

谢兴甫 谢菝菝

(华南理工大学)

1992年2月17日收到

本文提出一类折变形扬声器阵列,它们能兼容地应用于空间环绕声、平面环绕声、双通路立体声和单路声重发。以菱形和准蜂房形折变两种形式为例,给出了在重发时无声像位置畸变条件下的译码方程。文中最后分析了上和下两方向折变情况间的关系。

## 一、引言

过去的研究指出<sup>[1]</sup>,在三维空间环绕声重发中,如果空间的方位由两个方位角 $\theta$ 、 $\phi$ 表示,并规定 $\phi = 0^\circ$ 表示正上方, $\phi = 90^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ 和 $\phi = 90^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ 分别表示正前方和正左方; $N$ 个环绕倾听者的扬声器的方位角分别为 $\theta_n$ 、 $\phi_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ),它们发出声音的振幅分别为 $A_n$ ,那么重发的声像位置 $\theta_l$ 、 $\phi_l$ 由以下三式决定:

$$\sin \phi_l \cdot \sin \theta_l = \frac{\sum_{n=1}^N A_n \cdot \sin \phi_n \cdot \sin \theta_n}{\sum_{n=1}^N A_n} \quad (1a)$$

$$\operatorname{tg} \theta_l = \frac{\sum_{n=1}^N A_n \cdot \sin \phi_n \cdot \sin \theta_n}{\sum_{n=1}^N A_n \cdot \sin \phi_n \cdot \cos \theta_n} \quad (1b)$$

$$\operatorname{tg} \phi_l \cdot \sin \theta_l = \frac{\sum_{n=1}^N A_n \cdot \sin \phi_n \cdot \sin \theta_n}{\sum_{n=1}^N A_n \cdot \cos \phi_n} \quad (1c)$$

它们分别代表倾听者将头部固定和将头部沿 $\theta$ 或 $\phi$ 方向摆动而倾听的结果。

应用这三个公式,我们可以寻求可适用于环绕声重发的各种扬声器阵列及其相应的无声像位置畸变的矩阵译码方程。这里将对一些折

应用声学

变形扬声器阵列作出探讨。所谓折变形扬声器阵列,可以看作是把一些扬声器对称地排列在同一水平平面内,然后再将这个平面的前、后(或左、右)两端向上(或向下)作一个对称形式折变而成(如图1及图3)。这种阵列一般具有左、右或者前、后对称的情况;但没有上、下对称的形式。以下试取菱形折变和准蜂房形折变的情况讨论。

## 二、菱形折变型扬声器阵列

图1(a)所示的是一种菱形折变扬声器阵列的透视图。其中有四个扬声器 $\phi_F$ 、 $\phi_B$ 、 $\phi_L$ 及 $\phi_R$ 前、后、左、右地排列在一个水平平面内的菱形的四个顶角上,然后以任意一个对角线 $\phi_L$  $\phi_R$ (或 $\phi_F$  $\phi_B$ )为轴而将两个半边向上(或向下)折变而成。

当倾听者的头部位于这阵列的中心 $O$ ( $O$ 也为坐标原点,坐标规定同前)时,若令折变后各扬声器对倾听者的仰角或俯角为 $90^\circ - \phi_0$ ,则这四个扬声器的方位角为图1(b)及图1(c):

$$\begin{aligned} \phi_F: \phi_F &= \phi_0 & \theta_F &= 0^\circ \\ \phi_L: \phi_L &= 180^\circ - \phi_0 & \theta_L &= 90^\circ \\ \phi_R: \phi_R &= 180^\circ - \phi_0 & \theta_R &= -90^\circ \\ \phi_B: \phi_B &= \phi_0 & \theta_B &= 180^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

如果三维空间环绕声的四个独立传输(或记录,以下同)信号取为:[2—4]

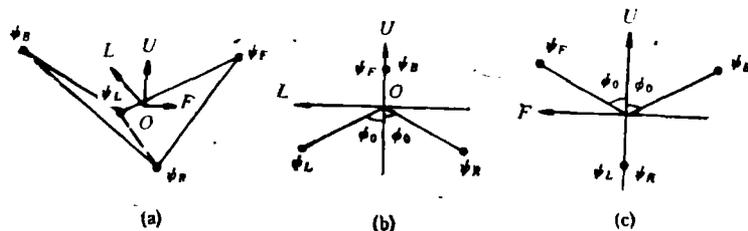


图1 菱形向上折变扬声器阵列  
(a) 透视图 (b) LU 平面投影图 (c) FU 平面投影图

$$\begin{aligned} M &= E_0 \\ S &= K_1 \cdot E_0 \cdot \sin \phi_s \cdot \sin \theta_s, \\ D &= K_1 \cdot E_0 \cdot \sin \phi_s \cdot \cos \theta_s, \\ C &= K_2 \cdot E_0 \cdot \cos \phi_s, \end{aligned} \quad (3)$$

同样,从(5c)式,当:

$$K_2 = \frac{1}{\cos \phi_0} \quad (8a)$$

时,也有一特解:

$$\phi_l = \phi_s \quad \theta_l = \theta_s \quad (8b)$$

这些结果表明,这种重放系统没有声像位置畸变现象。而从上面的结果还可看出,(3)式中所示的传输信号的振幅与  $K_1, K_2$  有关,亦即与扬声器的位置仰角或俯角 ( $90^\circ - \phi_0$ ) 有关。当  $\phi_0$  确定后,  $K_1, K_2$  亦随之确定,(3)式中所示的信号形式也就完全确定。例如:当  $\phi_0 = 45^\circ$  时:

$$K_1 = 2 \cdot \sqrt{2} \quad K_2 = \sqrt{2} \quad (9)$$

当  $\phi_0 = 60^\circ$  时,

$$K_1 = 4/\sqrt{3} \quad K_2 = 2 \quad (10)$$

实际上,信号  $M, S, D$  及  $C$  的振幅未必一定符合(6a)及(8a)式的关系,应用时可以调整这四个通路的放大系数而取得。

这是应用一个无方向性传声器和三个“8”字形指向传声器,重合而置于录声室中,并使其指向主轴分别对正左方  $L$ 、前方  $F$  和上方  $U$  时检拾所得的信号。式中  $K_1, K_2$  和  $E_0$  为与传声器灵敏度有关的常数,  $\theta_s, \phi_s$  为声源的方位角。

在重放中,分别馈给四个扬声器的信号  $F, L, R$  及  $B$  可以从译码方程取得:(考虑到对称性)。

$$\begin{bmatrix} F \\ L \\ R \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M \\ S \\ D \\ C \end{bmatrix} \quad (4)$$

将上式及(2)式代入(1)式可得:

$$\sin \phi_l \cdot \sin \theta_l = \frac{1}{2} \cdot \sin \phi_0 \cdot \frac{S}{M} \quad (5a)$$

$$\operatorname{tg} \theta_l = \frac{S}{D} \quad (5b)$$

$$\operatorname{tg} \phi_l \cdot \sin \theta_l = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg} \phi_0 \cdot \frac{S}{C} \quad (5c)$$

将(3)式代入(5a)式后,当得到,当:

$$K_1 = \frac{2}{\sin \phi_0} \quad (6a)$$

时,其有一特解:

$$\phi_l = \phi_s \quad \theta_l = \theta_s \quad (6b)$$

将(3)式代入(5b)式后,也可得到一个特解:

$$\theta_l = \theta_s \quad (7)$$

### 三、菱形折变型扬声器阵列的重放兼容性

如果将这种扬声器阵列和其译码方程式(4)式用于平面环绕声重放,那么独立传输信号(在(3)式中令  $\phi_s = 90^\circ$ ) 成为:

$$\begin{aligned} M &= E_0 \\ S &= K_1 \cdot E_0 \cdot \sin \theta_s \\ D &= K_1 \cdot E_0 \cdot \cos \theta_s \\ C &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

仿照上节的计算,从(1c)及(2)、(4)、(11)式可得:

$$\phi_l = 90^\circ$$

即声像排列在(LF)水平平面内,而从(1a)及(1b)式都可得到同样的解:

$$\theta_l = \theta_s$$

其中:

$$K_l = \frac{2}{\sin \phi_0}$$

由此可见,在重放中声像在(LF)水平面内而没有声像位置畸变。

当这种扬声器阵列和其译码方程用于双通路立体声重发时,在(11)式中D信号也为零,将其代入(1a)、(1c)两式中时也可以得到同样的结果;但将其代入(1b)式中时则得:

$$\theta_l = \pm 90^\circ \quad (12)$$

即在倾听中,倾听者将头部沿水平方向作微小摆动的瞬间,会感到声音来自左、右两侧而产生了声像位置畸变。

当这种扬声器阵列和其译码方程用于重放单路声信号时,四个扬声器都发出相同的“和”信号M的声音,倾听中就感到声音充满全室。

由此可见,这种扬声器阵列对各种立体声和普通单路声的重放具有很好的兼容性,并且

系统具有结构简单、对称等优点。实际应用中如果采用扬声器矩阵译码时,其电路结构更为简单。图2示这种扬声器矩阵译码电路。

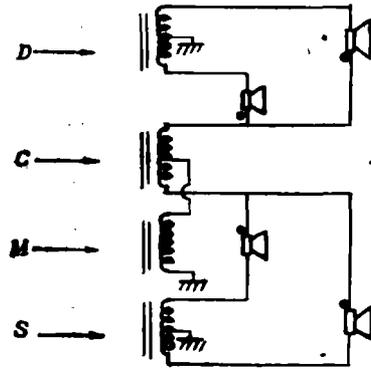


图2 译码电路

#### 四、准蜂房形排列折变扬声器阵列

将扬声器 $\phi_L$ 与 $\phi_R$ 以 $(90^\circ - \phi_0)$ 的俯角方向分别置于倾听者(坐标原点)的左、右两方,再将扬声器 $\phi_{LF}$ 、 $\phi_{LB}$ 、 $\phi_{RF}$ 及 $\phi_{RB}$ 以 $(90^\circ - \phi_0)$ 的仰角分别置于倾听者的左前、左后、右前及右后方向上如图3所示。假定各扬

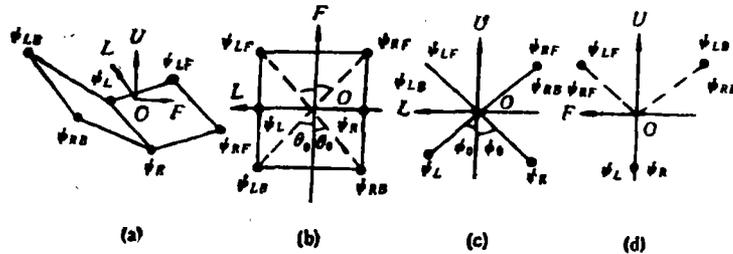


图3 准蜂房形折变扬声器阵列  
(a) 透视图 (b) LF平面投影图 (c) LU平面投影图 (d) FU平面投影图

声器与原点的距离 $O\phi_0$ 相等。这也可以看作将六个扬声器 $\phi_0$ 等分别置于水平平面内一个略似蜂房的六个顶角上而以 $\phi_L\phi_R$ 为轴将这平面两端向上(也可向下)折变而成。设 $\theta_0$ 为左、右两扬声器对倾听者O的半张角,则各扬声器的方位角为:

$$\begin{aligned} \phi_{LF} = \phi_0 \quad \theta_{LF} = \theta_0; \quad \phi_{RF} = \phi_0 \\ \theta_{RF} = -\theta_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_L = 180^\circ - \phi_0 \quad \theta_L = 90^\circ; \\ \phi_R = 180^\circ - \phi_0 \quad \theta_R = -90^\circ \\ \phi_{LB} = \phi_0 \quad \theta_{LB} = 180^\circ - \theta_0; \quad \phi_{RB} = \phi_0 \\ \theta_{RB} = 180^\circ + \theta_0 \end{aligned} \quad (13)$$

如果将这阵列用于重放三维空间环绕声,则译码矩阵可以写成(考虑对称性):

$$\begin{bmatrix} L_F \\ R_F \\ L \\ R \\ L_B \\ R_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1/2 & 1/2 & -1 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M \\ S \\ D \\ C \end{bmatrix} \quad (14)$$

值得指出的是,由于阵列的结构在左、右方向与在前后方向对称形式不同,其有关信号  $S$  与  $D$  的解码关系也不可能完全相同。因此就必须将有关信号的振幅加以区分:

$$\begin{aligned} M &= E_0 \\ S &= K_S \cdot E_0 \cdot \sin \phi_S \cdot \sin \theta_S \\ D &= K_D \cdot E_0 \cdot \sin \phi_S \cdot \cos \theta_S \\ C &= K_C \cdot E_0 \cdot \cos \phi_S \end{aligned} \quad (15)$$

其中  $K_S, K_D, K_C$  为三个待定系数。

类似前面的做法,将 (13)、(14)、(15) 式代入 (1) 式后,当:

$$\begin{aligned} K_S &= \frac{2}{(1 + \sin \theta_0) \cdot \sin \phi_0} \\ K_D &= \frac{1}{\sin \phi_0 \cdot \cos \theta_0} \quad K_C = \frac{1}{\cos \phi_0} \end{aligned} \quad (16)$$

时,(1) 式有一组特解:

$$\theta_I = \theta_S \quad \phi_I = \phi_S \quad (17)$$

即在重放中没有声像位置畸变现象。

在实际应用中,当  $\theta_0, \phi_0$  确定以后就可以从 (16) 式求得  $K_S, K_D$  及  $K_C$  的值,因而 (15) 式所给出的传输信号也就确定。例如:

当  $\theta_0 = 30^\circ, \phi_0 = 45^\circ$  时,

$$K_S = \frac{4\sqrt{2}}{3} \quad K_D = 2\sqrt{\frac{2}{3}} \quad K_C = \sqrt{2} \quad (18)$$

最后还须指出,这种扬声器阵列也可用于重放平面环绕声、双通路立体声和单路声,即其具有很好的兼容性。

## 五、上和下两方向折变之间的关系

一种向上折变的扬声器阵列改作向下方折变时,例如图 1 所示的菱形向上折变扬声器阵

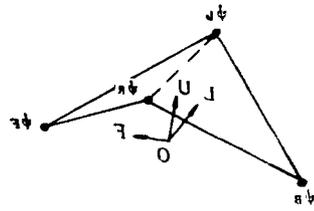


图 4 菱形向下折变扬声器阵列

列改作如图 4 所示的向下折变扬声器阵列时,四个扬声器的位置变为:

$$\begin{aligned} \phi_F: \phi_F &= 180^\circ - \phi_0 & \theta_F &= 0^\circ \\ \phi_L: \phi_L &= \phi_0 & \theta_L &= 90^\circ \\ \phi_R: \phi_R &= \phi_0 & \theta_R &= -90^\circ \\ \phi_B: \phi_B &= 180^\circ - \phi_0 & \theta_B &= 180^\circ \end{aligned} \quad (19)$$

对于这种扬声器阵列,译码方程仍可由 (4) 式表示,传输信号仍可写为 (3) 式的形式但为了区别,将 (3) 式的  $K_1, K_2$  换为  $K'_1, K'_2$  仿照前面推导 (5a) 至 (8b) 式的做法,不难得到,当:

$$K'_1 = \frac{2}{\sin \phi_0} \quad K'_2 = -\frac{1}{\cos \phi_0} \quad (20)$$

时,(1) 式有特解:

$$\theta_I = \theta_S \quad \phi_I = \phi_S \quad (21)$$

对比 (20) 式及 (6a)、(8a) 式可得:

$$K'_1 = K_1 \quad K'_2 = -K_2 \quad (22)$$

因而在菱形向上折变扬声器阵列中,如果译码方程保留 (4) 式不变,而将 (3) 式中的  $C$  换为  $C'$ :

$$C' = -C = -K_2 \cdot E_0 \cdot \cos \phi_S \quad (23)$$

这样就可以得到菱形向下折变扬声器阵列的译码方程。也可以这样做:保留传输信号 (3) 式不变,而将译码方程 (4) 式中有关信号  $C$  的译码矩阵元的符号反转,即得到所需结果:

$$\begin{bmatrix} F \\ L \\ R \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M \\ S \\ D \\ C \end{bmatrix} \quad (24)$$

同样,对于上节讨论的准蜂房形向上折变扬声器阵列,如果我们将译码方程 (14) 式中有关信号  $C$  的译码矩阵元的符号反转,就可

得到准蜂房形向下折变扬声器阵列的译码方程:

$$\begin{bmatrix} L_F \\ R_F \\ L \\ R \\ L_B \\ R_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1 & -1/2 \\ 1/2 & -1/2 & 1 & -1/2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & -1 & -1/2 \\ 1/2 & -1/2 & -1 & -1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ S \\ D \\ C \end{bmatrix} \quad (25)$$

总之,不论何种形式的折变形扬声器阵列,

如果将其上、下折变方向更改时,只须将信号  $C$  的符号反转,或者将其相应的译码方程中有关信号  $C$  的译码矩阵元素的符号反转,即可得到所需的结果。

### 参 考 文 献

- [1] 谢兴甫,声学学报,13(1988),312—328.
- [2] Gerzon M. A., *J. A. E. S.*, 21 (1973), 2—10.
- [3] Carey M. J. and Sager C., *Wireless World*, 80 (1974), 422—425.
- [4] 谢兴甫,《立体声原理》,科学出版社,1981,第 18 章.

# 岩体声波穿透层析成象技术及其工程应用

高鹏飞 聂运钧

(长江科学院)

1991 年 10 月 5 日收到

随着岩体声波测试技术的广泛应用和计算技术的进步,利用计算机处理声穿透信息,开展层析成象求解波速场,成为岩体声波检测技术研究的前沿科研课题。

本文介绍作者在声波穿透层析成象反演波速场方面取得的一些结果。通过新安江、清江隔河岩、宣恩龙洞电站三个工程应用实例介绍了层析成象技术的方法应用。对所采用反演算法的优点和局限性进行了讨论。对今后深入开展层析成象的研究前景作出了展望。

## 一、引 言

任何水利水电工程,其安全稳定至关重要。大坝、厂房等水工建筑物的基础岩体质量分级和稳定性评价以及坝体质量和补强效果的检查受到普遍重视。在这方面,工程岩体声波检测技术(包括超声波、声波、微地震技术)在我国成为解决上述问题进行岩石力学研究的一种常用手段。

随着计算技术的发展和计算机的普及推广,利用计算机处理声波测试资料,开展声波层析成象技术以求解波速场的研究,成为我国岩体声测技术研究的前沿课题。

层析成象技术(Computed Tomography 或 CT)是利用计算机对穿透物体(或从物体反应用声学

射)的投影值进行处理,以重建物体内部图象的一种反演技术。七十年代国外在医学超声诊断方面已取得重大成果,并很快渗透到地球物理反演中。Peterson (1985)<sup>[1]</sup>, Wong (1983)<sup>[2]</sup>, Ivansson (1984)<sup>[3]</sup>, Bois (1971)<sup>[4]</sup> 等利用孔间地震 CT 技术显示了孔间波速场分布,有效地推断孔间地质构造。Herman (1976)<sup>[5]</sup> 等在直线光学模型假设下,利用代数重构技术分析测井资料所取得的成果给予 CT 技术很大推动。我们采用较地震波频率为高的声波的穿透投影值,取得在不太大范围内具较高分辨率,较高精度的成象效果。象元精度可达  $0.3 \times 0.3 - 1.0 \times 1.0\text{m}$ , 从而可以为基础岩体质量分级和以稳定性评价为主要目的的岩石力学研究提供更为准确可靠的结果。本文介绍在声波穿透 CT 反演波速场方面取得的一些初步成果。通过三个