

声学译丛

总第 14 号

# 电声学

1

上海市物理学会声学工作委员会主编  
上海市科学技术翻译馆出版



声学译丛 总第 14 号

电 声 学

( 1 )

上海市物理学会声学工作委员会主编

\*

上海市科学技术翻译馆出版

(上海南昌路 59 号)

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

商务印书馆上海厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 7 字数 220,000

1984 年 9 月第 1 版 1984 年 9 月第 1 次印刷

印数 1—5,000

编 号 : 62 · 228

定 价 : 0.90 元

## 前 言

电声学是现代声学的技术基础。它的主要研究内容包括电声换能原理、电声换能器及其材料、电声测试方法及其设备和有关录声放声等技术问题。电声学的应用十分广泛,它不仅为广播通信事业服务,并且也直接应用于工农业生产和国防等方面。近年来,国外在电声技术方面的发展十分迅速,每年发表的有关电声论文为数甚多。为了及时引进国外技术成就,供我国电声工作者和有关专业技术人员参考,我们特决定在声学译丛中增出《电声学》专輯。

《电声学》的主要内容:电声元件、录声技术、电声测试、立体声、高音质重放和扩声系统等,目前则以电声元件、录声技术、电声测试三方面为重点。可供声学与无线电工作者以及有关科研人员、工程技术人员、高等院校有关专业的师生参考。

本輯創刊伊始,由于編者水平有限,經驗不足,缺点和不当之处在所难免,尚望各方专家和广大讀者批評指正。

上海市物理学会声学工作委员会

1964年7月

# 目 录

## 电 声 元 件

|                     |                        |      |
|---------------------|------------------------|------|
| 聚酯膜在傳声器設計中的应用.....  | Alexis Badmaieff ..... | (1)  |
| 膜片形状对声輻射的影响.....    | I. Malecki .....       | (7)  |
| 双頻带复合式揚声器的設計.....   | 中島平太郎等.....            | (15) |
| 复合式监听揚声器的設計和試制..... | 山本武夫等.....             | (33) |
| 高保真揚声器的設計.....      | 藤木一.....               | (42) |

## 录 声 技 术

|                        |                        |      |
|------------------------|------------------------|------|
| 用电类比法研究磁帶录声机速度的变化..... | W. Wolf.....           | (49) |
| 磁性录声用的鈷鉄氧体磁粉.....      | 宮田 明等.....             | (59) |
| 磁性录声——磁帶磁化理論.....      | L. G. Sebestyen 等..... | (65) |

## 电 声 測 試

|                     |                            |      |
|---------------------|----------------------------|------|
| 揚声器效率的測定.....       | M. T. Haitjema .....       | (69) |
| 揚声器紙盒材料彈性模量的測定..... | C. Bordone-Sacerdote ..... | (72) |
| 揚声器紙盒的复数彈性模量.....   | J. Merhaut.....            | (74) |

## 立 体 声

|                   |                    |      |
|-------------------|--------------------|------|
| 立体声概述.....        | T. Somerville..... | (76) |
| 若干立体声現象的相量分析..... | B. B. Bauer .....  | (84) |

## 高 音 质 重 放

|                  |                       |      |
|------------------|-----------------------|------|
| 住宅中的高保真重发問題..... | T. S. Korn.....       | (88) |
| 房間信息的傳輸.....     | Klaus Wendt.....      | (90) |
| 立体混响.....        | B. B. Фурьяев.....    | (93) |
| 发声自然的人工混响.....   | M. R. Schroeder ..... | (96) |

## 扩 声 系 統

|                       |                            |       |
|-----------------------|----------------------------|-------|
| 以頻移法改善扩声系統的反饋稳定性..... | M. R. Schroeder .....      | (101) |
| 用以改善声反饋稳定性的頻移器.....   | A. J. Prestigiacomo 等..... | (103) |
| 用于扩声的綫列揚声器.....       | William A. Dill .....      | (107) |



# 聚酯膜在傳声器設計中的应用

Alexis Badmaieff

## 引 言

为了改进傳声器的性能，人們正在不断探尋新材料和从事技术上的改进。如所周知，声頻放大器早已达到较高水平，它的頻率响应特性已接近十分完善的程度，然而，傳声器——将各种傳播的声音轉化为电輸出的发生器——却还未达到理想程度，虽然經過多次改进，傳声器已从粗糙的炭粒換能器发展到较为良好的現代設計。

近年来重大改进之一，就是采用聚酯膜来制造傳声器膜片。人們久已从事于探索一种重量較輕、比重較小的膜片材料，以便采用較厚的膜片而不致破坏膜片与音圈間应有的质量比例关系。

聚酯膜已被証明可以满足这些要求。它有一个显著的优点：当它制成复杂形状后，即使受到十分剧烈的瞬时形变，仍能保持原形。例如，聚酯膜制成的膜片在遭受瞬間爆炸声时，虽产生极大变形，但仍能恢复原状。而鋁制膜片在前述情况下，就会永久变形而必須調換。聚酯膜的比重約为 1.3，而鋁的比重是 2.7。由此可知，当傳声器膜片与音圈质量比固定时，聚酯膜所制膜片可較鋁制膜片厚得多。

曾对作傳声器膜片用的聚酯膜进行了多方面的研究，例如，曾在极大压力和高溫下制成塑料膜片。

为了試驗它的性能，曾使聚酯膜片长期經受  $-40 \sim +77^{\circ}\text{C}$  的溫度变化，結果，材料自身并未损坏，模压形状也未改变。这些膜片也曾遭受极大形变，例如在支持結構上，用手掌把它們压平，而放松后，它們仍能回复原形并正常工作。聚酯膜也曾熏以各种常見的化学气体，而未受影响，其一切性能良好如常。

鋁制膜片用在各种傳声器上，虽然性能优良，但易受机械压損而极易损坏，而塑料膜片不易压損，故能制成較牢固的高质量傳声器。又由于采用聚酯膜，高质量的傳声器已差不多达到不易损坏的程度。

## 設計标准

为了制訂設計标准，曾經进行許多必要的測試和实验。这里包括两大类傳声器——心脏綫式和无方向式。

心脏綫式傳声器比无方向式傳声器复杂得多，以下将分別討論这两种傳声器的設計。

## 无方向式傳声器的設計

这里先叙述无方向式傳声器。膜片直径选定为  $7/8$  吋，厚度为 0.0015 吋，这样的选择可使傳声器尺寸和低频响应間取得适当的調和。若膜片直径过小，則声順就較低，因而自然諧振頻率增大。当然，也可采用較薄膜片以提高声順，但是，如果材料太薄，膜片就极难压制，而且不易保持原形。同样，音圈的微型化会降低傳声器的灵敏度，因为一般鉄合金当磁通密度較大时即将飽和。根据这一概念，膜片模子制成預先設計的形式，以取得良好的頻率响应和低的自然諧振頻率。在膜片外形上具有几个高声順連接点，使和总质量結合后获得 350 赫的諧振頻率。其数学关系表示如下：

$$f_r = K[1/(M_m C_m)]^{1/2}$$

式中  $f_r$  是自然諧振頻率， $K$  是常数， $M_m$  为力感， $C_m$  是力容（結構如图 1 所示）。其声順部分設計为切綫的，它具有两个連接点，以取得高声順作用。为了避免极片的特殊加工，采用一个隔离阶，其末端装在胶接座中。应适当选择圓頂部分的球半徑，使勁度合宜，以达到最好的高频响应。

圓頂部分为約 5000 赫以上的頻率控制元件，但它单独不能工作，因它仅起无声順部分的作用。高频段的校正是調节极靴結構来达到的，这一結構装于圓頂内部，它圍入足量的空气，使空气的勁度与工作系統的质量在声頻以上一点发生諧振。此外，极靴和音圈間气隙所形成的声阻可使諧振峰变寬，因而消除了主要諧振系統和不足情况。

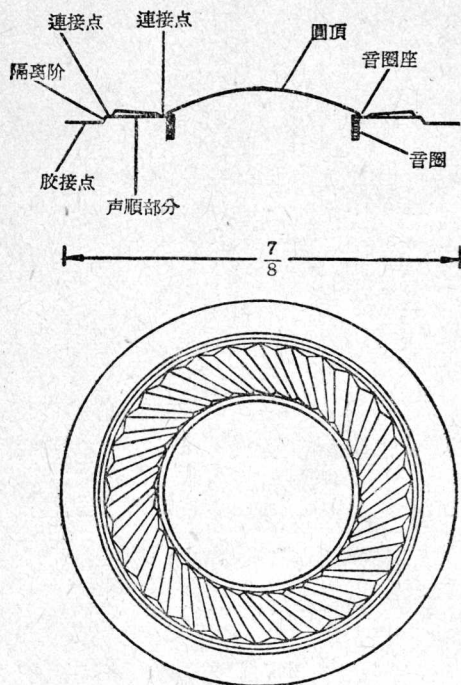


图1 无方向式膜片和音圈组件图

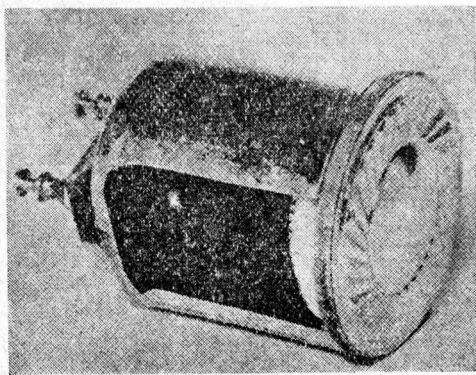


图2 无方向式扬声器整体照片(不连外壳)

鉴于音圈和膜片间牢固接合非常重要，特装置一个音圈座(如图1所示)。这个槽不仅固定了音圈与圆顶部分的相对位置，而且提供一个重迭接合点，以致该两部分粘接时，胶剂可在接合点上形成一个薄层。因为有了这个重迭接合点，所以胶剂内的应力是剪应力。

## 膜片的压制

膜片压制的方法是先把一个金属硬模加热到近于聚酯膜的熔点，在达到这一温度时，就把塑料膜放在硬模顶上，再用一块橡皮垫把该膜向模型压紧，并

趁热对聚酯膜施加高压，以保证模型各部分都能在膜片上复制出来。在加压情况下，使硬模冷却到室温；然后取消压力，从模中取出制成的膜片。因为所用温度很接近聚酯膜的熔点，所以发生了分子构造的变化，因而保证尺寸上极大的稳定性。

曾经花费很多时间对膜片成形得最好、最稳定的温度进行研究，发觉加热和冷却时间的长短也很重要。如温度过高，膜片虽然成形，但由于聚酯膜的收缩，表面将有孔洞。又如加热时间较短，收缩就不易发生，因而可以采用高温。在冷却过程中，降温速度必须较慢，以使应力均匀。一台自动压制机如加热与冷却温度调节适当，则每片只需60秒钟的压制时间。

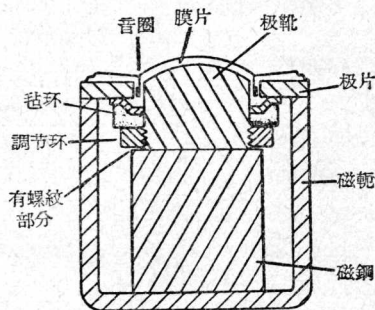


图3 无方向式扬声器剖面图

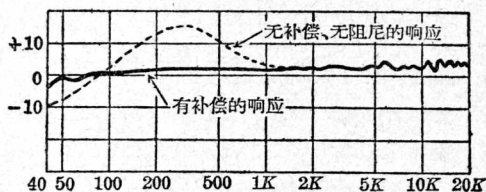


图4 无方向式扬声器的轴上响应

音圈质量是总的控制质量的一部分，为了获得良好的高频响应和符合上列公式，音圈材料必须极轻，因此以选用铝线为宜。铝具有质量对电导的最好比例关系。和铜相比，铜的比重为8.89，而铝的比重为2.7，但铝的电阻率仅较铜大1.64倍。因此就这二者的乘积而论，铜为8.89，而铝为4.45；显而易见，在优良的频率响应和高的灵敏度方面铝均胜于铜，虽然其导电性能比铜差一些。为了使生产简化，采用了圆线。为了制成坚固的音圈，是用39号线绕46匝，分为两层，以取得约8欧的阻抗。又因为坚硬性也很重要，特采用凝固后变硬的胶接材料把线匝和线层粘到一起，使其结构坚固而能自行支持。

装配时,将音圈小心装入图1中的音圈座内,再用胶剂粘接。装入磁结构中的音圈和膜片组件的整体照片如图2所示。这一设计由于采用了各种性质优良的元件,所以制成后的传声器具有良好性能,适用于录声、广播和仪器装置等。设计的目的在于大量生产,因而采取了各种措施,使性能可靠、制造牢固,而成本不高。图3所示磁路结构、连同粘接好的膜片和音圈组件包括下列各部分:极片;磁轭;铝镍钴V类磁钢;极靴(具有螺纹部分)。在螺纹上部有一调节环,它压紧毡环,以阻止气流经由音圈所在的空隙通至膜片的底面。这样装配后,膜片和音圈组件在自由空气中的谐振频率是350赫,与前面算出的一样。调节环使在毡环中产生阻尼,以获得平坦的声频响应。选择极靴的形状,使膜片与极靴圆顶的空隙中产生一个足够低的声顺,以扩展高频响应达20千赫。当这一结构装入一个通气的外壳内,而通气孔调至50赫谐振时,就得到非常良好的频率响应。

响应曲线示于图4,它表示零度的轴入射。曲线虚线部分表明该结构在无补偿、无阻尼时的响应。传声器灵敏度是按 $-55$ 分贝米/10达因/厘米<sup>2</sup>确定和测试的,稍高于一般动圈式传声器。因为它的尺寸小,所以绕射干扰极低,这可从曲线高频区域中看出。为了免除壳内产生的驻波,内腔一部分装入吸声用羊毛。

## 输出电路

音圈阻抗选用8欧,以使音圈小巧和绕线方便,为此必须设计一个变压器来提高输出阻抗。选择变压器元件时会仔细考虑,使达到成本低而重量轻的目的。为了使结果完善,选用一种小型变压器,按极限公差绕成,采用高导磁率铁芯和低的铁芯损耗,其次级线圈可以选择三个EIA标准数值,即30/50、150/250和20000欧。若装用五线传声器电缆接线器,则用户在自由选择阻抗时,只须把电缆插头连至所需的接线端上。

任何种类的传声器,总难免管理和使用不当,用户通常须在传声器内部选用阻抗,因此换接时就容易损伤零件。采用五线接线器来选择阻抗时,就无须拆开传声器,因而不致损伤零件。

传声器外壳都备有适度的空腔,以产生良好的低频响应,但尺寸宜小,以符合美观要求。为使空腔内产生对低频具有补偿作用的谐振,设计了一个管形通气孔。从公式 $f_a = K[1/\sqrt{LC}]$ 可知,当谐振频

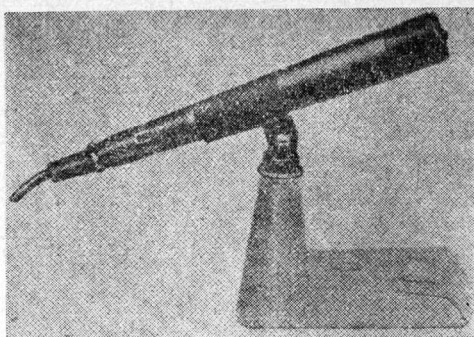


图5 无方向式传声器(连同外壳及支架)

率为50赫时,管的长度应为 $5\frac{1}{2}$ 吋。完整的无方向传声器如图5所示,构造细节如剖面图6所示。外壳与前部保护屏总组合长7吋,另加电缆插头 $1\frac{1}{2}$ 吋。由总长度可知此种传声器具有引人注意的细长外形,但其大小也还适合人手的握持。

外壳的另一形式是悬挂型。这种型式的特点是尺寸小、重量轻,套在颈上时并不感到有所妨碍,亦不触目,同时使用者仍可动作自如。悬挂传声器因有加重的胸音,必须进行补偿,将低音减弱,使合成响应平坦。因此,这种悬挂型传声器不需低频谐振辅助管,膜片后面也不需要大的空腔。

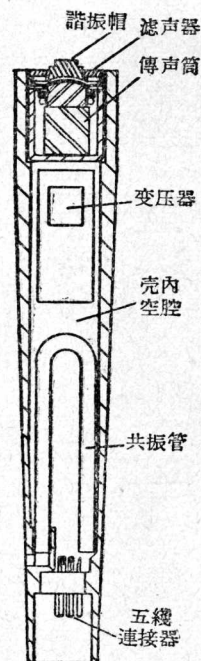


图6 无方向式传声器剖面图

悬挂型传声器也具有输出变压器,以升高传声器原有的8欧阻抗至所需值(30/50或150/250欧)。因欲使重量减轻,故省去五线插头。一根附有三线



插头的細小三芯屏蔽軟電纜經由衬管通入傳声器，它同时也封閉了后面的空腔，使与外界大气隔絕。两阻抗的选择方法是以軟電纜中适当的芯綫接在插头的接綫端上。悬挂型傳声器結構如图 7 所示，其剖面則如图 8 所示。

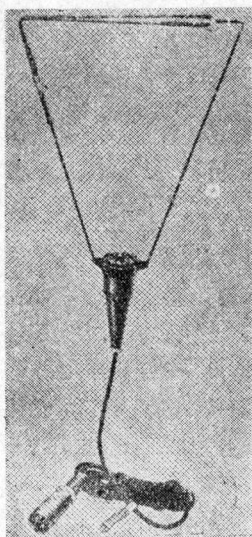


图 7 悬挂型傳声器(连同悬挂附件)

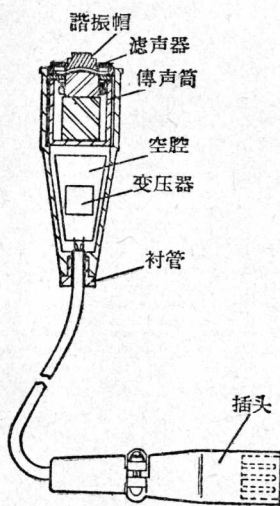


图 8 悬挂型傳声器剖面图

## 心脏綫式傳声器的設計

心脏綫电动压强式傳声器的設計要比无方向式复杂得多。不仅前面的响应要平坦，而且后面的鉴别力也要在大部分可用声頻範圍內保持高数值。因此，这种傳声器至少須有两个声音輸入通道。它必須有后面的輸入通道，再加上声音相移网络。作

者設計的心脏綫結構是部分地利用单向原理，以消除或鉴别发生于抵达膜片和音圈組件的諧振点。这一点选择为 120 赫，它是可聞声譜中的一点，其频率低得足够包括該声譜的一大部分，但亦高得足以减少对爆炸声和冲击的响应。在这一点下面，設置另一个声音輸入通道，用作低音輔增孔和低音鉴别元件，工作在 30 ~ 120 赫範圍內。这种傳声器需要一个外壳来工作，它应当作为一个完整的傳声器組件来处理。

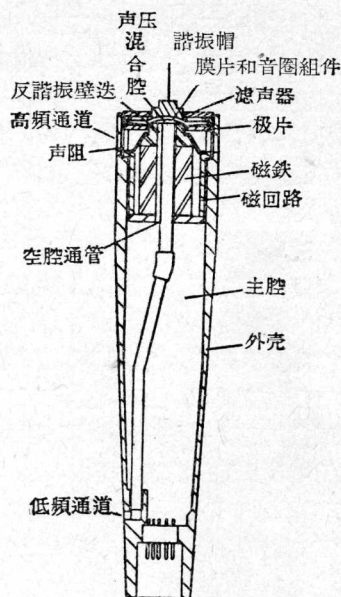


图 9 心脏綫式傳声器剖面图

图 9 用一簡图說明与这种傳声器主要性能有关的各个声音輸入通道。膜片和音圈組件（結構的心脏）另由图 10 描述。为了获得单向作用，器件质量必須控制，使諧振点降低而能在較闊的声譜範圍工作。但如諧振点选得过低，則这种結構对冲击激励和空气流就会过于敏感。选择諧振频率为 120 赫，正表明这两个因素的調和。因为膜片和声圈組件的质量控制着傳声器的灵敏度，所以如要降低諧振点，最好采用增加声順的方法，这就是心脏綫式膜片形状包含一个长的声順部分(图 10)的緣故，結構的其余部分与无方向式相似。膜片的直径較大，在此設計中为 1.2 吋。再由图 9 可知，声音以零度角入射，作用于膜片前面，稍迟一些后(由于途徑較长)，声音进入高频輸入通道。它經過綫子和音圈空隙(代表一个声感分量)，而再被延迟。当抵达膜片背后时，它已与前面的声压异相。为了增强 120 赫以下的低频响应，裝置了另一个低频通道，它离开膜

片后背較低頻通道更遠得多。進入高頻通道的聲音，經由一根管子進入膜片的混合腔。此管有兩種作用：第一是提供一個較遠的拾聲點，同時作為一個聲感分量和主腔諧振。現在再考察當聲音從後面進來時此傳聲器的作用：120 赫以上的聲音先進入高頻輸入通道，在那里被延遲（如上所述），它也經過一較長途徑而最後作用到膜片前面。由於它在到達混合腔的途中被延遲，兩個聲壓就在同一瞬間作用於膜片前後兩面，因而互相抵消。120 赫以下的聲音情況亦相似，但這時它也進入低頻輸入通道，在該處延遲而最後終於抵消，如同高頻輸入通道情況一樣。全部可用聲譜內，合成的拾聲圖案是心臟綫形，傳聲器等效電路示於圖 11 并附有說明。圖 12 為心臟綫式傳聲器（不連外殼）以及圖 11 中所述的各個聲音輸入通道。

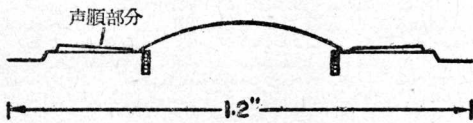


圖 10 心臟綫式傳聲器的膜片和音圈組件圖，并示出為獲得低諧振頻率所需的長聲順部分

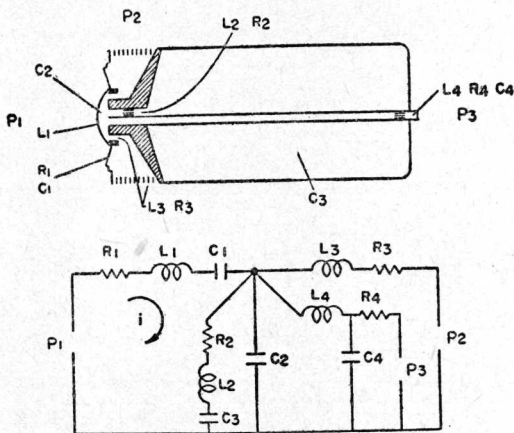


圖 11 心臟綫式傳聲器剖面及其等效電路簡圖。  
 $P_1$  是前面聲壓； $R_1$ 、 $L_1$ 、 $C_1$  是膜片的輻射電阻、質量 and 聲順； $C_3$  是外殼空腔； $R_2$  和  $L_2$  是膜片混合腔與空腔間的通道； $C_2$  是膜片下面的聲順； $L_3$  和  $R_3$  是音圈空隙和高頻輸入通道  $P_2$  上綫子的聲感和聲阻； $L_4$ 、 $R_4$  和  $C_4$  是低頻輸入通道  $P_3$  的集總聲感、聲阻和聲容

調節心臟綫式傳聲器使其達到最好的前後面差別力的方法，是在高頻輸入口處和較遠的低音拾取點加入不同數量的聲阻。用一兩層或三層厚綢布遮住高頻輸入口，就可消除後面進入的聲音。這種調節方法在 300~5000 赫之間有效。300 赫以下範圍

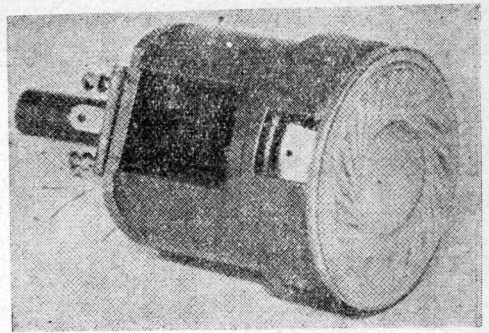


圖 12 心臟綫式傳聲器整體圖，不連外殼頻率響應調節

內的調節，可在低頻管內裝入適當長度和密度的羊毛，使低頻區域獲得最好的差別力。5000 赫以上的差別是可以固定的，它是由傳聲器形狀引起的障板效應的一個函數。當所有參數都正確調節後，合成響應就如圖 13 所示，其中顯出標記着  $0^\circ$  的前面響應和標記着  $180^\circ$  的後面響應。由圖可知，在前面響應曲線上出現一個如虛綫所示的峰點，其中心點在 3000 赫。頻率響應曲線中的這個峰點是由于上述長的聲順部分（為使膜片和音圈組件的自然諧振降低）的諧振所致。因為從聲學方面不易改正它，所以改用  $LC$  電網絡（與音圈并聯）來消除此峰點。這個電路由一扼流綫圈和一電容器串接而成，并用一個電阻器來控制該網絡的  $Q$  值。這樣調節後，前面的合成響應就如圖 13 實綫所示。

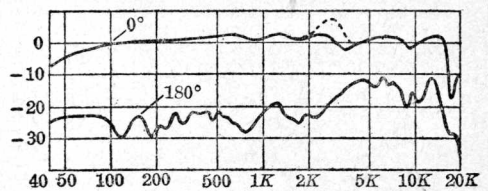


圖 13 心臟綫式傳聲器經適當調節獲得良好的差別力後的前面響應和後面響應

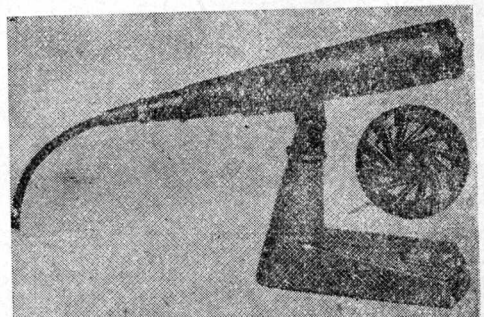


圖 14 心臟綫式傳聲器（連同外殼和支架）

如同无方向式傳声器一样，在音圈輸出端采用一个阻抗匹配变压器和上述网络并接，以提供三个正常使用的阻抗。其輸出端也装置一个五綫接綫器，因而可将所选择的阻抗接入电綫末端插头中，装配后的心脏綫式傳声器（連同外壳和支架）如图 14 所示。

### 对外物侵入的防护

这些新型傳声器的显著特点之一是在膜片前面采用燒結金属，以防止外物如鉄屑、灰尘和水等的侵入。所用特种燒結材料是許多青銅小球，在压力下使它們連成片状，約有 1/16 吋厚。我們用燒結青銅来防护傳声器已有多，通过对这种材料和其他材料的多次实验結果来看，在現今技术状况下，还没有其他装置可以在防护作用和声音品质方面与燒結青銅滤声器相比拟。这种材料中的空隙率可以严格控制，只須选用正确尺寸的小球来制片就行。由于这种材料也是一个声阻且具有較大的声感，所以必須把上述傳声器的高頻响应提高到 10000 赫以上。因此，在膜片圓頂前面又加装一个小型諧振帽，加上一个附加声順容，連同膜片的质量就可使諧振频率达 20000 赫以上。因为燒結青銅滤声器使这区域内的响应降低，而諧振帽使其增高，所以結果是平坦的。

除了燒結青銅滤声器外，还加装一个机械防护箱，保护傳声器的正面，使它不致因使用者握持不当而受损伤。

### 測 量

在研制过程中，各种测量都是在消声室內进行的。消声室是一个近乎沒有回声（或反射）的房間。实际上，在消声室內测量的条件和在空間一点测量时一样。在声学研究工作中，消声室是不可缺少的工具。消声室內置有一个可控制揚声器作为声源，又有一个电子测量装置，附有自动記錄笔，可画出响应曲綫，这就使消声室成为一种使用便利而准确度高的工具。有一种兰辛（Altec Lansing）消声室，其外部尺寸为 20×18×16 呎，室內六面都装有长 4 呎的吸声尖劈，有效尺寸为 12×10×8 呎。这种玻璃絲尖劈的吸声性能，在 70 赫以上的反射能量不到百分之一（虽然应用校准的傳声器，可以在更低得多的频率上测量）。厚实的双层墙壁建筑，可使空气中发生的聲音大量衰减。这种消声室又建于橡胶和鋼鉄的迭片所制的磚脚上，使地面振动較难透入；如要求更高的隔振性能，还可用打气橡皮垫来支持整个結構。

（王鏡民譯自美国《J. Audio Eng. Soc.》1961 年第 9 卷第 3 期第 218~224 頁，張本厚校）

## 建筑声学(4)《消声室》專輯內容預告

本輯选譯了目前国外現有的十二个大型和一般消声室的有关文献，着重介紹了消声室的基本結構和布置；用于吸收声能結構的材料、尺寸、安装方法和性能；在房間建成后它的声学性能的測試方法和实际結果。本輯还刊载了进一步改善消声性能（主要是吸声結構）的有关实验研究和設計数据，并选譯了数篇有关消声室中声波的傳播以及逐渐过渡式吸收体的理論文献。可供声学研究人員、电声工程技术人員、高等院校声学专业师生及土木建筑设计人員等工作及教学参考。本輯約于 1964 年第四季度出版，如需购閱，請向当地新华书店訂购。如訂购困难，請向上海南昌路 59 号本館郵购。

# 膜片形状对声辐射的影响

I. Malecki

## 1. 问题的范畴

有关膜片振动的文献是很丰富的。在分析这个问题时,新产生的困难导致对它进行了很多的理论工作<sup>[9,6,4]</sup>,但都只取得了部分成果,因为不能利用由一般方法求解的函数来表示形状较复杂的膜片振动。

本文的目的不是发展振动膜片的抽象计算,而是想找出这样一些数学关系式,它们能断定究竟膜片应该具有怎样的形状才能保证最佳的声辐射。这一问题在电声学中具有根本性的意义,而对其它技术部门(如航空、噪声控制)也不是完全没有意义的。

膜片的声辐射问题可以分成三个部分,但必须把它们看作是互相联系的。按照因果关系,可将这几部分列述如下:

- a. 研究膜片机械振动的类型;
- b. 研究膜片周围介质中的声场分布;
- c. 研究由振动膜片的声场所引起的生理和心理效应。

本文讨论的出发点是问题 c,因为听觉效应决定着应当对辐射膜片(如扬声器的振动膜片)的物理参量提出怎样的要求。

同时还应当记住:这样的膜片是一种机械-声音发生器,它的效率具有很重要的技术和经济意义,因而在评价设备的适用性时,应该考虑这个问题。

为简化讨论起见,我们只研究振动系统的稳态,而不去考虑振动系统的声顺变化所引起的非线性畸变。

## 2. 听觉器官的感觉

假定作用在膜片上的力的振幅恒定,当频率改变时,扬声器真实发声的条件是:在收听者所在的地方声压保持恒定值。但是,这一要求可能只有部分能实现,这就必须决定:与理想频率特性曲线有多大的偏离是可容许的。

一般说来,由传输设备的其它部件所引起的偏离小于我们听觉器官所能觉察的变化是可容许的。

实验证明<sup>[2]</sup>:在 100~500 赫内,声强变化 1/3 分贝耳朵就能区别出来。对上述范围外,特别是低于上述范围的声频,分辨阈更大,约为 1.5 分贝。耳朵的这种特性决定了“绝对容许度”,没有必要再把它降低,即或对声学器件的要求很高,也没有必要再降低。

然而,实际上可以允许更大的偏离,其数量级有如电声学器件的电学部分所显示的那样。对高质量的电声器件来说,这个偏离在中频部分是  $\pm 1$  分贝,而在高频和低频部分约为  $\pm 2$  分贝。

除绝对偏离值外,频率特性的图案也对声音的主观感觉有很大影响。众所周知,在策动力的频率达到某些值时,将会出现可动机械系统的共振,而使声强增加一定的高度。

单个共振无疑会引起音色的畸变,所以应该将它消除。当特性曲线具有“梳齿形”图案时(即出现一系列相距很近的极大值),情况就更加复杂。我们可以在膜片辐射时观察到这种特性曲线图案,也可以在封闭区域里的空气振动时观察到它<sup>[6]</sup>。例如:在一个边长分别为  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的长方体形区域里,可以用简正振动理论中很熟悉的公式来确定所能出现的共振频率

$$f_r = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{a^2} + \frac{q^2}{b^2} + \frac{r^2}{d^2}} \quad (1)$$

式中  $p$ 、 $q$ 、 $r$  为任意整数,  $c$  为声波在介质中的传播速度。

可以很容易地算出,在  $4f$  区间里,共振频率的数目随频率的三次方而增加。若两个相邻共振之间的频率差为  $4f_r$ ,当  $4f_r \rightarrow 0$  时,将会出现这样的瞬间,此时耳朵不再感觉到特性曲线的梳齿形图案,也就是说,觉察不到各个极大值。

这是由于大脑皮层器官中神经兴奋的传输机构和声源的特性而产生的。乐器的声音,尤其是歌唱的声音,一般是沒有恒定的音高,而是显出一定的频率调制。在使用具有梳齿形特性曲线的器件时,频率调制确实会在接收器中给出一定的振幅调制,但它却被耳朵的惯性所平整,耳朵只对声强的平均值起反应。再者,乐器大多不发单个的正弦音调,而是



发出“调束”音<sup>[3]</sup>。如果这样的调束的宽度  $4f_r \gg 4f_r$ ，则频率特性的不均匀图案就不会影响声音的强度。

到目前为止，还没有对上述现象进行过定量的研究，由于没有进行长期的慎密的实验，所以很难给出  $4f_r$  的更精确的值。我们暂时只提一提这个问题，它还需要予以个别的阐述。

显然，声音感觉的清晰性不仅取决于  $4f_r$ ，而且还取决于梳齿形曲线的最大值和最小值之间的声强差。设振动系统的机械阻尼为  $\delta$ ，则在频率为  $f_n$  和  $f_{n+1}$  的两个共振之间的区域里，声强将具有由共振曲线合成所得出的图案：

$$J = \frac{A_n f^2}{(f - f_n)^2 + 4\delta^2 f^2} + \frac{A_{n+1} f^2}{(f - f_{n+1})^2 + 4\delta^2 f^2} \quad (2)$$

设  $f_{n+1} - f_n = 4f_r$ ， $A_n = A_{n+1}$ ，由于  $4f_r \ll f_n$ ，对于  $f = f_n$ ，我们得到：

$$J_{\max} = \frac{A_n}{4} \left[ \frac{1}{\delta^2} + \frac{1}{\delta^2 + (4f_r)^2} \right] \quad (3)$$

在曲线的两个顶点中间，对于  $f = f_n + \frac{4f_r}{2}$ ，声强趋于极小值

$$J_{\min} = \frac{2A_n}{4[\delta^2 + (4f_r)^2]} \quad (3a)$$

因此

$$\frac{J_{\max} - J_{\min}}{A_n} = \frac{1}{4\delta^2} - \frac{1}{4[\delta^2 + (4f_r)^2]} \quad (4)$$

可见  $4f_r$  越小，而机械系统的阻尼越大，则辐射的频率特性曲线就越规则。在以后设计膜片时应考虑到这一点。

### 3. 确定膜片声学性能的准则

测定声场对一系列频率的整个空间分布，就能给出声源的全部声学特性。此分布情况可用一族确定声源指向特性的曲线来表示，指向特性就是声压同连接膜片中心  $O$  及观测点  $A$  的径线和膜片轴之间的夹角的函数关系（图1）。函数  $p(\theta)$  一般都是对和膜片中心有定距离  $D$  的点进行确定的。

也可以对声源周围的一系列点求出声压和频率的关系，即  $p(f)$  曲线。

为了概略地了解声场的空间分布，一般只限于对膜片对称轴方向上（ $\theta = 0^\circ$ ）并与膜片相距一个单位距离（如1米）的点求出  $p(f)$  值，而对两个或三个频率求出指向特性曲线  $p(\theta)$ 。

但这些曲线并没有给出声场效率或功率的概念。而计算声源的辐射阻  $R_p$ ，以代替上述这些量计算起来更为方便，这时声源所发出的功率  $N$  可从

下式求得：

$$N = v_0^2 R_p = \frac{p_0^2}{Z_0^2} R_p \quad (5)$$

式中  $v_0$  为膜片表面中心点振动速度的有效值；

$p_0$  为该点声压的有效值；

$Z_0$  为介质声阻抗率。

知道了声源的指向特性，就可以从关系式(5)中算出辐射阻

$$R_p = \frac{D^2}{Z_0 v_0^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} p^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta \quad (6)$$

$\theta$  和  $\varphi$  角都清楚地标在图1上。式中，对  $p^2$  沿半径为  $D$  的半球面积分是膜片发出的声能通量的量度。

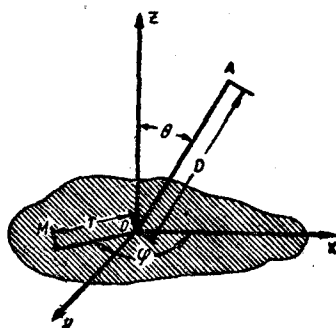


图1 辐射系统的几何简图

在以后的计算中，我们将忽略声压和分速度之间的位相差，即将  $Z_0$  视为实数。这就意味着我们将研究与膜片相距某一距离  $D > D_0$  处的声场，该处的位相差是非常小的。可以认为  $D_0 = 5\lambda$ ，因为对这个距离来说，相移只有  $1^\circ 50'$ 。这样所作的简化实际上并不会限制讨论的一般性。

我们的任务是研究膜片的有效辐射，消除支架及膜片背面作用的影响。为此，我们将默认膜片是放在一个具有理想反射性能和刚性的障板内，障板的尺寸比波长大得多。

### 4. 圆形活塞膜片的辐射

要比较我们所设计的各种膜片的性能，最好是把某种膜片当作标准，并将其它膜片的性能和它进行比较。我们把圆形平面活塞膜片选作标准膜片。其辐射可用比较简单的数学函数表示，而其形状也是设计更复杂的振动系统的基础。

可以根据振动系统所产生的声压的一般公式，计算直径为  $2a$  的圆形活塞膜片的辐射<sup>[7]</sup>：

$$p = \frac{\rho}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_S \frac{\partial \phi}{\partial n} \frac{e^{ikr}}{r} dS \right] \quad (7)$$

式中  $\rho$  为介质密度；

$\frac{\partial \phi}{\partial n}$  为垂直于活塞膜片表面的声学势分量;

$r$  为观测点到膜片中心的距离;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}.$$

曾經利用各种方法对活塞膜片的辐射进行了多次计算, 因此我們只给出最后的結果。在和膜片中心相距  $D$  的地方, 膜片的指向特性具有如下的形式:

$$p = \frac{ka^2 Z_0 v_0}{D} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (8)$$

此处  $J_1$  是一阶貝塞尔函数。

頻率特性曲线在  $r=D, \theta=0$  点为:

$$p = \frac{ka^2 Z_0 v_0}{2D} \quad (9)$$

分母系数 2 是从  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{J_1(x)}{x} = 0.5$  得来的。用公式(6)

所计算的膜片的辐射阻为:

$$R_p = \pi a^2 Z_0 \left[ 1 - \frac{2J_1(2ka)}{2ka} \right] \quad (10)$$

图 2 为膜片指向特性曲线的例子。

如图 3 所示, 頻率特性曲线是很不均匀的。在繪制此图时, 曾假设膜片的直径为 24 厘米, 并用对数标度计算了频率为 100 赫和 5000 赫的声强比。对于接收方向为  $\theta=0^\circ$  来说, 这两个频率的声强是相等的。

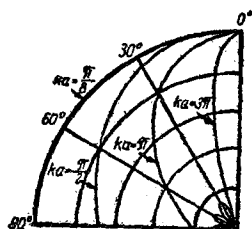


图 2 比拟膜片的指向特性

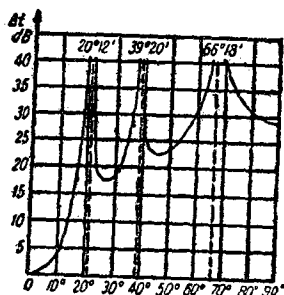


图 3 相对声强级和  $\theta$  角的函数关系

实际上, 声波的衍射和从周围墙壁上的反射消除了声辐射极小值的尖锐性, 从而使声学条件比理論上的要有利得多。

頻率特性曲线的不均匀性决定于傳輸上限, 因为对下限来说, 指向特性曲线几乎为圆形。因此, 膜片愈小, 指向特性曲线就愈是和最佳的曲线相接近。但是, 从图 4 的  $R_p(ka)$  曲线中可知<sup>[1]</sup>, 不能和此方向偏离太远, 因为当膜片太小时, 它的低频辐射功率就会不够。

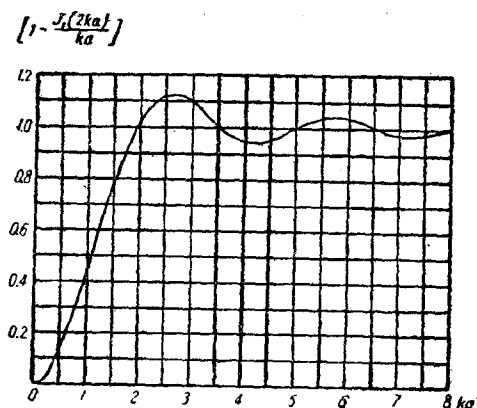


图 4 比拟膜片的辐射阻

圆形活塞膜片并不是最理想的辐射源, 因而在设计形状复杂的膜片时, 我们必须努力获得更好的结果。让我们看一看活塞形膜片 (即整个表面以相同振幅振动的膜片) 的一些最典型的形状。只要分析下面的几种情况就够了:

- 椭圆形膜片;
- 圆环形膜片;
- 圆锥形膜片。

然后用圆形平面膜片作为例子, 分析一下振动方式对辐射的影响, 也就是研究:

- 固定在框上的在整个表面上都没有振动位相差的膜片;
- 振动时在膜面上产生径节或圆节的膜片。

## 5. 椭圆形膜片的辐射

我们来研究切割成半轴为  $a$  及  $b$  的椭圆形平面活塞膜片的情形, 辐射指向特性可利用公式(7)来确定。因为要研究距膜片很远的声场, 所以可以认为来自膜片不同点的声学势是恒定的, 此时, 合势由相移来决定。由于我们研究的是活塞形膜片, 故满足条件  $\frac{\partial \phi}{\partial n} = v_0$ , 因此

$$p = \frac{Z_0 v_0}{\lambda D} \int_S e^{iku} dS \quad (11)$$

式中  $u$  为来自膜片不同处声波的程差。

以  $\alpha, \beta, \theta$  表示引自膜片中心的向径和直角坐

标轴的夹角, 则有:

$$u = x \cos \alpha + y \cos \beta \quad (12)$$

为使讨论导向较简单的圆形膜片的情况, 用辅助坐标  $x_1 = \frac{x}{a}$  和  $y_1 = \frac{y}{b}$  [10], 这时

$$p = \frac{Z_0 v_0 ab}{\lambda D} \int_{S_1} e^{jk(ax_1 \cos \alpha + by_1 \cos \beta)} dx_1 dy_1 \quad (13)$$

此处  $S_1$  是半径为单位长度的圆的面积。引入极坐标  $\varphi, \theta, r$ , 并用下式表示

$$\psi = \arctg \frac{b \cos \beta}{a \cos \alpha} \text{ 和 } l = \sqrt{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \cos^2 \beta}$$

利用关系式  $\cos \alpha = \cos \varphi \sin \theta$ ,  $\cos \beta = \sin \varphi \sin \theta$  可将(13)式写成

$$p = \frac{Z_0 v_0 ab}{\lambda D} \int_0^1 r dr \int_0^{2\pi} e^{jkl \cos(\varphi - \psi)} d\varphi \quad (14)$$

将此式积分得

$$p = \frac{kab Z_0 v_0}{D} \frac{J_1(kl)}{kl} \quad (15)$$

正如所预料的那样, 由于  $l$  是  $\alpha$  和  $\beta$  的函数, 指向特性不是一个回轉体。对于通过椭圆长径的截面, 亦即对位于  $xz$  平面上的向径有

$$\alpha + \theta = 90^\circ \text{ 及 } \beta = 90^\circ$$

因此

$$p = \frac{kab Z_0 v_0}{D} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (16)$$

此公式和圆形膜片的公式是完全一样的。对位于  $zy$  面上的向径类似地有

$$p = \frac{kab Z_0 v_0}{D} \frac{J_1(kb \sin \theta)}{kb \sin \theta} \quad (17)$$

对  $xy$  面

$$\alpha + \beta = 90^\circ; \alpha = \varphi; \theta = 90^\circ$$

$$p = \frac{kab Z_0 v_0}{D} \frac{J_1(k \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi})}{k \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (18)$$

也就是说, 在垂直于轴的平面上, 指向特性曲面的截面是个椭圆。

我们再来研究一下膜片的椭圆形状对频率特性的影响。将  $\alpha = 90^\circ$  与  $\beta = 90^\circ$  代入(15)式就可得到一个和圆形膜片相同的式子。因而和习惯的看法相反, 这里我们没有能够将特性平整掉。

计算椭圆形膜片的辐射阻更为困难, 它由(6)式确定, 将前面所得到的  $p$  值代入

$$R_p = k^2 a^2 b^2 Z_0 \int_0^\pi d\varphi \int_0^\pi \left[ \frac{J_1(kl)}{kl} \right]^2 \sin \theta d\theta \quad (19)$$

积分限的变化并不影响最后结果。

因为

$$\int_0^\pi \frac{J_1^2(ks \sin \theta)}{\sin \theta} d\theta = 1 - \frac{2J_1(2ks)}{2ks}$$

所以

$$R_p = a^2 b^2 Z_0 \int_0^\pi \frac{1}{s^2} \left[ 1 - \frac{2J_1(2ks)}{2ks} \right] ds \quad (20)$$

此处

$$s = \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}$$

此积分可用收敛较慢的级数形式表示, 计算是很麻烦的, 实际上用图示法积分更好[10]。图5为对于不同的  $a:b$ , 此积分值与圆形膜片 ( $a=b$ ) 中的  $\left[ 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right]$  的比值。在低频范围内,  $a$  和  $b$  的比值增大, 辐射阻降低。

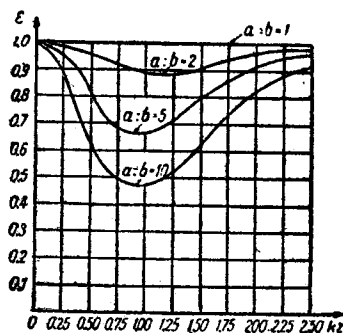


图5 辐射阻和椭圆形膜片形状的关系

从上面已知的数值中可得出结论: 与椭圆形膜片制作有关的工艺的高度复杂性并没有能够为它的辐射优点所补偿。

## 6. 圆环形膜片的辐射

我们这样来计算圆环形膜片的辐射: 从实心圆形膜片的声场中减去由另一个圆形膜片作用而引起的辐射, 此圆形膜片的直径等于圆环形膜片的内径。

因而这类膜片的指向特性曲线可利用公式(8)求得, 其形式为

$$p = \frac{kZ_0 v_0}{D} \left[ a_1^2 \frac{J_1(ka_1 \sin \theta)}{ka_1 \sin \theta} - a_2^2 \frac{J_1(ka_2 \sin \theta)}{ka_2 \sin \theta} \right] \quad (21)$$

在  $\theta = 0^\circ$  的方向上, 频率特性为

$$p = \frac{kZ_0 v_0}{2D} (a_1^2 - a_2^2) \quad (22)$$

利用(21)式, 我们从公式(6)和(7)中求辐射阻:

$$R_p = \pi Z_0 \left\{ a_1^2 \left[ 1 - \frac{J_1(2ka_1)}{ka_1} \right] + a_2^2 \left[ 1 - \frac{J_1(2ka_2)}{ka_2} \right] \right\} - 2\pi k^2 a_1^2 a_2^2 Z_0 \int_0^\pi \frac{J_1(ka_1 \sin \theta)}{ka_1 \sin \theta} \cdot \frac{J_1(ka_2 \sin \theta)}{ka_2 \sin \theta} \sin \theta d\theta \quad (23)$$

让我们比较一下半径为  $a$  的圆形膜片和具有同样面积的外径为  $a_1$  的圆环形膜片的性能。该膜片的内径为  $a_2 = \sqrt{a_1^2 - a^2}$ 。由此可以看出, 在膜片轴

上, 频率特性曲线和圆形膜片的完全一样, 且与  $a_1$  无关(此处  $a_1 \geq a$ )。将其指向特性和圆形膜片比较, 将可看到它有更突出的极大值。图 6 为圆形膜片 ( $m$ ) 及有相同直径但宽度极小的圆环形膜片 ( $p$ ) 的一些指向特性曲线的比较图例。对于这样的圆环<sup>[13]</sup>

$$p = gJ_0(ka \sin \theta) \quad (24)$$

式中  $g$  为与膜片大小有关的系数。

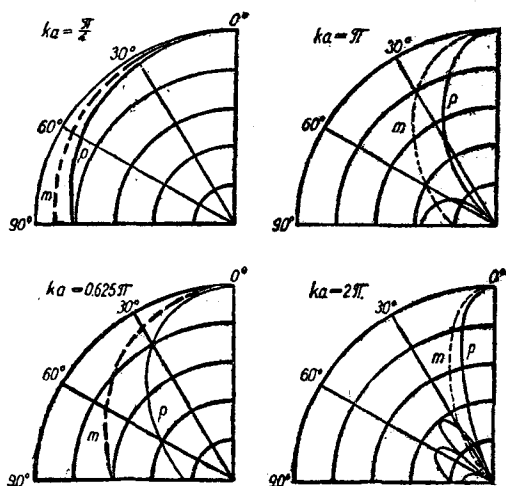


图 6 圆环形膜片与圆形膜片的辐射图案比较

我们来计算极限情形的辐射阻, 当  $a_1 \gg a$  时,  $J_1(ka_1) \cong J_1(ka_2)$ , 可以近似地写出

$$R'_p = \pi Z_0 (a_1 - a_2)^2 \left[ 1 - \frac{J_1(2ka_1)}{ka_1} \right] \quad (25)$$

而比拟圆形膜片的辐射阻却等于

$$R_p = \pi Z_0 (a_1^2 - a_2^2) \left[ 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right] \quad (25a)$$

因为  $a_1 \cong a_2$ , 故在这些条件下, 由圆形膜片向具有相同表面面积的圆环形膜片转换时, 对辐射总量并没有什么影响。然而  $R_p$  与频率的函数关系却发生了变化, 因为在式中代替参量  $ka$  的是  $ka_1$ , 由于  $a_1 \gg a$ , 所以在使用圆环形膜片时, 系数  $1 - \frac{J_1(2ka)}{ka}$  近似地等于 1, 而实际上可当作常数。由此可知使用圆环形膜片的优点是, 在比圆形膜片更宽的频率范围内(较低的下限), 辐射阻始终是恒定的, 而圆环形膜片的缺点在于制作驱动机构时的结构复杂性。

## 7. 圆锥形活塞膜片

在扬声器中, 最常用的形状是接近于圆锥形的, 或张角很大的指数喇叭的膜片。让我们研究一下最简单的圆锥形膜片的情况, 圆锥的张角为  $\delta$ 。

和前面一样, 需要利用公式(11)。显然, 膜片幅

射指向特性将是一个回轉体。下面根据几何关系来确定(11)式中的  $u$ 。

我们这样来安置坐标轴(图 7), 使测量点位于  $xz$  平面上, 这时向径和坐标轴间的夹角为

$$\alpha_1 = 90^\circ - \theta; \beta_1 = 90^\circ; \gamma_1 = \theta$$

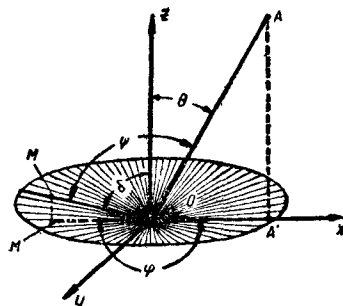


图 7 圆锥形膜片的几何参量

位于膜片面上的且通过其中心的直线  $OM$  与坐标轴间的夹角为  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ , 对这些夹角可有下列关系式:

$$\cos \alpha_2 = \cos \varphi \sin \delta; \cos \beta_2 = \sin \varphi \sin \delta; \gamma_2 = \delta$$

由此可以求出  $\psi$  角, 它是向径和位于膜片面上直线所形成的夹角

$$\cos \psi = \sin \delta \sin \theta \cos \varphi + \cos \delta \cos \theta \quad (26)$$

于是, 公式(11)中的  $u$  为

$$u = \frac{r \cos \psi}{\sin \delta} = r(\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \operatorname{ctg} \delta) \quad (27)$$

将此值代入公式(11)中即得

$$p = \frac{Z_0 v_0}{\lambda D} \int_0^a r dr \int_0^{2\pi} e^{jkr(\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \operatorname{ctg} \delta)} d\varphi \quad (28)$$

由此求出第一个积分后, 便有

$$p = \frac{Z_0 v_0}{D} \int_0^a k r e^{jkr \operatorname{ctg} \delta \cos \theta} J_0(kr \sin \theta) dr \quad (29)$$

为了将这类膜片周围的声场分布和圆形平面膜片所产生的声场进行比较, 我们将指数项展成级数

$$e^x = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{x^m}{m!} \quad (30)$$

通常,  $\operatorname{ctg} \delta \cong 0$ , 故只需取级数的前三项就够了。这时令  $z = kr \sin \theta$  和  $y = ka \sin \theta$  我们有

$$p = \frac{ka^2 Z_0 v_0}{D} \frac{J_1(y)}{y} + \frac{Z_0 v_0}{Dk \sin^2 \theta} \operatorname{ctg} \delta \operatorname{ctg} \theta \int_0^y z^2 J_0(z) dz + \frac{Z_0 v_0}{Dk \sin^2 \theta} \operatorname{ctg}^2 \delta \operatorname{ctg}^2 \theta \int_0^y z^3 J_0(z) dz + \dots \quad (31)$$

其数值解可用下面关系式<sup>[12]</sup>求得

$$\int_0^y z^{n+1} J_0(z) dz = -n^2 \int_0^y z^{n-1} J_0(z) dz + y^{n+1} J_1(y) + ny^n J_0(y) \quad (32)$$



由公式(31)可知:在 $\delta$ 接近 $90^\circ$ 时,圆锥的张角对膜片辐射的影响不大,因而 $\delta$ 的选择将不取决于辐射条件,而是由这个参量对膜片表面上振动分布的影响所决定。

## 8. 固定在框上的、进行同相振动的膜片

许多作者曾经对这类膜片在理论上进行过研究,因而我们只限于分析一下最后的结果,并且定出将这类膜片和活塞膜片进行比较的公式。

固定在框上的膜片振动方式取决于膜的刚性(准确地說,是薄板的刚性)和它的固定方法。一般地说,膜的振动振幅将按下面的函数变化

$$y_{\max} = y_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^n \quad (33)$$

此处  $r$  为所研究的振动的圆的半径;

$a$  为膜的半径。

函数  $y_{\max}$  的曲线如图 8 所示。

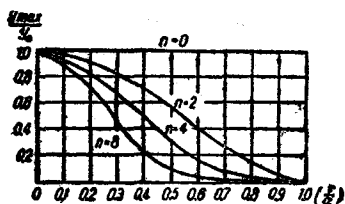


图 8 固定在框上的膜片振动振幅

和前面的几种情况相反,这里的  $\frac{\partial \phi}{\partial n}$  不是常量,因此必须按照公式(7)计算声压如下:

$$p = \frac{Z_0 v_0}{\lambda D} \int_0^a r \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^n dr \int_0^{2\pi} e^{jkr \sin \theta \sin \varphi} d\varphi \quad (34)$$

求出对  $\varphi$  的积分得<sup>[10]</sup>

$$p = \frac{2\pi Z_0 v_0}{\lambda D} \int_0^a r \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^n J_0(kr \sin \theta) dr \quad (35)$$

$$\text{令 } \cos \vartheta = \frac{r}{a} \text{ 及 } z = ka \sin \theta \quad [8]$$

$$p = \frac{2\pi Z_0 v_0 a^2}{\lambda D} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin \vartheta)^{2n+1} \cos \vartheta J_0(z \cos \vartheta) d\vartheta \quad (36)$$

由此

$$p = \frac{ka^2 Z_0 v_0}{D} 2^n (n+1)! \left[ \frac{J_{n+1}(ka \sin \theta)}{(ka \sin \theta)^{n+1}} \right] \quad (37)$$

利用这个推论我们可以求出由任意的、但与膜片中心对称的方式进行同相振动的膜片所产生的声压,因为膜片上的速度势可以用级数表示:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = b_0 + b_1 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) + \dots + b_m \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^m \quad (38)$$

而相应的声压为

$$p = \frac{ka^2 Z_0 v_0}{D} \sum_{m=0}^{n-1} b_m 2^m (m+1)! \left[ \frac{J_{m+1}(ka \sin \theta)}{(ka \sin \theta)^{m+1}} \right] \quad (39)$$

图 9 为指向特性曲线的比较。我们看到,指数  $n$  越大,指向特性就越是和其大小与波长相比很小的膜片特性相接近。这是可以理解的,因为那时只有膜片的中心部分在作振动。因此,膜片的性能就象一个直径很小的活塞形膜片一样。

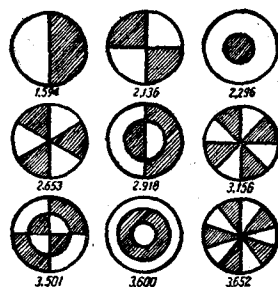


图 9 对不同的指数  $n$ , 膜的指向特性

当然,这个现象不能不对辐射阻产生影响,利用公式(37),辐射阻可从公式(6)求得

$$R_p = 2^2 \pi [(n+1)!]^2 a^2 Z_0 \int_0^{\pi} \frac{J_{n+1}^2(ka \sin \theta)}{(ka)^{2n} (\sin \theta)^{2n+1}} d\theta \quad (40)$$

此积分不能用一般方法求解。当  $n=0$  时,就得到圆活塞形膜片的方程(10);当  $n \geq 1$  时,辐射阻可近似地用下式表示

$$R_p = \pi w^2 Z_0 \left[ 1 - \frac{J_1(2kw)}{kw} \right] \quad (41)$$

式中  $w$  是替代的活塞膜的直径,对于给定的频率,替代的膜片给出和所研究的膜片相同的指向特性。特别有趣的是,这种膜片在频率非常低的状态,当  $ka \approx 0$  以及能够采用简化的  $J_n(x) = \frac{x^n}{2^n n!}$  时

$$R_p = \frac{\pi a^2}{2} Z_0 (ka)^2 \quad (41a)$$

也就是说,在  $n$  增大时,低频的辐射特性将和  $n$  无关。

由此得出结论,假使我们能够设计这样的膜片,其振动指数  $n$  随着频率的增加而增大,我们就可以获得平坦的指向特性曲线和辐射功率特性曲线。

## 9. 有节线分布的平面膜片

这里我们不再牵涉到早已知道的、外圈被固定的膜的振动理论。正如我们所知道的那样,在这类膜片上将产生节线,它们的位置将随策动力的频率而变。

让我们研究一种最简单情况,即固定在框上