

文章编号:1006-7329(2002)05-0028-04

室内早期反射声分布研究

张厚斌

(重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045)

摘要:在室内声学中,早期反射声对音质有着重要的影响。因此在反射声布满听众席的过程中形成各界面上的反射区域是音质设计中控制和利用早期反射声的依据。本文利用虚声源法构造声像空间。对室内声场中早期反射声线的方向,历程,延迟时间和各界面上的反射区域用解析法进行分析,推导出各前次反射面的边界坐标和实用的计算表格,使之走向量化设计。

关键词:声线;早期反射面;音质设计

中图分类号:TU112.4+.3

文献标识码:A

在厅堂音质设计中,早期反射声对音质有着重要影响。据研究^[1],在声源停止发声后

$$t_{st} = 2\sqrt{v} \quad \text{ms} \quad (1)$$

(式中 v 为厅堂容积)时间内室内声场主要受几何声学支配,而后才进入统计声场。本文拟用虚声源法及空间向量,直线和平面方程对早期反射声线的方向,历程,反射延迟及反射点的位置,反射区域等进行定量分析,以期对音质设计提供依据。

1 三维直角坐标系中的厅堂模型

我们取矩形体房间为研究对象(见图1)。图中给出了房间尺寸及声源 S 的相对位置。为研究听众所在地面(图1中斜线部分)任一受声点 A 的声场形成过程,我们将该房间置于空间直角坐标系中(图2)。

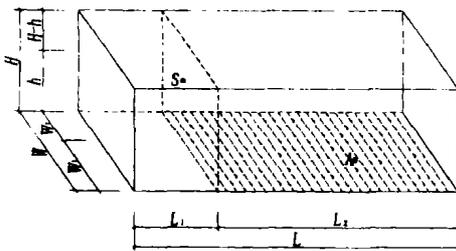


图1 房间模型

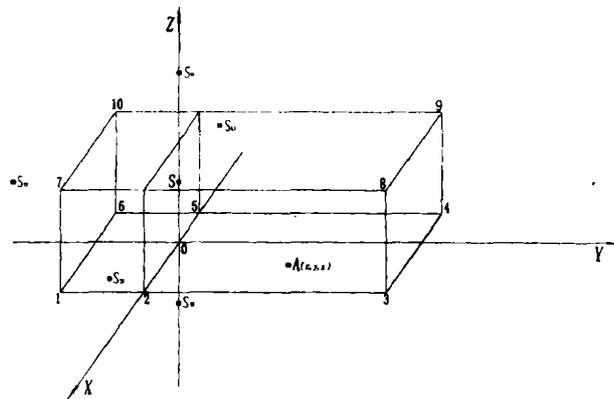


图2 空间直角坐标系中的房间模型

由图2可知,各对应点的坐标为:

$$1(w_1, -L_1, 0) \quad 2(w_1, 0, 0) \quad 3(w_1, L_2, 0) \quad 4(-w_2, L_2, 0) \quad 5(-w_2, 0, 0)$$

* 收稿日期:2002-06-10

作者简介:张厚斌(1953-),男,山东济南,博士生,主要从事建筑物理声学研究。

6(-w₂, -L₁, 0) 7(w₁, -L₁, H) 8(w₁, L₂, H) 9(-w₂, L₂, H) 10(-w₂, -L₁, H)

声源点的坐标为 S(0, 0, h), 若约定:

天棚(7-8-9-10)为界面 1 前墙(1-6-10-7)为界面 2 后墙(3-4-9-8)为界面 3

侧墙(1-3-8-7)为界面 4 侧墙(6-4-9-10)为界面 5 地面(1-3-4-6)为界面 6

则各界面对声源 S 形成虚声源点阵 S₁₁, ..., S_{n1}, S₁₂, ..., S_{n2}, ..., S₁₆, ..., S_{n6}, 下角标中前一数字为虚声源的阶数, 后一数字为界面名称。当引入虚声源 S_{ni}, 该界面就可被移走, 其作用由虚声源来等效。图 2 中对应各界面的虚声源点坐标(X₁, Y₁, Z₁)如表 1。

表 1 虚声源点坐标

虚声源	阶数(n)	X ₁	Y ₁	Z ₁
S _{n1}	n 为奇数	0	0	(n+1)H-h
	n 为偶数	0	0	nH+h
S _{n2}	n 为奇数	0	0	h
	n 为偶数	0	(1-n)L-2L ₁	h
S _{n3}	n 为奇数	0	(n-1)L+2L ₂	h
	n 为偶数	0	nL	h
S _{n4}	n 为奇数	(n-1)+2w ₁	0	h
	n 为偶数	nW	0	h
S _{n5}	n 为奇数	(1-n)W-2w ₂	0	h
	n 为偶数	-nW	0	h
S _{n6}	n 为奇数	0	0	(1-n)H-h
	n 为偶数	0	0	-nH+h

2 声线长度和反射延迟计算

现在我们假定由点声源 S(0, 0, h)发出球面波, 对地面听众区(2-3-4-5)任一受声点 A(x, y, 0)作声线分析。由镜像反射定律和空间两点的距离公式并结合表 1 得知:

由 S 到 A 点的直射声线长度为

$$D_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{2}$$

由 S 经界面 n 次反射到 A 点的反射声线长度为

$$D_n = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \tag{3}$$

(3)式中的 X, Y, Z 对应如表 2。若房间尺寸(L, W, H)以 m 计, 取声速为 340 m/s, 则反射延迟时间为

$$t_n = 3(D_n - D_0) \quad \text{ms} \tag{4}$$

3 前次反射面计算

由空间直线和平面方程可以确定由声源 S 发出的声线在经某界面反射到听众区的过程中在该界面形成的反射面位置, 形状和尺寸。我们约定当声线发射到某界面经 n 次反射到达听众区地面, 在该界面形成的反射面为 n 次反射面。

例如确定界面 1(天棚)上的一次反射面:

由表 2 知, 天棚面上的一次反射次序为 S-1-A, 则经天棚反射到全部听众区地面上的声线在界面 1 形成的反射面是由一阶虚声源 S₁₁(0, 0, 2H-h)和地面 2(w₁, 0, 0), 3(w₁, L₂, 0), 4(-w₂, L₂, 0), 5(-w₂, 0, 0)四点所构成的直线与界面 1(方程 z = H)的交点连成的矩形, 求得四点的坐标如下:

$$\left(\frac{H-h}{2H-h}w_1, 0, H\right) \quad \left(-\frac{H-h}{2H-h}w_1, \frac{H-h}{2H-h}L_2, H\right)$$

$$\left(\frac{H-h}{2H-h}w_2, 0, H \right) \quad \left(-\frac{H-h}{2H-h}w_2, \frac{H-h}{2H-h}L_2, H \right)$$

表 2 反射声线长度计算系数

反射面位置	反射面次数	反射次序	X	Y	Z
天棚(1)	—	S-1-A	x	y	2H-h
	二	S-1-2-A	x	2L ₁ +y	2H-h
		S-1-3-A	x	2L ₂ -y	2H-h
		S-1-4-A	2W ₁ -x	y	2H-h
		S-1-5-A	2W ₂ +x	y	2H-h
前墙(2)	—	S-2-A	x	2L ₁ +y	h
	二	S-2-3-A	x	2L-y	h
后墙(3)	—	S-3-A	x	2L ₂ -y	h
	二	S-3-2-A	x	2L+y	h
侧墙(4)	—	S-4-A	2W ₁ -x	y	h
	二	S-4-2-A	2W ₁ -x	2L ₁ +y	h
		S-4-3-A	2W ₁ -x	2L ₂ -y	h
		S-4-5-A	2W+x	y	h
侧墙(5)	—	S-5-A	2W ₂ +x	y	h
	二	S-5-2-A	2W ₂ +x	2L ₁ +y	h
		S-5-3-A	2W ₂ +x	2L ₂ -y	h
地面(6)	二	S-6-1-A	x	y	2H-h

界面 1 上的二次反射面,例如,按 S-1-3-A 反射次序,先计算虚声源 S(0,2L₂,2H-h)和地面 2,3,4,5 四点构成直线与界面 3(方程 y=L₂)的四个交点,此四交点与虚声源 S₁₁(0,0,2H-h)构成的直线穿过界面 1(z=H)的交点连成的矩形既为界面 1 上的一个二次反射面。该四点坐标如下:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{H-h}{2H-h}w_1, \frac{H-h}{2H-h}L_2, H \right) & \left(\frac{H-h}{2H-h}w_1, \frac{H-h}{2H-h}2L_2, H \right) \\ & \left(-\frac{H-h}{2H-h}w_2, \frac{H-h}{2H-h}L_2, H \right) & \left(-\frac{H-h}{2H-h}w_2, \frac{H-h}{2H-h}2L_2, H \right) \end{aligned}$$

同理,按 S-1-4-A 反射次序,先计算虚声源 S(2w₁,0,2H-h)和地面 2,3,4,5 四点构成直线与界面 4(方程 x=w₁)的四个交点,此四交点与虚声源 S₁₁(0,0,2H-h)构成的直线穿过界面 1 的交点连成的矩形为界面 1 上的另一个二次反射面。该四点坐标如下:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{H-h}{2H-h}w_1, 0, H \right) & \left(\frac{H-h}{2H-h}w_1, \frac{H-h}{2H-h}L_2, H \right) \\ & \left(\frac{H-h}{2H-h}(w+w_1), 0, H \right) & \left(\frac{H-h}{2H-h}(w+w_1), \frac{H-h}{2H-h}2L_2, H \right) \end{aligned}$$

现在举例分析界面 3(后墙)上的反射面分布。按后墙面上的一次反射次序 S-3-A,由虚声源 S₁₃(0,2L₂,h)和地面 2,3,4,5 四点构成直线与界面 3(方程 y=L₂)的四个交点连成的梯形既为界面 3 上的一次反射面。该四点坐标如下:

$$\begin{aligned} & (w_1, L_2, 0) & (-w_2, L_2, 0) \\ & \left(\frac{1}{2}w_1, L_2, \frac{1}{2}h \right) & \left(-\frac{1}{2}w_2, L_2, \frac{1}{2}h \right) \end{aligned}$$

界面 3 上的二次反射面是按 S-3-2-A 的反射次序先求出虚声源 S(0,-2L,h)和地面 2,3,4,5 四点构成直线与界面 2(方程 y=-L₁)的四个交点,此四交点与虚声源 S₁₃(0,2L₂,h)构成的直线与界面 3(y=L₂)上的交点连成的梯形既为界面 3 上的二次反射面。该四交点坐标为:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{L_2}{2L}w_1, L_2, \frac{L+L_1}{2L}h \right) & \left(\frac{L_2}{2L+L_2}w_1, L_2, \frac{2L}{2L+L_2}h \right) \\ & \left(-\frac{L_2}{2L}w_2, L_2, \frac{L+L_1}{2L}h \right) & \left(-\frac{L_2}{2L+L_2}w_2, L_2, \frac{2L}{2L+L_2}h \right) \end{aligned}$$

4 结论

按照表 2 中各反射面的反射次序,我们同样可以计算出其它界面上的反射面。结果表明,三次以上反射面在各界面上所占的反射面积比重越来越小。我们通过对室内早期声场中声线行程,反射延迟的计算以及对早期反射声分布到地面过程中在各界面上产生反射面的量化。对矩形房间各界面在形成混响过程中的作用,提供了十分清楚的概念。由于从任何界面上进行每一次反射时,部分声能将因吸声作用而消失。因此虚声源随着阶数的提高,对接收点的声能贡献越来越小。一二次反射面不仅在各界面上占有很大的反射面积比重,而且通过这些反射面的装修处理对控制反射声在一定延迟时间内到达受声点的能量,调节混响结构细节起着重要作用^[2]。从各反射面的边界计算可以看出,反射面的大小是房间尺寸和声源位置的函数。例如界面 1 上的反射面,通过改变 h/H 的比值,反射面的长宽可以从 0 到 $L_2/2$ 和 $W/2$,因此为吸声材料布置提供了很大的灵活性。我们可以在此基础上,计算任一受声点上各次反射声强度的时间分布和空间分布,从而揭示出传统混响时间所不能表达的混响局部特征,有助于经济有效地进行室内音质设计。

参考文献:

- [1] L. 克雷默. 室内声学设计原理及其应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995.
- [2] 王季卿. 建筑厅堂音质设计[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2001.

Study on Distribution of Early Reflected Sound in Room Acoustics

ZHANG Hou - bin

(Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University B, Chongqing 400045, China)

Abstract: The early reflected sound is a critical factor in room acoustics. In this paper, by means of fictitious sound source, the orientation, course and delay time of early reflected sound rays as well as reflecting areas on interfaces in room acoustic field are analyzed. The coordinates of early reflecting area boundary and practical diagrams have been formed. It is beneficial to quantitative design.

Keywords: sound ray; early reflecting area; acoustic design