散体、扩散混凝土砖、QRD. 本实验中研究对象QRD材料为基于二次余数序列产生的伪随机分布扩散结构(图1). QRD包括一维QRD扩散体和二维QRD扩散体^[10]. 二维QRD扩散体的特点是声波在互相垂直的两个方向上入射,均可产生扩散效果. 它在互相垂直的两个方向上都是按照二次余数序列规律安排井深的. 因此二维QRD扩散体的扩散特

性不再局限于平面极坐标,而是空间半球形. 简言之,一维QRD扩散体解决一个方向的声扩散问题;二维QRD扩散体则是解决相互垂直的两个方向的声扩散问题. 综合二维QRD材料的性能和美观等优势,二维QRD材料在小房间中的应用较为广泛^[10].



图1 隔声实验室中安装的QRD材料

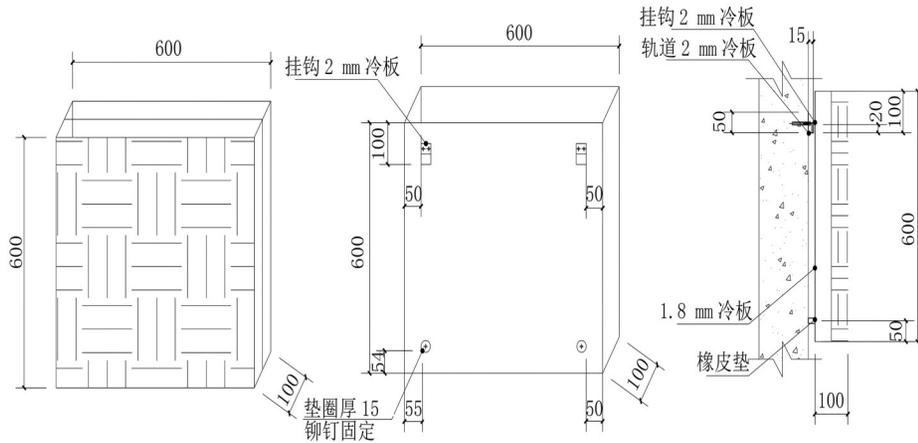
Fig. 1 QRD installed in the sound insulation laboratory

二维QRD材料外观优美,在房间内的安装构造简单、便捷. 通常安装凹槽轨道,进行壁挂连接(图2). 具体为通过轨道与铆钉将材料与墙面连接,轨道带有凹槽方便QRD材料的更换.

结合上述材料性能优势,本实验选用的扩散体为二维QRD扩散体,几何尺寸为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 85\text{ mm}$. 实验中主要通过四块相同的扩散体不同的布置方案来探究位置改变对声场均匀度的影响,实验用QRD扩散体及相应频率下的扩散系数见图3.

1.2 声场均匀度 混响实验室常用来测量材料吸声系数、构件隔声量等,为了获得准确的声学测量结果,混响室声场需要充分扩散. 理想的扩散声场可描述为传播方向具有随机相位和相等幅度平面波的叠加,且均匀分布在传播方向上. 目前评估声场的扩散程度的方式有:声压的空间均匀性、衰减率的均匀性和衰减曲线的线性等^[11-12]. 最常用的描述是声压级的空间均匀性和相邻位置声压之间的相互关系.

从统计声学来看,房间声场衰减的不均匀性是室内声场扩散程度不够的表现^[13]. 要使室内声场扩散得好,应尽量使房间呈不规则状,在室内进行扩散处理,从而使室内声场在衰减过程中趋向



QRD 扩散体与墙面连接正面构造 (单位: mm) QRD 扩散体与墙面连接背面构造 (单位: mm) QRD 扩散体与墙面连接构造剖面 (单位: mm)

图2 实验室中QRD安装构造

Fig. 2 QRD installation structure in the laboratory

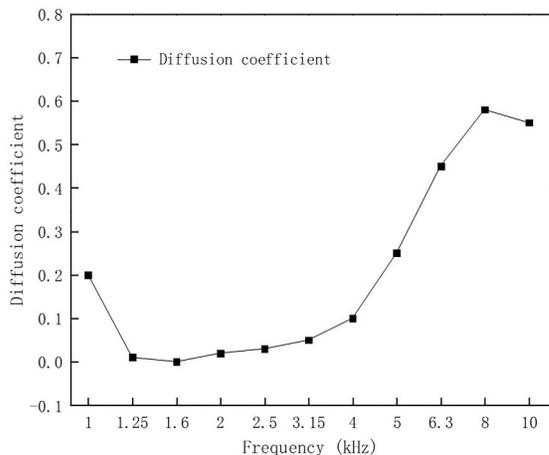


图3 实验中QRD扩散系数曲线

Fig. 3 The diffusion coefficient curve of QRD in the experiment

均匀. 从统计观点来说扩散声场可以认为声波通过任何位置的几率是相同的, 并且通过各方向的几率也相同, 在同一位置各声线相遇的相位是无规的, 从而导致室内声场的平均能量密度分布是均匀的^[14]. 声波的传递过程实质上就是声振动能量的传播过程, 单位体积里的平均声能量密度为:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\overline{\Delta E}}{V_0} = \frac{p_a^2}{2\rho_0 c_0} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c_0^2} \quad (1)$$

其中, $p_e = \frac{p_a}{\sqrt{2}}$ 为有效声压, ρ_0 为密度, c_0 为声速常数. 所以, 平均声能量密度与有效声压的平方成正比.

从波动声学来看, 简正频率就是房间做自由振动的固有频率, 当房间中声源的激发频率与房间中某一固有频率一致时, 房间产生共振^[1]. 而简正频率分布密集均匀就表示房间的传输频率特性均匀, 否则就表示频率特性的不均匀. 对频率进行微分, 可得在 df 内的简正频率数:

$$dN = \left(\frac{4\pi f^2 V}{c_0^3} + \frac{\pi f S}{2c_0^2} + \frac{L}{8c_0} \right) df \quad (2)$$

其中, V 为房间体积, S 为房间壁面总面积, L 为房间边线总长, c_0 为声速常数. dN 数随着频率增高增加得更快, 大量驻波方式的叠加, 可以把驻波效应平均掉, 从而使声场趋于均匀. 从式(2)可以看出, 若声源发出不是单频而是有一定频带宽度的声波, 且其中心频率比较高, 房间的体积比较大, 或者说与中心频率对应的声波波长比房间的平均线度小很多, 房间中激起的简正波数较多, 统计声学中的扩散声场实际上就是波动声学中大房间驻波声场的高频近似. 因此, 房间在高频范围内声场趋于均匀. QRD 材料的存在改变了声场的共振频率和模态分布, 从而影响房间声场的均匀度.

2 实验

2.1 实验环境与测试系统 实验在安徽建筑大学声学研究所混响实验室(图4)进行. 混响实验室几何尺寸为长7 m, 宽4.7 m, 高5.5 m, 本底噪声22.1 dB, 截止频率低于100 Hz.



图 4 实验环境

Fig. 4 Experimental setup

测量系统使用 VA-Lab6 声学测试系统(三角声源、十二面球体声源、功率放大器、六通道数据采集器、计算机、传感器等)(图 5);测量用传感器六只(传声器符合现行国家标准《电声学声级计第 1 部分:规范(GB/T 3785. 1-2010)》^[15]中 I 型的规定),将实验仪器连接为实验测试系统(图 6).

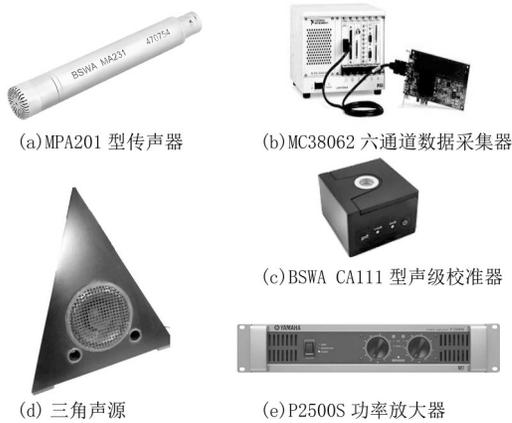


图 5 实验仪器

Fig. 5 Experimental apparatus

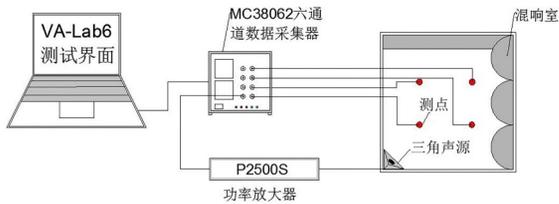


图 6 实验测试系统连接

Fig. 6 Experimental test system connection

2.2 测点布置与测试方案 通过测量得到混响实验室中测点 1, 2, 3, 4 的声压级, 对比不同 QRD

布置方案, 根据其各测点声压级的偏差分析, 判断声场的均匀度. 根据《声学建筑和建筑构件隔声测量第三部分: 建筑构件空气声隔声的实验室测量(GB/T 19889. 3-2005)》^[16]实验室测试标准, 在混响室中三角声源 S 位于墙角处, 传声器布置于小房间距离地面高约 1.5 m 位置, 且传声器位置与界面的距离不宜小于 1.2 m(图 7). 传声器位置与试件表面之间的距离也是如此.

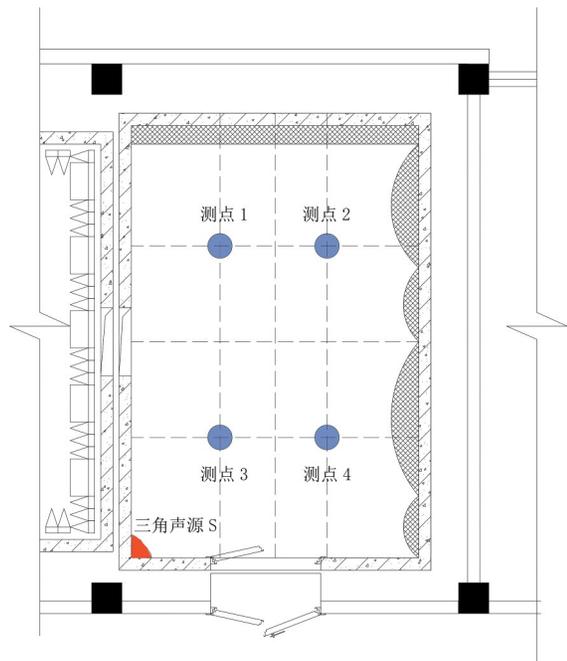


图 7 混响室实验测点布置

Fig. 7 Layout of test points in reverberation room

根据工程实践, 通常将扩散体安装在顶棚或墙壁四周. 由于混响实验室有三面墙(顶面、北面 and 东面)做了扩散处理, 其中顶棚挂了扩散板, 实验选取的是其他未做扩散处理的墙面和地面, 地面类比房间的顶棚, 根据集中与分散的布置方式, 选取了实验中比较符合常理的六种扩散体布置方式, 为 QRD 的布置方式提供参考建议. 使用三角声源作为实验用声源, 要保证声源位于混响室左上角位置处, 且声源发声方向应对着圆柱形扩散体, 可得布置方案(图 8).

3 结果与分析

3.1 量化声场均匀度的计算方法 一般而言, 混响室中不同测点声压级的标准差(SPL_s)通常用

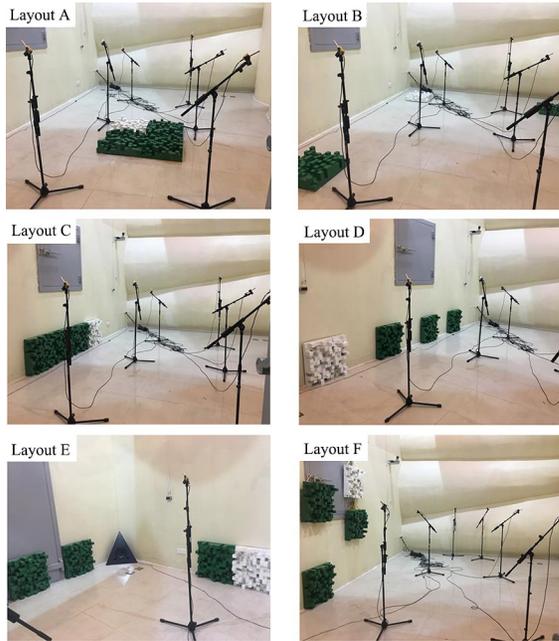


图8 混响室中QRD六种布置方案

Fig. 8 QRD layout schemes in the reverberation room

来描述其声场的空间均匀性^[17],即:

$$S_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_M} (L_i - L_M)^2}{N_M - 1}} \quad (3)$$

其中, L_i 为第*i*个点的声压级, N_M 为测点数量, L_M 为所有测点的声压级的算术平均值.

理想扩散声场的概念基于声能密度均匀分布于房间中主要空间的假设,因此声能密度的空间均匀性是声场均匀度的重要指标,而声能密度与声压的平方成正比.

$$\epsilon = \frac{p_i^2}{2\rho_0 c_0^2} \quad (4)$$

其中, ρ_0 为空气密度, c_0 为空气中的声速, p_i 为第*i*个点的声压级.因此,假设声压的平方的标准差可以更准确地描述声场均匀度^[17],可得:

$$\Delta p^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_M} (p_i^2 - p_M^2)^2}{N_M - 1}} \quad (5)$$

其中, p_M^2 为所有测点声压级平方的平均值, Δp^2 用平均声压级的平方来表征平均声场,而不是如 SPL_s 中对测点声压级进行平均.为了方便地与 SPL_s 的常用标准差进行比较,对 Δp^2 进一步计算^[17],用 S_p 来表示,即:

$$S_p = 10 \lg \left(\frac{p_M^2 + \Delta p^2}{p_M^2} \right) \quad (6)$$

其中, $\overline{p_M^2}$ 为计算频带中所有频率对应的 p_M^2 的平均值,因此, S_p 为无量纲.

为方便准确分析不同频段声压级偏差曲线与声压级曲线的关系,将频域划分为0~100 Hz,100~1000 Hz,1~10 kHz三个频率段分别分析(图9).

图9右图即声压平方标准差 S_p 曲线峰值基本对应于声压级 SPL 峰值.其中,低频范围中 S_p 曲线的准确度明显高于标准差 S_L 的精确度;随着频率的提高, S_p 曲线的偏差描述准确度基本保持不变,标准差 S_L 曲线的偏差描述准确度在逐渐提高,尤其在1 kHz以上的频率, S_p 曲线的偏差描述准确度明显提高.这是由于低频共振频率下声场是最不均匀的,易在共振频率下出现声压极大值和极小值.

计算声压级偏差时, S_L 平均的是声压级, S_p 平均的是声压级的平方.平均声压级与平均声压级的平方的物理意义不同^[18],后者描述声场均匀度更合理,因为声压的平方与声能密度成正比.当声场非常不均匀时,尤其在低频模式下,平均声压级与平均声压级的平方存在很大区别^[19].因此,在低频范围内,利用平均声压级 S_L 来评价声场均匀度不准确.低频范围内声场由少数共振模式主导,通常为非常不均匀的声场,所以声压级的标准差不是低频范围内声场均匀度的有效指标.而在混响室较高的频率范围内声场几乎是均匀的,平均声压级 S_L 和平均声压级的平方 S_p 给出了类似的结果,因此声压级的标准差值在高频下是有效的.

3.2 频域中QRD位置对声场均匀度的影响 通过评价声场均匀度不同计算方法的比较,得出 S_p 比 S_L 更适合描述声场均匀度^[20-21].混响实验室中QRD的六种不同方案在频域(1/3倍频程)中对应不同结果(图10).

频域中,在较低的频率0~100 Hz范围内,QRD的布置方案对声场均匀度几乎没有影响.在频域的1/3倍频程范围内,由于混响室低频其特征频率与1/3倍频程对应的频率未重合,所以其布置方式对声场均匀度的影响较小.在100~

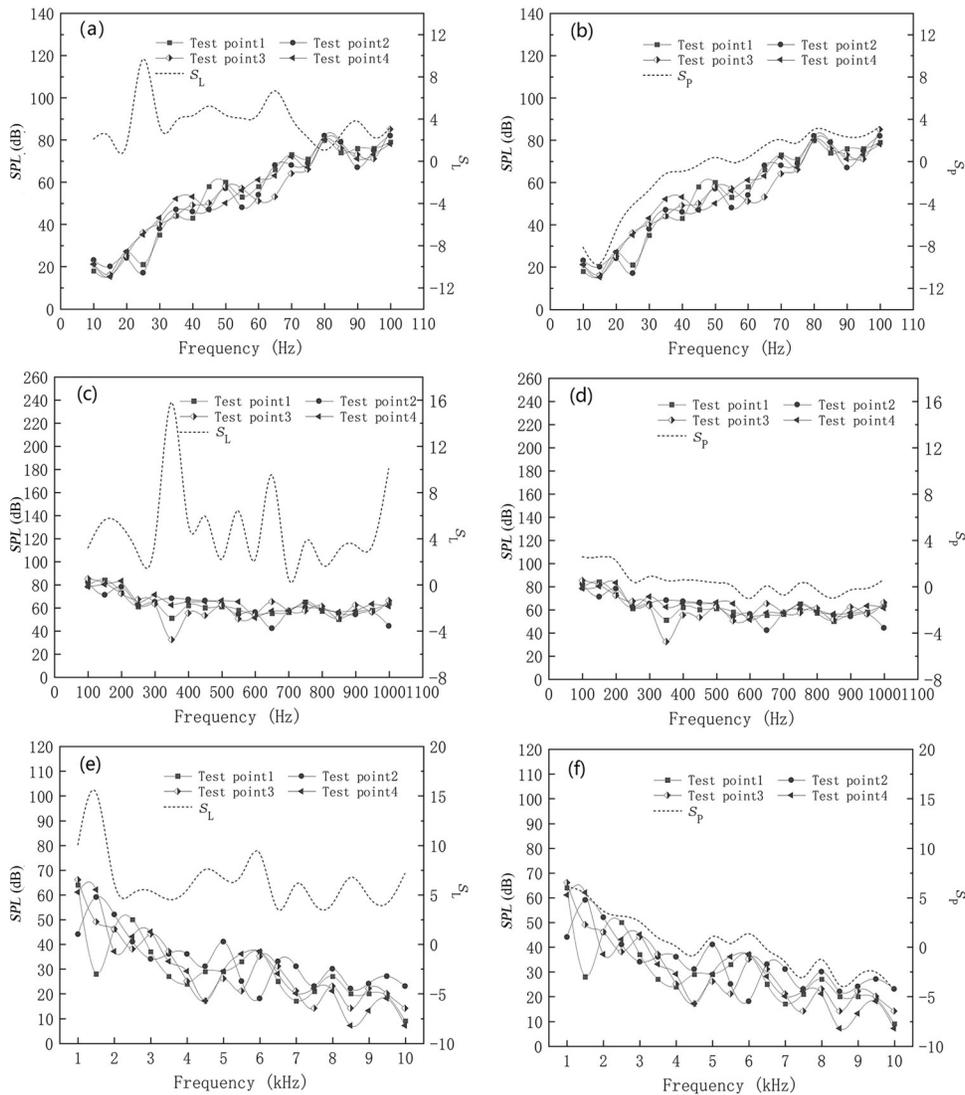


图 9 0~100 Hz, 100~1000 Hz, 1~10 kHz 频率段分别对应的 S_L, S_P 曲线与声压级曲线关系

Fig. 9 0~100 Hz, 100~1000 Hz, 1~10 kHz, the relationship between the S_L and S_P curves corresponding to the frequency range and the sound pressure level curve

1000 Hz 频率范围内,混响室中 QRD 不同布置方案在声场中不同频率对应的 S_P 变化较为明显,由于 QRD 在此频率段不同频率对应的扩散系数不同,其不同布置方式对声场均匀度的影响难以统一描述. 在 1~10 kHz 频率范围内,混响室中 QRD 不同布置方案的 S_P 变化不大,即 QRD 的布置方式在高频范围对声场均匀度几乎没有影响. 原因在于,高频声场中空间声能量密度接近处处相等,即声场趋向于均匀.

3.3 时域中 QRD 位置对声场均匀度的影响

时域上,在混响实验室中对 QRD 的不同布置方案的

不同测点进行声压级测试,选取声压级 (SPL) 和声压级最大值 (SPL_{MAX}) 两个参数进行分析^[18],其中 SPL_{MAX} 是测量时段内最大 SPL,用声压级标准差 (S_L) 来表征声场均匀度(图 11).

图 10 为时域下混响室中 QRD 不同布置方案的 SPL 和 SPL_{MAX} 曲线和标准差. 从图中可以得出方案 E、方案 F 的标准差较小,声场较为均匀. 当房间内 QRD 扩散体的面积一定时,其均匀分布于房间的天花板或者侧墙时,声场内各点的声压级标准差较小,声场均匀度较好. 为发挥 QRD 扩散体低频吸声的优势,应将其布置于房间低频模

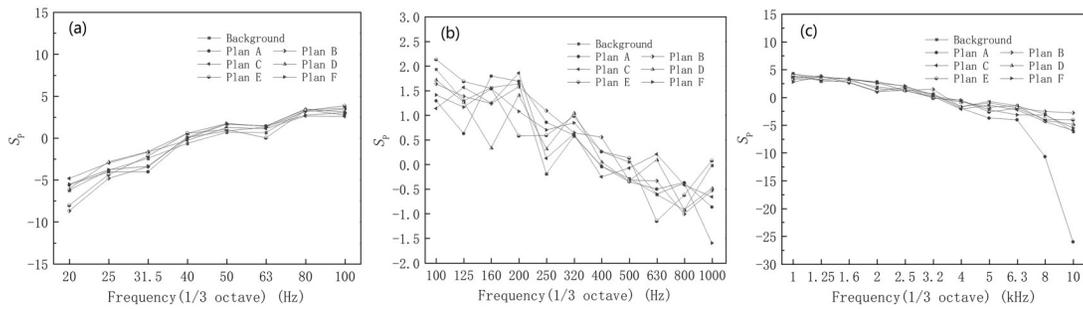


图 10 0~100 Hz,100~1000 Hz,1~10 kHz 频率段 (1/3 倍频程)QRD 不同布置方案的 S_p 曲线

Fig. 10 0~100 Hz,100~1000 Hz,1~10 kHz,frequency band (1/3 octave) S_p curve of different QRD layout schemes

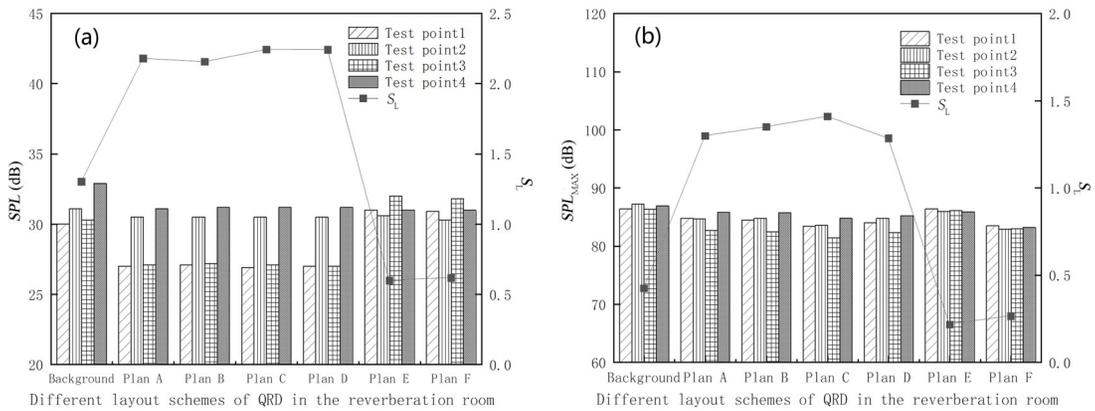


图 11 时域中 QRD 不同布置方案对应的测点声压级与标准差

Fig. 11 The sound pressure level and standard deviation of measuring points corresponding to different QRD layout schemes in the time domain

时声压值极大位置.

4 结论

QRD 位置的改变影响了房间声场声压级的分布,其存在及位置的不同改变了声场的共振频率和模态分布,从而影响房间声场的均匀度.在时域中,由于布置的方案不同,声压级在一定时间内不同测点平均量不同.在频域中,同时测量不同测点对应不同频率其瞬时值是不同的,不同测点声压级平方的偏差能够反映声场均匀度.具体结论如下.

(1)QRD 对房间声场均匀度的影响取决于声源、接收器的位置以及 QRD 本身的扩散性能.

(2)通过 QRD 的使用,可以进一步提高传统的混响实验室声场均匀度(混响实验室进行实验测量通常默认为其声场为理想均匀状态).

(3)低频时,声场由少数共振模式主导,声场

不均匀,所以 SPL_s 的标准差 S_L 不是低频声场均匀度的有效指标.低频范围中 S_p 曲线的准确度明显高于标准差 S_L 的准确度;随着频率的提高, S_p 曲线的偏差描述依然较为准确,标准差 S_L 曲线的偏差描述准确度在逐渐提高,尤其在 1 kHz 以上的频率, S_L 曲线的偏差描述准确度明显提高.

(4)当房间内 QRD 扩散体的面积一定时,其均匀分布于房间的天花板或侧墙时,声场内各点的声压级标准差较小,声场均匀度较好.为发挥 QRD 扩散体低频吸声的优势,应将其布置于房间低频模式声压值极大位置,即降低声场中由于共振频率造成的声场不均匀程度.

QRD 位置的改变对声场均匀度产生影响,本实验研究为 QRD 在工程实践中的具体应用提供参考,使 QRD 材料的位置分布更加科学、合理.下一步将对 QRD 扩散体对房间声场影响的理论分析,以及材料低频性能的提升进行研究.

参考文献

- [1] 高玉龙. 小房间声学设计及建筑声学处理. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] 薛长健, 王峥, 项端祈, 等. 建筑声学材料与结构设计和应用. 北京: 机械工业出版社, 2006: 102.
- [3] 钱中昌, 傅云霞, 余培英, 等. 混响室法测量吸声系数的不确定度评价. 计量学报, 2016, 37(4): 411—414. (Qian Z C, Fu Y X, Yu P Y, et al. Uncertainty evaluation for the measurement of sound absorbing coefficient in reverberation room. *Acta Metrologica Sinica*, 2016, 37(4): 411—414.)
- [4] 柳孝图. 建筑物理. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 215.
- [5] 蔡俊, 包飞, 王亚晨, 等. 二次余数扩散结构复合穿孔板扩散吸声研究. 声学学报, 2016, 41(2): 243—248. (Cai J, Bao F, Wang Y C, et al. A study on diffusion and absorption properties of the quadratic residue diffuser structure composited with perforated plate. *Chinese Journal of Acoustics*, 2016, 41(2): 243—248.)
- [6] Guo W, Min H. A compound micro-perforated panel sound absorber with partitioned cavities of different depths. *Energy Procedia*, 2015(78): 1617—1622.
- [7] Min H, Guo W. Sound absorbers with a micro-perforated panel backed by an array of parallel-arranged sub-cavities at different depths. *Applied Acoustics*, 2019(149): 123—128.
- [8] 卢婕宁, 沈勇. 大面积多周期伪随机序列扩散体群的一种优化布置方案. 应用声学, 2004(3): 29—32, 48. (Lu J N, Shen Y. An optimized layout of large-area multi-period pseudo-random sequence diffuser group. *Applied Acoustics*, 2004(3): 29—32, 48.)
- [9] 沈小祥, 沈勇. 基于有限元法的小房间内吸声材料位置研究. 声学学报, 2005(4): 324—328. (Shen X X, Shen Y. Research on the position of sound-absorbing materials in small rooms based on finite element method. *Acta Acoustica*, 2005(4): 324—328.)
- [9] Schultz T. Diffusion in reverberation rooms. *Journal of Sound and Vibration*, 1971, 16(1): 17—28.
- [10] Yang J, Shen Y, Wang H. On the sound absorption of quadratic residue diffuser groups with various shapes and combinations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(6): 3546—3548.
- [11] Bradley D T, Müller-Trapet M, Adelgren J, et al. Comparison of hanging panels and boundary diffusers in a reverberation chamber. *Building acoustics*, 2014, 21(2): 145—152.
- [12] Wu T, Cox T J, Lam Y W. From a profiled diffuser to an optimized absorber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 108(2): 643—650.
- [13] Schultz T J. Diffusion in reverberation rooms. *The Journal of Sound Vibration*, 1971, 16(1): 17—28.
- [14] Heuchel F M, Fernandez-Grande E, Agerkvist F T, et al. Active room compensation for sound reinforcement using sound field separation techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(3): 1346—1354.
- [15] 中华人民共和国国家标准. 电声学. GB/T 3785.1-2010. (State Standard of the People's Republic of China. *Electroacoustics*. GB/T 3785.1-2010.)
- [16] 中华人民共和国国家标准. 建筑和建筑构件隔声测量. GB/T 19889.3-2005. (State Standard of the People's Republic of China. *Measurement of sound insulation of buildings and building components*. GB/T 19889.3-2005.)
- [17] Wang S, Zhong J, Qiu X, et al. A note on using panel diffusers to improve sound field diffusivity in reverberation rooms below 100 Hz. *Applied Acoustics*, 2020(169): 107471.
- [18] Kim J H, Yang S I, Rhee J G. Optimization of field uniformity in a reverberation chamber using quadratic residue diffusers. *IEICE Transactions on Communications*, 2010, E93-B(10): 2787—2790.
- [19] Chung S, Rhee J, Rhee H. Simulations on field uniformity in a triangular reverberation chamber. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2002, 12(2): 198—205.
- [20] Pilch A, Kamisiński T. The effect of geometrical and material modification of sound diffusers on their Acoustic Parameters. *Archives of Acoustics*, 2011, 36(4): 955—966.
- [21] 中华人民共和国国家标准. 混响室法吸声系数测量规范. GBJ 47-83. (State Standard of the People's Republic of China. *Measurement specification for sound absorption coefficient of the reverberation room method*. GBJ 47-83.)

(责任编辑 杨 贞)