

一种可作为声源定位与声场空间特性 分析的测量系统

赵跃英, 盛胜我, 赵松龄

(同济大学声学所, 上海 200092)

摘要: 提出了一种由重复发射的声源配合缓慢转动的传声器组成的、等效于圆形传声器阵列的室内声学测量系统。阐述了这种测量系统的特点及其理论基础, 介绍了它在室内声场中若干涉及声源定位及声场空间特性测量等方面的应用, 并结合实例作了讨论。系统具有较强的适应性及实用性, 在室内声学测量中具有广泛的应用前景。

关键词: 室内声学; 传声器阵列; 声源定位; 方向性脉冲响应

中图分类号: O42 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2006)-02-0129-05

A measurement system for localization of sound source and analysis of spatial information of sound field

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

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

Abstract: A room acoustical system composed of a repeatable inspirited sound source and a slowly rotating microphone (RRS) is proposed which is equivalent to rounded microphone array. The principle and characteristic of this system is explained in this paper. Furthermore, the application of the system to localization of sound source and analysis of the spatial information of sound field is described. This system will be widely applied to room acoustical measurement due to its adaptability and practicality.

Key words: room acoustics; microphone array; sound source localization; directional impulse response

1 引言

室内声场与其时间特性和空间特性有关。经过半个多世纪的努力, 人们对声场时间特性的描述及评价方法已基本达成共识, 目前公认室内声学测量的主要任务就是获得房间的脉冲响应函数^[1], 广泛采用的方法是以计算机控制的声源, 输出自相关为 δ 函数的电压信号, 借助相关技术获得声脉冲信号。由于不能忽略声源系统把电信号转换为声信号时明显的滞后及拖尾现象, 因此曾提出借助反卷积技术消去声源脉冲响应函数的影响^[2]。近年来随着计

算机技术的飞速发展, 人们对声场特性的描述已不再局限于单测点脉冲响应函数, 诸如声源的空间定位、声场空间特性的分析等课题已成为当前室内声学研究的热点^[3]。

最简单的方法是使用指向性传声器测量声场空间特性, 其特性状如心形、8 字形等。这类测量虽然可以直接得到测点处某一方向入射的声压与时间的变化关系, 但受到指向性传声器性能的制约, 测量精度不够高^[4]。

另一种测量方法是基于声强测量的相关分析法^[5,6], 这是当前声场空间特性测量的主要方法之一。但是, 这种测量法最终得到的是某时间段平均声能流的方向和大小, 不能对不同方向同时到达的入射声进行识别, 而且其测量精度与普通的声强测量一样受到传声器的间距以及相位匹配精度的限制, 对

测量频率范围也存在较大的局限性。

还有一种多传声器组合的测量方法是传声器阵列法(即相控阵法)。这种方法首先对按一定规则排列的多个测点进行声压测量,然后再通过信号处理进行“波束成型”,最终可以得到任意方向声束的声压随时间变化的函数^[7-9]。这种方法具有较强的分析功能,能适应多种测量项目的要求,但其测量精度不仅受到传声器个数、空间分布范围及分布方法的限制,而且还受到传声器间相位匹配和定位精度等因素的影响,特别是它一般需要多通道输入的测量分析系统,在实际应用上受到很大的限制,降低了方法的实用性。

本文在前期工作的基础上,提出一种适用于室内声场测量的切实可行的测量系统。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,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。文中对这种测量系统(简称RRS)的特点及其理论基础作了阐述,对它在室内声学中若干涉及声源定位及声场空间特性测量等方面的应用作了具体介绍,并结合实例作了讨论。

2 理论分析

2.1 RRS 设计原理及特点

设声源是由微机生成的可重复数字化信号激励,记重复周期为 T ,激励信号采用常用的调频或噪声信号,信号的持续时间小于 $T/2$ 。适当选择周期 T 的长度,以保证在不同周期内室内声场完全相同,且相邻周期内不会相互混迭。

声场中的声信号由一个固定在转盘上的无指向性测量传声器接收,记传声器与转轴的垂直距离为 R ,垂点记为 O ,在声源重复发射声信号的同时,使转盘缓慢而匀速地转动,且保证在整数 N 倍的时间 NT 内,转盘刚好转过一周。这时传声器相应地沿着以 O 为圆心、 R 为半径的圆周上转过 2π 弧度。将 NT 时间内连续测得的数据分段,可得 N 个持续时间为 T 的声信号 $P_n(t)$ ($n=1, 2, \dots, N$),所得的结果等效于圆周上均匀分布的 N 个传声器组成的阵列实时测量所接收到的声信号。

这种由重复发射配合转动传声器所组成的系统进行测量的技术可简称为 RRS 测量技术。它的基

本特点是:将单个传声器在 NT 时间内的重复测量转化为 N 个传声器阵列在时间 T 内的实时测量。值得强调的是,一般传声器阵列中,各个传声器的相位特征严格要求相互匹配,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,切合实际,具有较强的实用价值。

2.2 基本关系式

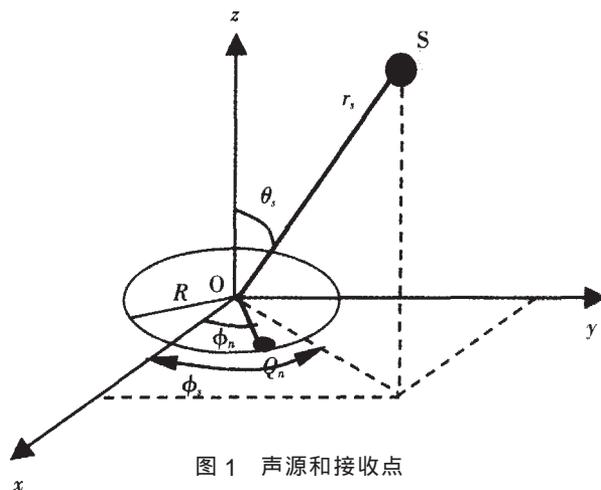


图1 声源和接收点

坐标系如图1所示。圆形传声器阵列中心 O 为原点,阵列处在 xy 坐标面上, z 轴垂直向上。记声源 S 与原点 O 间的距离为 r_s ,矢径 OS 与 z 轴的夹角为 θ_s ,其 xy 平面内的投影与 x 轴的夹角为 ϕ_s ,第 n 个测点 Q_n 与转轴的距离为 R ,矢径 OQ_n 与 x 轴的夹角为 ϕ_n 。

设 $r_s \gg R$,以中心点 O 作为参考,从声源发出的声波到达 Q_n 的声程差近似为

$$d_n = R \sin \theta_s \cos(\phi_s - \phi_n) \quad n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

记声速为 c ,相应的声时差为

$$\tau_n = (R/c) \sin \theta_s \cos(\phi_s - \phi_n) \quad n=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

激励声源发声的电压信号为 $e(t)$ ($t \geq 0$),其自相关函数近似为 δ 函数。声源的脉冲响应为 $h(t)$ ($t \geq 0$),声源辐射面上的声压信号为

$$P_s(t) = e(t) \otimes h(t) \quad (3)$$

其中 \otimes 表示卷积运算。设声源为无指向性球面声源,球面半径为 a_s ,声压信号以球面波的形式向外传播,设 $t=0$ 时,球面波波前在声源表面,由此得测量中心 O 点的声压为

$$P_o(t) = P_s(t - \tau_0) \cdot a_s / r_s \quad (t \geq \tau_0) \quad (4)$$

其中 τ_0 为声波由声源到达 O 点的延迟时间,即

$$\tau_0 = (r_s - a_s) / c \quad (5)$$

测点 Q_n 处的声压相应为

$$P_n(t) = P_0(t + \tau_0) \cdot r_s / (r_s - d_n) \quad n=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

由于在测量周期 T 内转盘缓慢转动, 测点位置随时间略有所变化, 即上式中 τ_n 随时间略有改变。

记转盘转动的角速度 $\Omega = \frac{2\pi}{NT}$, 设 $t=0$ 时第一个测点

Q_1 处在 x 轴上, 则式(2)中的 Q_n 为

$$Q_n = \Omega t + 2\pi(n-1)/N \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

将 $P_n(t)$ 与激励信号 $e(t)$ 进行相关运算, 根据 $e(t)$ 的自相关为 δ 函数的特性, 由式(3)、(4)得 O 点的脉冲响应函数为

$$h_0(\tau) = h_s(\tau - \tau_0) \cdot a_s / r_s \quad (t - \tau_0) \quad (8)$$

由于声源脉冲响应 h_s 具有尖峰特性, 因此可以由上式准确确定延迟时间 τ_{00} 。

同样, 将 $P_n(t)$ 与激励信号 $e(t)$ 进行互相关运算后, 由式(6)、(8)近似可得

$$h_n(\tau) = h_s(\tau - \tau_0 + \tau_n) \cdot \frac{a_s}{r_s - d_n} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

由此可得相应的延迟时间 $(\tau_0 - \tau_n)$ 。

值得指出, 在 t 时域内, 声压信号 $P_n(t)$ 具有相当长的持续时间, 在这期间内测点 Q_n 会有一定的角位移, 从而使它与中心点 O 的信号 $P_0(t)$ 并不完全相似。式(9)近似成立的理由为: 对 t 时域内的声压信号作相关处理后, 在 τ 时域内从声源发出的声信号已经转化为持续时间很短的声脉冲, 在它掠过传声器阵列的瞬间, 可以将阵列视为暂时“凝固”不动, 由式(7)决定测点 Q_n 位置的时间 t 应取中心点 O 的延迟时间 τ_0 。

2.3 应用 RRS 技术的理论基础

采用 RRS 测量技术可获得的原始信息是: N 个测点实时测量得到的声压信号 $P_n(\tau)$ 及相应的脉冲响应函数 $h_n(\tau)$, 通过灵活运用传声器阵列中的一些成熟的分析技术, 例如根据时间差进行声源定位、结合相控阵“波束成形”分析技术、搜索或加强特定方向传播的声波等就可以充分发挥它在室内声学测量中的作用。

3 若干应用的可行性分析

3.1 声源定位及直达声信号的分离

现场测量时, 直达声信号受到室内各个壁面反射信号的干扰, 其空间定位及分离的实际操作方法

为: 先由 $h_n(\tau)$ 提取相应的声延时 $(\tau_0 - \tau_n)$; 再对 N 个测点取平均得出 τ_0 值, 由式(5)可确定声源 S 的距离 r_s 为

$$r_s = c\tau_0 + a_s \quad (10)$$

取 $\tau = \tau_0$ 代入式(7)得 ϕ_n , 将式(2)表征的 N 个关系式分别乘以 $\cos\phi_n$ 和 $\sin\phi_n$ 后迭加, 并记

$$A = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \tau_n \cos\phi_n \quad (11a)$$

$$B = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \tau_n \sin\phi_n \quad (11b)$$

可以导出 θ_s 与 ϕ_s 分别由下列关系式决定

$$\sin\theta_s = \frac{C}{R} \sqrt{A^2 + B^2} \quad (12a)$$

$$\tan\phi_s = B/A \quad (12b)$$

中心点 O 处的直达脉冲可由式(8)求出

$$h_0(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n(\tau - \tau_n) \cdot \frac{r_s - d_n}{r_s} \quad (13)$$

这样得到的直达脉冲可以有效地抑制反射声的干扰。

如果进一步由式(8)得到 $r=r_s$ 处声源的脉冲响应 h_s , 然后再采用反卷积技术对原始声压信号进行处理, 得到消除 h_s 影响后的声压信号 $P_n(t)$, 相关运算后即可得到“真正的”近似 δ 函数的房间脉冲响应函数 h_n 。

3.2 室内早期反射声信号的提取与测量

本项应用在现场测量中具有重要价值。先在时域中初步分析单个测点的脉冲响应函数 $h_n(t)$, 此时直达声和较强的早期反射声为离散的尖脉冲, 可以方便地加以辨认和区分, 并根据声信号的强弱区别对待。对较强的离散反射声, 将其看成为由不同像声源传播而来的直达声, 再采用上一种分析方法, 分别求出它们的距离、方位角, 并可进一步求出它们与直达声的相对幅度。

对早期的来自强吸声面或散射体的较微弱的反射声, 声信号受到背景噪声的严重干扰, 无法直接得到准确的声延时, 此时应结合相控阵的信号分析技术, 对空间各个方向进行“波束成型”, 通过搜索技术提取反射声。具体方法为:

适当选定某一大于 $2R/c$ 的时间段, 确定其中心声延时 τ_0 并由式(7)求得 ϕ_n , 由式(2)对空间不同的方位角 (θ_s, ϕ_s) 分别求出相应的 τ_n 值, 忽略声程差 d_n 对幅度的影响, 分别得到中心点 O 处相应的脉冲

$$h_0(\tau_0, \theta_s, \phi_s) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n(\tau_0 - \tau_n) \quad (14)$$

在空间搜索 h_0 的极大值, 即可确定像声源的确切方位 (θ_s, ϕ_s) 及其位置。

根据像声源的空间坐标 (r_s, θ_s, ϕ_s) , 结合房间内反射面或散射体的具体位置, 去除声传播距离的影响, 即可获得反射面吸声系数和散射系数等重要信息。

3.3 室内中后期反射声的分析

对于中后期反射声, 其信号微弱且数量庞大, 此时也可用“波束成型”的方法进行处理。设在中心声延时为 τ_0 的时间段内有一系列沿不同方向传播的平面脉冲波掠过传声器阵列, 与上述微弱反射声的处理方法类似, 先求出各测点的 ϕ_n , 再针对空间特定方位由式(7)得到相应的 $h_0(\tau_0)$ 值。此时, 除了沿该特定方向及其邻域传播的脉冲波外, 沿其它方向传播的声波对 $h_0(\tau_0)$ 的贡献都被有效地抑制而可以忽略不计。

使 τ_0 沿时间轴滑动, 相应得到的 $h_0(\tau)$ 即可视为沿特定方向的房间方向性脉冲响应函数。方向性脉冲响应函数可以细致地反映房间内声传播的空间特性, 在室内音质评价等领域具有重要的应用前景。

4 测量实例

测量在 $16.0\text{m} \times 11.4\text{m} \times 6.6\text{m}$ 的消声室内进行, 采用有效半径为 $a_s=10\text{cm}$ 的无指向性球面声源, 接收传声器相对固定在转盘上, 与转轴的垂直距离为 20cm , 采样率为 44.1kHz 。图2为水平测量面上声源和测点位置的示意图, 竖直方向声源比测点高 0.7m , 测量中心 O 点与壁面 1、2 的距离分别为 2.5m 和 2.9m , 使用持续时间为 1s 、重复周期为 2s 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, 对应各测点的声压信号记为 $P_n(t)$ ($n=1, 2, \dots, 40$), 经相关运算后得到的各测点的脉冲响应函数为 $h_n(\tau)$ 。

三个典型测点位置的脉冲响应函数 $h_n(\tau)$ 以最大直达脉冲进行归一化后的实测结果如图 3 (a) 所示。由 40 个测点的声延时 $(\tau_0 - \tau_n)$ 分离出各测点相对于中心 O 的声延时 τ_n ($n=1, 2, \dots, N$) 后, 按照上述直达声测量定位的分析方法, 最终得到声源位置: $r_s=3.2\text{m}$, $\phi_s=9.6^\circ$; $\theta_s=77.1^\circ$; 中心点 O 处的脉冲响应函数 $h_0(\tau)$ 归一化后如图 3 (b) 所示。

在消声室中, 反射声信号微弱, 不能在脉冲响应函数中辨别, 也无法用声时差法进行分析, 应采用上

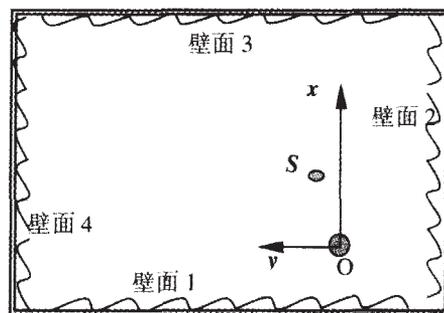


图2 消声室测量平面示意图

Fig.2 Sketch floor map of anechoic measurement

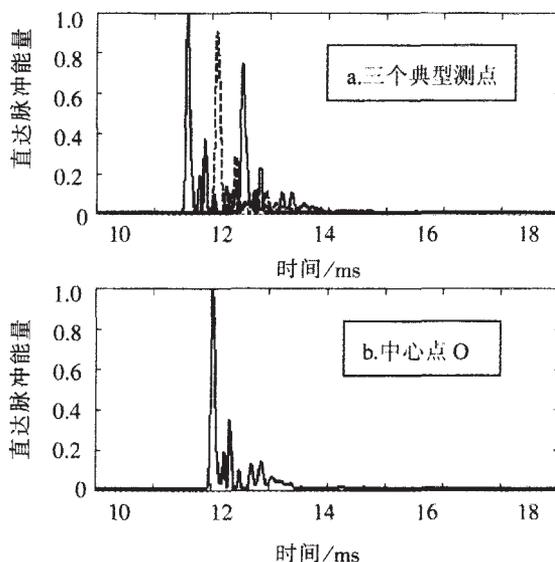


图3 不同测点的直达脉冲

Fig.3 Impulse responses of direct sound at different receiver point

述第二种针对微弱反射声信号的处理方法, 在空间各个方向进行“波束成型”, 并搜索 $h_0(\tau)$ 的极大值以确定反射脉冲。

图 4 为搜索到的两个典型反射脉冲信号并以最大直达脉冲进行归一化的图形。根据脉冲到达的时间和方位, 结合测量系统与消声室具体情况, 可以判断两反射脉冲分别对应于壁面 1 和壁面 2 的反射。对应壁面 1 的反射脉冲的像声源位置为: $r_s=8.2\text{m}$, $\phi_s=175.4^\circ$; $\theta_s=85.0^\circ$; 对应壁面 2 的反射脉冲的像声源位置为: $r_s=7.3\text{m}$, $\phi_s=-60.6^\circ$; $\theta_s=84.4^\circ$; 与实际情况相符。

由于消声室中反射信号微弱且较单纯, 上述图形中的响应函数 $h_0(\tau)$ 均以归一化后的平方值来表达, 对声源系统响应的影响也未予以消除。图 4 中的 $h_0^2(\tau)$ 比直达脉冲低了近 4 个数量级, 作距离修正后仍保持为低 3 个数量级, 这一结果表明, 实测到

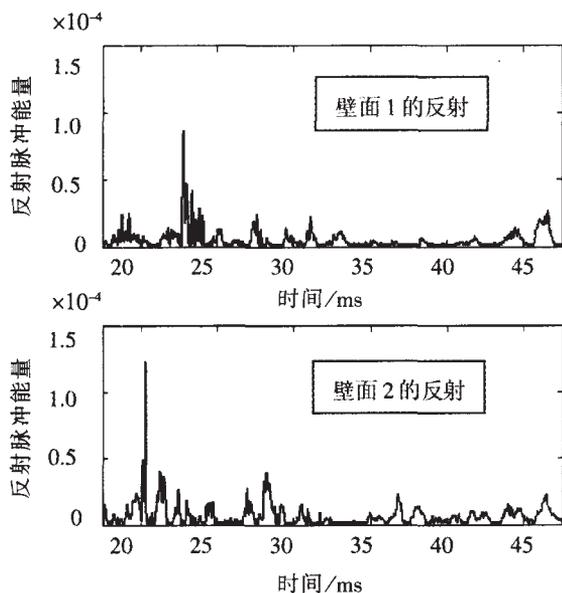


图4 壁面的反射脉冲

Fig.4 Reflected impulses from walls

的壁面吸声系数在 0.99 以上。

5 结论

综上所述,RRS 测量系统使用相对固定在转盘上的单个传声器,将 NT 时间内的重复测量转化为 N 个传声器阵列在 T 时间内的实时测量,其特点总结如下:

(1) 根据声时差进行声源定位,可以精确地确定声源方位及其脉冲响应,分离直达脉冲以及较强的早期反射脉冲。结合相控阵“波束成形”分析技术,用搜索或加强特定方向传播的声波的方法,可以有效地抑制其它方向反射声和噪声的干扰,提取出微弱的早期反射脉冲信号。通过进一步的数据处理,即可获得反射面吸声系数和散射系数等重要信息。

(2) 同样利用“波束成形”等分析技术,可得到特定方向的房间方向性脉冲响应函数,从而可以细致地反映房间内声传播的空间特性,在室内音质评价等领域具有广泛的应用前景。

(3) 与一般的声强测量方法相比,RRS 系统的测量可以得到特定方向入射脉冲随时间变化的函数关系,而不是平均声能流。与通常的传声器阵列测量方法相比,RRS 测量系统消除了传声器定位以及相

位匹配的技术困难。

总之,RRS 系统保证了测量精度,具有较强的适应性及实用性,在室内声学测量中具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 赵跃英, 盛胜我, 刘海生. 室内声学测量中数字化声源性能的分析[J]. 声学技术, 2003, 22(3): 143-146.
ZHAO Yueying, SHENG Shengwo, LIU Haisheng. Investigation of characteristics of modern digital sound sources for room scoustical measurement[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(3): 143-146
- [2] 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. The influence of loudspeaker response and its elimination in room acoustical measurement[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(9): 1252-1256.
- [3] 莫方朔. 音乐厅中后期反射声对空间感的影响[J]. 声学技术, 2002, 21(2): 84-87.
MO Fangshuo. The effect of late reflections on spatial impression in concert halls[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(2): 84-87.
- [4] Hiroyuki Okubo, Masamichi Otani, A system for measuring the directional room acoustical parameters[J]. Applied Acoustics 2001, 62(1): 203-215.
- [5] Frank J Fahy. Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals[J]. J Acoust. Soc Am, 1997, 62(4): 1057-1059.
- [6] Farina A, Tronchin L. Relation between listener envelopment and late arriving energy in concert[R]. Japan: A Satellite Symposium of ICA2004.
- [7] Govera B N, Ryan J G, Stinson M R. Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields[J]. J Acoust Soc Am, 2002, 112(5): 1980-1991.
- [8] Juha Backman. Microphone array beam forming for multi-channel recording[R]. Brasserie. AES 114th. 2003. P5721.
- [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.