

数字化声学测量技术

III. 非消声室环境中扬声器的测试

李毅民

(中国科学院声学研究所,中国科学院声学计量测试站,北京 100080)

1995年2月23日收到

摘要 由于建造消声室费用太高,如何在非消声室环境测量扬声器的特性是众多中小电声器材生产厂家极为关心的问题.本文介绍一种可在非消声室环境中进行测量的数字化的扬声器测量系统.本文论述了它的基本原理及两个关键问题,即激励信号的选择以及对单位脉冲响应加窗的问题.本文还讨论了窗口的宽度和形状对所测扬声器频率特性的影响,及对测量房间的要求.

关键词 消声室,频率响应函数,窗函数

Digital Acoustic Measurement Technique

III. Measuring Loudspeakers in non-anechoic rooms

Li Yimin

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences

Acoustics Measurement Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Owing to the high cost in building an anechoic chamber, measuring loudspeakers in ordinary rooms is a matter of concern to many audio equipment manufacturers. This paper introduces the fundamentals of the technique. Two key problems are discussed here. One is the choice of the activating signal input to the loudspeaker measured. The other problem is the selection of the window functions. Analysis is made on the influence of the window function to the frequency response function of the

loudspeaker measured, and the requirement to the room in which the measurement is conducted. A practical loudspeaker measuring system is also presented.

Key words anechoic chamber, frequency response function, window function

1 非消声室环境对扬声器特性测量的影响

按现有的技术规范,扬声器(箱)特性的测量应在消声室中进行.消声室不仅很好地隔绝了外界环境噪声的干扰,更重要的是它的所有壁面都装有吸声尖劈,几乎可以吸收全部入射声,只有少量很低频率的声波反射回去.这里

值得一提的是,任何消声室都不是完全理想的.所反射的低频声的情形与消声室的特性有关.但在一个消声室中仍造成了一个近似的没有反射声的自由声场,模拟了无限大空间中的声学效果.从而消声室环境被用作一种公认的测量标准,以便于对测得的扬声器特性进行对比.

本文所讲的非消声室环境,包括所有不满足上述条件的环境.在一个非消声室环境中,

例如在一个厅堂或房间中,总存在着反射声.入射声波与反射声波相重叠,可发生干涉现象.在有的频率上增强,在有的频率上则减弱.当房间的吸声较差时,声波多次来回反射,形成混响声.在这种情况下所测得的扬声器(箱)的特性,就与在消声室的测量结果有很大差别.总的特性灵敏度会偏高,频率响应曲线将出现许多起伏.所测得的结果与房间的大小,形状,以及墙壁及空间中的吸声情形密切相关.从而在非消声室环境中测得的结果无法与标准的测量结果进行比较.

建造一个消声室,耗资巨大,中小扬声器及音响器材生产厂家难以承受.多年来人们一直在研究如何能在普通房间中近似得到消声室环境的测量结果.本文介绍的随机信号激励窗口法正是目前世界上最先进的电声测量系统所采用的方法.这种方法很难用一个模拟的测量系统来实现.在此,数字信号处理技术再次显示了它无比的优越性.

2 脉冲激励与随机信号激励法的比较

扬声器特性的测量离不开信号源.必须有一个信号激励扬声器发声.在一定的距离上测量扬声器辐射的声音,以得到扬声器的响应特性.参看图1.

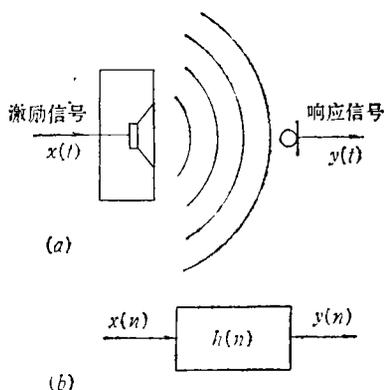


图1 扬声器(箱)的测量原理图
(a) 测量原理图, (b) 等效数字系统框图.

激励信号可以是纯音(正弦波),扫频信号,窄带噪声,白噪声,粉红噪声,猝发声,或脉冲

声.在图1中, $x(n)$ 为扬声器激励信号 $x(t)$ 的采样序列, $y(n)$ 为传声器接收到的声信号 $y(t)$ 的采样序列, $h(n)$ 为被测系统的单位脉冲响应序列.对于任意输入序列 $x(n)$, $y(n)$ 为 $x(n)$ 与 $h(n)$ 的卷积.

于是,

$$y(n) = h(n) * x(n) \quad (1)$$

$$Y(k) = H(k)X(k) \quad (2)$$

式中 $Y(k), X(k)$ 分别为 $y(n)$ 及 $x(n)$ 的离散傅里叶变换; $H(k)$ 为 $h(n)$ 的离散傅里叶变换,亦称为系统的频率响应函数.根据(2)式可得到

$$H(k) = \frac{\overline{G_{xy}(k)}}{\overline{G_{xx}(k)}} \quad (3)$$

式中 $\overline{G_{xx}(k)}$ 为输入激励信号序列的自功率谱, $\overline{G_{xy}(k)}$ 为 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的互功率谱.

当我们用一个纯音去激励扬声器时,只能得到扬声器在该频率上的响应.如果激励信号是一个窄带噪声,绝大部分能量集中在这一窄频带内,我们只能得到扬声器在这一窄带内的响应.如果激励信号在某一频带中的能量很弱,我们就不可能正确地获得扬声器在这一频带的响应.在信号处理理论中,用相干函数 $\gamma_{xy}^2(k)$ 来表示每一个频率上输入信号(激励信号)与输出信号(响应信号)的相干性.

$$\gamma_{xy}^2(k) = \frac{|\overline{G_{xy}(k)}|^2}{\overline{G_{xx}(k)} \cdot \overline{G_{yy}(k)}} \quad (4)$$

$\gamma_{xy}^2(k) = 1$ 时表明在该频率上输入与输出信号完全相干,所测得的该频率上的响应是可信的.当相干函数远小于1时,表明该频率上的响应是不准确的.

当我们用一个脉冲信号激励扬声器时,在理论上响应信号的傅里叶变换就是系统的频率响应函数.但是对于这一脉冲激励,响应信号的总能量是很有限的,分布在每一频率上的能量就微乎其微.对于一个实际的测量系统,由于受到测量精确度的限制,不可能用一个脉冲激励而准确测得每一频率上系统的响应.实际上,根据图1的测量原理,对于一个脉冲激励,所测得的相干函数在大部分的频率上都是远小

于1的。即使采用多个脉冲进行激励,情况亦不会有太大的改善。这样测出来的频率响应的精确度就不能满足我们的要求,尤其是在低频段。

对于一个平稳的随机信号,在分析时所截取的一段时间内,它的能量远远大于一个或若干个脉冲信号。事实上,按图1的系统测量一个扬声器,并用平稳的随机信号来激励扬声器,所测得的相干函数在整个分析频率范围中都非常接近于1。在频域中再作平均处理,这样得到的频率响应函数才能真实地反映扬声器本身的特性。目前国际上一些先进的测量分析系统都采用这种随机信号激励的方法,而不使用脉冲信号激励。

3 对单位脉冲响应加窗以消除反射声及混响声对测量的影响

公式(1)(2)表明,单位脉冲响应 $h(n)$ 与频率响应函数 $H(k)$ 是一对离散傅里叶变换。 $h(n)$ 是时域的序列,而 $H(k)$ 是频域序列。 $h(n)$ 为实数序列,而 $H(k)$ 是复数序列。 $H(k)$ 的模即幅频特性, $H(k)$ 的幅角即为相位频率特性,简称相频特性。一个扬声器在消声室与非消声室中的单位脉冲响应如图2(a),(b)所示。

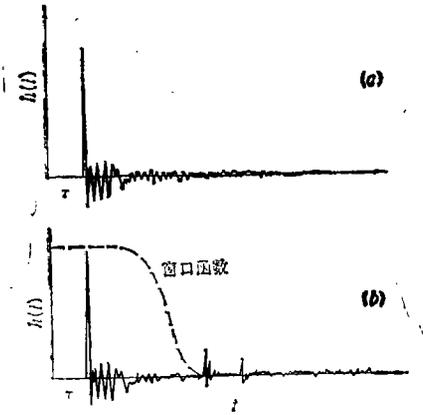


图2 扬声器的单位脉冲响应(0—20kHz 随机噪声激励)
(a) 消声室中的测量结果, (b) 普通房间中的测量结果。

图2中时间 τ 是扬声器辐射的声波在空间传播而引起的延迟。 $\tau = d/c$, d 为扬声器

与测量传声器之间的距离, c 为空气中的声速。在消声室中, $h(t)$ 随时间的增加很快衰减为零。其衰减的快慢只与扬声器振动的力学系统的阻尼有关。在非消声室中,由于存在反射声波的壁面,在单位脉冲响应的主峰后面还会出现一些小的峰。每一个可分辨的小峰是由一个反射面所引起。房间的混响声相应于单位脉冲响应尾部的起伏扰动。

按上述原理,可根据(3)式,在一个非消声室环境中先测到一个频率响应函数。为了消除反射声及混响声对测量结果的影响,随后对频率响应函数 $H(k)$ 作离散傅里叶反变换,得到单位脉冲响应序列 $h(n)$ 。截取 $h(n)$ 前边从 $n = 0$ 开始的某一部分,即令 $h(n)$ 乘以一个窗函数序列,以去掉后部相应于反射声的小峰及相应于混响声的起伏部分,见图2。然后对修改后的 $h(n)$ 作离散傅里叶变换,回到频域中并重新得到一个频率响应函数。这一新得到的频率响应函数去掉了反射及混响的影响,较为真实地反映了扬声器本来的特性。

必须注意到,所加的窗口函数的宽度取得适当是十分重要的。反射面越近,单位脉冲响应中相应于该反射面的峰离主峰越近,窗口就得越窄。但窗口太窄会影响到所测得的扬声器特性。下面我们来考察一下所加的窗口的宽度对扬声器频率响应的影响。设在非消声室环境中测得一个频率响应函数,对它作离散傅里叶反变换后得到单位脉冲响应 $h(n)$ 。设 $w(n)$ 为窗口函数序列。加窗后的单位脉冲响应为 $r(n)$ 。

$$r(n) = h(n) \cdot w(n) \quad (5)$$

为了考察窗口宽度变化带来的影响,我们来定性考察加窗前后频谱的变化,即 $h(n)$ 与 $r(n)$ 的频谱的差别。设 $R(e^{j\omega})$, $H(e^{j\omega})$ 和 $W(e^{j\omega})$ 分别为 $r(n)$, $h(n)$ 和 $w(n)$ 的频谱,即傅里叶变换。其中 ω 为数字域频率。根据数字信号处理的理论,两个序列乘积的频谱是这两个序列自身的频谱的卷积^[1]。

$$R(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega}) W(e^{j(\omega-\theta)}) d\theta \quad (6)$$

由(6)式可见,加窗对频谱的影响取决于窗函数序列 $w(n)$ 的频谱。对于一个宽度为 N 的矩形窗 $R_N(n)$

$$R_n(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & n < 0, n \geq N \end{cases} \quad (7)$$

其频谱的幅度函数为

$$W_R(\omega) = \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} \quad (8)$$

设扬声器的频响是 ω_1 到 ω_2 之间为常数的理想情形,见图 3(a)。矩形窗的频谱 $\bar{W}_R(\omega)$ 见图 3(b)。图 3(c) 即为加窗后的频响。

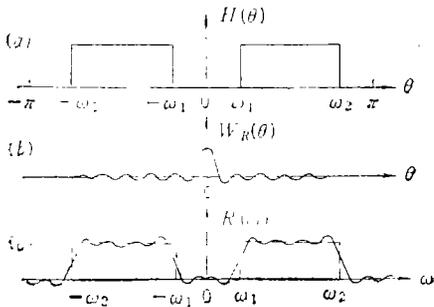


图3 加窗前后频谱的变化。

(a) 加窗之前的频谱, (b) 窗口函数的频谱, (c) 加窗之后的频谱。

由图 3 可看出加窗对原来的频率响应产生如下的影响:

(1) 使低频上升过渡带以及高频下降过渡带加宽,即变得平缓。窗口越窄,窗口频谱的主瓣越宽,过渡带变得越平缓。

(2) 频率响应过渡带两旁产生肩峰和余振,它们取决于窗口频谱的旁瓣。旁瓣越多,余振也越多。旁瓣相对值越大,肩峰越强。而旁瓣与主瓣的相对大小只决定于窗口函数的形状,与窗口的宽度无关。

根据上面的结果,在选择窗口宽度时,既要使把反射声对应的峰排除在窗口之外,为了不影晌扬声器本身的频响,窗口又不能太窄。这样也就要求最近的一个反射面离测量位置有一定的距离,以使单位脉冲响应中反射声对应的峰与主峰拉开一定的时间距离。参看图 2。在实际测量中,最近的反射面离测量点的距离越远,所测得频率响应的频率分辨率越高。

频率分辨率 $\Delta f \approx \frac{c}{2h}$, 式中 c 为声速, h 为

测量点与最近反射面的距离。

4 一个实用的扬声器测试系统

根据上面的分析,在非消声室环境中对扬声器进行测量要做如下的工作。产生一个随机噪声激励信号。根据图 1, 测量激励输入信号的自功率谱及输入与输出的互功率谱, 多次平均后再求频率响应函数。将此频率响应函数作离散傅里叶反变换, 得到单位脉冲响应。对单位脉冲响应加窗, 然后作离散傅里叶变换回到频域, 得到修正的频率响应函数。如此多的处理, 用一个模拟的系统是难以完成的。

在本系列文章的第一篇,“数字化声学测量技术 I. 概述”中介绍了一个实用的系统。它采用了数字信号处理系统。在微计算机内插一块数字信号处理系统板, 和一块数据采集板, 配以一些外围设备便可完成上述要求的处理功能。关于该系统的细节, 读者可参阅该文章。图 4 是该系统测得的一个扬声器的幅度频率响应。

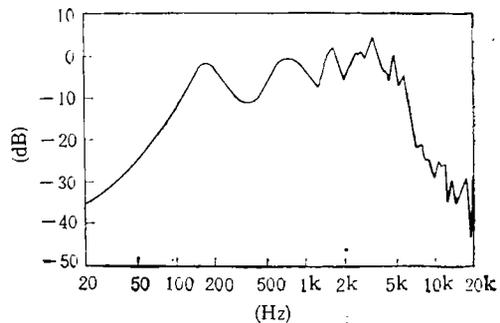


图 4 用随机信号激励法测得的一个 8 吋扬声器幅度频率响应。

窗函数: 矩形窗和汉宁窗组合, 窗口宽度: 35ms。

参 考 文 献

- [1] 邹理和. 数字信号处理, 上册, 国防工业出版社, 1985. 118-126.