

混响室中混响时间测量偏差的研究

杨小军, 沈 勇, 乐 意

(南京大学声学研究所近代声学教育部重点实验室, 南京 210093)

摘要: 在混响室中测量吸声材料的吸声系数时, 需要进行混响室中有吸声材料时混响时间的测量和没有吸声材料时混响时间的测量, 两者的可重复性和可靠性直接影响到所测材料吸声系数的准确度。通过统计声学 and 波动声学的基本原理对混响室中混响时间测量的空间偏差和重复偏差产生的原因进行了分析, 并且在多组不同的实验条件下, 在南京大学混响室中实测了空场时的混响时间和有吸声材料时的混响时间。通过比较、分析混响时间测量结果的空间偏差和重复偏差, 总结出了混响室中混响时间测量的空间偏差和重复偏差较小的测量条件。

关键词: 混响室; 混响时间; 空间偏差; 重复偏差

中图分类号: TB52

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-01-0093-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.01.017

Research on the fluctuation of reverberation time measurements in reverberation room

YANG Xiao-jun, SHEN Yong, LE Yi

(Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Ministry of Education, Nanjing 210093, China)

Abstract: When measuring the absorption coefficient of a certain material in reverberation room, the reverberation times of the reverberation room both with and without material need to be measured. The repeatability and reliability of the two measurements in reverberation room affect the accuracy of the measured absorption coefficient of this material. The cause of the spatial variance and ensemble variance of the reverberation time measurement is analyzed with the principles of statistic acoustics and wave acoustics. The reverberation times in the reverberation room of Nanjing university have been measured under different conditions, and the results are compared and analyzed. In the end the measurement condition under which we can get less spatial variance and ensemble variance of the reverberation time measurement is concluded.

Key words: reverberation room; reverberation time; the spatial variance; the ensemble variance

1 引言

1966 年, 同济大学声学研究室建筑声学组根据多年的测量经验指出厅堂中混响时间测量偏差的问题^[1]。1978 年, Thomas W. Bartel 和 Edward B. Magrab 在 (1) 扩散体旋转和不旋转和 (2) 改变桨叶的角度的条件下研究了混响室中混响时间测量的空间偏差^[2]。1984 年, 王季卿教授研究了同济大学混响室内有无扩散板的情况下的混响时间的标准偏差^[3]。2006 年, 孙广荣教授在混响室中扩散体旋转和静止的条件下研究了以 100Hz 为中心频率的 1/3 倍频程混响时间测量的空间偏差和重复偏差^[4]。后两者分别在两个不同体积的混响室, 以及在不同样

式的扩散体的条件下, 对混响时间测量的偏差做了研究。

本文在孙广荣教授研究的基础上, 将研究的频带拓宽到 1/3 倍频程、中心频率为 100~5000Hz 的频带范围, 通过三组不同的实验条件(使用中断声源法和 MLS 脉冲积分法; 扩散体处在不同的位置; 扩散体旋转和静止)下混响时间测量的空间偏差和重复偏差的比较, 总结出测量的空间偏差和重复偏差较小的测量条件。

2 混响时间测量偏差

在混响时间测量中, 用多次测量同一条空间独立测量的衰变曲线得到的混响时间之间的标准差和多次测量所得混响时间的平均值的比值来表征测量的重复偏差; 用测得的各条空间独立测量的衰变曲线混响时间的平均值之间的标准差和所有空间独立测量的衰变曲线混响时间的平均值的比

收稿日期: 2010-01-07; 修回日期: 2010-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(10774075)资助项目

作者简介: 杨小军(1985-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为建筑声学。

通讯作者: 沈勇, E-mail: yshen@nju.edu.cn

值来表征测量的空间偏差。

令 T_{ijk} 是第 j 条空间独立测量的衰变曲线第 i 次测得的第 k 个 1/3 倍频程的混响时间。 \bar{T}_{jk} 是第 j 条空间独立测量的衰变曲线第 k 个 1/3 倍频程测量 N_D 次所得混响时间的平均值, 则:

$$\bar{T}_{jk} = \frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} T_{ijk} \quad (1)$$

$\hat{\sigma}_{jk}$ 是第 j 条空间独立测量的衰变曲线第 k 个 1/3 倍频程测量 N_D 次所得混响时间的标准差:

$$\hat{\sigma}_{jk} = \left[(N_D - 1)^{-1} \sum_{i=1}^{N_D} (T_{ijk} - \bar{T}_{jk})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

η_{jk} 表示第 j 条空间独立测量的衰变曲线第 k 个 1/3 倍频程测量 N_D 次所得混响时间的重复偏差:

$$\eta_{jk} = \hat{\sigma}_{jk} / \bar{T}_{jk} \quad (3)$$

η_k 是 N_m 条空间独立测量的衰变曲线第 k 个 1/3 倍频程测量 N_D 次所得混响时间的重复偏差的平均值为:

$$\eta_k = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \eta_{jk} \quad (4)$$

$\bar{\bar{T}}_k$ 是 N_m 条空间独立测量的衰变曲线第 k 个 1/3 倍频程测得的混响时间的平均值。

$$\bar{\bar{T}}_k = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \bar{T}_{jk} \quad (5)$$

$\hat{\sigma}_k$ 是 N_m 条空间独立测量的衰变曲线第 k 个 1/3 倍频程测得的混响时间平均值的标准差:

$$\hat{\sigma}_k = \left[(N_m - 1)^{-1} \sum_{j=1}^{N_m} (\bar{T}_{jk} - \bar{\bar{T}}_k)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

μ_k 表示 N_m 条空间独立测量的衰变曲线第 k 个 1/3 倍频程测量所得混响时间的空间偏差:

$$\mu_k = \hat{\sigma}_k / \bar{\bar{T}}_k \quad (7)$$

统计声学中推导混响时间公式时, 假设声场是扩散声场, 满足: (1) 声以声线方式以声速 c_0 直线传播, 声线所携带的声能向各个方向传递几率相同; (2) 各声线是互不相干的, 声线在叠加时, 它们的相位变化是无规的; (3) 室内平均声能密度处处相同。从波动声学的角度看, 实际声场是所有驻波模式叠加的结果, 驻波的存在必然导致声场的起伏, 使得室内平均声能密度不可能处处相同。只有当某一频带存在大量的驻波模式时, 大量驻波模式叠加可以把驻波效应“平均”掉, 使得该频带室内声场趋于均匀。对于矩形房间有以下公式:

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

其中 f 为中心频率, 单位: Hz; df 为频带宽度, 单位: Hz; c_0 为空气中的声速, 单位: m/s; V 为房

间体积, 单位: m^3 ; S 为房间壁面总面积, 单位: m^2 ; L 为矩形房间边线总长, 单位: m; dN 为驻波模式数。从式(8)可以看出, 在中心频率比较高、房间比较大的条件下才存在较大的驻波模式密度, 才能接近扩散场的假设^[5]。

对于尺寸为 7.37m×5.93m×5.24m 的矩形房间, 中、低频段模式数量较少而不满足扩散场的假设, 因此不同测量位置之间测得的混响时间存在差异, 即产生了混响时间测量的空间偏差。

当房间的壁面以及扩散体位置没有发生变化时, 室内声场的边界条件就不会发生改变, 声场驻波模式的分布就是固定的, 任意固定测量点所处的驻波的位置是不会发生变化的, 因此只要每次测量时模式激发的程度一样, 每次测量得到的混响时间的结果应该很接近, 根据前面重复偏差的定义, 这种条件下测量的重复偏差就会很小。可以看出测量的重复偏差的产生与声场扩散的程度无关, 只与模式的激发程度有关。

使用中断声源法测量混响时间, 测试信号为噪声信号, 如粉红噪声信号。噪声信号具有随机性, 在声源终止发声的时候, 房间声场模式的激发的程度也具有随机性, 因此每次测量混响时间时可能是在模式激发程度不同的条件下进行的^[2]。从波动声学的角度来看, 不同模式的混响时间是不一样的, 因此多次测量同一条空间独立测量的衰变曲线得到的混响时间就不一样, 即产生了混响时间测量的重复偏差。

3 测量条件

测量时传声器的位置如表 1 所示:

表 1 传声器位置坐标
Table 1 The location of microphone

传声器位置	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6
x/m	1.4	1.2	3.0	4.6	4.8	1.1
y/m	1.1	3.0	1.4	2.0	3.5	6.0
z/m	3.7	1.5	1.8	3.2	1.7	1.4

表 1 中坐标轴系以混响室的一个下墙角为原点, 分别以该墙的两条棱为 x 轴、y 轴、z 轴方向。声源置于混响室两个下墙角, 坐标分别是: (5.93m, 0, 0) 和 (5.93m, 7.37m, 0)。传声器在每个位置时都测量 10 组数据, 即每条空间独立测量的衰变曲线测量 10 组混响时间值。因此式(1)~(7)中 $N_D=10, 1 \leq i \leq 10, N_m=12, 1 \leq j \leq 12$ 。图 1 为南京大学混响室扩散体示意图。扩散体旋转时转速为 120 转/min。

有吸声材料时, 吸声材料固定在面积为 $10.7m^2$

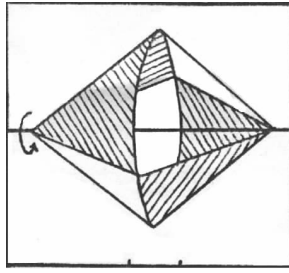


图 1 南京大学混响室扩散体

Fig.1 The diffuser in reverberation room of Nanjing university

的金属支架上。支架可以调节高度以获得不同深度的空腔。为减小支架侧面的声吸收,确保材料吸声系数测量结果的准确性,以槽钢为空腔的四壁,槽钢的拼接处用薄橡胶条压紧,保证接口处密封良好。吸声材料的吸声结构为 28/4 槽孔板+10mm 密胺+50mm 玻璃棉毡+100mm 空腔,在扩散体旋转与静止时的吸声系数如图 2 所示。

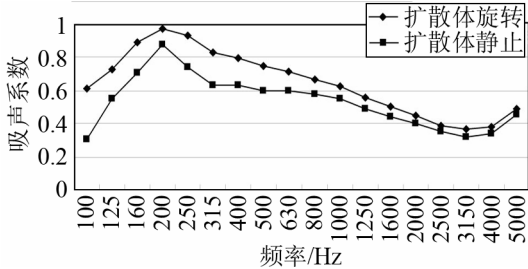


图 2 吸声材料的吸声系数

Fig.2 The absorption coefficient of absorptive material

4 实验结果及分析

(1) 扩散体静止时位置的影响

将扩散体分别置于位置 1 和位置 2,使用中断声源法分别测量混响室空场时和混响室有材料时的混响时间,其中位置 1 为扩散体自然静止时的位置,位置 2 在位置 1 的基础上绕旋转轴旋转 180° 得到。得到的测量的空间偏差和重复偏差如图 3~6 所示:

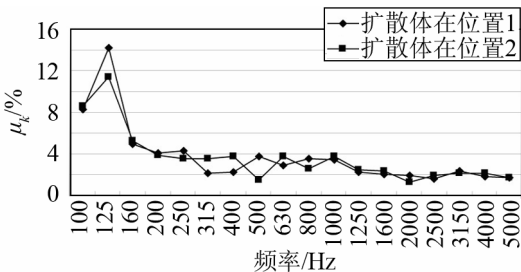


图 3 空场时扩散体在不同位置时的空间偏差 μ_k

Fig.3 Spatial variance μ_k at different diffuser positions without material

从图 3~6 可看出:扩散体在位置 1 和位置 2 时测量的空间偏差和重复偏差都起伏交错,基本一致,因此静止扩散体位置的变化对测量的空间偏差

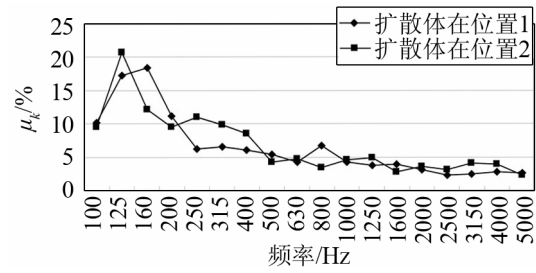


图 4 有材料时扩散体在不同位置时的空间偏差 μ_k

Fig.4 Spatial variance μ_k at different diffuser positions with material

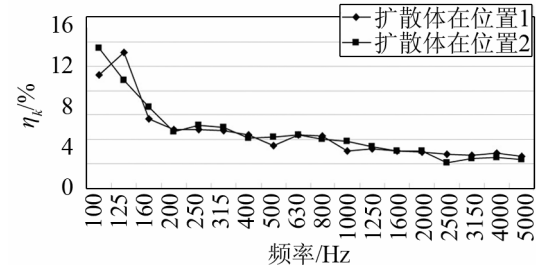


图 5 空场时扩散体在不同位置时的重复偏差 η_k

Fig.5 Ensemble variance η_k at different diffuser positions without material

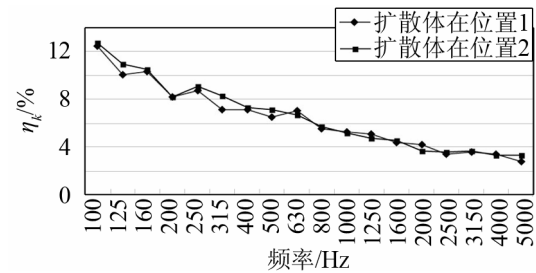


图 6 有材料时扩散体在不同位置时的重复偏差 η_k

Fig.6 Ensemble variance η_k at different diffuser positions with material

和重复偏差的影响较小。无论扩散体在什么位置,只是室内声场的边界条件发生改变,只能使得声场的模式分布发生改变,但无法有效地增加模式数目,无法增加声场扩散程度,所以不能减小测量的空间偏差。同样扩散体在不同位置不能改变模式激发的程度,因此不能减小测量的重复偏差。

(2) 使用不同测量方法的影响

在室内声场边界条件不变的条件下,分别用 MLS 脉冲积分法和中断声源法测量混响室空场时和混响室有材料时的混响时间,得到的测量的空间偏差和重复偏差如图 7~10 所示:

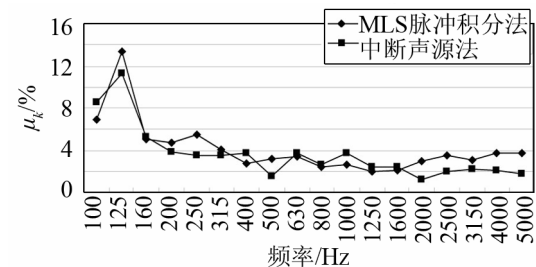


图 7 空场时两种方法的空间偏差 μ_k

Fig.7 Spatial variance μ_k at different methods without material

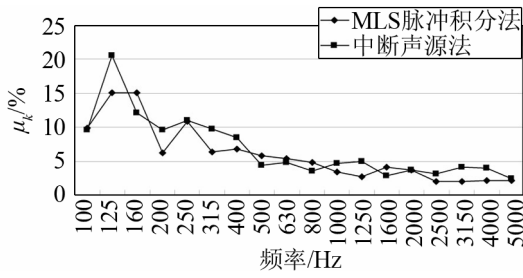


图 8 有材料时两种方法的空间偏差 μ_k
Fig.8 Spatial variance μ_k at different methods with material

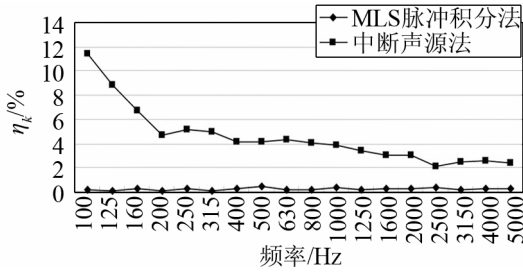


图 9 空场时两种方法的重复偏差 η_k
Fig.9 Ensemble variance η_k at different methods without material

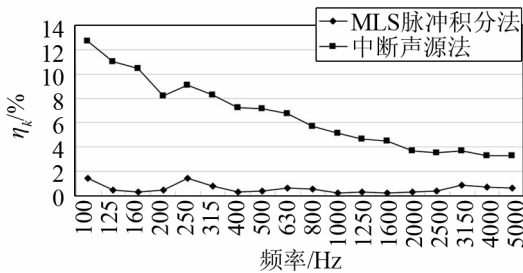


图 10 有材料时两种方法的重复偏差 η_k
Fig.10 Ensemble variance η_k at different methods with material

从图 7~10 可以看出：MLS 脉冲积分法可以获得很小的重复偏差，在获得较小测量的重复偏差方面优于中断声源法；使用两种方法得到的空间偏差较接近。实际上，MLS 脉冲积分法使用确定信号作为测量信号，测量时声场模式激发的程度不是随机的，因而能大大减小测量的重复偏差；但在声场边界条件不改变的条件下，两种测量方法都没有改变混响室的扩散程度，故两种方法得到测量的空间偏差相近，且都不能有效减小测量的空间偏差。

(3) 扩散体旋转的影响

在混响室中的扩散体静止和扩散体旋转的条件下，使用中断声源法分别测量混响室空场时和混响室有材料时的混响时间，扩散体静止时混响时间空间各点的标准偏差与王季卿教授 1984 年一文中的结果基本一致，得到的测量的空间偏差和重复偏差如图 11~14 所示。

从图 11 和图 14 可看出：扩散体旋转时混响时间测量的空间偏差要比扩散体静止时小，而且效果可以到达较高的频段。实际上扩散体旋转时打破了

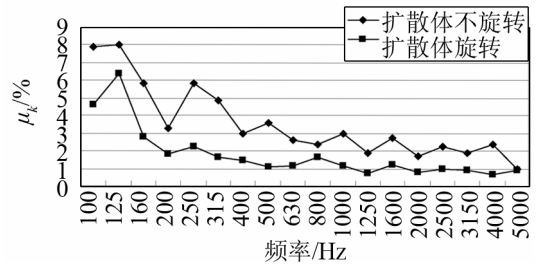


图 11 空场时扩散体旋转和静止时的空间偏差 μ_k
Fig.11 Spatial variance μ_k without material as diffuser rotating and not

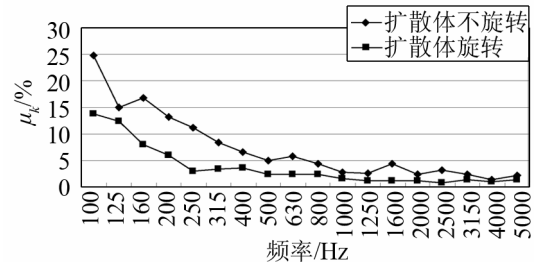


图 12 有材料时扩散体旋转和静止时的空间偏差 μ_k
Fig.12 Spatial variance μ_k with material as diffuser rotating and not

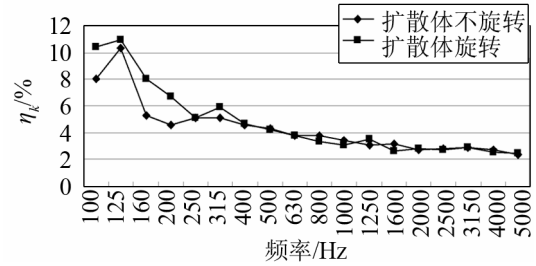


图 13 空场时扩散体旋转和静止时的重复偏差 η_k
Fig.13 Ensemble variance η_k without material as diffuser rotating and not

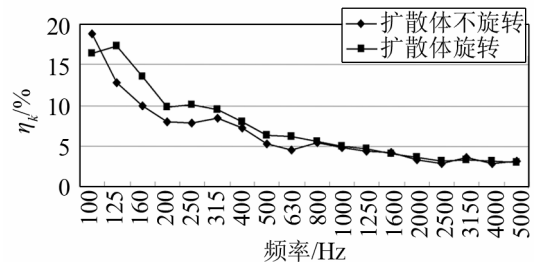


图 14 有材料时扩散体旋转和静止时的重复偏差 η_k
Fig.14 Ensemble variance η_k with material as diffuser rotating and not

原来稳定的驻波模式的分布，在扩散体旋转一个周期过程中的任何时刻室内声场都对应着不同的边界条件，边界条件不断变化，使得室内任意一点的声压起伏变化，尤其在低频段表现得比较明显，从而减小了测量对空间位置的依赖，增加了声场的扩散度，进而减小测量的空间偏差。

由图 13 和图 14 可见：在中、高频段，扩散体旋转与否对混响时间测量的重复偏差影响很小，在低频段，扩散体旋转时测量混响时间的重复偏差要比扩散体静止时略大。实际上，当扩散体旋转时，

在某个固定的传声器位置处低频段的声压会产生浮动,进而增大了该测量位置处测量的重复偏差。

5 结论

综上所述,得出结论如下:

(1) 静止的扩散体尽管位置不同,也不会有效改变测量的空间偏差和重复偏差。

(2) MLS 脉冲积分法可以有效减小测量的重复偏差,但不会有效减小测量的空间偏差。

(3) 在扩散体旋转的条件下测量,可以有效减小测量的空间偏差,但会略微增加低频段测量的重复偏差。

如果测试的混响室内扩散体能旋转,建议在扩散体旋转的条件下,使用中断声源法进行测量;如果扩散体不能旋转,建议使用 MLS 脉冲响应积分法进行测量。

测量过程中发现扩散体旋转的速度对测量的偏差也有影响,这方面工作目前正在进行中。

致谢:感谢孙广荣教授的悉心指导。

参 考 文 献

- [1] 同济大学声学研究室建筑声学组. 厅堂中混响时间测量的一些实际问题[J]. 声学学报, 1966, 3(3): 149-154.
Architectural Acoustics Group, Acoustics Laboratory, Tongji University. Some practical problems in the measurement of reverberation time in auditoria[J]. ACTA ACUSTICA, 1966, 3(3): 149-154.
- [2] Thomas W. Bartel, Edward B. Magrab. Studies on the spatial variation of decaying sound fields[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1978, 63(6): 1841-1850.
- [3] 王季卿, 顾樵国. 混响室中悬挂扩散板和试件面积对吸声测量结果的影响[J]. 声学学报, 1984, 9(6): 372-384.
WANG JiQing, GU QiangGuo. Dependence of sound absorption coefficients upon the area of suspended diffuser and acoustical material[J]. ACTA ACUSTICA, 1984, 9(6): 372-384.
- [4] 孙广荣, 吴启学. 混响室中低频测量的改进[J]. 电声技术, 2006, 258(10): 19-23.
SUN Guangrong, WU Qixue. Improvements of low frequency measurements in Reverberation Room[J]. Audio Engineering, 2006, 258(10): 19-23.
- [5] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufeng. Fundamentals of Acoustics[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001.