

# 同轴平面型扬声器—采用石墨聚合物蜂窝夹层结构的平板振膜\*

中园二郎等

(日本先锋公司电子工程研究所扬声器设计部)

同轴平面扬声器是直接辐射式平面振膜扬声器的新发展,它可获得一般圆锥形扬声器所不能达到的性能改进的效果。

1) 将声源的扩散保持在最小的范围内以增强声象,将四只平面振膜扬声器同轴地安装在一起就可达到这个目的。由于每只扬声器都分别占据从次声频率到超声频率的整个声频谱中的一部分,因而所有四只扬声器的声中心在一个平面上同心。这样就使得来自所有振膜的声的发源和其到达的时间都是相等的,为此,所有频率之间的时间延迟都能保持在最小范围内。

2) 由于消除了普通锥形振膜前室所固有的谐振频率以及分割频率特性,可获得平坦和平滑的频率响应

3) 通过采用夹层结构,我们实现了使振膜在较宽的频率范围内进行活塞运动。这种夹层结构是由两块石墨聚合物组合片用铝箔蜂窝状芯材粘接在其中而构成的。石墨聚合物蒙皮材料既要内部损耗大又要保证芯子材料具有高抗弯刚性。采用这样的结构可制成一种平面振膜,这振膜能在比较宽的频率范围内保持活塞运动并且具有平坦的频率特性和极好的瞬态响应特性

## 前 言

现代扬声器系统主要是由“圆锥形”辐射式扬声器配以二分频或三分频的多通道扬声器(two-way or three-way multispeaker)组合而成。然而,尽管圆锥形多通道扬声器系统具有许多优点,但是,由于作为声辐射的锥形扬声器的固有缺点,使其不能高保真地重放声音。

在1934年Mc Lachlan<sup>[1]</sup>指出了圆锥形直接辐射式扬声器存在的根本问题。这个问题涉及到由于圆锥形的前室引起的谐振而使得扬声器的频率响应曲线产生了峰谷现象。这个问题通过采用几种不同口径的圆锥形扬声器来相互复盖多通道扬声器系统中的各段声频谱的方法,在很大程度上获得了解决,

从而达到了失真小,指向特性好以及频率响应较平滑的效果。但是,问题依然存在,即:来自各个扬声器的声音的到达时间是随着声音频率而变化的。关于这个问题 Heysey<sup>[2]</sup>已进行了深入的研究。另外需要考虑的因素是,来自不同扬声器的声辐射指向是不同的,特别是当监听位置靠近扬声器系统时更是如此。该问题对于普通的同轴扬声器来说,在某种程度上已得到了改进,然而,各振膜不在同一平面上的缺点却仍然存在。延迟网络已被用来从电学角度来解决这个问题,但这需要复杂的电路以便获得满意的特性。

同轴平面扬声器由于不存在前室,所以它不受上述所谓“前室效应”的影响。而且,

\* 一九八〇年五月六—九日,在智利洛南安赫莱<sup>1</sup>举行的第66届美国电声工程协会会议上发展;修改于一九八一年八月三日。

由于是同轴平面结构，因此既不存在随频率而变化的到达时间差，也不存在与频率有关的声源辐射指向的任何差别。

此外，蜂窝夹层平板扬声器，经采用石墨聚合物组合片（该组合片在高声速的情况下，具有相当高的内耗）改进之后，可制成一个频带宽，同时失真又小的平面扬声器系统。

本文将对这种新型的同轴平面扬声器系统作简略的介绍。

## 一、结构细节

图1是表示由低频、中频、高频和超高频等四只扬声器单元组成的同轴平面扬声器系统。四只扬声器平面振膜都安装在同一平面上，低频扬声器位于中频扬声器的外面，高频扬声器位于中频扬声器的里面等等。这样就获得了一个共平面同轴的扬声器系统，在声场的有效可达范围内的任何位置上，该系统中各扬声器所给出的到达时间和指向都是相同的。

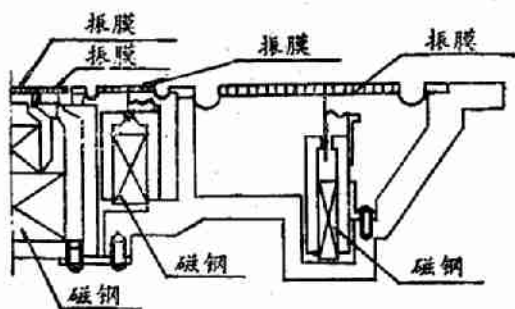


图1 同轴平面扬声器的截面图

所有的扬声器都是用铝箔制成蜂窝芯和用石墨聚合物材料制成蒙皮的夹层式结构。（PG蜂窝夹心片）各个振膜尺寸如下：低频扬声器呈矩形环状，其外边缘长度大约为400毫米，它的面积与350毫米（15英寸）的圆锥形扬声器相等。中频和超高频平板式扬声器也都是矩形环状，其外边长分别约160毫米和

60毫米。超高频扬声器呈正方形，每边为26毫米。每一个单元所用的矩形音圈都设计在每一个换能器的第一个波节位置上，为每个振膜提供了“波节驱动”的方式。因此，外部音圈各边的尺寸变得很大，与此相适应，所以磁轭结构也很大。

为了防止在声阻抗中出现峰谷现象，从振膜的背面来看，开放式磁轭结构是很理想的。为了达到这个目的，由四个矩形磁隙构成的敞开式磁轭结构已被应用于低频和高频单元之中，如图2所示。各矩形音圈的尺寸分别为：200、120、50和25毫米



图2 样品剖视照片

## 二、平板振膜

要满足振膜在宽频率范围内（频率响应平滑、失真小）进行活塞运动的条件是：

- 1) 抗弯刚度高
- 2) 内耗大
- 3) 运动质量轻

图3所示的轻质石墨聚合物蜂窝夹层平板具有非常接近于上述要求的特性。

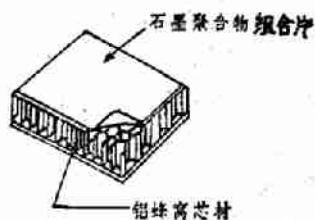


图3 蜂窝状夹层平板

石墨聚合物蜂窝夹层平板对挠矩的抗弯刚度  $D^{[3]}$  由下式给出:

$$D = \frac{E_c t_c^3}{12(1-\mu_c^2)} + \frac{E_f}{12(1-\mu_f^2)} \cdot \{(2t_f + t_c)^3 - t_c^3\} \quad (1)$$

式中:

- $D$  = 平板的抗弯刚度
- $E_c$  = 平板的杨氏模量
- $\mu_c$  = 平板的泊松比
- $t_c$  = 平板的厚度
- $E_f$  = 蒙皮的杨氏模量
- $\mu_f$  = 蒙皮的泊松比
- $t_f$  = 蒙皮的厚度

从(1)式中,我们可看到  $E_c$  和  $E_f$  必须大些,以便获得较大的抗弯刚度。为了使平板和蒙皮的有效杨氏模量大些,应该考虑增加它们的厚度。但是,这样却使得重量相应地增加了,因之也就降低了扬声器系统的效率。因此,合适的抗弯刚度和重量限制应当予以计算的。

通过测量石墨聚合物蜂窝夹层平板的悬梁样品的谐振频率,就可确定抗弯刚度,如图4所示。谐振频率  $f_m$  由下式给出:

$$f_m = \frac{\lambda_m^2}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{\rho_s A}}, \quad m=1, 2, 3 \quad (2)$$

式中:

- $A$  = 梁的表面面积
- $D$  = 平板的抗弯刚度
- $\rho_s$  = 平板每单位面积的密度
- $\lambda_m$  = 频率参数

因此,

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1.875}{l} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho_s A}} \quad (3)$$

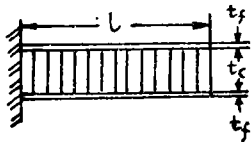


图4 悬梁

式中  $l$  是悬梁的长度

采用悬梁方法将两个不同蜂窝芯材规格进行计算和测量  $f_1$  的数值,如图5所示。

1) 从图5中我们可看到当厚度的增加

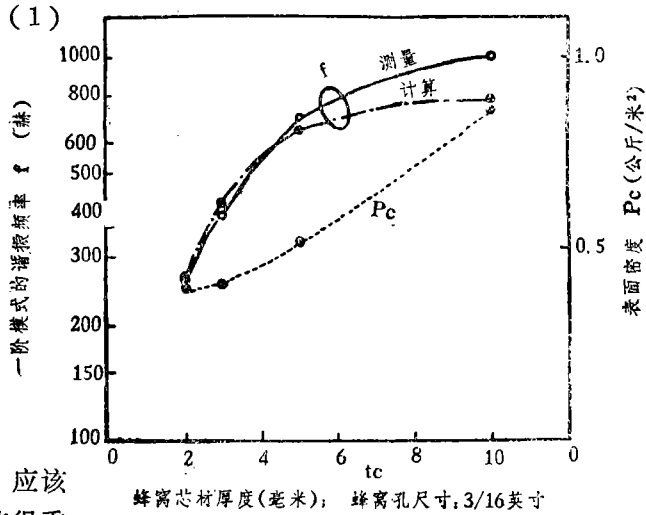


图5 悬梁的谐振频率和蜂窝芯材厚度之间的关系

超过5毫米时,  $f_1$  值不会成比例地随着每单位面积密度的增加而增加。

2) 当平板的厚度减少时,弯曲材料的质量则最后变成决定的因素,因此,每单位面积密度的减少与厚度的减少不成比例。

从上面我们能够获得平板的抗弯刚度和厚度的最佳值。更确切地说,增加厚度超过5毫米,将仅仅增加平板的质量;而厚度减少到小于2—3毫米时,其重量却不会明显地减少。

现在再回来分析一下方程式(1),在正常条件下:

$$t_f \gg t_c \text{ 和 } E_f \gg E_c$$

从这个关系式中,我们可看到  $E_f$  即蒙皮材料的杨氏模量,是确定平板抗弯刚度的决定因素。因此,这提示我们具有高杨氏模量<sup>[5]</sup>的石墨聚合物可以考虑作为蒙皮材料。表1是过去一直作为蒙皮材料铝的物理性能与石墨聚合物物理性能的比较。如表中所示,石墨聚合物的杨氏模量优于铝,而其每单位面积的密度大约是铝的65%。因此,在重量

表 1 几种振膜材料的物理性能

	杨氏模量 $E(\text{N/m}^2)$	密度 $(\text{kg/m}^3)$	声速 $\sqrt{E/\rho} (\text{m/s})$	内耗正切角 $\delta$
合成材料	$7.0 \times 10^{10}$	$1.8 \times 10^3$	$6.2 \times 10^3$	0.05
铝	$7.0 \times 10^{10}$	$2.7 \times 10^3$	$5.1 \times 10^3$	0.002
钛	$11.0 \times 10^{10}$	$4.5 \times 10^3$	$4.9 \times 10^3$	0.002
纸质材料	$0.2 \times 10^{10}$	$0.5 \times 10^3$	$2.0 \times 10^3$	0.05

相同的情况下，采用石墨聚合物，厚度大大增加是可能的。

表 2 说明采用悬梁的方法对分别用铝和石墨聚合物作蜂窝平板蒙皮材料的抗弯刚度进行的测定结果。所使用的两种材料的平板单位面积的密度相同。从测定的结果可以看出，采用石墨聚合物蒙皮材料制成的平板具有较高的抗弯刚度和内阻尼——约为铝材料的二倍，因而石墨聚合物是制作辐射振膜的优良材料。

表 2 用铝和合成材料制作蜂窝板蒙皮材料的比较

	抗弯刚度 $D$ $(\text{N/m})$	密度 $\rho$ $(\text{kg/m}^3)$	内耗 $(\tan\delta)$	蒙皮厚度 $(\mu\text{m})$
合成材料	4.65	100	0.026	75
铝	1.57	100	0.018	50

从以上这些数据可得出这样的结论：即低频扬声器平板的厚度必须约为 5 毫米，而高频扬声器的平板则必须是 2 毫米左右。

用石墨聚合物和铝制成蒙皮的低频扬声器的频率响应曲线如图 6 所示。采用铝蒙皮材料的频率响应，在 800 赫附近，其峰谷的

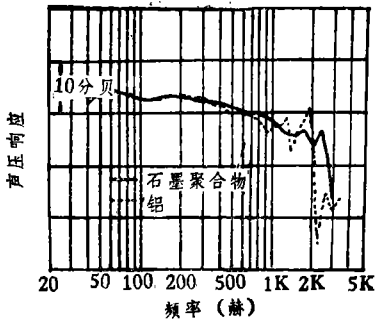


图 6 分别使用石墨聚合物合成材料和铝作蒙皮材料的频率响应比较

不均匀度为  $\pm 5$  分贝，而采用石墨聚合物蒙皮材料的频率响应则显得平滑，仅有少许峰谷的不均匀度，为  $\pm 2$  分贝。

### 三、特 性

#### 3.1 频率响应和失真

在距离振膜 1.5 米处的一点（在振膜的轴心上）进行声压测量，我们就可获得如图 7 所示的扬声器系统的频率响应曲线，该频率响应曲线从 50 赫到 20 千赫特别平坦和平滑，谐波失真小于 0.3%（输入功率为 1 瓦情况下，在 80 赫到 6 千赫处测量）。

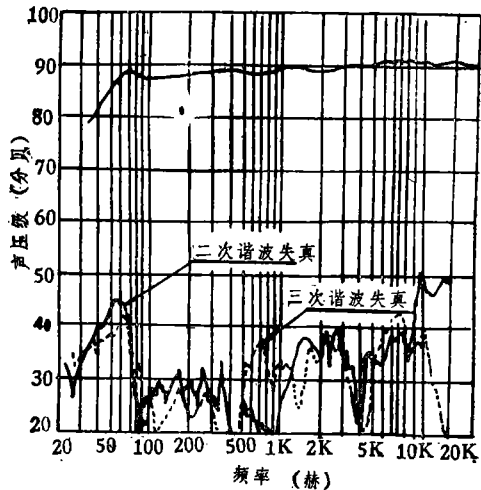


图 7 频率响应和谐波失真特性(1瓦, 1.5米)

#### 3.2 能量响应

本扬声器系统的能量响应可在体积为 69 立方米的一个混响室内进行测量，当频率超过 200 赫时即出现扩散声场，所以超过这频率所测得的能量响应是十分精确的。在图 8 中能量响应曲线在 200 赫以上变得平滑了。

如图中所示，每只扬声器所工作的频段只限于在这样一个范围内，在其中声辐射能量响应曲线是平坦的。为了达到这个目的，四只扬声器的交叉频率分别定为：400，2000和6000赫。

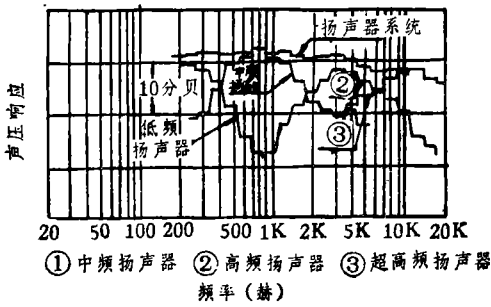


图8 功率响应特性

### 3.3 脉冲响应

通过测量脉冲的响应波形曲线，我们就可以确定由于平面振膜位置的不同所引起的到达时间差。图9表示从该扬声器系统所测得的典型脉冲波形曲线。图中所标出的各个角度是在距离扬声器系统中心轴的垂直面和水平面上进行测量的。图10—12中所示都是普通扬声器系统的脉冲响应波形曲线。图10表示同轴两频道扬声器系统的脉冲波形曲线。

该扬声器系统是由一只直径为300毫米（15英寸）的低频圆锥形直接辐射式扬声器和一只同轴的高频号筒式扬声器组成的。如图中所示，由于低频和高频扬声器位置的移动，引起了波形的失真。图11是三分频圆锥形直接辐射式扬声器系统的脉冲波形曲线，在该系统中，圆锥形振膜是放置在同样的平面位置上。象图中所见的那样，在该系统轴上的脉冲波形是不失真的。但是，频率响应稍偏离轴时就会失真，这是由于脉冲到达时间不同的结果。图12表示相当大的四分频结构扬声器系统的脉冲波形曲线。在该系统中，300毫米（15英寸）纸盆扬声器控制低频；250毫米（10英寸）纸盆扬声器控制中频；号筒高频扬声器控制高频；号筒式高频扬声器控制超高频端。在这种情况下，在偏离轴一点处到达时间的差别，被认为是由于靠近扬声器系统测量点所引起的。在这种情况下，从考虑到的由号筒不同长度引起的脉冲波形响应中所观察到的到达时间差的大小来看，1.5米的距离是太靠近了。

从前面一个例子，我们可以得出一个结论即：同轴平面扬声器系统与普通扬声器系

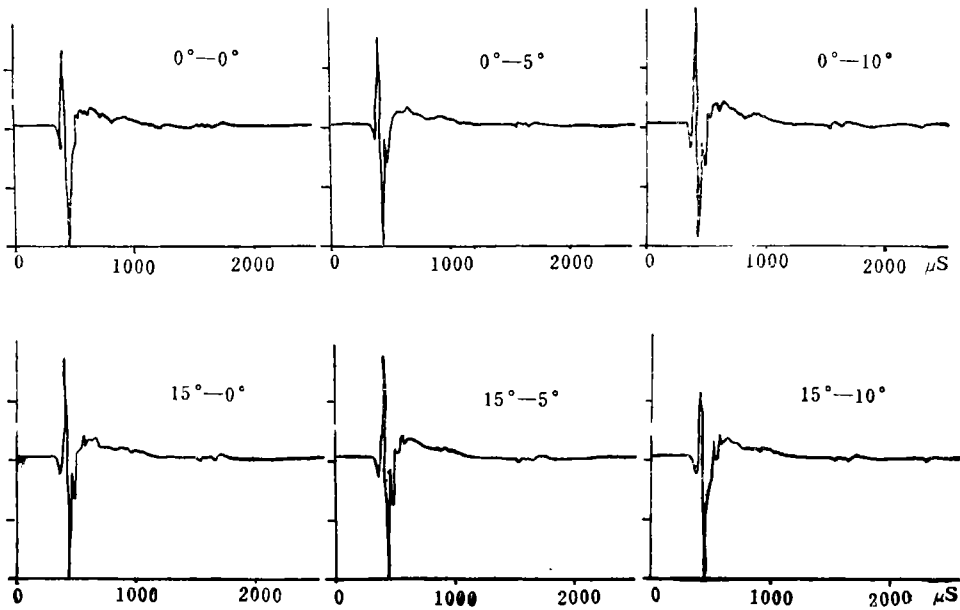


图9 同轴平面扬声器的脉冲响应波形。第一个数字代表垂直测量角，第二个数字代表水平测量角。

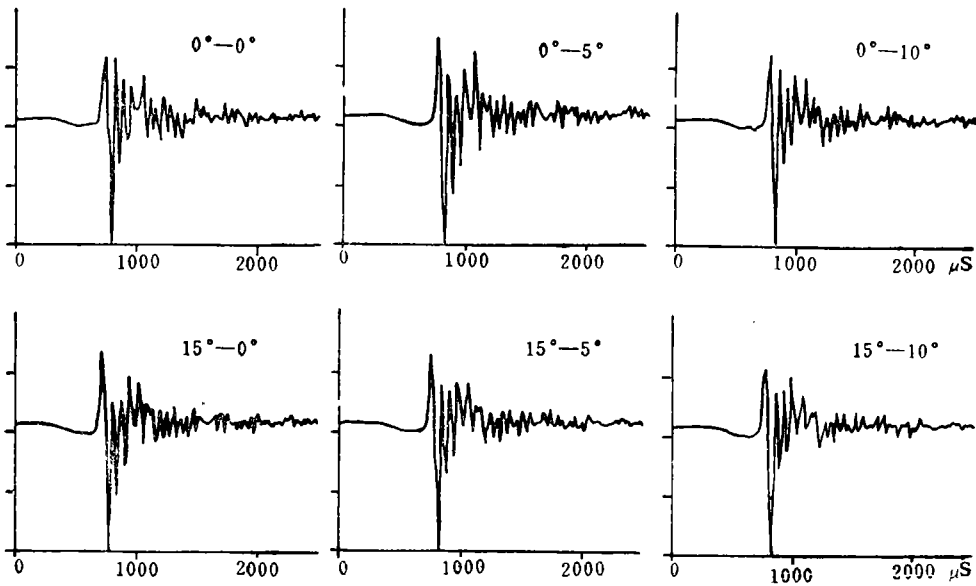


图 10 普通同轴两分频扬声器的脉冲响应波形。第一个数字代表垂直测量角，第二个数字代表水平测量角。

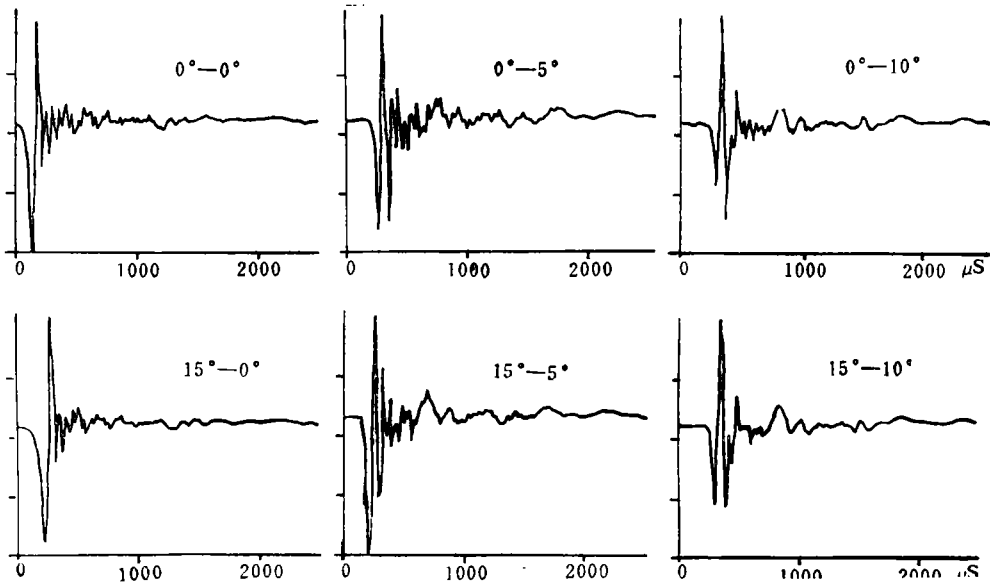


图 11 同轴三分频圆锥形纸盆扬声器的脉冲响应波形。第一个数字代表垂直测量角，第二个数字代表水平测量角。

统相比较，在一个宽频率范围内，在一个较宽的弧形听觉区域内，有较小的到达时间的失真。

图13给出了这个扬声器系统的包络延迟特性是从脉冲响应波形中获得的。根据这些特性，我们可识别出因频率关系而来的细小的到达时间差，以及由于偏离这扬声器中心

轴的较宽的弧形区而引起细小的到达时间差。

### 3.4 瞬态响应

该扬声器系统的瞬态响应如图 14 所示。这个瞬态响应是用电子计算机从图9\*中的脉

\* 原文系图11，应为图 9——译者注

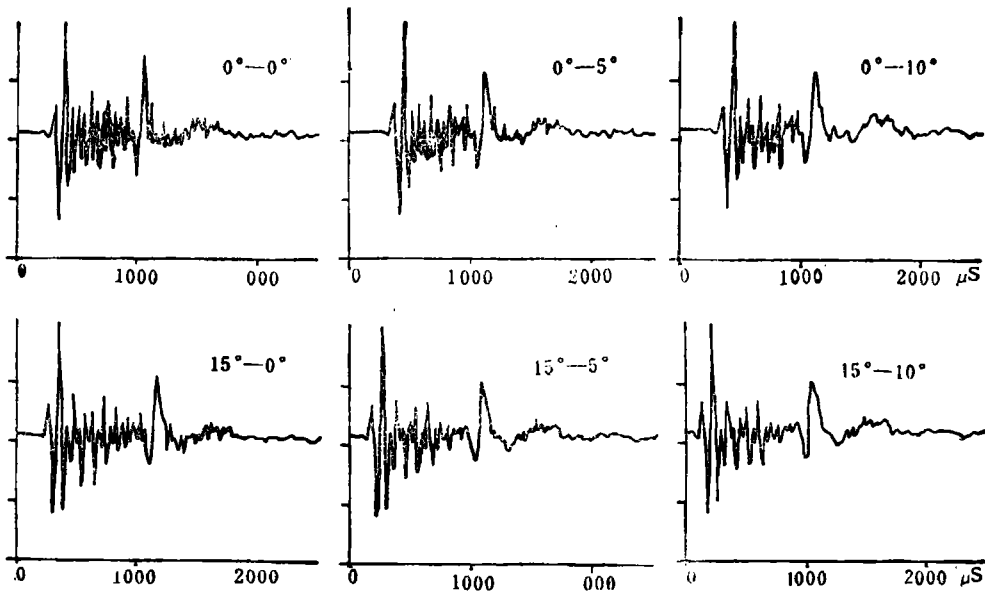


图 12 由号筒式中频扬声器和高频扬声器组成的普通四分频扬声器系统的脉冲响应波形。第一个数字代表垂直测量角，第二个数字代表水平测量角。

冲响应波形曲线计算出来的。可以看出，这个瞬态响应曲线就这个系统所具有的整个谱声频段来说是十分优良的。

### 3.5 技术参数

表 3 是该扬声器系统的技术参数。该扬声器的灵敏度是 93 分贝(1 瓦, 1 米), 最大允许输入功率为 150 瓦, 阻抗是 8 欧姆。

表 3 同轴平面扬声器系统的技术参数

类 型	四分频同轴式
灵 敏 度	93dB(1W 在 1 米)
最大输入功率	150W
阻 抗	8Ω
频率响应	30—40000Hz
交叉频率	400/2000/6000 Hz
箱体尺寸	700×1170×400mm (宽×高×深)

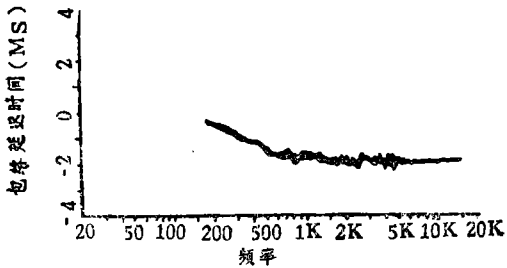


图 13 从图 9 脉冲响应波形中获得的包络延迟特性

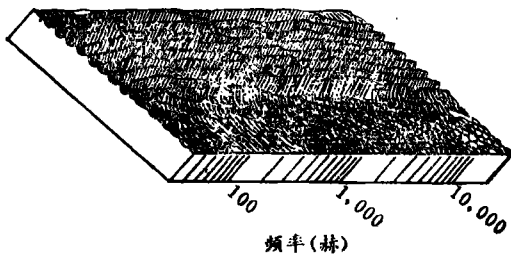


图 14 猝发音瞬态响应

## 四、结 论

同轴平面扬声器系统不仅具有极好的特性，如：频率响应平坦，失真小和良好的瞬态响应等，而且它在整个频率响应范围内(在轴上和偏离轴)，还具有到达时间差小的特点。因此，本扬声器系统在立体声重放时对声源提供了极好的“定位”作用，同时也极适合于监听的需要。

### 参 考 文 献

- [1] McLachlan, N. W. Loudspeaker (Dover Press, New York, 1934), reprinted 1959.
- [2] Heyser, R. C. "Determination of Loudspeaker

(下转第 52 页)

为零电位, 移位链处于手动移位状态。此时按动“频率编码”键盘的六只微动开关, 使三条移位链的第一节分别置“0”或置“1”。由此把一个三位二进制数码寄存于  $Q_{11}, Q_{21}, Q_{31}$  之中, 再按动进位键,  $A_4$  的  $Q$  端由高电位变为零电位,  $YF_6$  即输出一个单次进位脉冲, 把  $Q_{11}, Q_{21}, Q_{31}$  中的数码向右移位至  $Q_{12}, Q_{22}, Q_{32}$  中。此后再按“频率编码”键盘, 存入新的数码。重复“记码”及“移位”过程八次, 则可以在三条移位链中存满八个预定的三位二进制数码。且其中每一节的数码通过二——十进制转换电路后在数码管上显示出这一节相应的频率序号。由  $Q_{18}, Q_{28}, Q_{38}$  存储的数码, 通过数模转换电路转换为相应的模拟电压去控制线性压控振荡器频率。在记码状态, 这个振荡器输出信号频率由内部一个频率计测量, 并由数码管显示。通过“步跳”开关转换和“频率调节”旋钮进行调节, 可以选择输出跳频信号的参数  $f_0$  和  $\Delta f$  的数值。在记码状态, 触发信号  $CP_4$  (宽度为 1 毫秒) 的作用是使计数器  $A$  复零, 使触发器  $A_1$  的  $Q$  端为高电位, 触发器  $A_2$  和  $A_3$  的  $Q$  端为零电位。当“选择”开关置于“工作时,  $A_5$  的  $Q$  端变为零电位, 或非门  $Y_1$  开启, 输出移位脉冲  $CP_1$ , 并通过与非门  $YF_4$  后形成计数脉冲, 随后进入计数器  $A$  的  $CPE$  端, 但在此时与非门  $YF_3, YF_5$  仍处于关闭状态。当  $YF_4$  开启后所输出的第四个计数脉冲进入计数器  $A$  时, 其中的  $Q_3$  为高电位, 并使触发器  $A_3$  的  $Q$  端变为高电位。信号输出门  $YF_5$  开启, 对外开始输跳频信号。再经过一个码宽的时间后, 即第五个计数脉冲进入计数器  $A$  时, 其中的  $Q_3$  和  $Q_1$  为高电位,  $YF'_1$  动作, 使触发器  $A_2$  的  $Q$  端变为高电位, 与非门  $YF_3$  开启。 $CP_1$  经  $YF_3, YF_6$  形成脉内移位脉冲  $CP_2$ , 使三条移位链中二进制数码开始同步移位。每一个  $CP_2$  使二进制数码向右移动一位。移位到达  $Q_{18}, Q_{28}, Q_{38}$  中的二进制数码通过电阻相加网络和运算放大

器  $K$  组成的数模转换器转换为相应的模拟电压后, 调制线性压控振荡器的频率, 从而使输出信号的频率在时间上按码元宽度逐个跳变。另一方面  $Q_{18}, Q_{28}, Q_{38}$  中的二进制数码又返回到  $Q_{11}, Q_{21}, Q_{31}$  中, 并继续在三条移位寄存链中循环移位进动。当第十二个计数脉冲进入计数器  $A$  时, 其中的  $Q_3$  和  $Q_4$  为高电位,  $YF_2$  动作, 输出负阶跃电压, 经  $RC$  电路略微延迟后, 再由  $YF'_2$  输出一个正阶跃电压, 使  $A_1$  的  $Q$  端翻转为零电位。这时  $YF_3, YF_4, YF_5$  全部关闭, 八个码元的跳频信号输出结束, 三条移位链停止移位, 相应于八个频率序号的二进制数码经过运行一周后回到原来的位置, 并等待下一次触发。

从上面的叙述可以看出, 尽管触发信号的加入是随机的,  $YF_4$  开启后的第一个计数脉冲的宽度也许大小不一, 但由于通过计数器  $A$ , 触发器  $A_1, A_2, A_3$  及与非门  $YF_4$  控制后, 脉内的八个码宽可以严格保证相等。此外触发信号的时间间隔必须大于十三个码宽。在移位链运行期间不可加入触发脉冲。在“工作”位置, 数字频率计不对输出信号频率进行计数。



(上接第 59 页)

- Signal Arrival Times, Parts I-III," J. Audio Eng. Soc., Vol.19, pp.734-743, 829-834, 902-905 (1971 Oct., Nov., Dec.)
- [3] Uemura, M. J. Japan Soc. Mech. Eng., Vol.71, No.593(1968).
- [4] Suzuki, T. Morii, T. and Matsumura, S. "Three-Dimensional Displays for Demonstrating Transient Characteristics of Loudspeaker," J. Audio Eng. Soc., Vol.26, pp.511-517 (1978 July/Aug.).
- [5] Tsukagoshi, T. Yokozeki, S. Hagiwar S a, Yoshino, T. Arai, Y. and Yamamoto, T. "Polymer-Graphite Composite Loudspeaker Diaphragm," J. Audio Eng. Soc., Vol.29, pp.720-725 (1981 Oct.).

(俞裕星译自 J. Audio Eng. Soc., Vol.29, No.11, 1981 November pp.800-807 杭汝衡校)