

考虑界面声散射的室内声脉冲响应 计算机仿真新算法*

张继萍

(浙江省环境保护科学设计研究院 杭州 310007)

吴硕贤

(华南理工大学建筑系 广州 510641)

1998年1月12日收到

摘要 本文提出一种考虑界面声散射的室内声脉冲响应的计算机仿真新算法。该算法通过应用动态堆栈和虚拟内存,解决了模拟中计算可能失去控制的问题。作为例子,文中对二个矩形房间的声脉冲响应进行了仿真。

关键词 房间声脉冲响应, 界面声散射, 动态堆栈, 虚拟内存。

A new computer simulation algorithm for calculating sound impulse response in a room including surface scattering

Zhang Jiping

(Zhejiang Research and Design Institute of Environmental Protection, Hangzhou 310007)

Wu Shuoxian

(Department of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract A new computer simulation algorithm for calculating sound impulse response in a room is proposed, in which the phenomenon of sound scattering by walls is considered. By using dynamic stacks and virtual memory, the algorithm solves the problem that computation may be out of control in the simulation. The sound impulse responses in two rectangular rooms were simulated for illustrations.

Key words Room sound impulse response, Surface scattering, Dynamic stack, Virtual memory.

1 引言

掌握室内声脉冲响应具有非常重要的意义。脉冲响应反映了室内声场的特征,有了它,室内音质的其它参数均可从计算中得出^[1],从

而也为实现虚拟可听化技术提供了前提^[2]。经典的室内脉冲响应预测是采用缩尺模型模拟的方法,随着计算机技术的发展,又出现了若干计算机数值仿真的预测方法,例如虚声源法,

* 国家自然科学基金资助项目

声线跟踪法等^[3,4]。然而这些仿真算法通常仅考虑墙面声能的镜像反射,而未考虑粗糙墙面的声散射。许多文献表明^[5-7],界面声散射是室内声场仿真应加以考虑的重要因素。仅考虑镜像反射,对例如一些扁平狭长型的厂房,会造成预测混响时间过长等缺陷^[7]。因此,90年代以来,国内外学者已将注意力集中在研究界面声散射的仿真算法上^[6-10],以期研究声散射对室内声脉冲响应预测精度的影响。迄今为止,主要有以Hodgson、Lam和Dalenback等为代表的几类仿真算法。Hodgson^[7]等提出了基于朗伯余弦定理、用随机数确定声散射方向的散射声能表达方法,具有简捷的特点,但只能获得与统计特性有关的声散射能量。Lam^[8]提出了一种散射与散射能量直接相关的方法,但需假定散射能量呈指数衰减。Dalenback^[9]则提出了一种较为通用的方法,将散射界面划分成许多小方块,用以接受入射声能,然后将其作为次级声源发射声线,并假定镜像反射次数的增长是与时间的二次方有关。可见,在散射仿真算法中,都不同程度地需要作简化处理。最为直观的声散射模型,应该是任意一条声线入射到某一粗糙界面后,都生成一个次级散射声源。散射声线碰到后续界面后,同样分裂为镜像反射与散射反射两部分。但这种算法将导致计算时间随着散射声源的阶次呈指数增长的结果,并存在计算失去控制的危险。

本文以前人奠定的声线追踪方法为基础,由本文作者采用分裂递归的方法,研究发展了一种近似于直接考虑界面声散射的室内声脉冲响应计算机仿真新算法。为了解决仿真计算可能失去控制的问题,本算法采用动态堆栈和虚拟内存技术,交替记录入射到界面待作散射的声能,然后再将其从动态堆栈中弹出,作为次级声源继续分裂,从而实现模拟过程所产生的大量声线进行跟踪与记录的可能性,克服了计算中内存不足的困难。作为例子,我们应用该算法对某一矩形房间的声脉冲响应进行了仿真,同时还对一缩尺模型模拟计算了脉冲响应

及混响时间,并与该模型的实验研究结果进行了对照。本方法不难推广至对任意形状的室内声场进行仿真。

2 理论模型

入射至任意界面的某频率声能,其吸收、反射的关系可以用下式表达^[6]:

$$\alpha + \delta(1 - \alpha) + (1 - \delta)(1 - \alpha) = 1 \quad (1)$$

式中, α 为界面的平均吸声系数; δ 为界面的声散射系数。 δ 表示散射部分的声能占总反射声能的比例。第一项 α 表示界面吸收能量,第二项 $\delta(1-\alpha)$ 表示界面散射声能,第三项 $(1-\delta)(1-\alpha)$ 表示界面镜像反射声能。

如图1所示,设声源 S 为无指向性点源,发出能量为 E_0 的纯脉冲信号(距其1.0m处声级为 L_0)。由 S 发出 N 条声线,其方向在全空间均匀分布^[11],则每条声线携带能量为 E_0/N 。受声点为 R ,用于记录穿过以 R 为中心、半径为 r 的接受球域内声线的声能和到达时间。

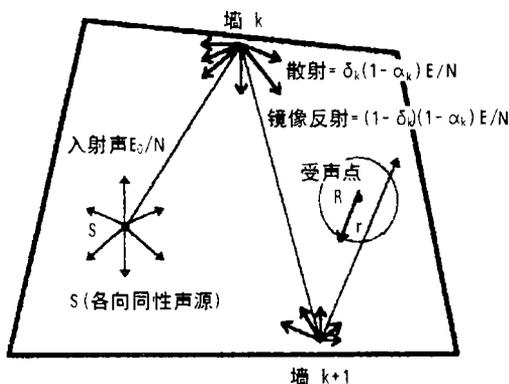


图1 考虑散射的室内声线传播

为将问题简化,假定被研究的示范房间平面为矩形。其第 k 面墙的吸声系数和声散射系数分别为 α_k 和 δ_k 。

根据(1)式,任一条声线碰到第 i 面墙后,墙面作镜像反射部分的声能 E_s 、作散射反射部分的声能 E_d 、声线传播到第 i 面墙的时间 T_i 和声线到达受声点的时间 t_i 分别为

$$E_{s_i} = \frac{E_0}{N} \cdot \prod_{k=1}^i (1 - \alpha_k) \cdot \prod_{k=1}^i (1 - \delta_k) \quad (2)$$

$$E_{d_i} = \frac{E_0}{N} \cdot \delta_i \cdot \prod_{k=1}^i (1 - \alpha_k) \cdot \prod_{k=1}^{i-1} (1 - \delta_k) \quad (3)$$

$$T_i = \frac{1}{c} \cdot \sum_{k=1}^i l_k \quad (4)$$

$$t_i = T_i + r_i/c \quad (\text{若声线穿过以 } R \text{ 为中心的球域}) \quad (5)$$

其中, l_k 为声线在反射墙面间的距离, r_i 为受声点至第 i 面墙反射点的距离, c 为声速。

作镜像反射部分声线的反射传播规律按经典的镜像反射声粒子追踪方法进行^[12,13], 主要由三部分组成: (1) 反射面的确定; (2) 反射声线方向的计算; (3) 声线到达受声点观察球域的判断及有关参数的记录。

作散射部分的声能依次作为次级散射声源, 在其后的追踪中, 与初始声线没有区别, 即在界面处能量关系仍然服从 (1) 式。

E_{d_i} 、 T_i 及与墙面相交坐标等参数被不断地依次记录下来, 直到 E_{s_i} 或 t_i 达到某预设的判据 (能量小于某预定值, 或时间小于某预定值)。然后, 将先前记录的数据逐组取出, 每个次级散射声源发出 n 条散射声线, 每一条散射声线发射的方向按蒙特卡罗方法确定, 并依朗伯定理计权, 其碰到第 l 面墙后, 墙面作镜像反射部分的声能 E_{s_l} 、作散射反射部分的声能 E_{d_l} 、声线的传播时间 T_l 和声线到达受声点的时间 t_l 分别为:

$$E_{s_l} = \frac{E_{d_l}}{n} \cdot \prod_{k=1}^l (1 - \alpha_k) \cdot \prod_{k=1}^l (1 - \delta_k) \quad (6)$$

$$E_{d_l} = \frac{E_{d_l}}{n} \cdot \delta_l \cdot \prod_{k=1}^l (1 - \alpha_k) \cdot \prod_{k=1}^{l-1} (1 - \delta_k) \quad (7)$$

$$T_l = T_l + \frac{1}{c} \sum_{k=1}^l l_k \quad (8)$$

$$t_l = T_l + r_l/c \quad (\text{若散射声线进入 } R \text{ 球域}) \quad (9)$$

其中, r_l 为受声点至第 l 面墙反射点的距离; 次级散射声源所发出的散射声线的方向, 用余同法产生两个 (0,1) 上均匀分布的随机数, 按朗伯定理和反射界面坐标矩阵变换确定。

3 仿真算法

仿真算法依下述步骤进行:

第一步, 在计算机内存中开辟二个动态堆栈, 用于存储交替递归追踪中的各有关参数。

第二步, 跟踪由声源发出一条初始声线, 当它碰到一个界面时, 声线分为镜像反射和散射反射两大部分, 在第一个堆栈内存储该声线的散射部分声能 (作为其产生的次级散射声源的能量)、到达时间、与界面相交坐标等参数, 然后继续跟踪其作镜像反射部分的声线, 直至其能量或追踪时间达到设定的判据 (能量或时间小于某预定值)。

第三步, 由第一个动态堆栈中弹出第一条记录的次级声源, 将其分裂为 n 条声线。每条声线方向依蒙特卡罗法产生, 并经朗伯定理计权, 计算机分别依次按与初始声线相同的方法跟踪 n 条散射声线, 并在第二个动态堆栈中存储每条散射声线的有关参数, 直至 n 条声线跟踪完毕。

第四步, 重复第三步骤, 直至第一个堆栈清空。然后由第二个动态堆栈不断弹出所记录的再次一级声源进行跟踪, 并在第一个堆栈进行压栈, ... 不断进行两个动态堆栈间的递归过程, 最后以能量和时间判据控制循环截止。计算机以同样方法进行追踪, 直至全部 N 条声线追踪完毕, 见仿真框图 (图 2)。

应用本算法时, 对于四周均由具有较强散射作用的墙面围成的矩形房间, 计算量相当大, 动态堆栈的内存开销将剧增, 以至达到几百兆, 超出一般 PC 机的 RAM 容量。对此, 我们应用在计算机硬盘上开辟虚拟内存的方法, 解决这一问题。与此同时, 对算法中的第四步, 用强制的方法, 控制二个堆栈递归的阶次; 一般取 2 个阶次的递归, 并不会给仿真引

入很大的误差。

N 条声线在计算机上的追踪时间 t_{comp} 可以下式估计：

$$t_{comp} \approx N(t_{ray} + n \cdot m^M \cdot t'_{ray}) \quad (10)$$

式中， t_{ray} 为对一条初始声线作镜像反射追踪平均所需的时间； n 为一条入射声线所产生的散射声线数量； m 为一条散射声线作镜像反射时平均碰撞墙面的次数； M 为两个动态堆栈交换数据的次数； t'_{ray} 为对一条散射声线作镜像反射追踪时平均所需的时间。

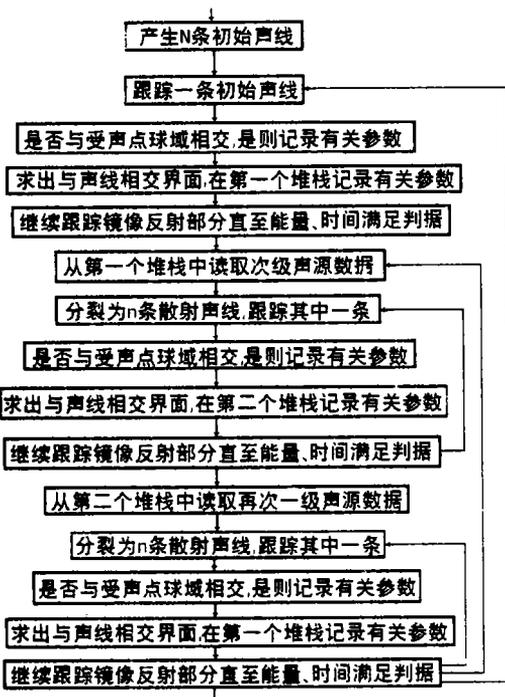


图 2 仿真算法流程图

4 二个例子

例一：对一个矩形房间脉冲响应的仿真。

矩形房间长 40m、宽 30m、高 15m。设其整个顶面安置了散射结构 ($\delta = 0.95$, $\alpha = 0.15$)，整个地面安置了吸声结构 ($\delta = 0$, $\alpha = 0.60$)，四面墙面结构相同 ($\delta = 0$, $\alpha = 0.15$)。

应用本文算法计算出该房间的脉冲响应见图 3。为使结果尽量精确，假定声源发出 1×10^6 条声线，每条声线遇到界面时被分裂为 10 条散射声线和 1 条镜像反射声线，二个动态堆栈间的递归阶次控制为 4 次。在 486DX2/66PC 计算机 16 位 C 语言平台上，程序运行了 51 分钟，受声点记录的数据量为 45.6KB。该脉冲响应的细部描述见图 4。

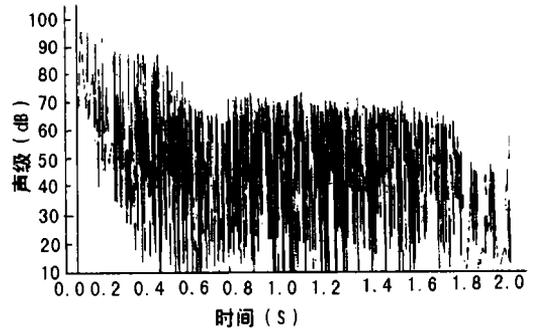


图 3 算例声场的脉冲响应

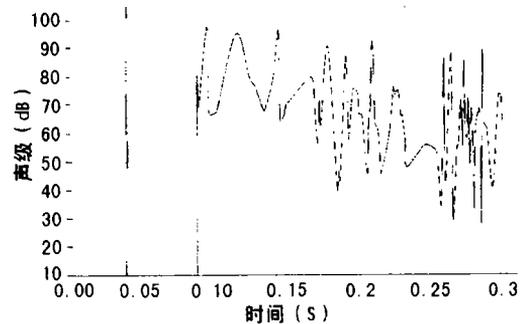


图 4 图 3 算例声场的脉冲响应细部

例二：对一个缩尺模型房间脉冲响应的仿真。

Hodgson^[7] 应用缩尺模型实验研究了具有粗糙墙面矩形房间的声散射现象，证明对于扁平狭长型房间，散射反射尤其具有重要作用。

Hodgson 的缩尺模型实验^[14]中所研究的矩形厂房，其长×宽×高为 110m×55m×5.5m(按模型比例换算成足尺)。模型用表面涂漆的胶合板制成，对 630Hz 的声音，其吸声系数约为

0.05-0.1, 实测缩尺模型的混响时间为 5.4s。

应用本文算法计算出该厂房对 630Hz 声音的脉冲响应见图 5, 其中界面声散射系数 δ 取 0.3。由于整个模型的界面都必须考虑散射反射的作用, 计算时声源初始声线取为 1×10^4 条; 每条入射声线碰到界面后被分裂为 1 条镜像反射声线和 1 条散射声线, 二个动态堆栈间的递归阶次控制为 2 次。程序运算了 1 小时 12 分, 受声点记录的数据量为 9.2MKB。

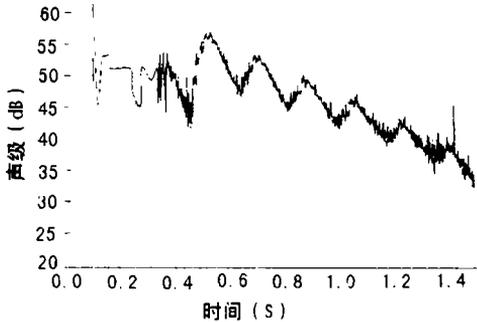


图 5 缩尺模型^[7]声场的脉冲响应 ($\delta = 0.3$)

Schroeder 提出用脉冲响应积分求混响时间的方法^[15], 如下式所示:

$$\langle S^2(t) \rangle = N \int_t^\infty r^2(x) dx \quad (11)$$

式中, $S(t)$ 是稳态噪声的声压衰减函数, $\langle \rangle$ 表示群体平均; $r(x)$ 是被研究房间的脉冲响应; N 为谱密度。上式表示, 声场声能密度衰减的群体平均, 可以由脉冲响应求出。根据上式, 可用下式求出混响时间:

$$10 \log \langle S^2(t) \rangle \approx 10 \log \sum_{i=1}^n r^2(i) \cdot (t_{i+1} - t_i) + 10 \log N \quad (12)$$

式中 $r(i)$ 为 t_i 时刻脉冲响应的值。由于 N 为常数, 上式第一部分所构成曲线的斜率近视表示了 RT 值。Schroeder 指出^[16], t_n 取 RT 的五分之一以上时, (12) 式得出的误差不大。由此, 我们从图 5 得到本例仿真结果混响时间约为 5.29s, 与模型实测值 5.4s 接近。

5 讨论和结论

本文算法的精度与声源的初始声线数量 N 、受声点球域半径和脉冲响应时间长度等因素有关。受声点球域半径取 1.0m 时, 所获得的脉冲响应曲线的早期部分误差较小, 后期部分误差相对较大; N 越大, 模拟结果越准确。同样, 一条入射声线所产生的散射声线数量 n 值越大, 误差也越小。由于散射声线仅在界面一侧散开, 因此 n 可取 $N/2$ 作为理论上的上限。如被模拟房间仅有部分墙面具有较强的散射作用(如例一), 计算量相对较小, n 可取较大值。对于四周均具有强散射作用墙面的情形(如例二), 计算量就会很大, 这时 n 可取较小值。此外, 本文算法在受声点会产生大文件数据, 对此我们采用外部磁盘排序、归并的方法进行处理^[17,18]。

本文为进一步考虑界面声散射的室内声场计算机仿真提出一种新算法; 本方法不准推广至对任意形状的房间进行声场计算机仿真, 并可进一步应用于声场可听化仿真。

参 考 文 献

- 1 Cremer L, Muler H. Principles and Application of Room Acoustics (translated by Schultz T). London: Applied Science, 1982, Vol 1, Vol 2.
- 2 Kleiner M, Dalenback B I, Svensson P. J. Audio Eng.Soc., 1993, 41: 861-875.
- 3 Rindel J H, Naylor G. Proceedings of 14th International Congress on Acoustics. Beijing/China, 1992. Vol 3, F2-1.
- 4 Vorlander M. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86: 172-178.
- 5 库特鲁夫 H. 室内声学. 沈耀译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- 6 Daienback B I, Kleiner M, Svensson P. J. Audio Eng.Soc., 1994, 42: 793-807.
- 7 Hodgson M. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89: 765-771.
- 8 Lam Y W. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 100: 2181-2192.
- 9 Dalenback B I L. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 100: 899-909.

- 10 Lam Y W. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, **100**: 2193-2203.
- 11 Krokstad A, Strom S, Sorsdal S. *J. Sound and Vibration*, 1968, **8**: 118-125.
- 12 Kulowski A. *Applied Acoustics*, 1985, **18**: 449-469.
- 13 秦佑国. 建筑物理研究论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. 56-59.
- 14 Hodgson M R, Orlowski R J. *J. Sound and Vibration*, 1987, **113**: 257-271.
- 15 Schroeder M R. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1965, **37**: 409-412.
- 16 Schroeder M R. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1966, **40**: 549-551.
- 17 Kunth D E. The art of computer programming/ sorting and searching. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1973, Vol.3.
- 18 Schildt H. C: the complete reference (third edition). Osborne: McGraw-Hill, 1995.

国际学术会议“衍射日 '99” (Day on Diffraction '99)

由俄罗斯圣彼得堡大学等单位组织的“衍射日”，其“'99”届将于1999年6月1-4日在圣彼得堡举行。学术会议欢迎有关任何种类波动现象及其关联项目的论文报告。工作语言：英语。论文摘要截止日期：1999年3月5日，内容限一页A4纸，请寄（建议用电子邮件）：

Steklov Mathematical Inst.
Fontanka 27
St. Petersburg 191011 Russia
babich @ pdmi. ras. ru
注册费：\$120. 咨询请联系：Ivan Andronov,
iva@AA2628. spb.edu.

Vassily M. Babich 教授

(本刊讯)

第 16 届国际声学和美国第 135 次声学联合会议 (ICA/ASA'98)

第 16 届国际声学会议 (ICA) 与美国第 135 次声学联合会议 (ASA) 于 1998 年 6 月 21 日在美国华盛顿州首府西雅图 (Seattle) 联合召开，学术会议共进行了 6 天。被收入会议录的论文总数为 1503 篇，其中包括大会报告 16 篇，分组口头报告 1093 篇，大学报论文 325 篇和大学报摘要 69 篇。文章内容分布于下述 14 个领域，即：（按西文开头字母为序）建筑声学、动物声学、声学海洋学、工程声学、音乐声学、噪声、物理声学、心理与生理声学、结构声学及振动、语言通讯和声信号处理及水声学，其中物理声学的论文有的 240 篇居首位。与会者来自世界各地的 49 个国家和地区。由于美国 135 次全国声学学术会议参与这个会议，故美国的论文总数达 715 篇之多，数列第一，其次是日本 (133 篇)，法国 (89 篇)，英国 (68 篇)，中国 (包括港台) 与加拿大各为 60 篇而名列第五，中国大陆占 49 篇，台湾 8 篇，香港 3 篇。

行开幕仪式，该剧院始建于 1926 年，是轻歌舞剧的演出场所，其内部的华丽装饰是仿效我国故宫、天坛及颐和园的风格。开幕式由会议负责人 L.A.Crum 和 P.K.Kuhl 主持，国际声学委员会的有关领导也致了贺辞，讲话与文艺节目穿插进行。从 22 日上午到 26 日下午进行学术报告。由于学术报告按兴趣相近的分科分别在 Sherabon 和 Westin 两个旅馆举行，彼此相距数百米，听众从一个旅馆到另一个旅馆去听报颇费时间。

与会期间还进行了纪念活动，为纪念美国声学界的先驱 I.Rudnick 和 H.Flynn 而进行专题学术讨论会，在两个旅馆还同时举办了展览会，内容包括新书和新刊以及声学仪器设备等。

会议决定，第 17 届国际声学会议将于 2001 年在意大利罗马召开。

会议于 6 月 21 日下午在西雅图第五街剧院举

(中科院声学所 钱祖文)