

音质设计手段的新进展

贺加添

(同济大学声学研究所 上海·200092)

现代室内声学的特点是发展和定义了多个音质评价参量。现代测量技术不仅有助于我们对这些参量的理解,还能为判别室内声学缺陷及大厅声学设计提供许多有用的信息。本文旨在综述声学模型测量、脉冲响应测量及计算机模拟技术等方面的进展。

New development of acoustical designing tools

HE Jiatian

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

Modern room acoustics has been marked by attempts to define several acoustic criteria and objective measures, which are related with geometrical parameters of the room and subjective impressions as well. Advanced measurement techniques in room acoustics are necessary in deepening our knowledge of such measures. They are also valuable diagnostic tools for giving useful supportive information in designing auditoriums. This paper is to review the developments in acoustical model test, impulse response measurement and computer simulation.

1 引言

室内音质设计,早已走出混响时间这个唯一参量的时代,但是,那许多新的评价参量,如何在设计阶段加以估计,则仍然不及混响时间那样可以简单地计算和完工后的现场测量,这就需要发展一些新的设计手段来适应它。50年代起,模型试验开始受到注意,但是受到测试条件的限制,试验是很粗糙的,加上分析手段落后,一张脉冲响应测量结果的示波器照片,只能作经验性的判断,或定性地说明一些明显的声学缺陷。近20年来,测量

技术的进步,加上计算机模拟技术的飞速发展,给室内音质设计增添了有力的工具,本文旨在综述这方面的进展,以促进国内的工作。

2 声学模型试验^[1]

长期以来,对于大厅的声学设计,最常用的方法是建造一个缩尺模型,用来研究声音在模型里的传播。此法具有造价低、房间形状和墙面材料都容易改变等优点。由于各种波的传播具有很多的共性,在早期的模型测量中,有使用水波的,也有使用光波的。水波很直观,但只能用来研究声波在大厅二维平面

收稿日期:95-5-28;修回日期:95-9-12

和剖面内的传播。光波模型可以提供更多有用的信息,如室内的稳态能量分布、墙面或天花上某一部分的反射情况等。模型比例可以作到 1/50 甚至 1/100。但光线模型不能提供任何关于各反射声到达接收点的时间先后信息,也不能反映声级的衰减过程。在室内声学中,光线模型不能回答的恰恰是比它能回答的更重要得多的问题。更恰当的方法是在模型中也采用声波。这时,所有的时间间隔(延时和混响时间)都相对于实际时间缩小

$$= \frac{1}{l/l} \text{ 为缩尺比), 波的频率应增大 } l \text{ 倍, 声级差则与比例系数无关。吸声系数 } \alpha \text{、空气衰减系数 } m \text{ 及频率 } f \text{ 的变化关系为:}$$

当然这只是一个近似关系,近似程度依赖于所要从模型实验中获得信息的类型,若所需的是前次反射的脉冲响应或反射图,在模型中使用两种类型的表面就够了,即反射的面(用金属、玻璃、石膏等构成)和吸收的面(例如泡沫塑料、毛织品)。在这种情况下,空气的吸收可以忽略不计。若是要观察长时间的反射图,如确定混响时间,情况就不一样了。这时模型与真实空间相对应的吸收系数应符合得相当好,这只有在弄清模型材料在模拟频率范围内的吸声特性之后,才是可能的。这可以在模拟混响室中测量。不过若只是为了混响时间,费这么大的精力是否值得深受怀疑。因为混响时间很容易通过数值计算较为准确求得。

若是按照 Spandock^[2] 的设想,则对模型与真实空间的声学相似性要求很高。Spandock 的方法是:首先录制没有混响的音乐或语言信号,在模型里按方程(1)要求的频率快放,再在所研究的点处,用微型人工头录取该信号。要求人工头在模型所需的高频范围内,具有人头在音频范围内相同的指向性和传递函数。当用相应原来频率的速度重放时,听者即可由此判决大厅的“声学”效果,研究进一步的调整措施。

这个方法在实际操作过程中有很多障碍,首先是需两次频率转换,这可以通过变速录音机或数字传输录音机来实现;更困难的是对电声换能器和人工头的特殊要求及墙面吸声特性和听众吸声特性的模拟(包括吸声的频谱特性);再是模型内所充气体的吸声也应和音频范围内空气的吸声一致。有些研究小组曾用充氮气或干燥空气等手段处理空气吸声问题;另外还要设计出符合要求的微型换能器。

模型的缩尺比例越大,频率就越高,无指向性的脉冲激励就越困难。可以使用小火花栓作声源,但一定要预先测试一下它的指向性和它的频谱特性。再是发展了一种专用于模型测量的静电或压电的电声换能器,它们的优点是能馈入任意的电信号,因此也就能适应于脉冲响应测量。由于不可能同时具有小尺寸和高效能,它们应该(至少近似地)是球对称的。压电换能器可由某些高聚合的箔组成,这种聚合体经特殊处理后,既可以具有压电效应,又能做成球形。还有,传声器也应该是无指向性的。幸运的很,市场上已有很小的电容传声器出售(如 1/4 或 1/8 英寸)。有关脉冲响应的求法,我们将在下一节中作进一步的讨论。

3 脉冲响应的测量^[1]

按照系统的观点,一个线性系统的所有特性都包含在系统的脉冲响应里,或者说,脉冲响应函数的傅氏变换——传递函数里。既然房间可以当作一个线性的声学系统,至少在原理上,当声信号从房间内的一点传到另一点时,几乎所有的音质参量,均可由它的脉冲响应函数完全描述。用实验的方法确定房间的脉冲响应是室内声学中一个非常重要的工作。

系统的脉冲响应是由时间为无限短(具有一定能量)的激励信号,如 脉冲,引起的

系统的输出信号。激励信号可以近似地由持续时间相对于系统最高频率信号的周期为小量的矩形脉冲代替。事实上,这是很难作到的,一是大多数扬声器不能精确地重复脉冲信号;二是为了获得足够的信噪比,激励信号的能量不能低于某一极限,所有的能量集中在一个很短的时间间隔,有可能使信号的幅值超出扬声器的线性范围,甚至损坏扬声器。

改善信噪比的方法包括使用带通滤波器、限制测量的频率范围及使用模拟或数字函数发生器,产生一个带特定包络的正弦信号,如伪高斯或哈密分布等。限制频宽等同于拓宽激励信号的持续时间。这里介绍一种不

限制测量的频率范围而达到上述效果的方法。设 $s(t)$ 是通过扬声器加在房间里的稳态信号,则传声器接收到的信号为:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)g(t-t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)s(t-t)dt \quad (2)$$

其中 $g(t)$ 为我们要测路径的脉冲响应。对方程(2)求激励信号 s 与接收信号 s 的互相关函数:

$$s_s(\tau) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{+T_0/2} s(t)s(t+\tau)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)s(t+\tau-t)dt \quad (3)$$

交换积分次序:

$$s_s(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \left[\lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{+T_0/2} s(t)s(t+\tau-t)dt \right] dt = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)s_s(\tau-t)dt \quad (4)$$

由式(4)可得出:若激励信号的自相关函数为 $s_s(\tau)$ 函数,或至少近似为 $s_s(\tau)$ 函数,相应上述方程的测量结果为: $s_s(\tau) = g(\tau)$,即脉冲响应 g 。上述方程也适应一般的传播信号,这时相关函数的积分限被扩展到从 $-\infty$ 到 $+\infty$,也不必再除以某个时间间隔 T_0 了。

一个能适应这种测量,即自相关函数集中在 $t=0$ 的信号是随机噪声。要获得合理的信噪比,对于每个延时 τ ,平均时间 T_0 不能太短(0.1秒的数量级)。另一方面需要一系列的延时才能准确解出某个长度的脉冲响应函数。所以使用白噪声测量脉冲响应将花相当多的时间。

比随机噪声更有用的是伪随机测试信号,尽管它的发生是确定的,但具有与随机噪声相似的性质。它们由一系列按照一定规律变化的,具有等幅值的脉冲或矩形脉冲组成。这种瞬态信号的一个典型例子是 Barker 码脉冲序列,由于这些序列的长度不超过 13 个元素,限制了信噪比的改善。另一个更有效的方法是最大长度序列,即具有由 $l=2^n-1$ 个元素 s_k 组成的序列。这里 n 为正整数。这些序列可由 n 级移位寄存器产生,其中某些

级寄存器的输出反馈到输入。它们的主要优点是通过快速 Hadamard 变换,可以有效地进行所需的相关计算。下面将详细描述这种由 Schroeder 和 Alrutz^[3]1983 年引进室内声学的方法:

设 s_k (其中 $k=0,1,2,\dots,l$) 是一个最大长度序列,长度为 l ,由于周期性,我们有 $s_{k+l}=s_k$ 及基本特性:

$$\sum_{k=0}^{l-1} s_k^k = -1 \quad (5)$$

由于 s_k 是离散函数,自相关函数由下式定义:

$$s_s(m) = \sum_{k=0}^{l-1} s_k s_{k+m} \quad (6)$$

当 $m=0, l, 2l, \dots$ 时,其值为 l ,对于其它的 m 值,上式为 -1 。若用一系列时间间隔为 t 的具有相同幅值,且符号按序列 s_k 改变的脉冲来激励所要研究的房间,则接收信号为房间脉冲响应 $g(t)$ 与激励信号的卷积。若在 t 为单位的某时刻采样,有:

$$s_k = \sum_{j=0}^{l-1} s_j g^{k-j} \quad (7)$$

这个方程等效于矩阵 S , S 由 s_k 的循环排列再加一行一列组成:

$$\begin{bmatrix} \bar{s} \\ s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{l-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & s_0 & s_1 & s_2 & \dots & s_{l-1} \\ 1 & s_1 & s_2 & s_3 & \dots & s_0 \\ 1 & s_2 & s_3 & s_4 & \dots & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & s_{l-1} & s_0 & s_1 & \dots & s_{l-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 \\ g_{l-1} \\ g_{l-2} \\ \vdots \\ g_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

或简写为 $s = S \cdot g$ (9)

在上式中, 我们引入 \bar{s} 代表 s_k 求和取负号。即

$$\bar{s} - \sum_{k=0}^{l-1} s_k = \sum_{k=0}^{l-1} g_k \quad (10)$$

不难证明:

$$g = \frac{1}{l+1} S \cdot s \quad (11)$$

方程(4)是我们所求问题的形式解, 即从测量结果 $s(t)$, 或取样信号 s_k 求出脉冲响应 $g(t)$ 或 g_k , 假定 $g(t)$ 持续时间短于序列的长度 l , 若 l 不是很短的话, 计算 $S \cdot s$ 将需要很多时间。但也不必把 S 看得太复杂, 它的最大的优点是对方程(8)的某些行列进行交换后, S 短阵可以转化为一个 Hadamard 矩阵, 而 Hadamard 矩阵是由 $(l+1)(l+1) = 2^{2n}$ 个 $+1$ 和 -1 按很好的规律组成的, 它由简单的循环形式构成:

$$H_{n+1} = \begin{bmatrix} H_n & H_n \\ H_n & -H_n \end{bmatrix} \quad H_0 = (1) \quad (12)$$

因为 H 矩阵是 S 矩阵经交换元素位置后得到的, 所以要得到脉冲响应的结果, 必须把序列 s 也作相应的交换, 再用 H 矩阵和交换后的 s 矩阵相乘, 即可求出。重要的一点是: 由于 H_n 的规律性, 乘积 $H_n \cdot s$ 计算起来很方便。

序列 s_k 的长度 l 依赖于所求脉冲响应的长度, 若脉冲响应包含小于 f_m 的所有频率, 则取样频率至少为 $2f_m$, 又若脉冲响应的持续时间为 t_m 秒, 则下列不等式必须满足:

$$l \geq 2f_m t_m$$

非常重要的一点是: 取样频率必须绝对和信号频率一致。有关 H 矩阵的变换及 $H \cdot s$ 或与 s 的交换矩阵的乘积, 可参阅有关文献^{[4][5][6]}。

4 计算机模拟

对于大型厅堂的声学设计, 物理模型是一个很有用的工具。尽管如此, 它们也正逐渐被一种更便宜、更迅速、更有效的方法所取代, 那就是室内声场的数字模拟。Schroeder 等人^[7]于 1962 年将计算机引入了室内声学, 从那时起这一方法被许多人用来研究各种各样的室内声场问题。第一个用数字计算机模拟音乐厅声学的是 Krokstad^[8], 他从声线跟踪技术获得的脉冲响应中, 得出了各种参量。

数字声线跟踪的原理如图 1 所示。假定某一位置的声源, 同时(在 $t=0$ 的时刻)朝各个不同的方向释放大量的粒子, 每个粒子在碰到墙面之前沿直线传播。为简单起见, 假定墙面为平面, 求声线与所有平面(组成房间的各个面)的交点, 然后选择在传播方向最近的交点, 即为声粒子与墙面的碰撞点。声粒子在这点将作镜面的或扩散的反射。在第一种情况下, 声粒子的方向由反射定律决定。若为扩散反射, 计算机发出两个随机数来决定粒子新的传播方向的方位角和高度角^[9], 然后粒子沿着新的传播方向继续前进, 直到再次碰到墙面, 如此反复进行下去。墙面吸声系数可用两种方法予以考虑: 一是每反射一次, 声粒子的能量乘以 $(1-\alpha)$, 或是把 α 解释为吸收概率, 即发出另一个随机数来决定粒子是继续传播还是被吸收掉了。用同样的方法可以考虑空气对粒子的衰减。当粒子能量低于某一预先设定值, 或粒子被吸收时, 计算机便跟踪下一个粒子的行程。这一过程重复进行直到 $t=t_m$ 时发出的所有粒子被跟踪完毕时为止。

这个过程的结果由计数器收集, 即一个预先设定的计数面积或计数体积。不管什么时候一个粒子穿过该计数器时, 它的能量和到达时间都被记录下来, 如果需要, 还可以记下方向。当所有粒子跟踪完毕, 各计数器中的粒子能量, 按预先设定的时间间隔相加, 结果

是一个能量的时间分布(图2),可以认为是一个短时间间隔平均的脉冲响应。时间间隔大小的选择很重要,若选得太长,所得结果只是粗略地近似于真实脉冲响应的分段平均,很多细节被平均掉了。另一方面,若时间太短,结果将受到随机涨落的严重影响。实际中使用的时间间隔为 $5 \sim 10\text{ms}$,大致相当于我们听力判断的时间。

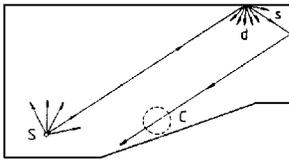


图1 声线跟踪原理示意图

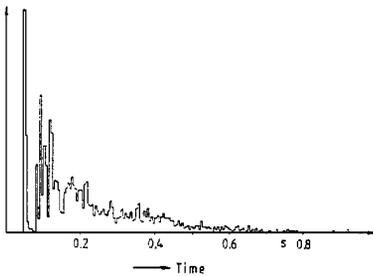


图2 接收点粒子能量分布时间图

若是为了考虑下列参量,如“明晰度” D 、“重心时间” t_s 、或“早期/后期声能比” S ,则不存在上述恰当选取时间间隔的问题,因为这些参量的计算是对脉冲响应进行全部或部分的积分。同样也适应早期衰减时间及稳态能量密度,它们都是与脉冲响应的积分有关。作为一个例子,图3表示声线跟踪法对一个容积为 3750m^3 ,有775座的报告厅求得的稳态声压级和明晰度 $D^{[10]}$ 。

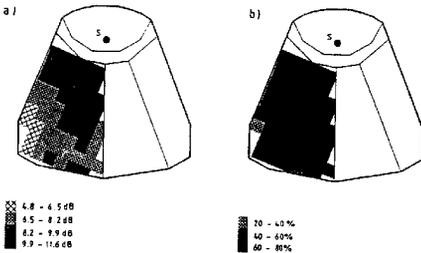


图3 (a) 稳态声压级分布。(b) 明晰度 D 分布^[10]

因为所得结果的精度依赖于计数器记录

的粒子数,所以模拟的脉冲声源发出的粒子数要足够多。计数器的面积或体积上接收到的粒子数不能太少。一般而言,作为尺寸为 1m 左右的接收器,声源发出 $10^4 \sim 10^5$ 个粒子能达到足够的精度。对于一台好的个人计算机,运行时间大约在一小时到数小时之间,这取决于计数器的多少、房间的复杂程度及所采用的计算方法。最繁琐和费时的是收集和输入有关墙面的位置、取向及声学参数。一般来说,只能模拟简单的曲面,如球面或圆柱面,对于复杂的曲面,只能用平面来近似。近似程度依赖于操作者的直觉和经验。

上面描述的过程可通过许多方法加以修正和改进,如声源辐射可以不是各向同性的,可以具有任意的指向性,也可以是多个声源,例如一个讲者与带有放大、延时和具有特定指向性的多个扬声器组成的系统,以确定大厅电声系统的最佳组合。而且还可以考虑纯镜面反射和理想散射墙面的混合,以及吸声系数依赖于入射角的情况。

“声线跟踪”法的本质是几何声学,即声的传播严格遵守几何定律。而无法说明干涉和衍射效应。这就留下了一个问题:这一缺陷在多大程度上限制了它的应用?上面的讨论,同样适应于虚声源模拟法。这一方法是用计算机找出所有对接收点的声能有明显贡献的虚声源,然后求出各虚声源传给接收点的能量和相对于直达声的延时。

可是,在这一简单的方法中,因为虚声源的个数巨大,需要不切实际的大量计算时间。可以举一个简单的例子:若一个有8个墙面平面的房间,墙面总面积为 3800m^2 ,容积为 12000m^3 ,按1根声线或1个声粒子每秒平均反射27次,若只计算 400ms 内的脉冲响应,虚声源至少到第11级。8个墙面11级的虚声源数大约为 2.6×10^9 个!更糟糕的是,由于墙面是有限大小的,不是无限大的,对于这些大量的虚声源在某一给定的接收点,只有一小部分是“可见的”,将花费大量的时间

去检验声源的“可见性”或有效性。

所幸, Van 和 Maercke^[11] 与 Vorlander^[12] 同时独立地找到了精确确定声源位置而不考虑无效声源的方法。这种方法是运用一个简化的声线跟踪模拟过程寻找虚声源。任何一个到达某一计数器的粒子, 它一定经过了一系列的虚声源, 这些虚声源可由反向跟踪粒子而获得, 若下一个粒子在同一个时间内碰撞同一个计数器, 则不予考虑, 因为它不会产生新的虚声源。当声线跟踪运行一段时间后, 就可确定所有有效虚声源的位置及它们的相对强度(取决于镜面反射过程中该墙的吸声系数)。与声线跟踪法相比, 它能产生精确的能量脉冲响应。但该法只能模拟纯镜面反射而不能模拟扩散反射的墙面。

另一方面, 这种声线跟踪和虚声源相结合的模型, 不仅可以估算声场的客观参量, 还为建立虚拟听觉环境提供了可能。也许最引人注目的想法是: 设计数字滤波器模拟房间的特性并作用于语言或音乐信号上, 听者听到的输出信号就好象他真的坐在大厅里感受到大厅里的声环境一样。这是 Spandock 关于物理模型设想的现代诠释。

要达到这一目的, 需要知道房间的真实(振幅)脉冲响应而不是它的能量响应。这样光靠吸声系数来描述墙面的声学特性就不够了, 还要知道它的复数部分和反射系数的频域和时域特性。一种近似方法是对几个频带分别进行模拟, 每次都用与之对应的吸声系数, 最后恰当地把它们合成为脉冲响应, 而且很有必要转化为双耳信号。否则, 听者就没有真实声场的空间感了。所以, 脉冲响应还应进行修正达到包含听者个人耳朵的传输函数。既然这些函数与声音的入射信号有关, 就需要一套快速的测量方法, 例如用最大长度序

列作为实验信号, 再结合快速 Hadamard 变换。当所有这些都实现后, 输入实际大厅里播放的“干”信号, 就可以通过耳机或自由场重放技术, 把输出信号呈给听众了。

很明显, 这一技术非常有利于声学工作者把古老的梦想变为现实。它不仅有助于各类大厅的实际声学设计, 同时对研究大厅几何尺寸、墙面特性、听众位置等对听觉状态的影响提供了有力的手段。这种技术我们称其为“听觉化”技术(Auralization)。

本文是在王季卿教授的指导下完成的, 王教授和蒋国荣老师仔细审阅了全文, 特此致谢!

参考文献

- 1 Kuttruff, H., Room Acoustics Elsevier Sci. Pub. LTD, 1991
- 2 Spandock, F., Ann. D. Physik 1934; 20: 345
- 3 Alrutz, H. & Schroeder, M. R., Proceedings of the 11th International Congress on Acoustics, Paris, 6, 1983, p. 235
- 4 Maowilliams, F. J., Proc. IEEE, 1976; 64 (12): 1715
- 5 Schroeder, M. R., J. Acoust. Soc. Am, 1965; 37: 409
- 6 Xiang Ning, Signal Processing, 1992; 28: 139
- 7 Schroeder, M. R., Atal, B. S. & Bird, C., Proceedings of the Fourth International Congress on Acoustics, Copenhagen, 1962, Paper M21
- 8 Krokstad, A., J. Sound Vibr., 1968; 8: 118
- 9 贺加添, 声学技术 1994; 13(3): 111
- 10 Vorlander, M., Acustica, 1988; 65: 138
- 11 Vian, S. P. & Van Maercke, D., Proc. Vancouver Symposium, 12th International Congress on Acoustics, 1986, p. 74
- 12 Vorlander, M., J. Acoust. Soc. America, 1989; 86: 172