

可听声声场模拟技术

贺加添

(同济大学声学所 上海 200092)

可听声声场模拟所要回答的问题是：怎样确立一个声场和怎样重建一个声场。常用的模拟方法可分为：厅堂模拟、双耳模拟和相似模拟三种。本文论述了可听声声场三种模拟方法的原理、实现的途径及存在的问题，着重分析了用RCC方法实现相似模拟的可能性，并对可听声声场模拟技术的应用前景作了简要的介绍。

Audible Sound Simulating Technology

He Jiatian

(Institute of Acoustics, Tongji University)

The problems which audible sound simulation wants to solve are how to determine a sound field and how to restructure a sound field. Audible sound simulation usually includes room sound simulation, binaural signal simulation and similarity simulation. This article reviews the fundamental ideas, methods and problems of all three kinds of audible sound simulations and gives more detailed illustrations about RCC method. At the end, a number of prospected applications are mentioned.

1. 基本原理

声源发出的声波为 $S(\omega)$ ，受厅堂的影响，按线性系统理论，到达接收点的声信号为 $S(\omega) \cdot R(\omega)$ ；同理，输入双耳的声信号为 $S(\omega) \cdot R(\omega) \cdot H_{1,r}(\omega)$ 。其中： $R(\omega)$ 为厅堂的传递函数， $H_{1,r}(\omega)$ 分别指左耳及右耳的传递函数 [$H_1(\omega)$, $H_r(\omega)$]。图 1 为声场模拟的原理简图。理论上讲，最后输入耳道的信号包含了有关声源和厅堂的全部信息，如：混响、韵律、持续时间等时间方面的信息；方向、距离、宽阔感等空间方面的

信息；响度、音调、品质等质量方面的信息。

听者接收到这些信息后，在脑中建立一个关于声场的“像”，并对声信息中的各参量做出反应，按自己的标准，形成整个声场的评价。应该说，对于整个声场的评判结果会有明显的个体差异，而对各参量的评价是趋于一致的，就像是一杯加糖和一杯不加糖的咖啡，喜欢与不喜欢的答案可以千差万别，而关于哪杯咖啡甜，哪杯咖啡苦的答案却总是相同的一样。

收稿日期：93-6-28

可听声声场的模拟，就是要真实地再现出各参量的影响，或者说：听者在虚拟声环

境中感受到的“声像”与在真实声场中感受到的“声像”一致。

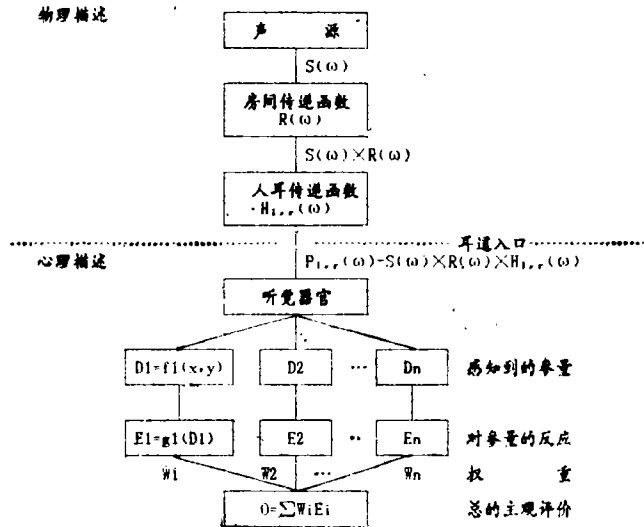


图1 可听声声场模拟原理示意图

2. 可听声声场模拟方法

我们可以将可听声声场模拟分为三类：厅堂模拟、双耳模拟和相似模拟。对厅堂某接收位置声信号 $S(\omega) \cdot R(\omega)$ 的模拟称为厅堂模拟，它的目的是产生一个与接收点真实厅堂信号相同的模拟信号。对双耳信号 $S(\omega) \cdot R(\omega) \cdot H_{i,r}(\omega)$ 的模拟称为双耳模拟，它的目的是产生一对双耳信号，该信号与人头处于真实声场接收位置时，左右两耳道入口处的声信号一致。最后，真实声场特征的再现模拟，称为相似模拟，它的目的是使听者在模拟声环境中感知到的各声场参量与原声场一致。

2.1 厅堂模拟

厅堂模拟包括两方面的内容：怎样确立一个声场和怎样重建声场。

首先来回答第一个问题，从原理上讲，模拟声场就是要重建直达声和所有的反射声。所以，要确立一个声场，也就是要找出直达声和所有反射声的信息，诸如：直达声

和所有反射声的方向、强弱和延时等。通常所用的方法有测量法和计算法。

四传声器测量技术属于一种测量方法^[1]。该方法是采用不在同一平面内的稍微分开的四传声器同时测量由该系统发出的脉冲声(或M序列伪随机信号)在某点的脉冲响应。通过分析比较各传声器接收到的信号的强弱、延时等参数，确立该厅堂虚声源的空间分布规律和反射声的方向特性。图2为四传声器结构及用该方法测得的音乐厅的虚声源分布和指向特性图^[1]。该方法不仅可在实际厅堂中测量，还可在缩尺模型中使用。正如文献[1]所指出的，该方法的分辨率还不理想，当反射声密集时，不能很好地分辨出各个反射声的方向、强弱和延时等特性。遗憾的是，除了四传声器方法外，现在还没有其它能探测声场空间结构的有效手段。

计算方法即数字计算机模拟方法。通常使用的方法有声线跟踪法^[2]和虚声源法^[3]等。

声线跟踪法是假定声源发出大量的声粒子(能量粒子)，声粒子按几何声学规律传播

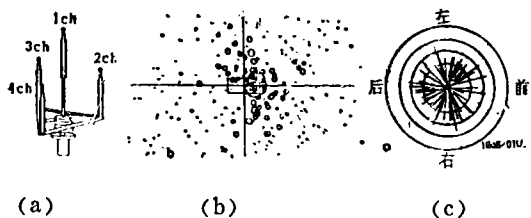


图2 (a)四传声器结构; (b)音乐厅的虚声源分布测量结果; (c)指向特性

和反射, 计算机分别对每个粒子进行跟踪。当粒子碰到墙面时, 通常的处理方法有两种: 一种是假定粒子的能量减小 α 倍(其中 α 为墙面的吸声系数); 另一种采用 Monte Carlo 方法, 假定粒子有 α 的概率被墙面吸收。粒子经过接收点时, 通过一个计数器, 它的能量、时间和方向等都被记录下来, 直到粒子的能量衰减到预先设定的值(第一种方法), 或粒子被墙面吸收(Monte Carlo 方法), 本次跟踪才终止, 转向下一个粒子的跟踪。当所有粒子跟踪完毕后, 将记录器接收到的数据进行统计, 即可得出该点的所需的声场信息。

虚声源法是根据几何声学原理, 声波在墙面上发生反射时, 在与声源的对称点存在对应声源的像(虚声源)的理论进行计算的。通过计算机找出所有有用的虚声源的位置和强度, 并据此计算厅堂内任意一点的声场。图3为虚声源法和声线跟踪法得到的厅堂的能量脉冲响应分布图。

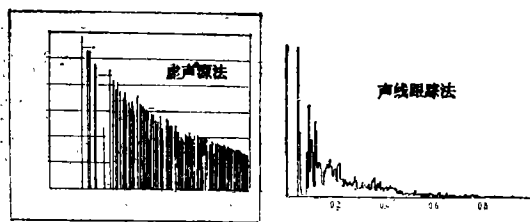


图3 虚声源法和声线跟踪法得到的厅堂(能量)脉冲响应分布图(不是同一厅堂)

声线跟踪法实际上是一种统计方法, 总会存在统计误差, 使得结果不精确; 误差的

大小与粒子数的平方根成反比, 且靠增大粒子数提高精度的效果不是很明显; 对于虚声源法, 由于要鉴别大量虚声源的“可见性”, 计算量非常巨大; 两法都不能从声压角度, 只能从能量角度进行模拟; 都不能解决声波的干涉、衍射等波动性问题。

第二个问题: 怎样重建声场? 重建声场就是要重现直达声和所有反射声的方向分布特性及时序结构。时序结构比较好办, 方向分布特性可就困难多了。我们知道, 一个厅堂对应的虚声源的个数是无限大的, 理论上讲, 要在物理上完全重现原声场, 也需要无限多个声源, 这在实际中是不可能的。通常的做法是用有限个声源进行模拟, 具体方法有如下两种: 分割空间法和相加定位法^[4]。

图4为分割空间法示意图。该方法的原理是将听者周围的空间分割成许多的子空间(图中为16份), 将同一子空间来的声波进行合成, 并通过处于该空间中心轴上的扬声器重播。

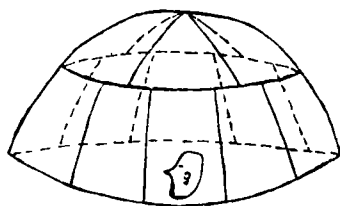


图4 分割空间法示意图

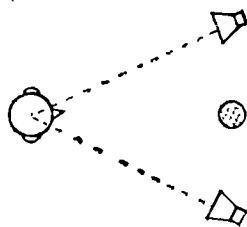


图5 相加定位法示意图

图5为空间定位法的示意图。我们知道, 人耳对同时从两扬声器发出的声波, 感觉上好像是从两扬声器之间的某个声源发出的。相加定位法就是利用这个原理, 将各虚声源相加合并, 以达到用有限个声源来重现厅堂

中某点的声场的目的。

以上两方法尚处于研究探索阶段，目前还存在许多问题，主要有两个：一个是用多少声源来模拟声场合适？二是不能精确重现厅堂的混响声。据认为：声场的混响部分，对听者的心理反应有很大的影响。即使是能精确确定混响声，现在还不知道混响声应该怎样与前次反射声连接。很多情况下使用人工数字混响器，有可能产生“染色”现象。

2.2 双耳模拟^[5]

双耳模拟要回答的问题是：怎样获得左右两耳的输入声场信号和怎样对人耳重放输入信号？

双耳输入信号通常由测量得到。可以用人工头在实际厅堂中进行测量，也可以用缩小人工头在缩小模型中测量。同样也可用上节谈到的厅堂模拟的计算方法，即通过计算机计算厅堂的传递函数，再与实测人耳的传递函数相乘，即可求出整个系统的传递函数。在实际厅堂测量中，声源信号可以是实际声场信号，也可以是电火花或M序列伪随机信号。不过，尚存在下列问题没有很好解决：一个是如何真实地模拟人的双耳？人的躯干、人耳乃至人头的形状对双耳信号是否有影响？第二个问题是：如何在模型实验中同时在整个音频段真实地模拟各种材料的声学特性？如果此问题不解决，就很难说在模型实验中获得的双耳信号与实际厅堂双耳信号存在对应关系。

通常使用耳机或扬声器对人耳重放输入信号。使用耳机重放时，将通过人工头录制的双耳信号，再用耳机分别输入到人的左右耳。此技术方便、简单。图6为该方法的原理简图。通过耳机重放时，要求功放、耳机等系统的传递函数为1(常通过补偿使其尽量平直)。在实际操作时，人耳对重放信号的方向的判断不是很清晰，特别是很难区分前后的声音及发生定位错误。

把左右两耳信号分别输入两扬声器重放

声学技术

时，交叉听闻问题(对应左耳的信号不仅能传到人的左耳，还会传到人的右耳；同样，对应右耳的信号，也能同时传到右耳和左耳的现象)尚未得到解决。

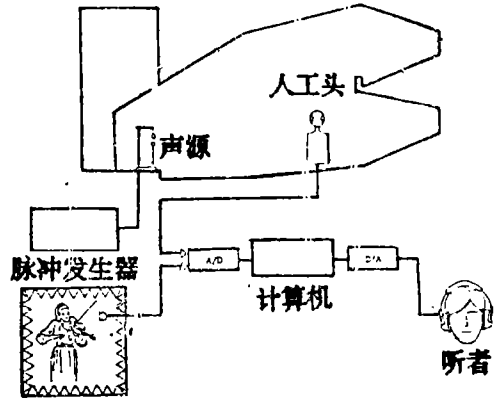


图6 双耳模拟原理简图

2.3 相似模拟^[6]

日本的森本政之认为：我们不必非得去在物理上精确再现原声场，只需要对听者赖以进行主观评判的参量进行精确模拟就行了，即模拟声场和原声场在物理意义上可以不完全一样，只要听者在感觉上一样就行了。在此基础上，他提出了一种相似模拟的方法。为了研究相似模拟的可行性，设计了图7所示的实验，多组扬声器水平放置，在200ms内发出67个声信号(模拟1个直达声和66个反射声)。在中心位置用人工头录制该声场的双耳信号，并进行相关分析(简称RCC)。

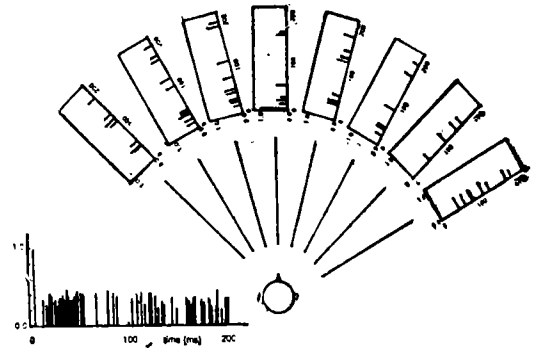


图7 由多组水平扬声器产生的声场

在作RCC分析时,每次只分析双耳信号上的一小段,即取矩形时间窗。窗与窗之间相互连接而不重叠。由窗内RCC的最大值确定声信号的强度,由最大值对应的延时,确定声信号的方向。RCC方法在一个矩形窗内只能得到一个声信号(图8),声信号的强度等于该窗内所有声信号的等效强度,时间和方向与该窗内最强声信号的时间和方向一致。由RCC得到的有关直达声和反射声的信息,建立模拟声场,请听众来判断模拟声场与原声场的相似性。

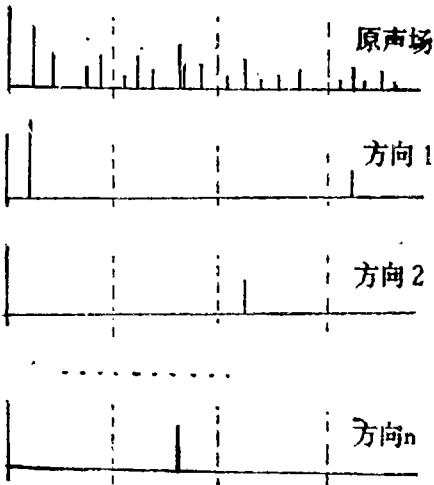


图8 由RCC得到的声信号组成形式

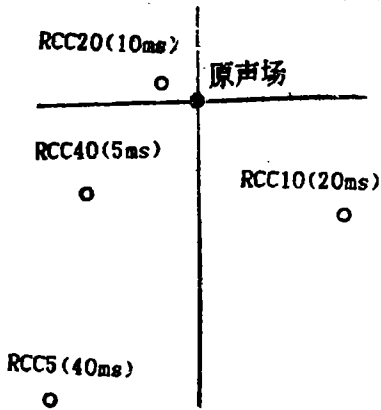


图9 主观比较结果(RCC后面的数字为RCC得到的声信号数,括号里的时间为窗宽)

图9为9个学生按Kruskal提出的多因素分析方法得到的有关模拟声场与原声场的比较结果。从图中可以看出:随着窗宽的减

小。模拟声场逼近原声场,但不是线性的,而是振动性逼近。特别是当窗宽为10ms时,在所有窗宽样本范围内,与原声场相似程度最高,处于“没有区别”和“一点点区别”的范围内。

我们可以得出:用RCC实现相似模拟是可能的。不过,从上述实验也应看出:RCC只能分辨水平方向的声信号,垂直方向的声信号怎样区分,及如何模拟混响声和选取窗宽的大小,都是有待研究解决的问题。

3. 应用前景

(1) **噪声评价:** 现在使用的A声级或其它测量标准不足以完全描述噪声环境,特别是在常规声级下,噪声对人的影响主要是在心理方面。近年来越来越多的人试图通过主观评价方面的心理研究来真实评价噪声的行为,却很难将受试对象带到噪声现场直接进行评判。可听声声场模拟技术则为此类实验在实验室的模拟声环境下进行提供了条件:

(2) **声学设计:** 声学设计分为音质设计和噪声控制设计。厅堂,特别是音乐厅的音质设计一直是近几十年来争论的焦点,而且是一个经久不衰的课题。声场模拟技术为音质设计提供了强有力的手段。我们可在设计之初,将有关信息输入计算机,即可听到你想要听的位置的音质效果,你可以边听边比较边修改。你还可以将世界著名音乐厅的音质效果与你的方案同时进行比较。对于噪声控制设计,声场模拟技术也大有可为,特别是工厂车间的噪声治理或声学设计,通过声场模拟,为你找到最佳的解决方案。

(3) **音乐欣赏:** 例如许多人都希望能亲身享受世界级著名音乐厅的音乐演出,由于地理、时间、条件等的限制,常常不能如愿。声场模拟技术能创造与世界著名音乐厅相同的声环境,在自己家里,就能得到那种身临其境的美妙享受。

(4) 电话会议和会议录音系统：双耳的“鸡尾酒会”效应，可使人在嘈杂的环境中能轻易听清某一特殊的声音。通过双耳模拟系统，可把此效应用于电话会议或会议录音中，能大大提高所需声音信号的清晰度。也可用于其它系统中，起到抑制背景噪声、提高信噪比的作用。

(5) 其它：声场模拟技术还可以用于各仿真系统的声环境模拟、可用于电声系统特别是扬声器特性的评价及用于音质评价等。

参考文献

1 贺加添 厅堂音质测量中的四传声器接收技术. 声学技术, 1993, 12(3), 26~29

2 K Heirich Kuttruff. Computer simulation. room acoustics, 1992; 282~288

3 H Lee. An efficient algorithm for the image model technique. Applied Acoustics 1988; 24; 87~115

4 Yuji Korenaga; A sound-field simulation system for room and sound system design 120th ASA Meeting, Nov. 1990

5 H Moller. Fundamentals of binaural technology. Applied Acoustics 1992; 36; 171~218

6 M Morimoto. Basic study on sound field simulation based on running interaural cross-correlation. Applied Acoustics, 1993; 38; 89~92

(上接43页)

表1中数据和地址都是采用16进制，它表示了数据与低5位地址及高5位地址的对应关系。为了节约篇幅，表1中只列出了ROM中首和尾一部分数据和地址，中间部分省略了。表格上方一行表示地址 $A_0 \sim A_9$ 的地址

值，左边一列表示地址 $A_4 \sim A_9$ 的值，其中地址值下面带有横线的表示高5位地址 $A_5 \sim A_9$ 。如图2所示， $A_5 \sim A_9$ 的地址数据来自于前一次5bit平均数据 $2^0 \sim 2^4$ ，两者之间如表2所示具有一一对应关系。

表2 高5位地址 $A_5 \sim A_9$ 与数据 \bar{V}_{n-1} 的对应关系

地址 $A_5 \sim A_9$	0000H	0020H	0040H	0060H	0080H	00A0H	00C0H	...	03C0H	03E0H
对应平均值 \bar{V}_{n-1}	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	...	1EH	1FH

现在让我们来看看表1中的数据是否满足(2)式。由前面分析已经知道，数据平均ROM低五位地址直接表示数据 V_n ，高五位地址和平均数据 \bar{V}_{n-1} 相对应。例如，高五位地址是00A0H，由表2知道对应数据 $\bar{V}_{n-1} = 05H$ ，这时如果低五位地址也是 $V_n = 05H$ ，那么平均值 $\bar{V}_n = 05H$ 。若高五位地址值不变，而低五位地址变为 $V_n = 1EH$ ，则平均值 $\bar{V}_n = 1EH$ 。总之，表1中的数据都是按照(2)式计算并进行四舍五入得到的十六进制值。

5 结束语

本文仅讨论了沿一个方向上的回波进行实时平滑平均处理的原理和电路设计，如果要对 360° 方向上由波束扫描接收的回波信号实行这种处理，只要在数据存储器RAM的地址线上输入方位地址就可实现。这种以存储器ROM为核心构成的实时平滑平均处理电路对于声呐设计来说是十分有用的，它既简化了声呐系统的设计，又能达到实时处理的目的。实际使用结果表明，采用这种实时平滑平均处理电路后，处理过的回声信号，干扰影响小，数据稳定性好，声呐显示回波图像清晰。这种方法可以作为一种数据处理方法应用到所有的回声探测仪器中。