



扬声器技术近年来的进展

王 以 真

(天津电声器材厂)

1989 年 1 月 10 日收到

本文从理论研究、新型设计、测量技术、材料应用等方面论述了扬声器技术的发展,评述了国内外发展动态。

一、引 言

扬声器作为一种电声换能器,已有一百多年的历史。它在科研、国防、人民文化生活等方面有着不可替代的作用。世界上每年生产数亿只扬声器,是声学领域中数量最多,使用最广泛,分布面最大的声学器件。本文较详细地介绍扬声器技术发展的情况。

二、理 论 研 究

扬声器的发展之理论基础是经典的声学理论。在电动式扬声器出现后的 10 年,即 1934 年,McLachlan 出版了“Loudspeakers^[1]”一书,首次从理论到实践对扬声器做一番总结。书中假设扬声器锥体是一个刚性活塞,来计算其声辐射特性。但这样分析只有在低频时有价值。因此随后一段时间内扬声器的设计取决于经验、尝试及非定量的理论分析。

1. 理论分析的深入和有限元法的应用

从 1951 年开始, Nimura, Ross, Kalnins, Frankort 从理论上对轴向对称壳体的振动进行数值计算和分析研究。荷兰 Philips 的 Frankort^[2] 的研究更为系统,他从刚性活塞分析开始,然后分析刚性锥体的声辐射,最后再考虑柔性锥的声辐射。

因为扬声器锥体根本不是一个刚体,在频率高于某一值时,扬声器锥体会出现分割振动,

即锥体的每一部分振动振幅和相位皆不相同。或者说锥体出现了与轴线对称的弯曲波和纵波。

可用微分方程完整描述非对称振动锥体的应力应变,它可包含 14 个变量。即可列出 14 个一阶微分方程。用这种方法可以分析锥体各几何、物理参量对声辐射的影响。帮助我们理解扬声器的振动。即使经过一些简化,解这些微分方程也是十分繁冗,无法依据它实际设计扬声器。

由于计算机技术的发展,使得用有限元法分析锥形扬声器振动成为可能。有限元法是将扬声器振膜看成许多性质相同而又极其微小的单元,即有限元组成。只要取出其中某个单元来分析,利用已推导出的节点受力与位移关系,然后再将各单元组成完整的振膜。亦就是建立节点的平衡方程式,求解方程组,得出各节点的位移,再由节点位移求单元内各处的应变应力,就能获得整个振膜的振动特性。在 70 年代末有人首先用有限元法分析了扬声器振膜的振动形式和声学特性^[3]。

这样我们在设计扬声器锥形振膜时,只要将振膜的几何形状数据和材料物理特性数据输入到计算机中,计算机根据有限元法程序便可模拟扬声器振膜的振动,计算出由此产生的声压级、声功率,并能在绘图仪上绘制出声压频率曲线、声功率曲线、辐射指向性图形和任意频率点的振动图形。图 1 是 YD160-1 扬声器计算和实测声压频率特性曲线。由图可见两者相当

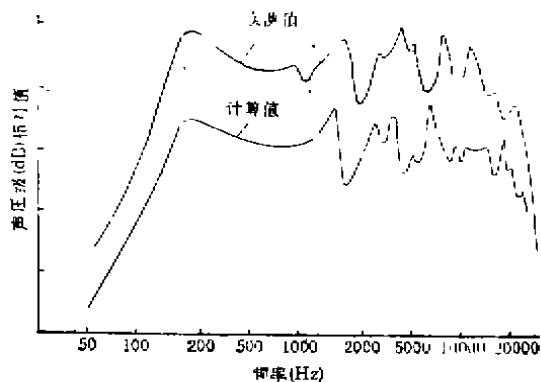


图1 扬声器(YD160-1) 计算和实测声压频率曲线一致。这在扬声器历史上是一次重大的突破。

2. 扬声器分谐波的出现及其研究

对于任何一个非线性系统, 输出信号中会出现输入信号的高次谐波, 对此早有经典性解释。可用谐波失真系数来描述。此外还发现, 当扬声器输入一单频信号时, 输出信号中不但有高次谐波出现, 还有低于基频的信号出现, 人们称之为“双音”或“半音”。其明显程度人耳清晰可辨。这在大口径扬声器中更为明显。

在实践中克服“双音”“半音”的方法, 是改变纸盆的振动模式, 在纸盆某部位根据经验粘贴一些重物藉以消除这种“双半音”。对于这种分谐波产生的物理原因及对扬声器性能的影响, 魏荣爵教授指出^[4]: 根据近代非线性理论的研究, 非线性系统振动随着驱动力增大至一定程度, 可以导致分岔及混浊。当外界驱动力增大到一定值时, 在某些频率区域不仅会出现高次谐波, 而且会出现高次分谐波, 分数谐波 (如 $\frac{1}{2}f, \frac{1}{4}f, \frac{1}{3}f, \dots$ 等), 在某些频率上则会发生混浊现象, 即输出为一片混浊的连续谱。

3. 封闭式和倒相式扬声器箱的定量设计

扬声器箱种类繁多, 但主要分封闭式和倒相式两大类, 箱体不仅是扬声器的支架, 而且可以改变整个系统的低频响应。

自1932年 A. L. Thuras 提出倒相箱专利以来, 助音箱理论有了许多发展。其中最重要的是澳大利亚的 R. H. Small 的贡献, 它在

Thiele 研究的基础上, 系统地提出扬声器箱的定量设计、即将扬声器的传递函数近似为契比雪夫、巴特沃契高通滤波器来使扬声器箱的设计达到量化。一个倒相箱的设计完全可以等效一个高通滤波器的设计利用计算机辅助设计, 可以给定一高通滤波器响应(根据需要选择不同阶数的契比雪夫、巴特沃契滤波器), 然后由计算机对多维变量(扬声器和箱体的模型参数)进行搜索来自动逼近给定的目标函数, 求得为达到此频响要求的箱体和扬声器所有参数。

另一种情况是当一扬声器单元已定, 亦即扬声器各参数已定, 设计箱体参数, 以求获得最佳的频率响应。近年国内外提出了许多计算机辅助设计方法^[5]。

除了扬声器箱体以外, 其他诸如号筒扬声器^[6]、分频网络、磁路等皆可利用计算机辅助设计。

三、扬声器的新结构

目前使用的扬声器虽然种类很多, 但仍以直接辐射式扬声器为主流, 属于直接辐射式扬声器的有锥形扬声器(纸盆扬声器), 号筒扬声器, 球顶扬声器。对扬声器改进的思路有: 在传统的扬声器上刻意求精; 根据新的原理制造新扬声器; 改善扬声器与外部关系来改进扬声器。现将这些改进, 举要列下。

1. 数字式扬声器^[7]

由于数字技术的发展, 人们设想, 作为音频系统终端器件的扬声器, 是否能直接输入数字信号, 而能输出模拟信号, 不仅完成通常的电声转换, 而且同时完成数字-模拟(D-A)转换。

研究表明, 不论是动圈式扬声器或压电式扬声器皆可制成数字式扬声器。例如多音圈式PCM 数字扬声器, 不过是若干并联的音圈, 都输入PCM 信号。多单元式PCM 数字扬声器, 压电式直接驱动数字扬声器。

不论那一种数字扬声器, 都正处于试验阶段, 结构比较复杂, 要达到实用化阶段尚需做许多工作。

2. 恒指向性号筒^[8-9]

一般号筒扬声器的指向性随频率而改变, 频率越高指向性图越尖锐。而厅堂扩声所要求号筒扬声器指向性不随频率而变。根据这种要求, 从 70 年代末开始先后推出不同类型的恒指向性号筒, 其中有曼塔来号筒 (美国 Altec 公司)^[10], CD 号筒 (美国 E-V 公司), 双径向号筒 (美国 J. B. L 公司), 双贝塞尔号筒 (日本松下公司)。

恒指向性的关键在于号筒采用不同形状的侧壁, 即侧壁形状由过去单纯的直线式、指数式变成复杂的、甚至不连续的函数。由于详细计算号筒指向性十分复杂, 现在采用计算机来快速计算和设计。图 2、3、4、5、6 是一 CD 号筒的几何图形, 水平偏轴、垂直偏轴响应; 指向性因数, 指向性指数响应。

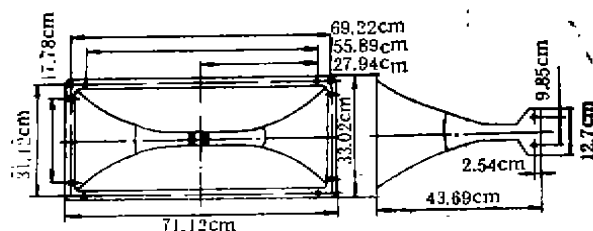


图 2 CD 号筒形状

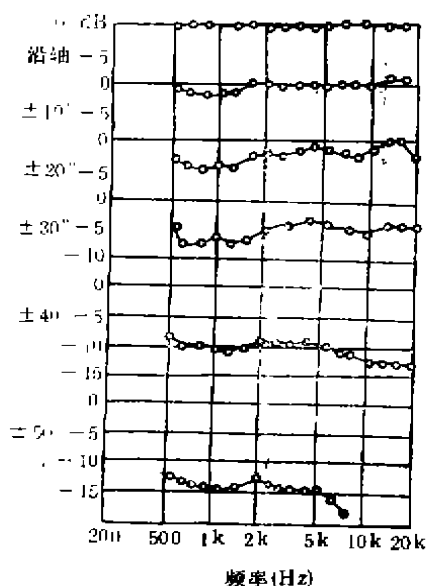


图 3 CD 号筒水平偏轴响应。

应用声学

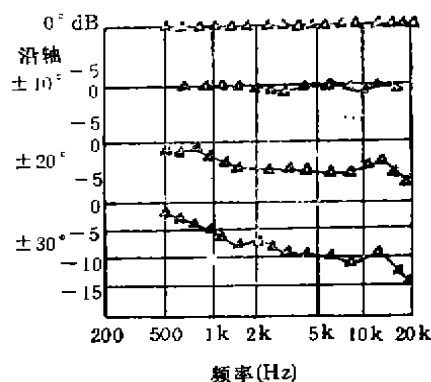


图 4 CD 号筒垂直偏轴响应

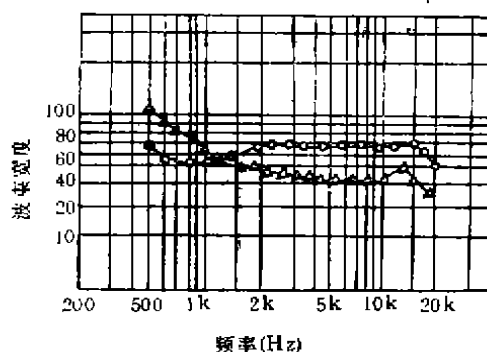


图 5 CD 号筒 6dB 波束宽度响应

○——水平; △——垂直。

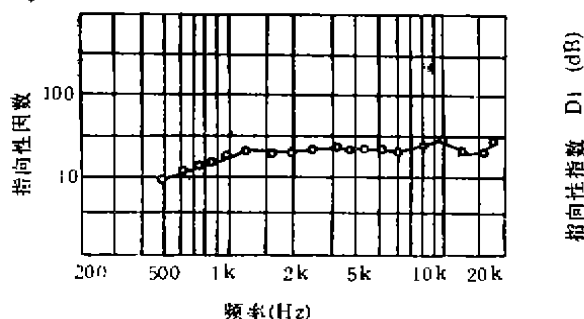


图 6 CD 号筒指向频率响应

3. 利用无源网络扩展扬声器箱的低频响应。

一个封闭式扬声器箱其低频响应由箱体和扬声器单元而定, 我们常常希望扩展扬声器的低频范围。根据 Small 等人的分析, 扬声器系统可以看成是一个高通滤波器。通过声学、机械学、电子学方面许多方法都可以扩展扬声器系

系统的低频响应。倒相式或无源反射式扬声器系统皆是利用声学或机械学方法改变低频响应至三阶、四阶或五阶滤波器的例子。

因此在放大器与扬声器之间人为加上一个无源滤波器,使此无源滤波器和扬声器形成一个新系统,这个新系统相当于一个五阶系统,使此系统的低频向下扩展,扩展到低于由振膜质量-箱体力顺所决定的共振频率以下。

设计的问题在于选择外加电路 LC 的数值。但扬声器究竟不是一个电路,外加电路会产生一些其他影响,例如 LC 的存在显然会影响扬声器的瞬态特性。

4. 海尔式扬声器

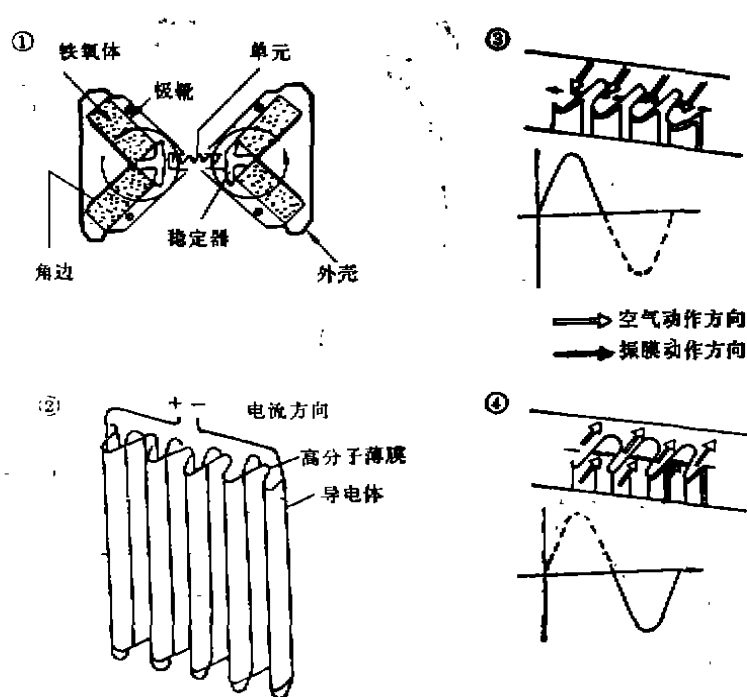


图 7 海尔扬声器

5. B.E.S 扬声器^[11]

B.E.S 扬声器是一种新型扬声器结构,于六十年代末发明和发展起来的。

B. E. S 技术采用一个长方形的聚合物薄膜,由一个或几个扬声器驱动器(磁路音圈系统)驱动,使之振动发声。

图 8 是 B.E.S 的振动图

B.E.S 振膜由成千上万个紧密压缩的聚苯

传统的扬声器按辐射方式分为:直接辐射扬声器;号筒扬声器;耳机。其特点皆是声音辐射方向与振膜振动方向是一致的。

美国在 1973 年提出一种新的扬声器结构,其声辐射方向和振膜振动方向垂直。出现了第四种辐射方式。这种海尔式扬声器如图 7 所示,在手风琴式的振膜上由上到下贴附作为音圈的导线,而磁场与此面相垂直,当导体中通以音频电流时,相邻的皱折交替接近和分开,好像风箱一样将空气压缩、吸入,因而产生声辐射。这种扬声器具有两方面指向性,指向性比较尖锐,重放宽带约为 500—20000Hz,适合做高频扬声器。



图 8 B.E.S 扬声器

乙稀珠构成,这种声弯曲膜片在压缩下热处理,再在规定的环下冷却。这种由计算机设计

的,具有独特轮廓的膜片,每个不同部分,在各自特定的频带重放,即用此一个振膜,实现全频带的重放。B.E.S 扬声器的特点是,完全无指向的扩散;具有平坦的频率特性;动态范围宽,覆盖面积大。

做为一个成功的例子,B.E.S 公司为墨西哥市的 AZTEC 体育场提供了中央扬声器系统,用于 1986 年世界杯足球赛。此系统共包括 192 个单独的 B.E.S 扬声器。引起世界公众(包括中国)的注意。

四、测试技术与扬声器技术的相互促进^[12]

测试技术的进步深化对扬声器的认识;扬声器技术的发展又盼求新的测试方法。近年来扬声器测试技术的进步不亚于扬声器技术本身的发展,实现了非消声室测试法。

1. 用数字技术测量扬声器的特性^[13~14]

最近由于电子计算机的广泛应用,快速傅

里叶变换的实现,使一种测量扬声器脉冲响应,计算其转移函数的方法获得了实际应用。这种数字测量系统与模拟测量系统相比有两个特点。①测试信号由稳态连续信号改为脉冲信号或猝发信号,可不用造价昂贵的消声室。②由于采用了快速傅里叶变换(F.F.T)等许多数字信号处理的新技术,具有计算速度快,精度高的特点。还可实现如扬声器的相位特性、群延迟特性等的测量。

2. 用激光、计算机法观察扬声器振膜的振动

随着频率的升高,扬声器的振膜振动难以观察,前几年出现的激光全息摄影法,可以观察分析扬声器振膜的振动,这是一项重大进展,但是仍不能直接观察到振膜的振动。英国的 Cellation 公司采用激光、计算机法,用眼睛观察扬声器振膜的振动。

此方法是:①由计算机控制下的一台氦氖激光器扫描正在振动的扬声器振膜,其扫描方式是直线扫描或弧形扫描,以收集振膜上的

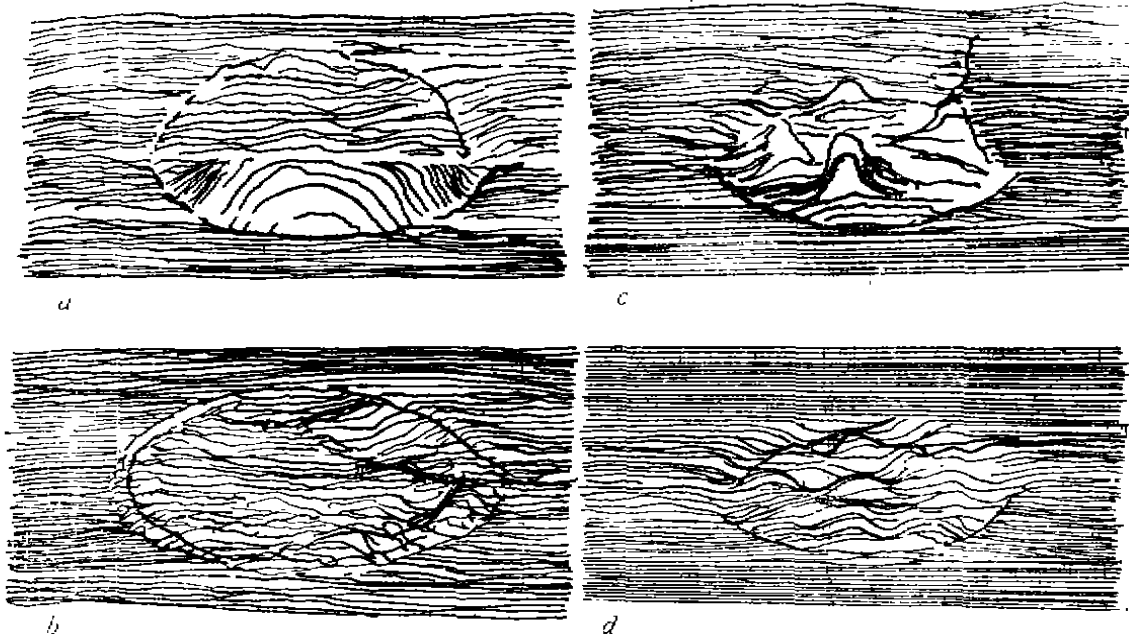


图 9 振膜振动形式

32000 点以上的信息;②用相位感应探测器收集信息,并使之延迟,再送入 X-Y 绘图机;③绘应用声学

图机描画出由激光扫描的扬声器振膜振动瞬间的立体图。这种立体图可以清晰地反映出扬声

器的振动情况。

Celestion 观察到的图形如图 9 所示。

3. 大功率谐波失真的测量。

扬声器在大功率输入时测量谐波失真是一件困难的事, 因为扬声器难于长期承受此大功率。丁永生^[13]提出采用一个触发脉冲, 来触发猝发音信号发生器, 产生一定波数的猝发音信号, 由于猝发音持续时间短, 扬声器可以安全地承受很大峰值功率的猝发音信号。采用微机程序处理, 以测量出大功率下的谐波失真。此种大功率谐波失真仪, 同样可以完成对扬声器其他参数的非消声室测量。

4. 扬声器频率响应的新的表示方法^[15]

传统扬声器频率响应是分别表示其声压频率响应和相位响应。由于数字唱机等设备的普及, 提高了对放声系统音质的要求, 对扬声器系统来说, 对相位特性更为重视。因此提出一种用尼奎斯特螺旋线同时表现声压频率特性和相位特性的三维表示方法。

五、新材料的广泛应用

扬声器材料的进展, 又集中于振膜材料的改进。扬声器的振膜, 直到现在还是以纸质锥体为主, 它是用纸浆, 经打浆、施胶、捞型、压制而成。这种工艺成熟, 价格低廉, 性能满足一定要求, 仍被大量使用。但是, 当对扬声器提出更高的要求时, 纸盆振膜满足这些要求是困难的。作为扬声器振膜, 其基本要求是比弹性模量要大, 即材料的弹性模量与密度之比要大, 为了保证有良好的音质, 还希望材料有一定内阻尼, 因此, 可从振膜形状改进, 如平板振膜的出现, 而单一材料组成的振膜难于同时满足比弹性模量大而又有内部阻尼要求。所以新的振膜材料几乎都是复合材料。复合材料有的是两种或两种以上材料组成, 或者是在一种基本材料中加入增强材料。

1. 平板振膜扬声器^[16-18] (简称平板扬声器)

平板扬声器已有多年历史, 只是蜂巢平板的大量生产, 才使平板扬声器进入高潮。由于

平板是铝制芯组成, 所以比弹性模量甚高, 由于消除了前室效应, 在正面轴上的频响比较均匀。结构也比较新颖。

平板扬声器开发了不同类型, 如蒙皮有铝制, 玻璃钢, 碳纤维, 增强烯族烃……; 有圆形、矩形; 有单音圈推动、四音圈推动; ……等。

但是平板扬声器偏轴的频响同样是不均匀的, 结构工艺复杂。因此大多数优质的扬声器, 仍采用传统的锥形振膜。

2. 新型振膜材料

已经用于扬声器的新材料很多, 其主要改进是在基材中加入一些强化材料; 或由两种以上材料合成的材料。这些材料主要有: ①碳纤维增强材料。即在纸浆纤维中加入一定比例的碳纤维。②强化烯族烃^[17]。这是用高分子材料中最轻的烯族类做基体, 与强化纤维中比弹性率最大的碳纤维复合, 这种复合材料有过去没有的加工特性。③精细陶瓷振膜。精细陶瓷振膜是将铝系精细陶瓷在 5000—10000℃ 隔绝氧气的情况下熔融, 高速流过作为基体的铝振膜表面, 得到弹性模量高、密度小的精细陶瓷振膜。④硼钛复合材料^[17]。用硼膜和钛组成三层复合结构。用蒸发的办法生成硼膜。⑤石墨振膜^[17]。石墨振膜材料是由石墨晶体与高分子聚合物的复合体。⑥云母振膜。将云母垛成厚 0.5μ 长 500μ 的鳞状片、用适当比例树脂含浸, 再热硬化, 可制成强韧的云母振膜。⑦等离子金刚石振膜。所谓等离子金刚石振膜, 是在钛振膜表面附着一层金刚石的理想复合振膜, 由于金刚石是最硬的物质, 这种振膜轻而刚性高, 局部谐振少。⑧ CAM 振膜。它是由碳纤维和聚酰胺纤维交织而成, 它保持了两种纤维的优点, 克服了其缺点。⑨碳纤维三层振膜和碳纤维夹层振膜。碳纤维夹层振膜如图 10 所示。

碳纤维三层结构振膜如图 11 所示。这些结构材料皆改进了扬声器低频动态范围, 改善了暂态特性。

扬声器其他部件在材料、工艺方面都有不少进展。如线性良好的 A 级定心支片; 高磁能

积的钕铁硼磁体;磁流体;各种阻尼剂;各种高顺性折环。

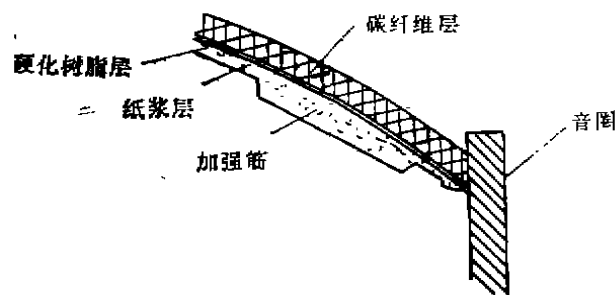


图 10 碳纤维夹层振膜

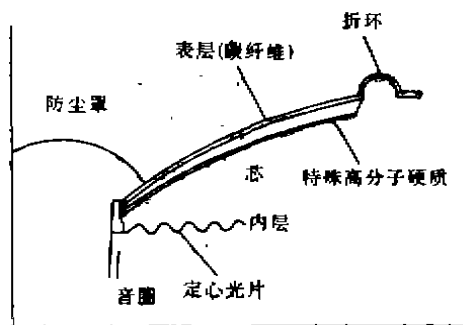


图 11 碳纤维三层振膜

六、几点简短的结论

1. 尽管扬声器的品种结构众多,但在可以预见的十年左右,电动式纸盆扬声器仍会占据主流地位。复合振膜将会广泛应用。

2. 扬声器理论的探讨、和测试方法的改进可以说还处于初期阶段。

3. 本文没有过多涉及扬声器的指标,因为相同指标的扬声器韵味可能不同,这可以说指

标不完善,亦可以说客观测试和主观评价的差距,更是一个有待深入探讨的领域。

今后扬声器技术的发展中心是制造出更为满意的、适合多方面用途的扬声器。从理论上深入研究扬声器的振动模式与定量分析,特别是暂态的研究;同人的听觉机理联系研究扬声器音质评价;同建筑声学联系研究扬声器放声与周围空间的关系;同计算机等现代测量技术联系研究足以表征扬声器特性的测试方法;同现代生产技术相联系改进扬声器的材料构成和生产工艺;不排除有新的换能方式出现,但将来的一二十年将仍以改进目前结构为主。

参 考 文 献

- [1] McLachlan N. W., Loudspeakers, Oxford at the Aarendon Press, 1934.
- [2] Frankfort F.J.M., Vibration and Sound Radiation of Loudspeaker Cones, N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken, 1973.
- [3] 上野孝文,日本音響学会誌, 34-8(1978).
- [4] 魏荣爵等,电声技术,4(1986).
- [5] Small R. H., J. Acoust. Soc. Am., 69-6(1981).
- [6] 新井悠一,無線と実験, 73-8(1986).
- [7] PCM スピーカの可能性, 电子通信学会技术研究报告, EA81-19.
- [8] 任吉外一,無線と実験,別冊 12(1981).
- [9] 木下正三,ラジオ技術, 33-2(1984).
- [10] Mantaray, J. Acoust. Soc. Am., 26-9(1978).
- [11] 吉田丰,電波科学,2(1982).
- [12] 阪本檀次,日本音響学会誌, 43-9(1987).
- [13] Ding Yongsheng, J. Acoust. Soc. Am., 77-3(1985).
- [14] 伊藤實,ラジオ技術, 41-6(1987).
- [15] 窪田登司,無線と実験,74-3(1987).
- [16] 佐伯多門,日本音響学会誌,38-4(1982).
- [17] 王以真,电声技术,3-4(1982).
- [18] 山本武夫,揚聲器系統(上、下冊),ラジオ技術社,1977.