

单传声器实现声场空间特性测量的研究

赵跃英, 盛胜我, 赵松龄

(上海同济大学声学所, 上海 200092)

摘要: 提出了一种测量室内声场空间特性的方法, 测量系统由一个可重复发射的声源配合装置在缓慢转动平台上的接收传声器组成。阐述了借助此测量系统进行入射脉冲空间分布的测量方法及典型的实验结果。实验表明, 根据测量需求选择适当的空间计权因子, 能够实现各种指向性传声器的等价测量, 从而进一步获得反映声场空间特性的各种客观参量。

关键词: 室内声学; 方向性脉冲响应; 声场空间特性

中图分类号: O42

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-06-1205-04

Research on measurement of special features of sound field using single microphone

ZHAO Yue-ying, SHENG Sheng-wo, ZHAO Song-ling
(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A system for measuring space features of sound field is proposed. The system consists of a repeatable inspiring sound source associated with a microphone fixed on a slowly rotating platform. The measurement method and typical experimental results of time and space distribution of sound impulses are demonstrated. It is shown that the measurement results after weighting are equivalent to those with all kinds of directional microphones. And various parameters of describing special properties of sound field can be obtained.

Key words: room acoustics; directional impulse response; space properties of sound field

1 引 言

在室内声学研究中, 评价声场的客观参量可以分为两类: 一类为声场的时间、能量评价参量, 如混响时间、早期衰变时间、初始延迟时间间隔、相对强感以及早后期声能比等。其中, 单通道的脉冲响应测量方法已较为成熟, 并得到了广泛的应用; 另一类为声场的方向性空间评价参量, 如声场扩散因子、侧向反射声能比以及耳间互相关因子等。相应研究还处于发展阶段, 正受到越来越多的关注, 并逐渐成为建筑声学研究的热点^[1-3]。

通常, 声场空间特性的测量方法是得到特定方向

的入射能量或声场的方向性脉冲响应函数。方向性脉冲响应函数不仅反映了声场中到达脉冲的能量、时间、频率特性, 同时还包含了脉冲入射方向的信息, 进一步可以得到关于声场扩散、能量流动等物理特性, 也可以从中得到与音质空间感相联系的客观参量。

简单的得到方向性脉冲响应的方法是使用各种指向性传声器进行直接测量, 用于测量的指向性传声器有心型、8 字型、Y 字形、抛物反射型等。虽然这种测量方法原理简单、操作方便, 但总体上精度不够。

Farina 在双通道声强测量的基础上, 使用靠近的 5 个个无指向性传声器组合, 其测量结果为测点处的入射至三个相互垂直方向的单位面积的净声能通量^[4], 如今这种三维的声强测量法已成为一种常用的脉冲能量入射方向的测量方法。

传声器阵列法是以一定规则排列的多个测点, 通过信号到达各测点的时间差进行声源定位或使用相位修正以及计权叠加进行“波束形成”^[5]。Gover

收稿日期: 2007-01-25; 修回日期: 2007-03-25

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, 研究方向: 室内声学。

通信作者: 赵跃英, E-mail: zhaoyy@citiz.net

提出使用 32 个无指向性传声器组成的空间球形阵列,用鹰噪声序列作为声源电信号,通过信号处理得到三维空间 60 个方向的方向性脉冲响应^[6],从而可以进一步研究声场的空间特性。但由于传声器间相互匹配、定位及多通道测量系统等问题,传声器阵列的测量方法在室内声学测量中,特别是现场测量中的应用一直受到很大的限制。

针对室内声场测量的特点,本文提出使用一个可重复发射的声源以及固定在转动平台上的无指向性测量传声器,实现传声器阵列的测量。这种重复发射配合转动传声器所组成的系统简称为 RRS。文献^[7]扼要地介绍了 RRS 的一些应用及数据处理方法,本文着重阐述通过 RRS 技术的应用进行室内声场中方向性脉冲响应以及关于音质空间感客观参量的测量方法,为音质评价中空间感的进一步研究打下基础。

2 测量系统的设计要点

记激励信号的重复周期为 T ,信号的持续时间小于 $T/2$,适当选择周期 T 的长度使其为室内混响时间的 2 至 3 倍,以保证相邻周期内信号不会相互混迭,但同时须满足在不同周期内声场完全相同。选用调频信号作为输入的电信号,因为调频声波可视为频率随时间缓慢变化的谐波,不仅信号处理方便,而且其频率范围可严格控制,在对接收声信号进行处理时可保证排除混迭效应的干扰。

直角坐标系的选取如图 1 所示,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 xOy 平面内的投影与 x 轴的夹角为 ϕ_s 。声场中的声信号由一个固定在转动平台上的无指向性测量传声器接收。使转轴与 z 轴重合,传声器在 xOy 平面内绕 O 点转动,记转动半径为 R 。在声源重复发射声信号的同时,使转动平台缓慢而匀速地转动,且保证在整数 N 倍的时间 NT 内,转动平台恰转过一周,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 $p_n(t)$, ($n=1, 2, \dots, N$), 所得的结果等效于缓慢转动的、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。记各个测点为 Q_n ,第 n 个测点的矢径 OQ_n 与 x 轴的夹角为 ϕ_n 。

设声源 S 在 $t=0$ 时向外发射球面波。将测点 Q_n 处接收到的声压信号 $p_n(t)$, ($n=1, 2, \dots, N$) 作相关处理后可得相应的脉冲响应函数 $h_n(\tau)$, 其中 τ 为

声波从声源 S 传播至测点 Q_n 处的声延时。

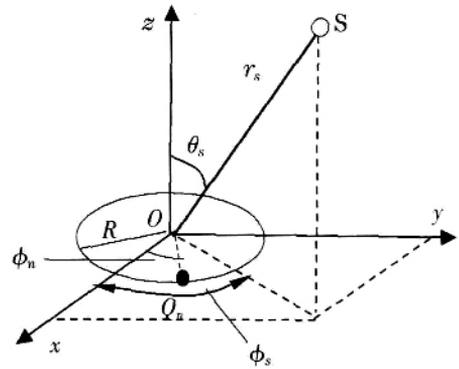


图 1 测点和坐标系示意图

Fig.1 Receiver points and coordinat

通过对信号的后期处理,修正传声器转动的影响,将单个传声器在 NT 时间内的重复测量转化为 N 个完全匹配的传声器组成的阵列在时间 T 内的实时测量,从而可以进一步应用传声器阵列中的一些成熟的分析技术。

3 实际应用结果及其分析

3.1 影响系统性能的因素

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和旋转半径、频带滤波及扬声器响应等。相关测量在消声室内进行,主要结论总结如下:

根据 RRS 数据处理方法,传声器的转速过大,传声器位置随中心时间 τ_0 的变化过快,不利于对传声器转动影响的修正;但转速过小,测量时间过长,则不利于测量结果的稳定。实验中选取的转速为 80s/转,每 10ms 传声器的移动为 0.04° ;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。

根据阵列测量原理,测点数越多,其空间指向性曲线的主瓣与旁瓣能量比越大,在实际室内测量中,表现为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。

系统的空间方向分辨率随滤波频率的不同而不同,频率越大,系统的方向分辨能力越大。实验表明,在满足传声器旋转半径大于 $1/4$ 信号波长的条件下,系统具有较高的方向分辨能力,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。

3.2 方向性脉冲响应的测量

实际测量在 $5.13 \times 2.75 \times 2.86\text{m}^3$ 的矩形房间内进行。房间门窗关闭, 侧墙和顶面铺有吸声材料, 混响时间较短。测点距地面 1m, 传声器的旋转平面为水平面(设为 xOy 平面), 旋转半径为 20cm, 声源位置略高于测点。

以测量中心 O 为球心在空间做一球面, 将球面按相等立体角分割成 K 个相等的部分, 任一立体角 Ω_k 以其中心方位角 (θ_k, ϕ_k) , ($k=1, 2, \dots, K$) 表达, 当声波传播方向落在 Ω_k 范围内时, 视作与沿中心方位角方向 (θ_k, ϕ_k) 传播等效, 即将入射到测点中心 O 处的所有脉冲视为 K 个离散的波束。

现考察以特定方向 (θ_k, ϕ_k) 决定的第 k 个波束在中心 O 处产生的脉冲响应函数, 相应于此方向, 测点 Q_n 与中心 O 点间的相对声时差为

$$\tau_{nk} = (R/c) \sin\theta_k \cos(\phi_k - \phi_n) \quad (1)$$

其中, 若记 $\tau=0$ 时第一个测点的矢径与 x 轴的夹角为 ϕ_{01} , 转台转动角速度为 Ω , 有

$$\phi_n = \phi_{01} + \Omega\tau + 2\pi(n-1)/N \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

根据传声器阵列的“波束成形”技术^[8], 此方向的脉冲响应函数为

$$h_{\alpha k}(\tau, \theta_k, \phi_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n(\tau + \tau_{nk}) \quad (3)$$

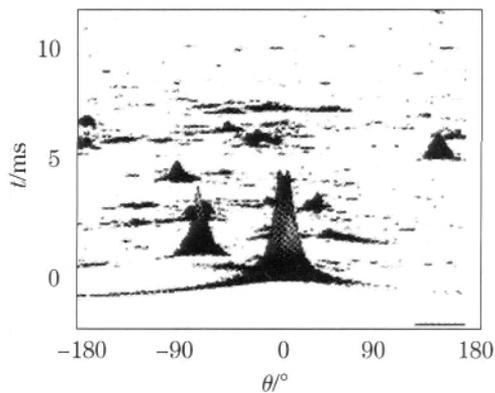


图 2 房间中 xOy 平面内早期脉冲分布图

Fig.2 Space distribution of early impulses in the room on xOy plane

方向性脉冲响应不仅可以分辨房间内各个脉冲到达的时间, 同时也可以分辨出脉冲到达的方向, xOy 平面内直达声以及早期反射声的到达时间与到达方向如图 2 所示, 图中水平坐标表达了脉冲到达的方向, 竖直坐标表达了脉冲到达的时间。实验中取 $K=10 \times 40$, 考虑到转盘每秒转过 4.5° ; 其相邻波束的夹角为 9° ; 因此, 对前 80ms 的计算结果暂未按式(2)做角度修正。

根据房间尺寸以及声源和接收点位置, 若只考虑镜面反射, 可以从理论上计算出各个壁面的反射

脉冲的到达时间和方向, 用最大值搜索的方法可以得到方向脉冲响应中的早期离散的反射脉冲, 将两者进行比较, 结果如表 1 所示。

表 1 早期反射脉冲与理论值的比较

Table 1 Comparison of the early impulses and its theoretical results

	τ/ms		$\phi/^\circ$		$\theta/^\circ$	
	理论	实验	理论	实验	理论	实验
直达脉冲	0	0	29.6	29.6	72.8	74
壁面(前)	8.3	/	12.6	/	82.2	80
壁面(后)	8.94	8.53	168	165	82.6	80
壁面(左)	4.70	4.79	59.8	56	79.9	80
壁面(右)	1.79	1.82	313	315	76.4	80
顶面	4.09	/	29.6	/	53.0	/
地面	3.38	/	29.6	29.6	50.0	42.0

由于实际测量中, 取直达脉冲到达时刻为时间零点, 并用直达脉冲的方向作为已知方向确定坐标, 因此直达脉冲结果一致。实际测量中, 前方壁面有窗, 造成散射, 反射脉冲无法辨认; 地面和顶面反射脉冲有一定的混叠, 无法分离, 但实际房间的顶面具有一定的吸声, 因此就将反射脉冲作为地面反射, 但由于不是单个波包, 到达时间难以判断; 从结果中也可看出, 水平面精度优于竖直面; 考虑到理论计算中所用的距离和尺寸的测量精度有限, 可以认为测量结果与理论值符合较好。

3.3 侧向入射的反射声能量

在大量不同方向的脉冲声波同时入射的情况下, 可将所有入射的脉冲声视为 K 个离散的波束, 并近似地认为同时落入不同立体角的脉冲互不相干, 满足能量叠加原理。特定方向传播的脉冲响应函数方值不能根据式(3)直接得出, 而是应该根据脉冲平方值误差最小的原则, 消除其他方向入射脉冲能量的影响后, 任一特定方向 (θ_k, ϕ_k) 方向脉冲响应的方值为

$$h_{\alpha k}^2(\tau, \theta_k, \phi_k) = \frac{1}{N(N-1)} \{ [\sum_{n=1}^N h_n(\tau + \tau_{nk})]^2 - \sum_{n=1}^N h_n^2(\tau + \tau_{nk}) \} \quad (4)$$

在 $\tau \sim \tau + \Delta\tau$ 时段内, 此入射脉冲波束的能量为

$$E(\theta_k, \phi_k) = A \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} h_{\alpha k}^2(\tau, \theta_k, \phi_k) dt \quad (5)$$

其中 A 为与媒质密度、声速、立体角分割方法等因素有关的比例常数。记指向性计权因子为

$$\begin{cases} Q_1(\theta_k, \phi_k) = \sin\theta_k \sin(\phi_k - \phi_s) & 0 < \phi_k - \phi_s < \pi \\ Q_2(\theta_k, \phi_k) = \sin\theta_k \sin(\phi_k - \phi_s) & \pi < \phi_k - \phi_s < 2\pi \\ Q_3(\theta_k, \phi_k) = \sin\theta_k \cos(\phi_k - \phi_s) & 0 < \phi_k - \phi_s < \pi \\ Q_4(\theta_k, \phi_k) = \sin\theta_k \cos(\phi_k - \phi_s) & \pi < \phi_k - \phi_s < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

以直达脉冲到达时刻为时间零点, 根据早期侧

向反射声能量因子的定义^[9],有

$$LFC = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |p_L(t) p_o(t)| dt}{\int_0^{t_2} p_o^2(t) dt} = \frac{\sum_{k=1}^K [Q_1(\theta_k, \phi_k) + Q_2(\theta_k, \phi_k)] E_2(\theta_k, \phi_k)}{\sum_{k=1}^K E_1(\theta_k, \phi_k)} \quad (7)$$

其中 t_1 和 t_2 分别取 5ms 和 80ms, E_1 为对应 $t_1 \sim t_2$ 时间间隔内的各入射脉冲波束的能量, E_2 为对应 $0 \sim t_2$ 时间间隔内的各入射脉冲波束的能量。

房间全频带早期侧向反射声能量因子 $LFC = 0.2193$ 。这一结果等价于置于 O 点的, 两最大值连线在 xOy 平面内, 且与声源位置矢量垂直的 8 字型指向传声器的测量等价。

3.4 其它入射声方向特征的物理量的获取

通过对各入射脉冲波束的能量的不同加权, 可以组成各种随时间变化的参量, 用来进行声场的描述。例如测点处左右声能比

$$LR = \frac{\sum_{k=1}^K Q_1(\theta_k, \phi_k) E(\theta_k, \phi_k)}{\sum_{k=1}^K Q_2(\theta_k, \phi_k) E(\theta_k, \phi_k)} \quad (8)$$

前后声能比

$$FR = \frac{\sum_{k=1}^K Q_3(\theta_k, \phi_k) E(\theta_k, \phi_k)}{\sum_{k=1}^K Q_4(\theta_k, \phi_k) E(\theta_k, \phi_k)} \quad (9)$$

将直达脉冲到达后的 5ms~80ms 的早期方向脉冲用 1/3 倍频程滤波, 再根据式(4)至(11)得各频段的参量, 结果如表 2 所示。

表 2 早期不同方向入射脉冲能量比
Table 2 Energy ratio of early impulses in different directions

	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
LR	0.86	0.97	1.17	0.89	1.07
FR	0.88	0.97	1.02	1.10	0.82

可见, 结合不同的处理方法, 系统可以得到完整的声场空间信息, 并可进一步根据需求获得各种客观参量。这是无法通过一般的 8 字型指向传声器的测量得到。

4 结 论

本文利用室内声学测量可完全重复的特性, 提出使用沿圆周连续移动的单个无指向性传声器实现

传声器阵列的测量, 在同一中心 O 周围接收 n 个测点的声压信号及其脉冲响应, 从而可以对测点处声场的时间、空间特征进行更进一步的研究。

通过 RRS 声强测量的应用, 并用离散的声束表述连续的空间声场, 可以得到中心 O 点处各脉冲声束的入射时间及入射方向的分布。

根据测量需求选择适当的空间加权因子, 可以对入射脉冲进行包括无指向性、单方向强指向性、8 字型指向性以及任意设定的指向性函数传声器的等价测量, 从而可以进行关于能量传递、声场扩散以及音质空间感客观参量等量的测量。

根据侧向反射声能量的定义, 可以得到早期侧向反射声能量因子及不同方向入射脉冲能量比等参量, 并且可以对不同频率进行计算。

总之, 此测量方法在实验上可一次性测得声场的空间信息, 为进一步的声场描述及音质空间感的研究提供条件。目前 RRS 尚存在一定的局限性, 主要是它的等效传声器阵列为平面阵列, 不能区分以方位角 θ_k 与 $(\pi - \theta_k)$ 入射的声波, 其改进工作正在进行中。

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] 刘克, 周启君. 白瑞奈克教授论音乐厅音质参数[J]. 声学学报, 2002, 27(4): 232-240.
LIU Ke, ZHOU Qijun. Professor Beranek's theory acoustical parameters in concert hall acoustics[J]. Acta Acustica, 2002, 27(4): 232-240.

[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(1,2): 84-87.
Mo Fangshuo. The effect of late reflections on spatial impression in concert halls[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(2): 84-87

[4] Yamasaki Y, Itow T. Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone Method[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1989, 10-2.

[5] 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.

[6] Govera B N. Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields[J]. 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 Kinneking. Two-Dimensional noise source imaging with a T-shaped microphone cross array[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2000, 108(6): 2884-2890.

[9] ISO3382. Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters 1997[S].