

室内障碍物对声传播作用的计算机模拟研究

曾向阳, 孙进才, 陈克安
(西北工业大学航海工程学院, 西安 710072)

摘要: 计算声场脉冲响应是数字式可听化研究的核心工作。文章研究了室内声场中存在障碍物的情况下, 如何用数值方法模拟脉冲响应的问题。首先提出了根据障碍物特点进行分类研究的方法, 然后利用声线跟踪技术和统计学方法, 设计了几类障碍物(屏风、隔墙等)情况下模拟声场分布的具体算法。在这些算法中, 对镜面反射、扩散反射、散射和透射等现象作了不同程度的考虑。最后, 将一个复杂声场模型的仿真计算结果和理论分析作比较, 检验了算法的可行性。

关键词: 障碍物; 声传播; 计算机模拟

中图分类号: TU112.4 **文献标识码:** A

Study on effects of indoor barriers upon sound propagation with computer simulation

ZENG Xiang-yang, SUN Jin-cai, CHEN Ke-an

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In the study of digital auralization, a special computer model should be set up to simulate the impulse response of an enclosure. In previous studies, behaviors of indoor barriers have not been fully investigated. This paper presents different methods for simulating the behaviors of various barriers including screens, a small number of irregular barriers, an intervening wall and a lot of disorderly placed barriers. Corresponding algorithms are developed based on the ray-tracing technique and statistical method. Phenomena such as specular reflection, diffused reflection, scattering and transmission have been considered. These algorithms are testified by simulation of a complicated model.

Key words: barriers; sound propagation; computer simulation

1 引言

数字式可听化^[1] 研究中一个很关键的问题是脉冲响应的模拟计算。对于高频情况, 通常利用几何声学模型来研究, 最著名的两种模型是虚源模型和声线模型。它们的可行性已被许多文献所证明^[2,3]。不过, 以往的研究大多针对空房间, 很少涉及存在障碍物情况。而实际的厅堂、厂房等空间里不可避免地会存在各种物体。某些情况下, 还会人为地布置一些散射体或隔声体以满足特定的声学要求。这类声场模型的分析难度比空房间情况下的分析难度要大得多。曾有人用虚源法做过这方面的研究, 但仅考虑简单空间中各向同性分布的障碍物^[4]。也有人用声线法模拟障碍物的作用, 但只对障碍物无规分布的情况^[5]。

实际上, 声场中可能存在镜面反射、扩散反射、散射、透射等多种现象。它们所占的比例既与空间

的界面有关, 还受空间内的声障碍物形状、数量等因素影响, 有必要分类研究。本文根据几种常见障碍物(屏风、隔墙、少量形状复杂的障碍物、大量杂乱无章障碍物等)的不同特点, 给出了相应的研究方法。论文将声线跟踪法和统计方法相结合来模拟少量障碍物情况; 对隔墙情况, 提出了等效声源模拟方法; 对大量障碍物情况, 则以 Kuttruff^[6] 的统计思想为依据设计算法。同时, 论文对声源、接收者的建模方法也作了必要的研究。

2 算法设计原理

由于虚源法仅适用于规则的空间, 而且难以模拟扩散反射、散射等现象; 而声线跟踪法可以根据声线与壁面或障碍物的各种关系来考虑前述现象, 并且具有计算效率高、不受空间形状限制等特点。因此, 本文主要以声线跟踪模型为基础。

计算脉冲响应的思路如下: 某时刻声源向一定空间范围内辐射声线后, 这些声线会在空间中与壁面(或障碍物)不断碰撞, 并伴有能量吸收、反射、散射等现象。利用计算机跟踪所有声线的传播情况,

收稿日期: 2001-05-23; 修回日期: 2001-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助, 西北工业大学博士创新基金资助

作者简介: 曾向阳, (1974), 男, 湖北宜昌人, 博士, 主要研究方向: 声场视听一体化、噪声预测和控制及环境信息系统。

根据到达接收点的声线的能量和到达时间,就可得到接收点处的能量脉冲响应。

下面详细阐述为获取脉冲响应,对声源、声传播、声接收等采取的具体模拟方法。其中,着重探讨了儿种典型障碍物情况下模拟声传播的算法。

1.1 声源的模拟

对于各向同性点源,初始声线在整个空间范围内均匀分布,每根声线的能量为:

$$I_k = \frac{I_0}{N} \quad (1)$$

其中, I_k 是 k 根声线携带的能量, I_0 是声源辐射的总能量, N 是初始声线数目。

对于指向性因数为 Q 的声源,则有:

$$I_k = \frac{I_0 \cdot Q}{N} \quad (2)$$

或者若指向性声源的形状比较规则(如喇叭形),可以将初始声线限制在声源所包含的空间角内。此时,每根声线的能量仍由式(1)决定。

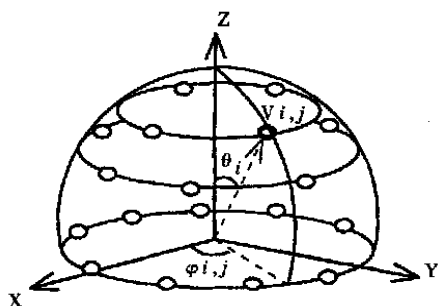


图1 初始声线方向

初始声线的方向按如下方法确定:将以声源为球心的单位球体沿 Z 轴等间隔取 n 个圆,每个圆上再取 $m_i = n \sin^2 \theta_i$ 个等间距的点,如图1,那么在儿些点处的单位矢量的方向就代表初始声线的方向。即任意初始声线的方向为:

$$V_{i,j} = (\sin \theta_i \cos \varphi_{i,j}, \sin \theta_i \sin \varphi_{i,j}, \cos \theta_i) \quad (3)$$

如果初始声线分布于全部 4π 空间角内时,该声线的高度角和方位角分别为:

$$\theta_i = \frac{(2i-1)\pi}{2n}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$\varphi_{i,j} = \frac{(2j-1)\pi}{2m_i}, \quad j = 1, 2, \dots, m_i \quad (5)$$

作者总结了一个能准确估算初始声线总数的公式:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (6)$$

1.2 声传播过程

障碍物对声场的作用是通过影响声线传播过程

来体现的。对不同类型的障碍物,要保证一定的计算精度和较高的计算效率,需要依据其特点,采用不同的处理方法。

2.2.1 屏风状障碍物

这类障碍物相当于在声场空间中增加了若干壁面。如图2(a),在设计算法时,可以将每个屏风看作两个大小相同,法向量相反的壁面。故可以完全按照空房间的模拟方法进行,遵循“在声线传播方向上离声线上一出发点最近的物体将与声线发生实际碰撞”这一原则来确定声线同障碍物和墙壁的关系。

在壁面主要考虑镜面反射和扩散反射现象。设壁面吸声系数、扩散反射系数分别为: $a, d, a, d \in [0, 1]$, 散射声能为 I_d , 镜面反射声能为 I_s , 入射声能为 I_i 。则对于镜面反射部分,其反射能量为:

$$I_s = (1-d)(1-a)I_i \quad (7)$$

镜面反射方向余弦为:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \alpha_1 - 2\cos \Delta \cdot \mu \\ \beta_2 = \beta_1 - 2\cos \Delta \cdot \eta \\ \gamma_2 = \gamma_1 - 2\cos \Delta \cdot \xi \end{cases} \quad (8)$$

其中下标 1、2 分别表示碰撞前、后, Δ 表示声线与碰撞面法线的夹角, (μ, η, ξ) 表示该法线的方向余弦。

对扩散反射部分,当声线与壁面碰撞时,先由计算机产生一个 $[0, 1]$ 内的随机数 r 。若 $r \in [0, d]$, 认为任意一个接收域都能接收到其能量 I_d 。

$$I_d = d(1-a)I_i \quad (9)$$

扩散反射声线的方向余弦为

$$\begin{cases} \alpha = \sin \theta \cdot \sin \varphi \\ \beta = \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ \gamma = \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\theta = \arcsin(r_1)$, $\varphi = 2\pi \cdot r_2$, r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 内两个相互独立的随机数。

2.2.2 隔墙

当屏风状障碍物尺寸大到一定程度时,就会将空间分隔为两个小空间。如图2(b),对于空间1(声源所在空间),隔墙仅被视为该空间的一个壁面,因此空间1仍然是空的,可以按前述方法讨论声线分布,而不考虑空间2内的情况。但对于空间2中的接收者而言,隔墙将主要起到隔声作用,需要考虑声的透射现象。因而不能按空间1中的处理方法考虑声线与隔墙的关系。这里作者利用等效声源法处理,即先对空间1进行声线跟踪,得到接近隔墙的若干接收点处的声强,将这些接收点作为激发点,在计算了隔墙传声损失后将其等效为新的声源,等效声

源仅向空间 2 中辐射声线。等效声源的功率为:

$$W = I \cdot S \cdot t \quad (11)$$

其中, W 为等效声源功率, I 为激发点声强, t 为隔板的传输系数 ($0 \leq t \leq 1$)。

于是, 可以用 2.2.1 中类似的方法进行声线跟踪以确定空间 2 中的声线分布情况。

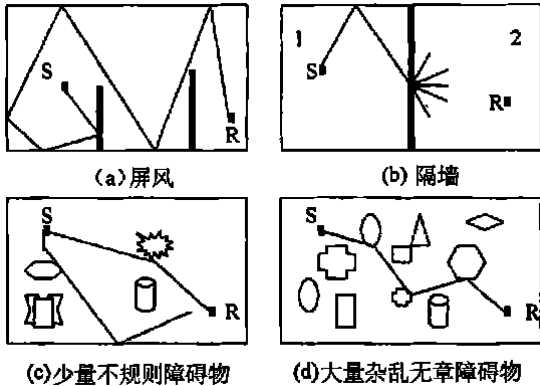


图 2 各种障碍物情况

2.2.3 少量结构复杂的障碍物

当空间中障碍物数目较少, 但形状都很复杂时, 障碍物的作用主要体现为吸声和散射。因此判断声线与障碍物是否相碰以及碰后能量的计算与前两种情况不同。在判断声线是否通过障碍物时, 我们根据该障碍物的形状近似地取一个与之等体积的规则几何体(长方体、球等), 根据声线与这些近似体的关系决定它是否与对应的障碍物碰撞。如果声线先与墙壁碰撞, 反射方向和能量的求法与 2.2.1 节中相同。如果声线到达障碍物, 则反射声线沿近似体中心发出, 方向和能量按如下思路确定: 先由计算机发出随机数决定声线能量是否被吸收。如果被吸收, 则停止对该声线的跟踪。否则, 声线能量保持不变, 并向各个方向随机辐射, 其新方向可用类似于 2.2.1 中处理扩散反射的方法来确定。

2.2.4 大量杂乱无章障碍物

数量较大、位置、形状杂乱无章的障碍物的主要作用也是散射和吸声, 但此时很难根据每一物体的实际位置、形状等逐一计算声线的碰撞情况。这里采用一种统计学方法。

首先计算声线在各个障碍物之间的平均自由程 L :

$$L = \frac{4V}{\sum_{k=1}^N S_k} \quad (12)$$

其中, N 是障碍物总数, V 是障碍物总体积, S_k 是第 k 个障碍物的表面积。

这种情况下, 声线在各障碍物之间的传播距离服从三维 Poisson 分布^[5], 可以根据以下函数确定声线经过时间 τ 后与 k 个障碍物发生碰撞的概率^[6]:

$$f_k(c\tau) = e^{-c\tau} (c\tau)^k / k! \quad (13)$$

其中, c 是声速。由此可以导出声线在任意两个物体间经历的路程为:

$$D = -L \cdot \ln(r) \quad (14)$$

其中, r 为 $[0, 1]$ 内的随机数。限于篇幅, 推导过程从略。

在判断某根声线与障碍物相碰还是与墙壁相碰时, 先计算上一碰撞点至其传播方向上最近的面的距离 d_{\min} 。若 $d_{\min} > D$, 声线将先与障碍物相碰。其新方向和能量计算方法与 2.2.3 节相同。若 $d_{\min} \leq D$, 声线与壁面碰撞, 反射方向和能量求法与 2.2.1 节相同。

3 模拟声接收

按照上述方法确定了空间中的声线分布后, 就可以计算接收点的脉冲响应。

首先需要确定哪些声线对接收者有贡献。一般认为通过接收点的声线是有贡献的, 即当声线与接收点的距离小于一定的值 r_{\min} 时, 认为对接收点有贡献。作者导出的求解该临界值的公式如下:

$$r_{\min} = d_{SR} \cdot \sqrt{\frac{4}{N}} \quad (15)$$

其中, d_{SR} 是声源至接收者的距离, N 是初始声线总数。可见, r_{\min} 的取值与声线的数量以及声源与接收者中心位置之间的距离有关。

在确定了某根声线到达接收域后, 需要记录其到达时刻 T 和能量 I 。其中 T 由该声线从声源至接收点的几何路程 L 和声速 c 决定。计算能量时则要考虑其传播过程中能量的变化情况, 主要取决于壁面、障碍物和空气对能量的作用。壁面和各类障碍物对声能的影响前面已经介绍。对于空气吸声可按如下公式计算:

$$I_2 = I_1 e^{-\tau L} \quad (16)$$

其中, τ 为空气吸声系数, I_1 为未考虑空气吸声时的能量, I_2 为计入空气吸声后的能量。

3 举例和讨论

在仿真研究时, 首先通过模拟得到各接收点的脉冲响应, 由此求得相应的能量衰减曲线(EDC), 然后根据下面的公式求出各点的声压级, 并与理论分析进行比较。

$$L_p = 10 \lg \left(\int_0^{\infty} E(t) dt / 4 \times 10^{-10} \right) \quad (17)$$

式中, L_p 为声压级, $E(t)$ 能量衰减曲线。

设有如图 3 所示三维空间模型, 各壁面吸声系数均取为 0.1, 扩散反射系数为 0.6, 在 $y = 7\text{m}$ 和 $y = 19\text{m}$ 处有两堵隔墙, 面积均为 192m^2 , 传输系数 t 均为 0.3。被隔墙隔开的 3 个空间从左至右依次命名为 1、2、3 号空间。其中 1 号空间中有 5 个结构复杂的物体, 2 号空间中有一些任意摆放的小障碍物, 3 号空间中有一个屏风 ($y = 23\text{m}$ 处)。声源位于空间 2 中, 坐标为 $(5, 13, 2)$, 声功率为 0.05w 。我们分别仿真计算了不同空间中 14 个接收点处的脉冲响应和声压级。声压级结果见表 1。A、G、K 三点的脉冲响应如图 4。

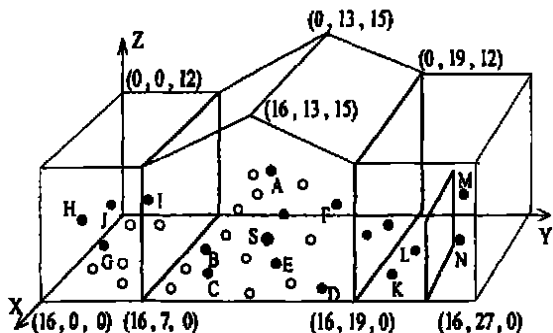


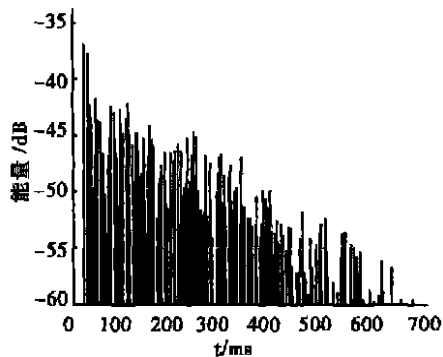
图 3 三维空间模型(空心小圈代表障碍物中心位置, 实心圈代表接收点)

表 1 模拟结果

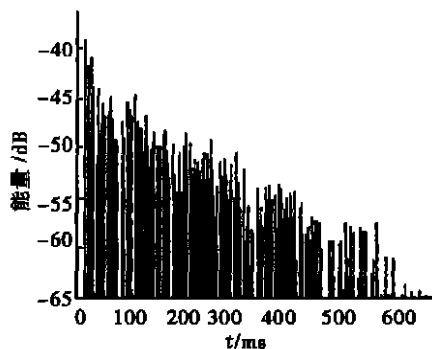
接收点	坐标	声压级 / dB	接收点	坐标	声压级 / dB
A	(3, 11, 6)	90.5	H	(8, 2, 5)	83.0
B	(7, 9, 3)	89.7	I	(3, 5, 6)	83.5
C	(11, 11, 3)	92.2	J	(4, 2, 6)	84.6
D	(14, 17, 2)	91.6	K	(11, 20, 3)	82.6
E	(8, 14, 3)	94.8	L	(5, 20, 2)	83.1
F	(3, 15, 2)	90.4	M	(4, 25, 6)	81.7
G	(7, 2, 2)	83.4	N	(4, 24, 3)	82.1

对于空间 2, 我们还用声压叠加法进行了计算。从图 5 可以看出模拟值和计算值是比较接近的。点 E 的模拟值误差较大 (2.45dB), 原因在于它离声源较近, 受直达声线的影响较大。通过多次仿真研究还发现: 小障碍物数目越大, 理论值与模拟值差别越小。这是不难理解的。因为障碍物越多, 声线分布就越趋于均匀, 也就意味着声场越接近理想的扩散声场。不过, 计算工作量也会随之增加。

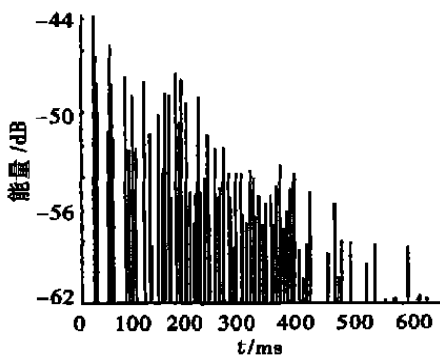
比较空间 1、2 中的平均声压级, 可得隔墙的插
(下转第 57 页)



(a)



(b)



(c)

图 4 脉冲响应 (a) A 点 (b) G 点 (c) K 点

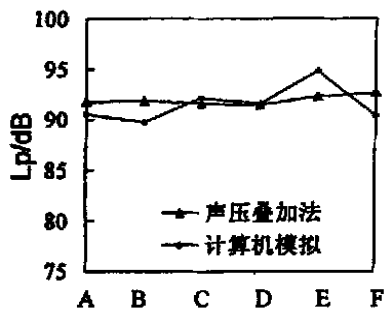


图 5 各点声压级

峰频段) 将会得到显著改善。

把铝箔调换成 30 μm 厚度的 PVF 薄膜后, 复合吸声结构的垂直入射吸声系数实测结果见表 4:

用表 4 数据与表 3 数据对照比较, 除 200Hz 频段外, 所有测试频段的吸声系数均有不同程度的提高, 800Hz 频段的反共振峰几乎被“拉平”。但 1.6kHz 频段的反共振峰仍十分明显, 但比铝箔结构的吸声系数有所提高。这可能与实用角度的要求还有一些差距。不过, 在实际噪声控制工程中, 噪声源多为连续频谱噪声, 而驻波管测试采用的是单频纯音测试, 估计实用中 2 kHz 频段的吸声带宽将对 1.6kHz 频段的吸声系数会产生一定的增益。即是说, 1.6 kHz 在实际使用中, 其吸声系数将会得到提高。

为了便于直观分析和比较, 实用性泡沫铝板吸声结构(板后留置 100mm 空腔) 的吸声系数随频率变化曲线见图 1 所示, 以供选用参考。

PVF 薄膜是美国杜邦公司专利产品, 它具有防水, 阻燃, 抗老化, 防静电, 不积灰, 使用寿命可达 20 年的护面材料, 但价格要比铝箔高出许多倍。

4 结 论

泡沫铝板是一种综合性能优异的吸声材料, 在采用薄膜复合的吸声结构形成各种噪声控制器件后, 其声学性能并不亚于常规的纤维性和多孔性阻

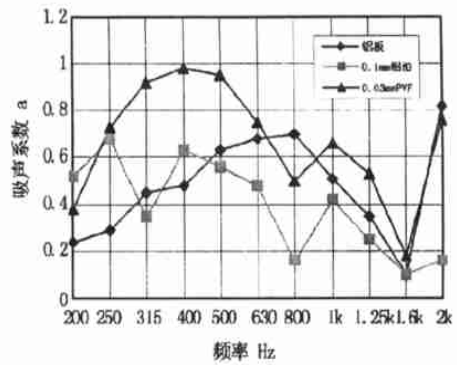


图 1 不同吸声结构吸声系数曲线

性吸声材料。在消声器应用实践中, 泡沫铝板复合铝箔并设置 100mm 厚空腔深度的吸声结构, 比无铝箔复合吸声结构在 250Hz 频段的消声量提高 9dB (A), 整个测试频带范围的消声器基本接近同类的纤维阻性材料消声器。加上它所具有的防火、防水、洁净、性能稳定、无二次污染等特点, 已逐渐被工程界所接受。

参考文献:

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975, 23(1): 38-50.
- [2] GBJ88-85, 驻波管法吸声系数与声阻抗率测量规范[S]. 知识出版社, 1986.
- [3] 赵松龄. 噪声的降低与隔离[M]. 同济大学出版社, 1985. 111-113.

(上接第 51 页)

入损失为: 7.29dB; 同样可得空间 2、3 之间隔墙的插入损失为: 8.54dB。两者都高于根据传输系数求得的隔声量 5.23dB, 其中一个原因是在对受声空间 1 和 2 中的接收点进行模拟时, 还计入了壁面和空气吸声的影响, 而根据传输系数求得隔墙损失不包含这一部分。

模拟隔墙作用时发现: 模拟结果的准确程度与等效声源数目并不存在直接关系。取过多的等效声源会大大增加计算工作量, 而模拟准确程度并没有明显改善, 有时反而更差。本文算例中选取了 12 个等效声源, 结果还是比较令人满意的。

4 结 论

本文详细研究了几种常见障碍物情况下室内声场脉冲响应的计算方法。仿真结果证明本文的算法具有较高的计算效率和一定的计算精度。本文的研究不仅有助于增强可听化研究的实际意义, 还可直

接用于一些实际声场的数值分析。例如, 对于隔墙的研究, 可用于分析噪声在多个空间之间的传播; 对于大量杂乱无章障碍物的研究, 可用于分析人群对厅堂中声传播的影响, 等等。

参考文献:

- [1] Keiner K, Dalenback B-I, Svensson P. Auralization an overview[J]. J. Audio. Eng. Soc., 1993, 41(11): 861-875.
- [2] Heinrich Kuttruff. Room Acoustics (Fourth edition) [M]. London Spon Press, 2000: 301-309.
- [3] Akira Mochimaru. A study of the practicality and accuracy of impulse response calculation for the auralization of sound system design[J]. J. audio Eng. Soc., 1993, 41(11): 881-892.
- [4] A. M. Ondet, J. L. Barbry. Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 85(2): 787-796.
- [5] W. Leschnik. Sound propagation in urban and forest areas [J]. Acustica, 1980, 44: 14-22.
- [6] Kurruff. Sound decay in reverberation chambers with diffusing elements[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1981, 69(5): 1716-1723.