

# 基于声线跟踪法对闭空间声场预测的 接收球半径计算\*

蒋忠进<sup>1†</sup> 邱小军<sup>2</sup> 崔铁军<sup>1</sup>

(1 东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210096)

(2 近代声学教育部重点实验室 南京大学声学研究所 南京 210093)

**摘要** 接收球半径是采用声线跟踪法进行声场预测的一个重要参数。以前所用到的接收球半径一般是通过经验估计得到的,缺乏详细的理论分析。本文从声波传播机理角度分析了根据声线密度来确定接收球半径的原因,并推导了矩形闭空间中声线密度和接收球半径的计算方法。声线密度可以通过原始声线数目,声场空间体积与形状,边界吸声系数来确定。在一给定闭空间里,声线密度可看作是均匀分布的,所以接收球半径与空间位置无关,可看作是一个常数。但对不同的声场空间来说,由于空间体积、形状和吸声系数的变化,声线密度是不同的,因此接收球半径也会不同。声线密度越大,接收球半径越小;声线密度越小,接收球半径越大。实验表明,所提出的接收球模型能用来较准确地预测闭空间里的声压级和混响时间等声学参数。

**关键词** 声线跟踪, 声线密度, 接收球半径, 闭空间

## Computation of the receiving radius in an enclosure in sound field prediction based on ray-tracing method

JIANG Zhong-Jin<sup>1</sup> QIU Xiao-Jun<sup>2</sup> CUI Tie-Jun<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096)

(2 Key Laboratory of Modern Acoustics (MoE) and Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** The receiving radius is an important parameter in ray-tracing sound prediction, whose value has often been estimated in empirical ways due to the lack of theoretical basis. This paper analyzes the reason that the receiving radius is determined by the sound ray density, and derives a formula for calculating the radius of the receiving sphere in rectangular enclosures. The sound ray density can be determined by the initial sound ray number, the volume and shape of the sound field, and the absorption coefficient of the boundaries.

2007-04-02 收稿; 2008-07-02 定稿

\* 国家自然科学基金资助项目(10674068, 60671015), 中国博士后科学基金资助项目(2004036414), 江苏省博士后科研资助计划项目。

作者简介: 蒋忠进(1973 - ), 男, 博士, 东南大学信息科学与工程学院副教授, 主要研究方向为声场预测、微弱信号提取、雷达目标特性和目标识别。

邱小军(1968 - ), 男, 南京大学声学研究所教授, 博士生导师。

崔铁军(1965 - ), 男, 东南大学博士生导师, 长江学者特聘教授。

† 通信联系人 E-mail: jiangzhongjin@sina.com

In an established enclosed sound field, the sound ray can be regarded as being distributed evenly, so that the receiving radius does not vary with the receiving position and is a constant. However, for different sound fields, because of the difference in the space volume, shape and absorption coefficient, the receiving radius are different. The greater is the sound ray density, the less is the receiving radius; the less is the sound ray density, the greater is the receiving radius. Experimental results validate that our proposed method for calculating the receiving radius can be used to predict some acoustical indexes such as the sound pressure level and the reverberation time in an enclosure.

**Key words** Ray-tracing method, Sound ray density, Receiving radius, Enclosure

## 1 引言

基于几何声学的声场预测方法包括声线跟踪方法<sup>[1, 2]</sup>, 像源法<sup>[3, 4]</sup>, 以及声线跟踪与像源法相结合等三种主要方法<sup>[5]</sup>, 而最后一种方法又包括圆锥束法<sup>[6]</sup>和三棱锥束法<sup>[7]</sup>, 这些方法在建筑声学领域已经得到广泛的使用。在腔体形状较复杂时, 一般采用声线跟踪法, 而在声线跟踪法里, 接收球是一个不可缺少的重要环节; 如何确定接收球的半径, 即声线接收球半径, 仍然是一个需要研究的问题。

当前共有三类接收模型, 在第一类接收模型里, 接收球半径是一个常数, 它不随声场空间中接收点位置的变化而变化, 甚至在不同吸声特性的声场空间里, 它也是同一个值。常见的例子如 Normal 接收模型<sup>[8-10]</sup>, 其常用的接收球半径是 0.5m 或者 1.0m<sup>[8, 11]</sup>。该接收球模型里, 接收半径、声场空间体积和初始声线数目之间的关系可以表示为  $r = \left(\frac{15V}{2\pi N}\right)^{\frac{1}{3}}$ , 这里  $r$  是接收半径,  $N$  是初始声线数目,  $V$  是声场空间容积。这种接收球半径有很大的局限性, 不能适用于任意尺寸的空间, Hilmar 已经证明了它所带来的系统误差<sup>[12, 13]</sup>。

在第二类接收模型里, 接收半径在一个既定的空间里是不变的, 但它对于不同的空间却是变化的, 因为不同声空间的体积、吸声系数和声线密度是不同的, 本文中所研究的也是这种接收模型。

在第三类接收模型里, 接收半径在不同声空间中是不同的, 即便是在同一个声空间里, 接收半径也会随着接收位置的变化而变化。这种接收模型首先由 Hilmar 提出<sup>[12]</sup>, 其接收球半径计算公式可以表示为  $r = d \sqrt{\frac{2\pi}{N}} = ct \sqrt{\frac{2\pi}{N}}$ , 其中  $d$  是声线的传播距离,  $c$  指声速, 而  $t$  表示声线的传播时间。因为随着声线向前传播, 接收球半径需要不断更新, 因而这种接收球模型的计算量很大。

Zeng 等针对第三类接收球模型进行了改进<sup>[14]</sup> (本论文中称之为 Zeng 模型), 改进的接收球半径表示为  $r = d_{SR} \sqrt{\frac{4}{N} \log_{10} V}$ , 其中  $d_{SR}$  表示声源到接收点之间的直线距离 (本文简称源接距)。由于改进的接收球半径与源接距成正比, 当接收点距声源很远时, 接收球半径很大, 这会降低远距离处的预测空间分辨率。

本文基于矩形闭空间, 提出一个计算接收球半径的公式, 其接收球半径与声线密度有关, 但与接收球的空间位置无关, 故属于第二类接收球模型。在该接收模型里, 初始声线根据预定的方位角, 全方位地从点声源发出。在声线的传播过程中如果遇到界面, 将产生镜面反射, 以及根据拉格朗日模型产生散射<sup>[15, 16]</sup>。对每根声线的跟踪从发射开始, 并将在声线能量低于能量阈值时结束。声线通过一个接收球来检测它是否通过接收点, 对接收到的声线到达时间和能量进行统计, 即可得到该点的脉

冲响应。

## 2 接收球半径计算方法

### 2.1 声线密度与接收球半径

在本论文提出的接收模型里,声线密度越小,接收球半径越大,否则统计所需的声线数目将得不到满足,声场预测精度将会降低。反过来,声线密度越大,接收球半径就应该越小,否则计算量将会很大,并且声场预测的空间分辨率将会毫无意义地降低。

当声场空间不是明显的长空间或者扁空间时,闭空间中的声场可以被认为扩散声场,其中的声线密度从统计的角度来说是均匀分布的。尽管声线密度在不同的点不可能完全均匀,但其波动会较小。所以在一个既定的闭空间里,接收球半径对于不同的位置可以是一个常量。在不同的声场空间里,由于空间体积、形状和吸声系数的变化,会导致声线密度的变化,所以接收球半径也应该相互不同。

影响声线密度的因素主要有如下几个:第一个是初始声线数目,它是决定声线密度的首要因素;第二个是闭空间的体积,因为空间体积越大,声线密度将会越低;声场空间的形状,也是影响声线密度的一个因素,因为较扁的空间里声线与边界的碰撞频率高,能量衰减快,会降低声线密度。最后,边界吸声系数也是一个影响声线密度的因素,因为边界吸声系数越大,声能量将会衰减得越快,导致声线数目的减少。所以在计算声线密度和接收球半径的时候,应该考虑这四个因素。

### 2.2 接收球半径的计算方法

如图1(a)所示,在一个长、宽和高分别为 $l$ 、 $w$ 和 $h$ 的矩形闭空间里,声线在各个方向无序反射,并均匀分布。可以肯定的是,每根声线必然介于某两个面之间,而且在每两个面之间会有很多声线。由于矩形空间具有六个面,根据数学组合原理,15个面两两组合,就可以把所有的声线分为15组,每组介于某两个界

面之间。

如图1(a)所示,介于ABCD和A'B'C'D'之间的声线会穿越象EFGH和E'F'GH这样的平面,而EFGH是其中面积最小的一个,因为它跟直线AA'相垂直。这里EFGH的面积被定义为该组声线的穿越面积,称之为 $S_{P-EFGH}$ 。小球O是接收球,灰色区域是接收球在EFGH上的投影。灰色区域的面积被定义为该声线组的接收面积,称之为 $S_{R-EFGH}$ 。这是因为该声线组里被接收到的声线都会穿越接收球里的一个圆面,其面积就是 $S_{R-EFGH}$ 。如果该声线组里的声线总数目是 $N_{P-EFGH}$ ,被接收到的声线数目是 $N_{R-EFGH}$ ,则该声线组里的声线密度可以定义为

$$\rho_{EFGH} = \frac{N_{P-EFGH}}{S_{P-EFGH}} = \frac{N_{R-EFGH}}{S_{R-EFGH}} \quad (1)$$

所以声线密度就是经过单位穿越面积的声线数目。

这15组声线又可以被分为三类,每一类包含5组。第一类如图1(b)所示,图中每个双向箭头代表一组声线。这一类包含的声线组分别为介于ABCD和A'B'C'D'之间,介于AA'B'B和BB'C'C之间,介于BB'C'C和CC'D'D之间,介于CC'D'D和DD'A'A之间,介于DD'A'A和AA'B'B之间的五组。同理,第二和第三类声线组分别如图1(c)和1(d)所示。

在第一类里,对于介于ABCD和A'B'C'D'(如图1(b))之间的声线组,穿越面积 $S_{P-EFGH}$ 为 $w \times l$ 。如果接收球半径为 $r$ ,则接收面积 $S_{R-EFGH}$ 为 $\pi r^2$ 。

在计算第一类里介于DD'A'A和AA'B'B之间的声线组的穿越面积时(如图1(e)所示),AA'E'E垂直于DD'B'B,所以它就是穿越面积。同理,CC'F'F是介于BB'C'C和CC'D'D之间的穿越面积。其面积可计算如下

$$S_{P-AA'E'E} = S_{P-CC'F'F} = h \frac{wl}{\sqrt{w^2 + l^2}} \quad (2)$$

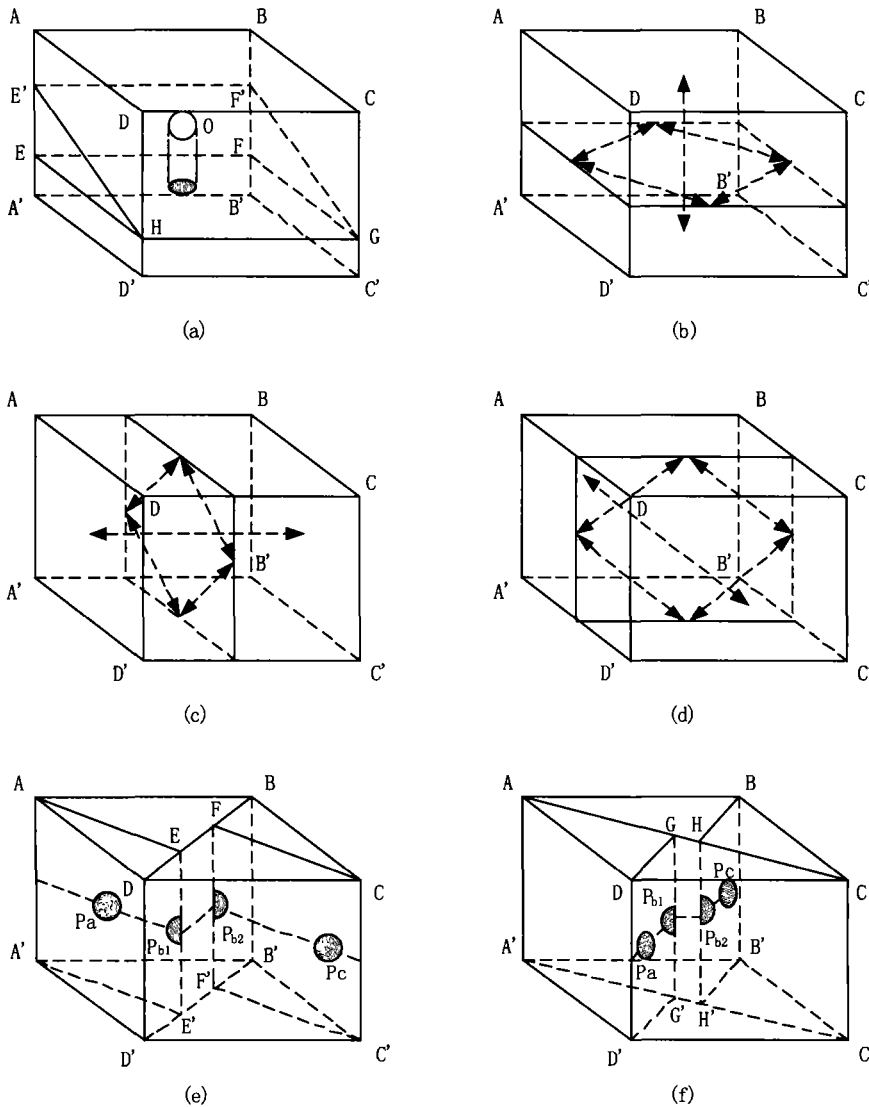


图 1 矩形空间中的穿越面积和接收面积 (a) 介于 ABCD 和 A'B'C'D' 之间的穿越面积和接收面积; (b) 第一类; (c) 第二类; (d) 第三类; (e), (f) 相邻两个界面之间的接收面积和穿越面积

当计算 DD'A'A 和 AA'B'B 之间的接收面积以及 BB'C'C 和 CC'D'D 之间的接收面积时,接收球在 AA'E'E 和 CC'F'F 上的投影会随着接收球的移动而移动。接收球的投影可能会全在 AA'E'E 上,如灰色区域 Pa 所示,也可能全在 CC'F'F 上,如灰色区域 Pc 所示。也可能其投影一部分在 AA'E'E 上而另一部分在 CC'F'F 上,如 Pb1 和 Pb2 所示。因此接收面积可以计算如下

$$S_{R-AA'E'E} + S_{R-CC'F'F} = \pi r^2 \quad (3)$$

同理,在第一类里,介于 AA'B'B 和 BB'C'C 之间的穿越面积为  $S_{P-BB'H'H}$  (如图 1(f) 所示), 介于 CC'D'D 和 DD'A'A 之间的穿越面积为  $S_{P-DD'C'G}$ , 并且它们都与  $S_{P-AA'E'E}$  相等。另一方面,介于 AA'B'B 和 BB'C'C 之间的接收面积为  $S_{R-BB'H'H}$ , 介于 CC'D'D 和 DD'A'A 之间的接收面积为  $S_{R-DD'C'G}$ , 而且  $S_{R-BB'H'H}$  与  $S_{R-DD'C'G}$  的和也是  $\pi r^2$ 。

到此为止,将第一类里的5组声线的穿越面积和接收面积相加,得到其总穿越面积和总接收面积分别计算为

$$S_{P-team1} = wl + 4 \frac{wlh}{\sqrt{w^2 + l^2}} \quad (4)$$

$$S_{R-team1} = 3\pi r^2$$

同理,第二类中总的穿越面积和接收面积分别计算为

$$S_{P-team2} = wh + 4 \frac{wlh}{\sqrt{w^2 + h^2}} \quad (5)$$

$$S_{R-team2} = 3\pi r^2$$

第三类中总的穿越面积和接收面积分别计算为

$$S_{P-team3} = lh + 4 \frac{wlh}{\sqrt{l^2 + h^2}} \quad (6)$$

$$S_{R-team3} = 3\pi r^2$$

所有类中总的穿越面积和接收面积分别计算为

$$S_p = wl + wh + lh + \frac{4wlh}{\sqrt{w^2 + l^2}} + \frac{4wlh}{\sqrt{w^2 + h^2}} + \frac{4wlh}{\sqrt{l^2 + h^2}}$$

$$S_R = 9\pi r^2 \quad (7)$$

因为矩形空间里声线是均匀分布的,每组

声线里的声线密度也是彼此相等的。因此如果声空间里总的声线数目为  $N_p$  而被接收声线的总数为  $N_R$ , 则空间里的声线密度可计算如下

$$\rho = \frac{N_{p-1}}{S_{p-1}} = \frac{N_{p-2}}{S_{p-2}} = \dots = \frac{N_{p-15}}{S_{p-15}} \\ = \frac{N_{p-1} + N_{p-2} + \dots + N_{p-15}}{S_{p-1} + S_{p-2} + \dots + S_{p-15}} = \frac{N_p}{S_p} = \frac{N_R}{S_R} \quad (8)$$

这里  $N_{p-i}$  和  $S_{p-i}$  分别表示第  $i$  组里的声线数目和穿越面积。

在声线跟踪法里,反射次数  $M_{ref}$  可以计算如下

$$(1 - \alpha)^{M_{ref}} = C_{th} \quad (9)$$

$$M_{ref} = \log_{1-\alpha} C_{th}$$

这里  $C_{th}$  指跟踪阈值,而  $\alpha$  表示空间边界吸声系数。声线总数  $N_p$  是  $M_{ref}$  和初始声线数目  $N$  之间的乘积

$$N_p = N * M_{ref} = N \log_{1-\alpha} C_{th} \quad (10)$$

声线密度可以计算如下

$$\rho = \frac{N \log_{1-\alpha} C_{th}}{wl + wh + lh + \frac{4wlh}{\sqrt{w^2 + l^2}} + \frac{4wlh}{\sqrt{w^2 + h^2}} + \frac{4wlh}{\sqrt{l^2 + h^2}}} = \frac{N_R}{9\pi r^2} \quad (11)$$

因此接收球半径可以计算如下

$$r = \sqrt{\frac{N_R \left( wl + wh + lh + \frac{4wlh}{\sqrt{w^2 + l^2}} + \frac{4wlh}{\sqrt{w^2 + h^2}} + \frac{4wlh}{\sqrt{l^2 + h^2}} \right)}{9\pi N \log_{1-\alpha} C_{th}}} \\ = \sqrt{\frac{N_R \left( \frac{S}{2} + 4V \left( \frac{1}{\sqrt{w^2 + l^2}} + \frac{1}{\sqrt{w^2 + h^2}} + \frac{1}{\sqrt{l^2 + h^2}} \right) \right)}{9\pi N \log_{1-\alpha} C_{th}}} \quad (12)$$

在上面的公式里,  $S$  表示矩形闭空间的表面积并与空间形状有关。 $V$  表示矩形闭空间的体积。所以接收球半径与初始声线数目、闭空间的体积和形状,以及边界的吸声系数有关。

### 2.3 声压级的计算

在声线跟踪声场预测里,所有到达接收球的声线都能被检测到,并且它们的声强和到达时间都可以被计算出来。第  $i$  根声线的声强  $I_i$  可计算如下<sup>[8, 14]</sup>

$$I_i = \frac{W_i a_{r_i}}{V_r} \quad (13)$$

这里  $W_i$  表示声线到达接收球时的功率,  $d_{r_i}$  表示声线穿越接收球的距离,  $V_r$  指接收球的体积。不同声线的声强可以根据它们的到达时间而进行排序,就能得到接收点的脉冲响应  $I(t)$ 。

通过脉冲响应可以计算声场中某点的声压级 (SPL) 如下<sup>[14]</sup>

$$SPL = 10\log_{10}\left(\frac{P_e^2}{4 \times 10^{-10}}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{\rho_0 c_0 \int_0^{\infty} I(t) dt}{4 \times 10^{10}}\right) \quad (14)$$

通常条件下,空气的  $\rho_0 c_0$  取  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ , 所以 SPL 可以计算如下

$$SPL = 120 + 10\log_{10}\left(\int_0^{\infty} I(t) dt\right) \quad (15)$$

这种算法已经被广泛地应用在不同的接收模型里。

### 3 实测与预测结果比较

下面通过试验,将 Normal 接收球模型, Zeng 接收球模型,以及本文中所提出的接收球模型的性能进行相互比较。首先,针对两个不同的矩形闭空间中的 SPL 和混响时间  $T_{30}$  进行了测量,然后再用上面三种接收球模型的声线跟踪法进行预测,最后将预测结果和实测结果进行比较。两个闭空间里,一个是混响室,另一个是普通的矩形房间。矩形房间有两扇窗户和一扇木门,所以其结构相对复杂一些。选择矩形房间的目的是测试新接收球模型在普通房间里的预测效果。

混响室的宽、长和高分别是  $5.91\text{m}$ 、 $7.34\text{m}$  和  $5.27\text{m}$ , 而矩形房间的宽、长和高分别是  $4.52\text{m}$ 、 $5.43\text{m}$  和  $3.41\text{m}$ , 它们的体积和形状彼

此不同。两个空间的边界吸声系数如表 1 所示,均通过混响时间测量结果计算得到,所对应的频段是  $125 \sim 4000\text{Hz}$  之间的各个倍频程。混响室的墙壁是光滑水泥面,而矩形房间的墙壁是普通抹灰面,因此其具有稍大的吸声系数。在每个闭空间里都共选 9 个测试点,它们的坐标和源接距(声源到测试点的位置)如表 2 所示,表中同时给出了声源的坐标,其中  $d_{SR}$  表示源接距。

表 1 两个矩形空间的吸声系数

		混响室					
频率 (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$		0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
		矩形房间					
频率 (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$		0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07

实验测量采用 B&K Pulse - 3560D 多信号分析系统,所用的接收传声器的型号是 B&K4190。Pulse 系统产生频率范围为  $100\text{Hz}$  到  $5\text{kHz}$  的宽带噪声作为测试信号,并通过一个  $150\text{W}$  的音箱进行放大输出。Pulse 系统对接收到的声音进行处理,并得到各个测试点声场的声压级和混响时间。在声线跟踪预测中所用的初始声线数目  $N$  是  $25,000$ 。跟踪阈值  $C_{th}$  和接收声线数目  $N_R$  分别设为  $0.001$  和  $1500$ 。

表 2 声源和测试点的坐标

		混响室								
	声源	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9
X (m)	0.6	1.5	3	1	4.5	3	4.5	1.6	4.5	3
Y (m)	0.8	1.8	1.8	3.6	1.8	3.6	3.6	5.6	5.4	5.9
Z (m)	0.5	2	1	1.5	2	3.5	1.6	3.8	1	4.7
dSR (m)	0	2.01	2.65	3	4.3	4.75	4.93	5.91	6.05	7.03
		矩形房间								
	声源	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9
X (m)	0.6	1.5	2	2.5	2.5	3	3.5	3.5	4	4
Y (m)	0.8	2	2	3	2	3	4	4	5	5
Z (m)	0.5	1	2	1	3	2	1	3	2	3
dSR (m)	0	1.58	2.38	2.95	3.36	3.58	4.35	4.99	5.61	5.95

在混响室中经实测和预测得到的相对声压级如图 2(a) 所示。图中显示的是在每个测试点,500Hz 和 1000Hz 的相对声压级的平均值。由图可见,随着源接距的增加,相对声压级不断下降,符合室内声场规律。在比较各种接收球模型的预测结果时,Jiang 接收球模型的结果最接近测量结果,Zeng 模型的效果其次,Normal 接收球模型的效果再次。Normal 模型,Zeng 模型和 Jiang 模型的预测误差分别为 1.23dB, 1.11dB 和 0.74dB。

在混响室里实测和预测得到的  $T_{30}$  在图 2(b) 中进行了相互比较。共针对 9 个测试点的 125 ~ 4000Hz 内的各个倍频程进行了预测和测量。在每个频率上,图中给出的  $T_{30}$  是 9 个测试点上的平均  $T_{30}$  值。由图可见,Jiang 模型的效果好于其它另外两种接收球模型。Normal 模型、Zeng 模型和 Jiang 模型的预测误差分别为 0.73s、0.22s 和 0.20s。

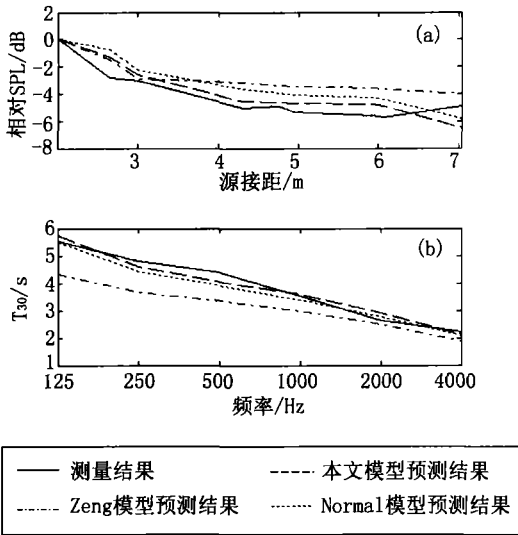


图 2 混响室中的测量结果和预测结果  
(a)测量的和预测的 SPL;  
(b)测量的和预测的  $T_{30}$

矩形房间中的结果如图 3(a) 所示。从图中可见,Zeng 模型的效果比 Jiang 模型的效果稍好,而这两种模型的效果均强于 Normal 模型。Normal 模型,Zeng 模型和 Jiang 模型的预

测误差分别是 1.39dB, 1.06dB 和 1.14dB。与图 2(a) 相比,由于矩形房间结构更加复杂,随着源接距的增加,矩形房间内的相对声压级有着明显的波动。

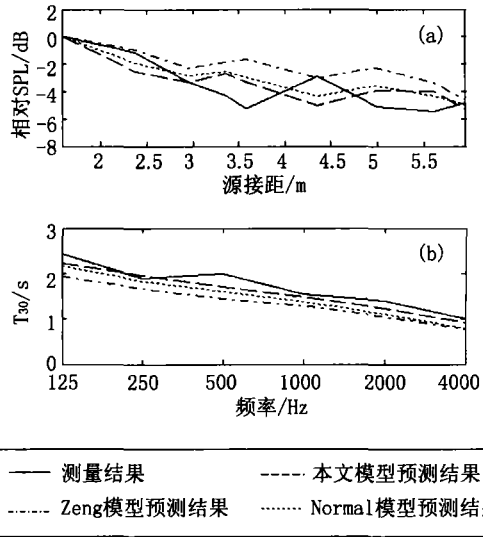


图 3 矩形房间中的测量结果和预测结果  
(a)测量的和预测的 SPL;  
(b)测量的和预测的  $T_{30}$

矩形房间里实测和预测得到  $T_{30}$  如图 3(b) 所示。在每个频率上, $T_{30}$  都是 9 个测试点的平均  $T_{30}$ 。本文模型能比其它两种模型更准确地预测混响时间,而 Zeng 模型的效果要比 Normal 模型好。Normal 模型,Zeng 模型和本文模型的预测误差分别为 0.36s, 0.24s 和 0.14s。

### 4 结论

对于一个给定的闭空间,针对位置不同的点,接收球半径一般是一个常数,但对于不同的闭空间来说,由于各空间里的声线密度是不同的,故接收球半径应该是变化的。本文针对闭空间里声线密度在声场预测中的作用,以及决定声线密度的各种因素,提出了根据初始声线数目、声场空间体积和形状、边界吸声系数来确定声线接收球半径的新方法。根据不同空

间里的实测和预测结果,新接收球模型能较准确地预测声压级和混响时间等声学指数。

如果声场空间不是理想的矩形空间,但形状近似矩形,可以估计其长、宽和高,并采用本文提出的方法计算其接收球半径。对于形状更复杂的空间,怎样根据声线密度来合理计算其声线接收球半径,也是今后将继续的工作。

### 参 考 文 献

- [1] Krokstad A, Strom S, Sorsdal S. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, 1968, 8(1):118-125.
- [2] Kulowski A. Algorithmic representation of the ray-tracing technique. *Applied Acoustics*, 1985, 18(6):449-469.
- [3] Heinz R. Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical method to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberation tail. *Applied Acoustics*, 1993, 38(2):145-159.
- [4] Lee H, Lee B H. An efficient algorithm for the image model technique. *Applied Acoustics*, 1988, 24(2):87-115.
- [5] Drumm I A, Lam Y W. The adaptive beam-tracing algorithm. *Journal of the Acoustics Society of America*, 2000, 107(4):1405-1412.
- [6] Vorlander M. Simulation of the transient and the steady-state sound propagation in rooms using new combined ray-tracing/image source algorithm. *Journal of the Acoustics Society of America*, 1989, 86(1):172-176.
- [7] Lewers T. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, 1993, 38(2):161-178.
- [8] Yang L N, Shield B M. Development of a ray tracing computer model for the prediction of the sound field in long enclosure. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 229(1):133-146.
- [9] Dance S M, Shield B M. The effect on prediction accuracy reducing the number of rays in a ray-tracing model. *Inter-Noise94*, 1994, 3:2127-2130.
- [10] Ondet A M, Barbry J L. Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. *Journal of the Acoustics Society of America*, 1989, 85(2):787-796.
- [11] Yang L N, Shield B M. The prediction of speech intelligibility in underground stations of rectangular cross section. *Journal of the Acoustics Society of America*, 2001, 109(1):266-273.
- [12] Lehnert H. Systematic errors of the ray trace algorithm. *Applied Acoustics*, 1993, 38(3):207-221.
- [13] Lehnert H, Blauert J. Principles of binaural room simulation. *Applied Acoustics*, 1993, 38(4):259-291.
- [14] Zeng X Y, Chen K A, Sun J C. On the accuracy of the ray-tracing algorithms based on various sound receiver models. *Applied Acoustics*, 2003, 64(4):433-441.
- [15] Dalenback B. Room acoustics prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection. *Journal of the Acoustics Society of America*, 1996, 100(2):899-909.
- [16] Zeng X Y, Chen K A, Sun J C. Development of a hybrid computer model for simulating the virtual sound field in enclosure. *Applied Acoustics*, 2002, 63(5):481-491.