

室内指向性声源的声场数值模拟

曾向阳, 陈克安

(西北工业大学航海工程学院, 西安 710072)

摘要: 为了利用计算机对室内指向性声源的声场进行模拟, 文中将声线跟踪法、虚源法和 Monte Carlo 法相结合, 编制了一种声场数值模拟仿真程序。该程序能模拟有(或无)指向性声源在室内给定点的声压级等参数值, 还能计算出该点的脉冲响应函数。作为例子, 分别利用该法和声压叠加法研究了点源和偶极子声源的指向性。

关键词: 室内声场; 指向性声源; 数值模拟

中图分类号: TU112.4⁺ 32 **文献标识码:** A

On the numerical simulation of acoustical field in rooms with directional sources

ZENG Xiang-yang, CHEN Ke-an

(Northwestern Polytechnic University, Xian 710072, China)

Abstract: In this paper, an algorithm which combines the ray tracing method, the image method and the Monte Carlo method is designed to calculate the acoustical field in rooms with directional sources. A corresponding computer program is designed and some parameters, such as the pressure level and the impulse response, can be calculated by the program. In the two examples, the pressure levels are calculated and the results are compared with those calculated by the sound pressure superposition method.

Key words: acoustical field in rooms; directional source; numerical simulation

1 引言

与声在自由空间的传播相比, 声在室内的传播过程显得更为复杂, 受房间结构、吸声或散射处理、接收者位置以及声源特性等许多因素的影响, 所以室内声场的计算难度也就相应增大。近年来, 计算机在声场模拟方面的应用受到了人们的重视。但现有的模拟方法都假定声源为无指向性源, 而实际上, 并不存在绝对的无指向性源, 即使是理想化的无指向性点源在不同位置时也可能存在着不同的指向性因数。为了模拟指向性声源的声场, 本文结合几种传统的声场模拟方法, 即声线跟踪法^[1]、虚源法^[2]和 Monte Carlo 法^[3]的各自特点, 将它们稍作改进并组合在一起, 设计了一种新的数值模拟方法, 并编制了仿真程序。为了验证程序可靠性, 文中对一个具体的厅堂模型进行了计算, 研究了点源在不同位置时所反映出的指向特性, 将其结果与声压叠加法的计算结果作了对比^[4], 还简单研究了偶极子指向特性。

2 利用改进算法模拟室内指向性声场

为模拟指向性声场, 我们设计的算法思路如下:

收稿日期: 1999-12-06; 修回日期: 2000-04-28

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, 博士研究生, 主要从事噪声控制、声场模拟等方面的科研工作。

先将声线跟踪法和 Monte Carlo 法结合来确定声场空间中声线的分布。如果声源无指向性, 则具体做法为: 先根据经典声线法的思想确定声源发出的初始声线在空间的分布(均匀分布), 然后求各声线与壁面的碰撞点。在求声线反射方向时, 则根据 Monte Carlo 思想, 由计算机发出一个随机数 $\xi \in [0, 1]$, 根据它的大小来决定声线作镜面反射还是作扩散反射。即当 $\xi < d$ 时作扩散反射, 否则作镜面反射。这里 d 为壁面的扩散反射概率, 满足 $0 \leq d \leq 1$, 须预先设定其值。若声线作镜面反射, 则根据几何声学规律求其新方向, 否则根据计算机发出的随机数来确定。后面例子中的实际声线轨迹见图 1 (声源位于房间中心)。当整个声场的声线分布确定后, 由计算机判知声线是否经过以接收点为中心的球形域, 并将到达接收点声线的到达时刻和此时所携带的能量记录下来, 由此可以得到能量脉冲响应, 如图 2。

如果声源有指向性, 则需要根据声源特性分情况处理。若为已知指向特性的声源, 则按声线跟踪法的方式求解能量脉冲响应, 并需要给初始声线携带的能量按指向特性加权。例如对于偶极子声源, 每根初始声线携带的能量应等于原值乘以 $\cos \theta$, 其中 θ 是该声线的初始方位角。若声源指向特性未知或与声线初始方向等不存在简单的数量关系, 则

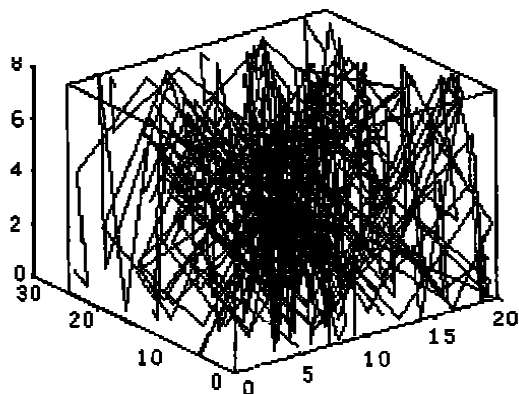


图1 声线轨迹(部分)

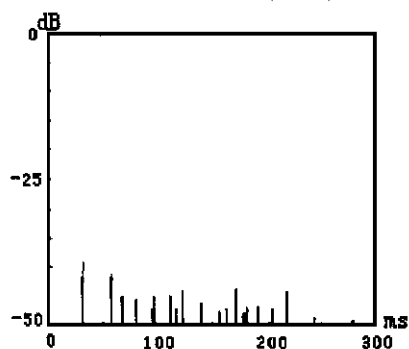


图2 声场脉冲响应

可以将声线跟踪法和虚声源法结合。即利用反向跟踪到达接收点的声线来确定虚声源的位置和声压。同时还要确定每根到达接收点声线的相位变化, 根据其值来判断各虚声源的声压是相互叠加还是相互抵消。得到声压脉冲响应后, 通过简单的平方运算即可获得该点的能量脉冲响应(声线法、虚源法和 Monto Carlo 的算法详见文献[1~3], 这里不再赘述)。

上述算法除了可以计算给定点的声压(或能量)脉冲响应并输出相应图形之外, 还可以求出该点的一些声场参数。例如: 为了计算某点的声压级, 首先要求出该点的能量衰减曲线(EDC):

$$E(t) = \int_t p^2(\tau) d\tau = \int_t e(\tau) d\tau \quad (1)$$

其中, $p(\tau)$ 和 $e(\tau)$ 分别为所求得的声压和能量脉冲响应。然后可以根据下式计算声压级:

$$SPL = 10 \lg \left[\int_0^\infty E(t) dt / U_B \right] \quad (2)$$

其中, $U_B = 4 \times 10^{-10} \text{ N}^2/\text{m}^4$ 为一参考值。如果需要, 还可以用类似的方法计算诸如清晰度等描述声场的参数(算法流程见图3)。

3 算例

在后面的比较中需要利用声压叠加法所得的计声学技术

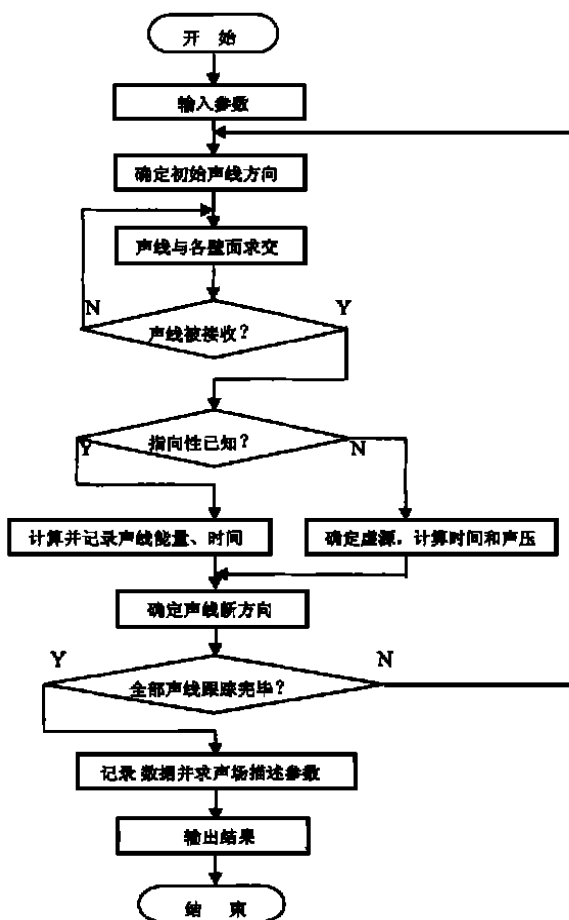


图3 算法流程图

算结果, 故先简单介绍一下这种方法。

3.1 声压叠加法

对于室内指向性声场, 可以分为两个部分来考虑, 即直达声场 p_d 和混响声场 p_r , 两者之和即为室内总声场 p , 这就是声压叠加法的思想。用公式表示即为:

$$|p|^2 = |p_d|^2 + |p_r|^2 \\ = \rho_c W_A (1/4\pi r^2 + 4/R) \quad (3)$$

其中, W_A 为声源功率, r 为接收点离声源的距离, ρ_c 为空气特性阻抗, $R = \bar{\alpha}s/(1 - \bar{\alpha})$ 为房间常数, $\bar{\alpha}$ 是房间的平均吸声系数, s 是房间的全部内表面积。

又知声源功率级 $L_w = 10 \lg W_A + 120$, 故可得距声源 r 处的声压级为:

$$L = L_w + 10 \lg (1/4\pi r^2 + 4/R) \quad (4)$$

考虑到声源的指向性对混响场影响甚微, 故此, 只需对(4)式稍作修改即得指向性声场的声压级计算公式。设声源指向性因数为 Q , 则有:

$$L = L_w + 10 \lg (Q/4\pi r^2 + 4/R) \quad (5)$$

3.2 两个实例

根据第2节中所述算法编制仿真程序后, 我们

对点声源和偶极子的几种不同情形作了计算,同时列出了对点声源声场用声压叠加法求得的结果以作比较。对偶极子情况,则主要研究了不同位置处声压级的差别。

(1) 点声源

已知条件: 房间尺寸为 $20 \times 25 \times 8\text{m}^3$ 的矩形封闭空间, 房间常数为 430m^2 (相应的房间平均吸声系数 $\bar{\alpha}$ 为 0.2, 它可通过房间尺寸及房间常数计算得到), 点源分别位于房间中部、房间顶部、某个墙角, 其声源功率为 0.01W 。在用声压叠加法计算时, 3 种情况的指向性因数分别取为^[4]: 1、2、8, 见图 4。计算结果见表 1。

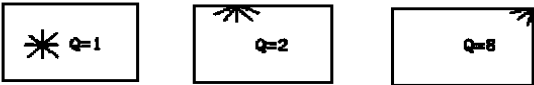


图 4 点声源在不同位置时的指向性因数
表 1 不同位置的点源在各接收点处的声压级

已知条件		数值模拟法	声压叠加法
点源位置	接收位置	声压级/ dB	
(10, 12.5, 4)	(15, 17.5, 7.7)	79.2	80.2
	(13, 15.1, 7)	79.9	81.0
(10, 12.5, 8)	(5, 8.8, 3)	78.6	80.7
	(7, 15.1, 5)	81.3	82.0
(20, 25, 8)	(15, 20, 4.3)	88.3	82.8
	(17, 22.4, 5)	90.8	85.4

(2) 偶极子

已知条件: 房间情况同上, 声源功率为 0.01W 。计算结果见表 2。

表 2 偶极子源在各接收位置的声压级

已知条件		数值模拟法
偶极子位置	接收位置	声压级/ dB
偶极子的两个点源分别位于 (4, 8, 6) 和 (5, 8, 6)	(4.5, 15, 6)	8.6
	(4.5, 3, 7)	14.0
	(4.5, 17, 3)	7.9
	(9, 8, 6)	81.6
	(15, 8, 6)	85.7
	(3, 8, 6)	86.1

4 讨 论

由表 1 可以看出:

- (1) 室内各点声压级并不象自由场那样满足随距离增加而减小的规律, 而是和距离没有明确关系。
- (2) 点源声场数值模拟的结果与声压叠加法计算结果比较接近 (多数误差在 3dB 以内)。只有当点源位于角落时, 误差较大 (超过 5dB), 原因可能是声线在角落区域内的反射比较复杂, 而仿真程序对

于声线射向角落情况采取了简化处理手段, 即认为射向角落的声线被吸收。

表 2 中, 偶极子位置固定, 分别计算了位于偶极子轴线上以及偶极子的两个点源连线上共 6 个点的声压级, 从结果可知:

- (1) 偶极子轴线上声压与两点源连线上声压级有显著差别, 前者远小于后者。这与理论解释是相符的, 因为偶极子指向性函数为 $\cos\theta$ (θ 表示两点源中点至接收点的连线与两点源所在直线所成的夹角), 而轴线上接收点所对应的 $\cos\theta$ 值是 0, 两点源连线上接收点对应的 $\cos\theta$ 值是 1 (或 -1)。
- (2) 偶极子轴线上接收点的声压值并不为 0。原因是室内声场存在许多反射声, 这也是室内声场不同于自由声场的地方。

另外需要说明的是: 由于接收域半径以及声线根数等参数对计算的精度和速度影响很大, 每次计算均应统一, 但目前又还没有可靠的参考值, 所以本文在计算时, 将某次用声压叠加法计算所得值与模拟计算值十分接近的上述参数的值作为参考值, 然后在保持不变的情况下进行了各次计算。文中所采用的声线根数和接收球域半径分别为 2000 根和 0.5m。在主频为 366MHz 的计算机上, 前面各组计算时间均在 5min 之内。

5 结 论

本文给出了一种考虑声源指向性的用混合法模拟计算室内声场的算法。作为例子, 根据自行研制的仿真程序, 对人们比较熟悉的点声源和偶极子的指向性作了简单研究。由于该算法是虚源法、声线法和 Monte Carlo 法的结合, 因此它能同时对镜面反射、扩散反射加以考虑。根据实例的计算情况以及对结果的分析可以得出结论: 前述的改进算法可以用于具有较简单指向性的声场的模拟计算, 并且还具有较高的计算速度。不过, 在如何处理声线在墙角等特殊位置的反射以及接收域大小的选取等方面还有待于继续研究和改进。

参考文献:

[1] 曾向阳, 陈克安, 刘峰. 计算房间脉冲响应的经典方法——声线跟踪法研究[J]. 电声技术, 1999, 3: 30-34.
[2] Jont B. Allen and David A. Berkley. Image method for efficiently simulating small room acoustics [J], J. Acoust. Soc. Am., 1979, 65(4): 943-950.
[3] 贺加添. 室内扩散声场的 Monte Carlo 模拟方法[J], 声学技术, 1994, 13(3): 111-115.
[4] 沈廉. 扩声技术[M]. 北京: 人民出版社, 1982. 251-255.