

室内声学测量中数字化声源性能的分析

赵跃英, 盛胜我, 刘海生

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要:文章选取了三种典型的数字化声源信号: 膺噪声、线性调频声及调幅脉冲波包进行分析, 阐明了它们的共同优点及各自的特点。其中膺噪声的应用较为普遍, 而线性调频声则由于其原理简单, 在实际测量中具有更大的优越性。提出了在混响时间足够长的房间内作测量时, 可以不考虑扬声器本身的响应对测量结果所产生的影响。

关键词:数字化声源; 膺噪声; 线性调频; 调幅脉冲

中图分类号: TB52

文献标识码: A

Characteristics of modern digital sound sources for room acoustical measurement

ZHAO Yue-ying, SHENG Sheng-wo, LIU Hai-sheng

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

Abstract: In this paper, three types of typical digital sound sources, pseudonoise, linear sweep, and impulse-shaped signals, are analyzed. Their common advantages and individual characteristics are described. Pseudonoise is a common source, while sweep is more advantageous in practical applications due to its simple operation principle. If reverberation time of room is long enough, influence of the loudspeaker response on measurements is negligible.

Key words: digital sound source; pseudonoise; linear sweep; impulse-shaped signal

1 引言

前文^[1]扼要地阐述了室内声学基本测量方法及几种常用声源性能的对比分析。文中指出, 用脉冲响应函数的观点来分析室内声场具有很大的优越性, 它可以更准确地反映声场变化的物理过程及其细致情况, 从而可以获得更多的有用信息。一些传统的声源: 诸如淬发的脉冲声、电火花发声以及电声系统产生的白噪声等都有一定的局限性, 其共同缺点是实验不能重复, 只能从能量平均的角度对混响时间较长的情况, 获得较粗略的实验结果。

现代声学测量技术朝着数字化、自动化与实时化的方向有了重大的进展^[2]。在室内声学测量中已越来越广泛地采用了可作重复试验的数字化声源信号, 通过迭加技术、相关分析等数据处理手段^[3], 可以克服传统声源的局限性, 获得更细致更精确的各种实验参量。

本文选取了三种典型的数字化声源信号: 膺噪声、线性调频声及调幅脉冲波包进行分析研究, 阐明

了它们的共同优点及各自的特点。对测量系统本身的响应特性在消声室内作了检验, 提出在房间内对早期反射声作定位测试时, 或在混响时间足够长的房间内作响应函数的测量时, 扬声器响应特性产生的影响可以忽略不计。在消声室内作了反射声测试并在混响室内作了混响时间测量, 检验了这三种声源的实测性能。

2 测量系统

整个测量系统的示意图如图 1 所示, 作为声源的扬声器放置在室内 A 处, 传声器放置在测点 B 处, 主控计算机输出的原始数字化电压信号 e_0 经 D/A 板转换后经功放馈至扬声器 A, 发出相应的声压信号 p_A 。在测点 B 处的声压信号 p_B 由传声器接

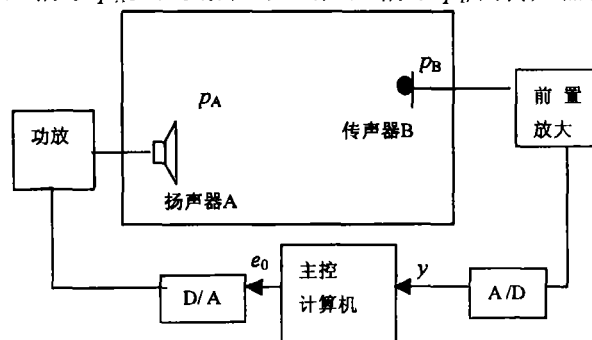


图 1 测量系统示意图

收稿日期: 2002-10-28; 修回日期: 2003-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目前期研究成果之一 (50078038)

作者简介: 赵跃英(1963-), 女, 上海人, 讲师, 硕士研究生, 研究方向: 室内声学。

收经前置放大,转换为电压信号,再由 A/D 板转换为数字化信号输回至计算机进行记录并作相应的分析处理。

上述测量系统的主要特点是:激发声源发声的原始电压信号 e_0 是可控的,可按特定的要求预先设置。设采样频率为 f_s ,在时间间隔 T_N 内,相应的采样个数为 $N = f_s \cdot T_N$,在 $0 \sim T_N$ 的时间范围内, e_0 可表达为具有 N 个元素的确定性数组,它可以精确地再现,从而可使实验能完全重复。

电压信号 e_0 转换成声压信号 p_A ,与发声系统的性能有关,其中主要的因素是扬声器的瞬态响应特性,记扬声器对 δ 脉冲的瞬态响应函数为 h_0 ,声压信号 p_A 为电压信号 e_0 与响应函数 h_0 的卷积,可得:

$$p_A(t) = \int_0^t e_0(\tau) h_0(t - \tau) d(\tau) \quad (1)$$

值得指出,在室内声学测量中,人们往往默认声源发出的声压信号 p_A 就是激励声源的电压信号 e_0 ,实际上两者是有所不同的,例如当 $t \geq T_N$ 时,激励电压信号 e_0 为零,但声源并不立即停止发声,声压信号 p_A 要持续一段时间后才逐渐衰减为零,当扬声器响应 h_0 给定时,原则上也可消去它对实验结果产生的影响,对此本文暂不深入分析,为方便起见,可暂假定扬声器响应产生的影响可以忽略不计,声源发出的声压信号 p_A 可按实际需要预先设置。

声源发出的声波在室内传播过程中,测点 B 处的声压信号 p_B 由直达声与壁面反射声迭加后产生,设声源发出一个 δ 脉冲,当它到达 B 处时作为时间 t 的起点,测点先后接收到的声压信号即为房间对 δ 脉冲产生的瞬态响应函数,记为 $h(t)$ 。声压信号 p_B 为声压信号 p_A 与房间响应函数 h 的卷积,可得:

$$p_B(t) = \int_0^t p_A(\tau) h(t - t_0 - \tau) d\tau \quad (t \geq t_0) \quad (2)$$

式中 t_0 为声源 A 至测点 B 直达声传播所需的时间。

接收系统一般经过良好的校正,测点 B 处的声压信号 p_B 转换成数字化电压信号输入计算机时,可设它的时频特性基本保持不变。

当声源发出一定的声压信号 p_A ,测定了 B 点的声压信号 p_B ,借助信号处理技术就可以确定房间的响应函数 h ,进一步可求出反映房间声学特性的各个参量。

实际测量时,电声系统状况保持不变,取足够长的时间间隔 T_N ,声源在 $0 \sim T_N$ 时间内发出给定的声压信号 p_A ,再停止一段时间 T_M , T_M 宜根据具体情况而定。相应记录测点 B 处在 $(T_N + T_M)$ 时间内的声压信号 p_B ,完成一次实验过程后,即可进行下一次实验。插入一段零发射的时间 T_M ,是为了保证先后两次实验不会对 p_B 的结果产生相互干扰。

重复实验时,声源的位置与取向应保持不变,使室内声场随时间与空间变化的情况可以精确地再现。这时,如果测点的位置也保持不变,对于先后两次实验接收到的声压信号 p_B ,信号的幅度与相位原则上应完全相同,可按矢量法则互相迭加,不过测量过程中会受到环境噪声等一些随机因素的影响,由于先后两次实验对 p_B 的随机干扰是不相干的,因此应按能量法则进行迭加,这表明,多次重复实验结果采用迭加技术后可以显著提高接收信号的信噪比,即使在强噪声干扰条件下,也能进行有效的测量。图 2 为脉冲声在房间内传播的实测响应曲线,可见,经迭加处理后,曲线质量明显提高。

值得指出,如果重复实验时,测点处于不同的位置 B 与 B',那么先后两次实验接收到的声压信号 p_B 与 $p_{B'}$ 有所不同,它们相当于用两只完全相同的传声器分别放置在测点 B 与 B' 所进行的实时测量,这种替换技术也是数字化声源的特点与优点之一,有重要的应用价值。

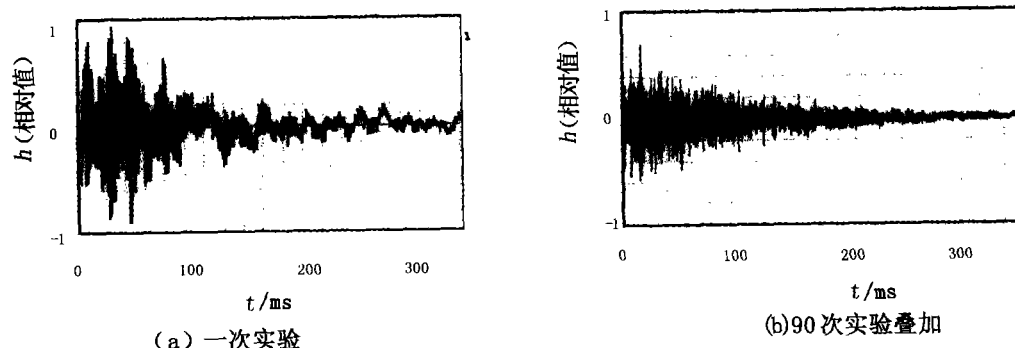


图 2 脉冲声在房间内传播时的响应曲线

3 几种数字化声源

现代室内声学测量中采用的数字化声源由计算机控制,不同声源发出的声压信号 p_A 有自己的时频特性,接收到的声压信号 p_B 相应有所不同,应根据实际测量目标与要求,选择适当的声源与相应的分析处理方法。

下面对三种典型的数字化声源分别进行阐述。

(1) 膺噪声源

借助专门设计的计算机硬件或软件,在时域上可按某种特定规则,逐个生成杂乱分布的序列 $(x_1, x_2, \dots, x_N)$, 其中各个元素带有随机特性且互不相同,作统计平均时其期望值趋近于零,而其均方根值则趋近于常数,取该常数为 1,并不影响分析的普遍性。这就是说,从总体性能看,这种序列具有随机数的统计特性,而从生成规则看,它具有确定性,因此可以重复实现。具有这种双重特性的声信号称为膺噪声,它可以视作能重复实现的白噪声。

设声源发出的声压信号 $p_A(t)$ 为归一化的膺噪声,在时域上从 $0 \sim T_N$ 的时间间隔内,它与理想的白噪声具有相同的统计特性,它的自相关函数为 δ 函数;在频域上,其功率谱与白噪声相同,均匀平坦。

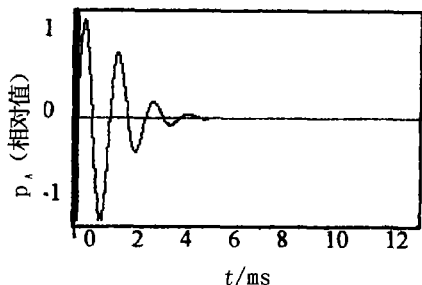
在测点 B 接收到的声压信号 $p_B(t)$ 由式(2)决定,由 p_A 与 p_B 的互相关函数或互功率谱可以得到房间的响应函数 $h(t)$,如果要较细致地了解房间的频率特性,可对声压信号 p_A 与 p_B 作相应的带通滤波处理。

(2) 调频声源

调频声源所发出的声压信号的频率随时间有规则地变化。调频的方式可有多种选择,最基本的是线性调频,即频率 f 随时间线性地变化。调频声源发出的典型声压信号 $p_A(t)$ 可记为:

$$p_A(t) = A \sin(\pi f_N t^2 / T_N + \Phi) \quad (3)$$

式中 A 为振幅, Φ 为初始相位,当时间从 0 至 T_N 时,相应的频率 f 从 0 线性增大至 f_N 。



(a) 波形

调频声压信号(通常称为啭音)可视为频率随时间单调提高的“准纯音”,在时域上的波形如图 3 所示。在频域上功率谱为一平坦的直线。

如果对调频声源的声压信号 $p_A(t)$ 作归一化处理,使其均方根值为 1,可以证明, $p_A(t)$ 的自相关函数也为 δ 函数。由 $p_A(t)$ 与相应接收声压信号 $p_B(t)$ 间的互相关函数也可得到房间的响应函数 $h(t)$ 。由此可知,调频声源与膺噪声声源相比较,从相关分析角度考虑,两者具有相类似的特性,同样能良好地满足室内声学测量的变化,随机起伏较小,特别是调频声源的时域特性与频域特性是互相协调的,便于对信号进行滤波处理,因此应认为它具有较大的优越性。

(3) 调幅脉冲声源

以具有峰值特性的曲线调制一定频率的谐波,可得波包形状的调幅脉冲。典型的调幅脉冲声压信号可取为:

$$p_A(t) = Ate^{-\beta t} \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中 A 为振幅, ω 为谐波圆频率, β 为包络线衰减系数,取谐波频率为 500Hz,波包的波形及其功率谱如图 4 所示。

此波包具有下列特性:

(a) $t=0$ 时, p_A 及其一阶导数为零,满足一般振动系统的初始条件。

(b) 波包前缘上升迅速,有利于辨认波包传播到达时刻。

(c) 能量相对集中在较狭的频带范围内,有利于提高信噪比。

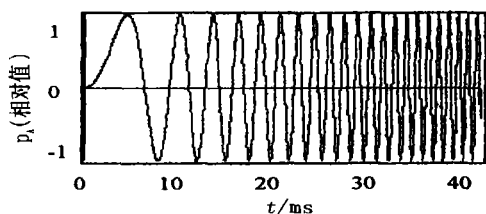
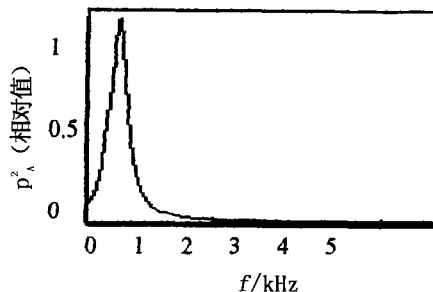


图 3 线性调频典型波形图



(b) 功率谱

图 4 调幅脉冲

调幅脉冲声源的主要特点与优点是同时兼有 δ 脉冲与纯音的双重性能,在一定条件下,测得的信号不需要作相关分析与滤波处理,可直接进行房间参量计算。

4 实验结果

我们首先在无反射的消声室内检验测量系统本身的响应情况,主控计算机分别输出膺噪声、线性调频及调幅脉冲等三种电压信号 e_0 ,信号经电-声-电转换后再返回计算机,把输出信号与相应的输入信号进行对比分析,两者的时频特性明显不同,这主要是由于扬声器响应特性的影响,当输出信号 e_0 为归一化膺噪声或线性调频声信号时,变化情况较类似,相应声压信号 p_A 的功率谱不再平坦,其自相关函数不再是 δ 函数而成宽度达 10ms 左右的波包,但其起始位置大致不变,当输出信号 e_0 为调幅脉冲时,相应的声压信号 p_A 波包形状有所变化,但其起始位置也大致不变。

由上可知,在房间内对早期反射声作定位测试时,或在混响时间足够长的房间内作响应函数的测量时,扬声器响应特性产生的影响可以忽略不计。

消声室内,在声源近旁放置一块反射板,分别用三种声源发出的信号进行测试,所得结果如图 5 所示。由图可见,三种声源都可以良好地检测出早期反射声,反射声峰值的位置基本一致,但其幅度及波形却有一定的差别,这可解释为扬声器的响应特性对三种声源产生的影响有所不同的缘故。

在混响室内,分别用三种声源测量房间的响应函数,求出不同频率的混响时间,由于混响室的混响时间很长,扬声器响应特性产生的影响可以忽略不

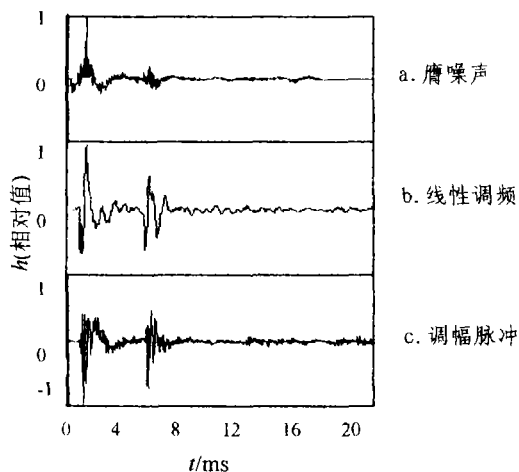


图 5 早期反射声测试

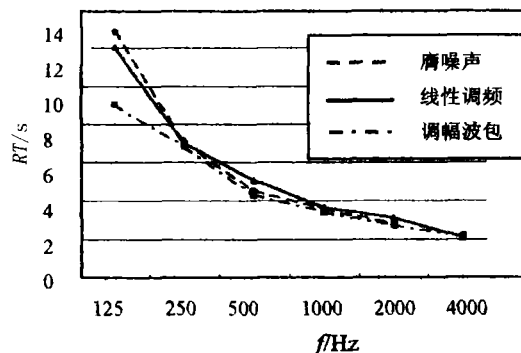


图 6 混响时间的测量

计,所得结果如图 6 所示。由图可见,三种声源所得的结果比较相符。不过当频率为 125Hz 时,调幅脉冲声源与另两种声源所得结果有明显差别,这可以解释为在 125Hz 以下,混响室本身的扩散特性变差,脉冲声源测得的数据作直接运算而另两种声源则作相关处理,因此所得结果有所不同。

5 结论与讨论

(1) 现代数字化声源的共同特点与优点是实验可以重复实现,从而可用迭加技术与相关分析等数据处理手段,获得更细致更精确的结果。

(2) 膺噪声可视为能重复实现的白噪声,声源所发出的归一化信号的自相关函数为一 δ 函数,由相关处理可得房间的响应函数等参量,此声源的应用已较为普遍。

(3) 线性调频声可视为频率随时间单调提高的“准纯音”,它具有与膺噪声类似的相关特性,测量总体水平与膺噪声大致相当,但其原理简单,实际测量中在技术细节上具有更大的优越性。

(4) 调幅脉冲兼有 δ 脉冲与纯音的双重性能,测得的信号可直接进行房间参量的计算。

综上所述,文中介绍的三种数字化声源都具有优越的性能,在室内声学测量中有推广应用价值。至于如何根据实测目标与要求选择适当的数字化声源,以及如何保证避免或消除扬声器响应产生的影响等问题,尚有待于今后进一步的研究工作。

参考文献:

- [1] 赵跃英,盛胜我. 室内声学测量中常用声源性能的比较[J]. 声学技术, 2003, 22(2): 76-79.
- [2] 赵松龄. 声学测量技术二十年[J]. 声学技术, 2002, 21(1): 52-54.
- [3] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 5-33.