

一种声场空间特性测量系统的性能研究

赵跃英, 盛胜我, 赵松龄

(同济大学声学所, 上海 200092)

摘要: 室内声学测量中, 在声源重复发射声信号的同时, 将单个无指向性传声器缓慢而匀速地转动, 其测量结果等效于以转盘转轴为中心的圆形传声器阵列, 相应的测量系统简称为 RRS。通过消声室测量, 着重分析此测量系统在方向脉冲响应测量中的性能及主要影响因素。结果表明, 在满足传声器旋转半径大于 $1/4$ 信号波长的条件下, 系统可具有令人满意的方向分辨能力。

关键词: 室内声学; 方向性脉冲响应; 方向分辨能力

中图分类号: O42

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-01-0091-05

Research on performance of a spatial sound field measurement system

ZHAO Yue-ying, SHENG Sheng-wo, ZHAO Song-ling

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, Chian)

Abstract: The measurement system (called RRS) is composed of a repeatedly inspirited sound source associated with a slowly rotating microphone, and the measured result is equivalent to that of using a round microphone array in room acoustics measurement. Based on the test in an anechoic room, the performance of the system in directional impulse response measurements as well as the main affecting factors are analyzed in this paper. Results show that this system has enough directional resolution while the rotating radius of microphone is greater than $1/4$ wavelength of signal.

Key words: room acoustics; directional impulse response; directional resolution

1 引 言

精确细致地描述客观声场、系统地给出声场中各种相关因素及其与厅堂音质之间的关系是室内声学研究的必然趋势^[1-2]。由于单通道脉冲响应的测量只能得到室内声场随时间变化的特性, 不能得到声场的空间特性, 而只有方向性脉冲响应的测量才能满足现代室内声学及音质空间感研究的需求, 因此, 我们针对室内声学研究的特点, 在现有的众多声场方向性测量方法的基础上^[3-6], 结合目前计算机信号处理的优点, 提出了一种可用于现场测量的、简便实用的室内声学测量系统。

系统利用声源信号可完全重复的特点, 将单个无指向性传声器固定在转盘上, 在声源重复发射声信号的同时, 使转盘缓慢而匀速地转动, 通过对信号的后期处理, 修正传声器转动的影响, 从而得到一个等效于以转盘转轴为中心的圆形传声器阵列, 我们将上述借助可重复声源以及转动传声器所组成的测量系统简称为 RRS (System with repeatable source and rotating microphone)。

这种测量系统的主要特点是利用室内声学测量的可重复性, 将单个传声器在 NT 时间内的重复测量转化与为 N 个传声器阵列在时间 T 内的实时测量等效。由于一般传声器阵列中, 各个传声器的相位特征要求相互匹配, 而在 RRS 技术中使用的是同一个传声器, 上述匹配要求的技术困难可以自动消除; 一般传声器阵列中需要多通道输入, 而在 RRS 技术中只需要单通道输入, 这使测量系统大为简化, 切合

收稿日期: 2007-03-03; 修回日期: 2007-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(10574100)

作者简介: 赵跃英(1963-), 女, 上海人, 博士, 副教授, 室内声学。

通讯作者: 赵跃英, E-mail: zhaoyy@citiz.net

实际;与此同时,系统对室内声学空间特性的测量功能与一般的传声器阵列相当。

在前阶段的工作中^[7]已扼要地介绍了 RRS 的一些应用及数据处理方法,如根据声时差进行声源定位;结合“波束成形”技术提取微弱的早期反射脉冲信号以及特定方向的方向性脉冲响应函数等。本文则通过消声室测量,着重评价此测量系统在室内脉冲响应测量中对声场空间特性的测量能力,并分析其主要影响因素,为此系统在室内声场及厅堂音质空间感等研究领域的应用提供依据。

2 实验原理及方法

测量在 $16.0 \times 11.4 \times 6.6 \text{ m}^3$ 的消声室内进行。采用有效半径 $a_s=10\text{cm}$ 的十二面体无指向性扬声器作为声源,根据 RRS 的设计要求,接收传声器相对固定在转盘上,随转盘在水平面内转动,旋转平面设为 xy 面,设其与转轴的交点即测量中心为坐标原点 O ,垂直向上方向为 z 轴正方向。传声器与转轴的垂直距离 $R=20\text{cm}$,声源比中心点 O 稍高,与 O 点的距离为 $r_s=5\text{m}$, O 点与消声室各壁面的距离均大于 2m 。系统的采样率为 44.1kHz ,使用持续时间为 1s 、重复周期为 2s 、频率范围为 $10\text{Hz}\sim 8000\text{Hz}$ 的线性调频电信号激励声源,转盘转动周期 80s ,转动一周共有 40 个信号发射周期,结果相当于一个由 $N=40$ 个测点组成的传声器阵列。记各测点的声压信号为 $P_n(t)$ ($n=1, 2, \dots, 40$),分别将它们与激发扬声器的线性调频电信号进行相关运算,得到各测点的脉冲响应 $h_n(\tau)$ 。由于消声室壁面为强吸收,与直达脉冲相比,后续的反射声可以忽略不计。受扬声器响应的影响,直达脉冲呈现为持续时间小于 10ms 的脉冲波包。以时域上尖峰所在位置 τ_0 作为脉冲的到达时刻,由于每 10ms 传声器的移动仅为 0.04° ,因此,在对单个直达脉冲波包处理时,可将传声器旋转引起的误差予以忽略。

以 τ_0 为中心,取 $\Delta\tau \approx 10\text{ms}$ 的脉冲波包 $h_n(\tau)$ ($n=1, 2, \dots, 40$) 进行分析,根据通用的传声器阵列“波束成型”计算技术^[8-9],在声源远场的中心 O 处,相应空间任一特定方向 (θ, ϕ) 的方向脉冲响应函数为

$$h_0(\tau, \theta, \phi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n(\tau_0 + \tau_n) \quad (1)$$

其中 θ 为此特定方向与 z 轴的夹角, ϕ 为此特定方向在 xy 平面内的投影与 x 轴的夹角。上式中

$$\tau_n = (R/c) \sin\theta \cos(\phi - \phi_n) \quad (2)$$

为相应于此特定方向入射的声波,各个测点与中心 O 点间的相对声时差,其中 c 为声速, ϕ_n 为 τ_0 时刻各个测点的位置。

测量时脉冲信号由声源发出,经各测点接收并按上述方法处理,用脉冲响应的平方和表达脉冲波包的能量,从而得到系统测量到的声波沿 (θ, ϕ) 方向入射的能量大小。当 (θ, ϕ) 与声源方向一直时,测量值最大,定义最大能量方向与 $1/2$ 最大能量方向的夹角为系统能量空间曲线的半角宽度,并用此半角宽度表达 RRS 测量系统对入射声方向的分辨能力。半角宽度越小,系统方向分辨能力越大,对完全理想的测量系统,单声源入射时的半角宽度应趋近于零。

根据一般传声器阵列的测量原理,阵列的测点数 N 越大、分布范围 R 越大,其空间测量精度,即系统的方向分辨能力越高。但是,与普通的声源方向定位测量不同,室内声学中的声场空间特性具有两层含义:一是不同位置声场的能量分布特征,另一是同一位置入射脉冲的方向分布特征。由于 RRS 测量的结果表达了测点分布区域内声场特征的平均值,在非均匀场中,加大测点分布的区域也就减小了系统对空间声场能量随位置变化的测量精度,因此,传声器旋转半径的大小具有一定的限制。

3 方向分辨能力及其主要影响因素

3.1 测点数的影响

通过消声室实验,得到各个测点的脉冲信号 $h_n(t)$ ($n=1, 2, \dots, N$)。分别取测点数为 $N=40$ 、 $N=20$ 和 $N=10$,测得对应空间各方位 (θ, ϕ) 的全频带脉冲能量,图 1 为水平面内 $(\theta=\pi/2)$ 以最大值归一化后的结果,图中声源方向经坐标变换后置于 $\phi=0$ 。

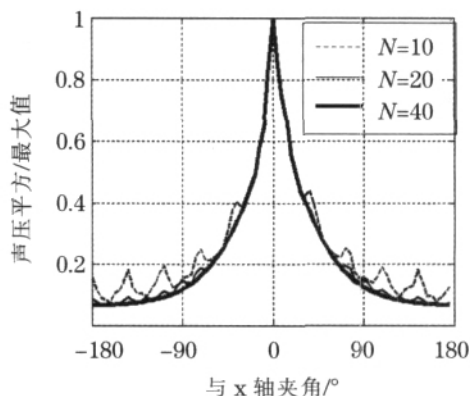


图 1 不同测点数的系统方向分辨能力(水平面内)
Fig.1 Directional resolution measured with different numbers of testing points (in horizon plane)

从图中可以看出, 表达测量系统方向分辨能力的半角宽度与测点的数量 N 无关, 不过测点越少, 能量空间曲线的旁瓣越明显, 主瓣与旁瓣的能量比也越小。在实际声场测量中, 当多个不同方向的脉冲同时入射, 测点数越小, 特定方向的脉冲能量受到其它方向的影响就越大, 方向脉冲的测量精度越低。

实际声场测量中, 测点数量并不是可以无限制增加的。在 RRS 系统中, 为了保证各个相应测点信号之间的相互独立, 每一重复周期的时间长度至少应大于房间的混响时间, 因此测点数量受到传声器转动速度与房间的混响时间之间关系的限制。从上述测量结果来看, 在一般室内测量中, 取重复周期 2s、共 40 个测点是合适的, 要进一步加大测点数则需要降低传声器的转动速度。

3.2 旋转半径的影响

影响系统方向分辨能力的另一个因素是测点分布的范围, 即传声器旋转半径。

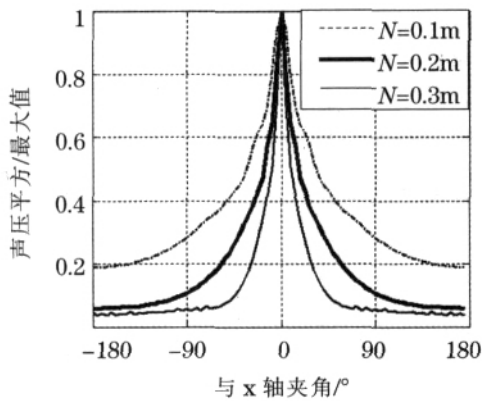


图 2 不同旋转半径的系统方向分辨能力(水平面内)

Fig.2 Directional resolution measured with different rotating radius of microphone (in horizon plane)

设有单个脉冲入射, 当待测方向与脉冲入射方向一致时, 各测点脉冲经时延修正后的到达时间相同, 声压叠加后其总能量近似为单测点能量的 N^2 倍。当待测方向偏离脉冲入射方向时, 各测点脉冲在时域上离散, 叠加后的总声压在幅度上得到抑制, 且随各脉冲离散程度的不同, 总能量介于单测点能量的 N^2 与 N 倍之间。对宽带脉冲来说, 旋转半径越大, 脉冲间的离散程度越大, 叠加后的能量越趋近于单测点能量的 N 倍, 系统的方向分辨率就大; 而对相同的旋转半径来说, 在进行频带滤波处理后, 频率越低, 脉冲间的离散程度越小, 系统的方向分辨率就越低, 因而系统的方向分辨率取决于传声器旋转半径与入射脉冲频率特性之间的相对关系。

分别取旋转半径 R 为 0.1m、0.2m 和 0.3m, 测得对应空间各方位 (θ, ϕ) 的全频带脉冲能量, 图 2 为水平面内 $(\theta=\pi/2)$ 以最大值归一化后的结果, 图中声源方向经坐标变换后置于 $\phi=0$ 。从图中可以看出, 加大传声器旋转半径, 即增大圆形阵列的半径, 可以明显地增大系统的方向分辨能力。

不过, 虽然增大传声器旋转半径可以减小半角宽度, 但同时也增大了测量的空间平均范围, 过大的阵列半径不仅降低了能量随位置变化的测量精度, 而且在小房间测量时难以满足测点位于声源远场的条件。因此, 需要根据测量要求和条件适当选择。

与测点所在的水平面情况不同的是, 在竖直面内, 当 $\theta=0$ 时, 测量系统的方向分辨能力与水平面相当, 但随着 θ 角的增大, 其方向分辨能力降低, 也就是说在竖直面内, 分辨能力不是各向同性的, 还与入射波的方向有关。值得指出, 由于测量系统为平面阵列设计, 因此在竖直面内脉冲的能量关于 xy 平面镜面对称。

3.3 频带滤波的影响

将测量结果用中心频率为 f 的 $1/3$ 倍频程进行滤波, 以各自的声压平方和表达频带内的脉冲能量, 并以最大值进行归一化, 设传声器旋转半径为 R , 旋转一圈相应的总测点数为 N 。水平面内, 在与脉冲入射方向偏离 ϕ 角的待测方向上, 各测点间脉冲的最大声时差为

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{2R}{c} \sin\phi \quad (3)$$

相应的相位差为

$$\Delta_{\max} = 2\pi f \frac{2R}{c} \sin\phi \quad (4)$$

当 $R = \frac{\lambda}{4}$ 时, 测点信号叠加结果与 8 字形传声器相当, 即两个第一极小位于 $\phi = \pm 90^\circ$ 处。若加大半径 R , 极小值位置则向中央极大方向移动, 半角宽度相应减小, 因此我们将波长与 $4R$ 对应的频率作为测量系统的低频测量极限。

经消声室实测, 水平面和竖直面内, 不同倍频程内能量曲线的半角宽度分别由表 1 和表 2 表示。根据结果可知, 半角宽度随滤波频率的不同而不同, 频率越大, 半角宽度越小, 即系统的方向分辨能力越强。在旋转半径 $R=0.2\text{m}$ 的条件下, 500Hz 以上, 即旋转半径大于 $1/4$ 声波波长时, 半角宽度小于 0.62 弧度, 系统的方向分辨能力大于 8 字形传声器, 且声波频率越高, 系统的方向分辨能力越强。

表 1 水平面内方向分辨能力与滤波频率的关系

Table 1 Relationship between filtering frequency and directional resolution(in horizon plane)

中心频率/Hz	250	500	1000	2000	4000
半角宽度/rad	1.20	0.62	0.23	0.13	0.08

同样,在竖直平面 $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ 的范围内的测量结

果如表 2 所示。与表 1 对比后可知,其方向分辨能力明显比水平面内低,这主要由于测量时声源入射角 θ 接近 90° ,此时系统的分辨能力最弱。

表 2 竖直面内方向分辨能力与滤波频率的关系

Table 2 Relationship between filtering frequency and directional resolution(in vertical plane)

中心频率/Hz	250	500	1000	2000	4000
半角宽度/rad	1.5	0.9	0.6	0.4	0.2

3.4 扬声器响应的影响

由于扬声器的脉冲响应,实际发出的声信号不再与输入的电信号相同,声脉冲也不再是理想的 δ 脉冲,而是具有一定持续时间的脉冲波包,这不仅降低了系统的时间分辨能力,同样也降低了系统的方向分辨能力。

仍以 $R=0.2\text{m}$, $N=40$ 为例,理想全频带脉冲入射时计算机模拟实验得到的水平面内能量空间曲线的半角宽度为 0.11rad ,而实际全频带声脉冲入射时,由消声室测量得到的能量空间曲线的半角宽度为 0.35rad ,这主要是由于扬声器脉冲响应低频较强,降低了系统的测量精度。理论上为了得到更为满意的测量结果,可通过反卷积技术对原始测得的声压信号进行处理^[10],得到消除扬声器响应影响后的近似理想脉冲的、“真正的”脉冲响应函数,然后再使用“波束成型”法进行处理。图 3 为单脉冲入射条件下,扬声器响应的影响消除前后,空间各方位(θ ,

ϕ)的全频带脉冲能量空间曲线,消除扬声器响应影响后曲线半角宽度约为 0.10rad ,与理想脉冲状态一致。在实际测量中也可以考虑通过高通滤波,减小低频信号的影响,提高测量精度。

4 小 结

RRS 为根据室内声学的特点设计的可用于现场测量的、简便实用的测量系统。本文针对 RRS 测量系统,定义单脉冲入射时最大能量方向与 $1/2$ 最大能量方向的夹角为系统能量空间曲线的半角宽度,并用此半角宽度表达 RRS 对声波方向测量的主要性能,通过消声室测量及计算机处理,给出了系统的性能评价及分析,具体结果总结如下:

影响测量系统对入射脉冲方向分辨能力的因素主要有传声器的旋转速度、旋转半径、滤波频带及扬声器响应。

测点数越多,能量空间曲线主瓣与旁瓣的能量比越大,在实际室内测量中,不同方向入射声波之间的影响越小。但测点数量不仅受到计算机数据处理能力的限制,而且也受到传声器转动速度及房间混响时间的限制。从结果来看,在一般室内测量中,取 40 个测点数是合适的。

空间能量曲线的半角宽度随滤波频率的不同而不同,频率越大,半角宽度越小,系统的方向分辨能力越大。在满足传声器旋转半径大于 $1/4$ 信号波长的条件下,系统具有较高的方向分辨能力,高频段可视为强指向性测量系统;为了满足低频段的测量精度,需要加大传声器的旋转半径。

测量系统在垂直于 z 轴的水平平面内的测量性能各向同性;但在竖直平面 $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ 的范围内,其方向分辨能力随 θ 角的增大而减小。

扬声器脉冲响应的影响降低了实际测量时系统的方向分辨能力,可通过反卷积或滤波技术予以改善。

由于测点为 xy 平面对称分布,因此无法对此平面上方与下方空间加以区分,在实际测量中需要根据反射面(如顶面、地面)的具体位置,判断反射脉冲的确切方位。此问题已考虑通过双传声器立体阵列予以解决,相应的研究正在进行中。

参 考 文 献

- [1] 王季卿. 音乐厅音质设计进展述评[J]. 应用声学, 2003, 22(1): 1-7.
WANG Jiqing. Overview of the progress of concert hall acoustical design[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(1): 1-7.
- [2] Beranek L. L. Music, acoustics and architecture[M]. New

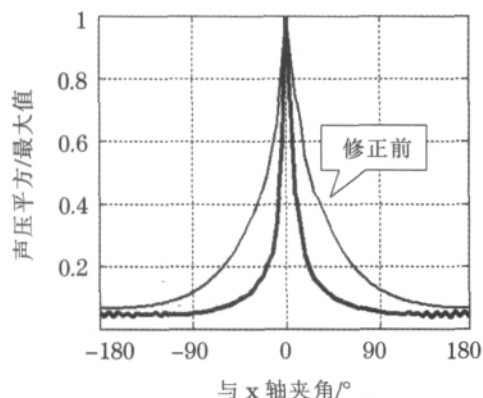


图 3 扬声器响应对方向分辨能力的影响(水平面内)

Fig.3 Directional resolution affected by loudspeaker response (in horizon plane)

- York: John Wiley and Sons, 1962.
- [3] Toshiyuki Okano. Relations. Among inter-aural crosscorrelation coefficient (IACCE), Lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 104(1): 255-265.
- [4] Yamasaki Y, Itow T. Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method[J]. J. Acoust. Soc. J. (E), 1989, 10: 2.
- [5] Hiroyuki Okubo, Masamichi Otani. A system for measuring. The directional room acoustical parameters[J]. Applied Acoustics, 2001, 62: 203-215.
- [6] Govera B N. Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields. J. Acoust. Soc. Am., 2002, 112(5): 1980-1991.
- [7] 赵跃英, 盛胜我, 赵松龄. 一种可作为声源定位与声场空间特性分析的测量系统[J]. 声学技术, 2006, 25(2): 129-133.
ZHAO Yueying, SHENG Shengwo, ZHAO Songling. A measurement system for localization of sound Source and analysis of spatial information of sound field[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(2): 129-133.
- [8] Marinus M. Boone Niels Kinneging. Two-dimensional noise source imaging with a T-Shaped microphone cross array. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108(6): 2884-2890.
- [9] 林志斌, 徐柏龄. 基于传声器阵列的声源定位[J]. 电声技术, 2004, 5: 19-23.
LIN Zhibin, XU Bailin. Sound source localization based on microphone array[J]. Audio Engineering. 2004, 5: 19-23.
- [10] 赵跃英, 盛胜我. 室内声学测量中扬声器瞬态响应的影响及消除[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(9): 1252-1256.
ZHAO Yueying, SHENG Shengwo. Influence of loudspeaker impulse response and its elimination in room acoustical measurement[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(9): 1252-1256.