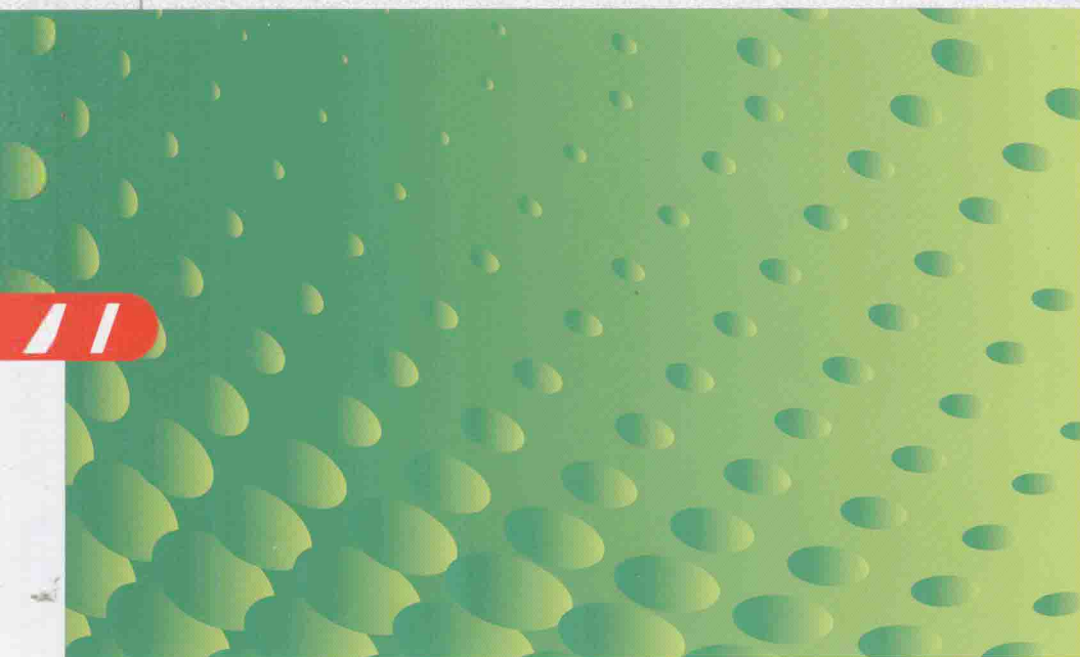


电声器件材料 及物性基础

■ 吴宗汉 何鸿钧 徐世和 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电声器件材料及物性基础

吴宗汉 何鸿钧 徐世和 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以电声器件材料及其物性为主要内容,包括电声、声电转换基础知识,电声器件中的功能材料,电声器件中的结构材料,电声器件中的辅助材料,电声器件材料研究及性能标准介绍等。

本书适合声学、物理学以及通信、电子等有关专业本科生和研究生阅读;也可作为从事电声器件制造的一线技术人员的辅助资料 and 培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电声器件材料及物性基础 / 呈宗汉, 何鸿钧, 徐世和编著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-118-08565-5

I. ①电... II. ①吴... ②何... ③徐... III. ①电声器件—电子材料②电声器件—物理性质 IV. ①TN64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 019856 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售



*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 字数 258 千字

2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

科学技术发展到了今天,应该说除了少数特殊领域外,想要根据新原理来开发新技术,其可能性越来越小了,今后将主要依靠新材料,特别是具有特殊物理、化学性能和具有新特性的功能材料来制造新组件、新设备。本书讨论的是电声器件材料。电声器件是指电声换能器,它是将电信号转换为声信号或作相反转换的器件。广义的电声换能器包含次声换能器、超声换能器、水声换能器。但通常的电声换能器是指声频范畴内的电声器件,如传声器、扬声器、耳机、受话器、送话器和拾音器等。

研究电声换能的原理、技术和应用的学科就是电声学,它是一个边缘学科。实际上,它是工程与艺术交叉,与微电子、光电子、计算机技术等互相渗透的既古老又年轻的崭新的领域。近年来的发展,它显示出了与材料科学、纳米技术等一些前沿科学密不可分的关系。

经典的电声学主要研究换能器的原理和设计,目前已扩展到用电子器件来产生各种频率、波形和强度的声音,以及有关声音的接收、放大、传输、测量、分析和记录等电声技术。从频率范围来说,研究的主要是可听声频段。

与一般的工程产品一样,要生产出一个优质产品,离不开优质的材料、科学的工艺、良好的设备、先进的管理等诸多因素。这其中,优质的材料是重中之重,基础中之基础。2011年辞世的声学界资深院士魏荣爵教授,曾对编者之一说过以下一段话:“没有好材料就想做出好产品,这是作领导的指导理念有误;有了好材料做不出好产品这是你们搞技术的工作不力。”要使我国从电声大国发展为电声强国,必须要从基础抓起、从材料抓起;否则“再大的侏儒也成不了巨人”。为此,本书以电声器件材料及其物性为中心内容,向一线的技术人员做些基础性的介绍,以期对他们的知识提升尽一点绵薄之力。

这虽是写作的初衷,但由于水平所限,能否做到,还请读者们判定,并给予指正了。

本书的编写,得到了美律实业股份有限公司的廖禄立董事长、魏文杰副董事长,美律电子(深圳)有限公司的林士杰总经理,美特科技(苏州)有限公司的林淑君总经理,海帆国际、弘凌电子有限公司的罗权得董事长、应正铭总经理,新厚泰电

子有限公司的林朝阳总经理、李铠总工,勤增实业有限公司的郎克勤总裁、罗旭辉总经理、陈虎工程师,深圳多美科技有限公司的蒙圣杰总经理,无锡杰夫电声有限公司的蒋正祥总经理,深圳华玮旭电子有限公司的张玮董事长,南京大学的林靖波教授,东南大学物理系的陈鹏同学等的支持与鼓励,在此致以诚挚的谢意!

作 者

目 录

第 1 章 电声器件换能原理	1
1.1 声—电换能器件原理	1
1.2 电—声换能器件原理	6
1.2.1 按换能原理划分的电声器件	7
1.2.2 按辐射、耦合原理划分的电声器件	19
第 2 章 电声器件中的功能材料	22
2.1 驻极体材料	23
2.1.1 电介质极化	23
2.1.2 驻极体材料	24
2.2 磁性材料	41
2.2.1 磁介质磁化	41
2.2.2 钕铁硼材料	46
2.2.3 磁致伸缩材料	47
2.3 铁电材料	49
2.4 压电体材料	51
2.4.1 压电效应	51
2.4.2 压电材料分类	53
2.4.3 压电材料的应用	54
2.5 压电驻极体材料	58
2.5.1 压电驻极体材料与压电材料	59
2.5.2 多孔压电驻极体薄膜的制备	60
2.5.3 压电驻极体传声器的制备	61
2.5.4 讨论与分析	62
2.6 磁液	63
2.6.1 概述	63
2.6.2 磁液技术指标	67
2.6.3 磁液用量的计算和控制	70

2.6.4	磁液技术发展动态	73
2.6.5	含磁液磁路系统中音圈的力学特性	73
2.7	硅材料	86
第3章	电声器件中的结构材料	88
3.1	单纯性结构材料	88
3.1.1	支/承结构材料	88
3.1.2	载体结构材料	89
3.1.3	保护结构材料	90
3.2	功能性结构材料	90
3.2.1	扬声器振膜	90
3.2.2	扬声器纸盆	94
3.2.3	纸盆及其强化材料	101
3.2.4	零部件材质对 ECM 特性的影响	114
3.2.5	定心支片	125
3.2.6	折环	126
3.3	结构材料的功能特性与功能性材料的结构特性	127
3.3.1	振膜制成中的材料特性对成品传声器相关性 能影响的分析	127
3.3.2	驻极体电容传声器的温度特性	131
3.3.3	永磁体的结构特性	136
3.3.4	材料的热特性对成品扬声器性能影响的 热等效模型分析	140
第4章	电声器件中的辅助材料	156
4.1	胶粘剂、粘胶材料	156
4.1.1	胶粘剂	156
4.1.2	电声器件用胶	160
4.2	焊料及助焊剂材料	161
4.2.1	焊料	161
4.2.2	助焊剂	164
4.3	硅橡胶材料	166
4.4	桐油	170
4.5	漆	170
4.6	织物及纤维类材料	171

4.7	敷铜板材料	178
4.8	无纺布	179
第5章	电声器件材料研究及性能标准介绍	184
5.1	结构和物性	184
5.1.1	化学键	184
5.1.2	价键理论	188
5.1.3	结晶性固体的物性	190
5.2	材料(金属)性能和实验方法标准	191
5.3	聚合物材料性能和实验方法标准	196
	参考文献	198

第1章 电声器件换能原理

电声换能器是接收声信号而输出电信号或接收电信号而输出声信号的一种装置,常用的有传声器、扬声器、耳机、送话器和受话器等。按照换能方式,电声换能器可分为电动式、静电式、压电式、电磁式、炭粒式和气流调制式。后两种是不可逆的,炭粒换能器只能把声信号转换为电信号,而气流调制式换能器则只能产生声能;其他类型换能器是可逆的,既可用作声接收器,也可用作声辐射器。

1.1 声—电换能器件原理

声—电换能器是由声学系统里的能量来策动,而将能量转换成电能量输送到电系统中去的元器件。在电系统里显现的波形,相应于声学系统里的波形。

按照换能原理,声—电换能器可分为炭粒式、电磁式、电动式、电容式、驻极体电容式、压电(晶体、薄膜)式、电子式和热线式等。

1. 炭粒式传声器

炭粒式传声器(图1-1)是靠炭粒间的接触电阻因受声压作用而变化,而起换能作用的。

图1-1(a)是一个典型的炭粒式传声器,炭粒钮是一个装满炭粒的圆柱形空腔。膜片因受声压作用而产生位移,引起炭粒间压力变化,从而改变炭粒间的电阻,在位移不大时,电阻变化和位移成正比,线路中产生的电流为

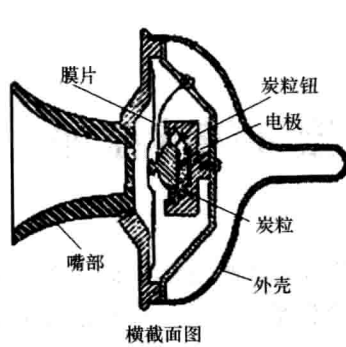
$$i = \frac{e}{r_{E0} + hx \sin \omega t}$$

式中: e 为电池组的电压; x 为膜片的振幅; r_{E0} 为当 $x=0$ 时,线路的总电阻; h 为元件常数(Ω/m , Ω/cm); ω 为圆频率, $\omega=2\pi f$ 。

图1-1(b)~(d)所示炭粒式传声器,与图1-1(a)类似,在声压作用下,膜片位移,引起炭粒间压力变化,从而改变炭粒间的电阻,使线路中的电流发生变化,达到声电转换的目的。

2. 电磁式传声器

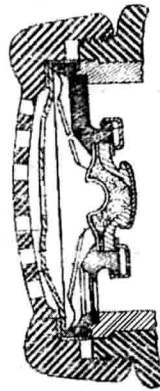
电磁式传声器(图1-2)由一个受声波作用的膜片,连接在一个电枢上,这个电枢处于磁场中,当膜片受声波作用使电枢有位移变化时,磁路中磁阻、磁通发生变化,使得围绕在电枢外的线圈里产生电动势,这个电动势是与声波作用相对应的。



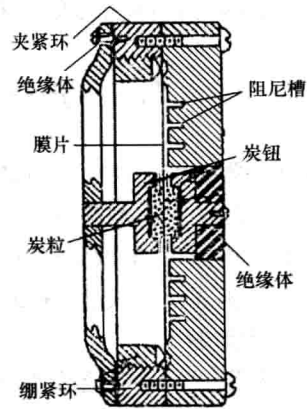
(a) 单钮炭粒式传声器



(b) 改进的单钮式炭粒传声器



(c) 新型单钮炭粒式传声器



(d) 双钮紧膜炭粒式传声器

图 1-1 炭粒式传声器

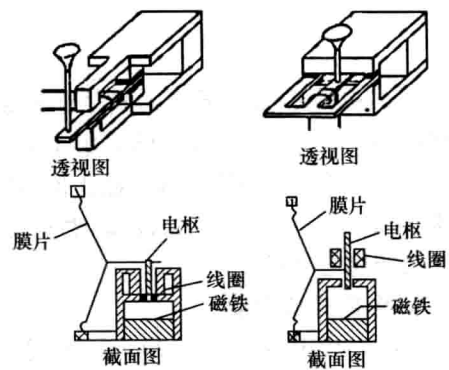
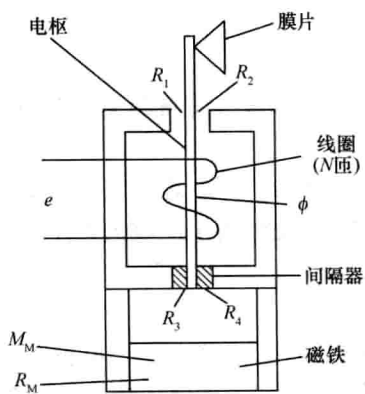


图 1-2 电磁式传声器

下面介绍一个专利(中国专利号:200910232133.0):这是一个动磁平面线圈式微型传声器的专利。一般的动圈式传声器中,若永磁体的磁感应强度为 B ;动圈在垂直于磁场方向上的长度为 l ,则当线圈在垂直于磁场方向上的运动速度为 v 时,由于声压作用而在线圈上产生的“动生”电动势为

$$E_{\text{动}} = Blv$$

但在该发明专利中,若线圈的面积为 S ,带有钕铁硼微粉(永磁体)的振膜在声压作用下运动,使其磁感应强度 B 随时间而变化,变化率为 $\Delta B/\Delta t$,这时在线圈中产生的电动势是“感生”电动势,其大小为

$$E_{\text{感}} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S$$

“动生”电动势和“感生”电动势在物理原理上是两个不同的概念。

在该发明专利中,线圈是采用蜗旋式密排绕成的平面线圈,其高度低,占用空间小。也可用跑道式密排绕制成矩形平面线圈。实物原理如图 1-3 所示。

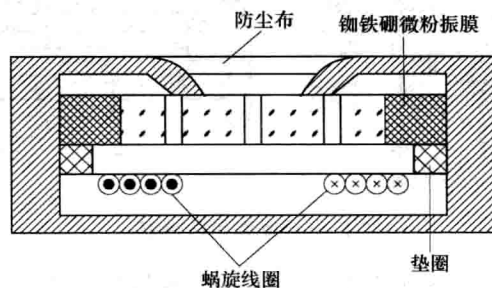


图 1-3 动磁平面线圈式微型传声器

3. 电动式传声器

电动式传声器在有些书上也称为动导体式传声器,它是由于导体在磁场中运动切割磁力线而产生“动生”电动势,从而产生电压输出的一种传声器。若一个受声波作用的膜片与一个线圈相连,则该线圈处于一个磁场中,受声波作用的膜片运动时,带动线圈在磁场中运动,切割磁力线而产生“动生”电动势,输出电压,因此,电动式传声器有时也称为动圈式传声器。若不是线圈而是一个直导体,则称为感应式传声器。若这个直导体是一条悬挂在磁场中的金属带,一面在空间里,另一面接在声阻上,则就成了带式传声器。

电动式传声器是由于导体在磁场中运动切割磁力线而产生“动生”电动势,因而产生电压输出的一种传声器。由于导体在磁场中的运动是一个相对运动,这样,就会有几种形式,以动圈式传声器为例,它是磁场不动,线圈相对于磁场运动;若线圈不动,让磁体运动,也能有磁场和线圈间的相对运动,产生电动势,而完成声—电转换的过程。

注意,电磁式传声器和电动式传声器是两类换能装置,不可混淆,电磁式传声

器输出的是“感生”电动势,而电动式传声器输出的“动生”电动势。

4. 电容式传声器

电容式传声器(图 1-4)由一个金属环上贴敷被金属化了的聚合物膜(或者直接用超薄金属膜),通过一个绝缘的薄垫圈与一个金属板(称为背极)相对而立,形成一个“电容”,在这个“电容”的上、下极板上施以一定的直流电压(偏压),若这个“电容”的电容量为 C ,施加的电压为 U ,则“电容”极板上的电量 $Q = CU$,而电容量符合 $C = \epsilon S/d$ 的规律,其中 S 为“电容”两极板相对面积, ϵ 为气隙的介电常数, d 为“电容”两极板间的距离。当外来的声振动使振膜振动时,使 d 有规律地变化,因而 C 也有规律地变化:当 d 变大时, C 变小;反之亦然。 C 的变化会产生一个相应的电压变化(因为外来偏压不变, Q 不变),这个电压就是由外来声信号振动引起的“诱生”的电动势。拾取这个“诱生”电动势,就完成了声—电转换过程。

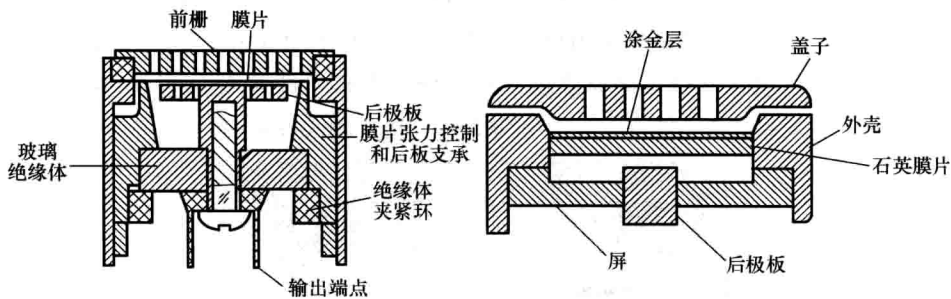


图 1-4 电容式传声器

一般的电容式传声器都必须有一个提供直流偏压的装置,因此电容式传声器体积都较大,而驻极体电容式传声器由于是自给偏压,无需外加直流偏压,因而省去了常规电容式传声器工作时所必需的外加电源系统,这样大大节省了生产成本,简化了设备。最初的驻极体电容式传声器用的是无机材质——巴西棕榈蜡、硫磺等材料,由于这类蜡驻极体电容式传声器的体积大,电荷储存量低,且寿命短,使其应用受到很大的限制。驻极体电容式传声器应用最重要的转折点是 1962 年由 Sessler 和 West 在美国 Bell 实验室首先研制出第一个以柔性聚合物 FEP(聚全氟乙丙烯)薄膜为储电层的驻极体电容式传声器,使得这类传声器表现出巨大的商业价值和竞争优势,并于 1968 年由日本 Sony 公司首先投放市场。常用的驻极体电容式传声器原理如图 1-5 所示,其实物结构如图 1-6 所示。

驻极体电容式传声器的发展很快,到 1972 年,这类传声器的日本年产量达 1 千万只。现在驻极体传声器的世界年产量已突破 10 亿只,目前至少 90% 的传声器是由驻极体材料制成的。

20 世纪 80 年代初,由 Sessler 首先倡导开始了现代无机驻极体材料的研究。以非晶态 SiO_2 、 Si_3N_4 为代表的无机驻极体薄膜由于其突出的电荷储存寿命,制作工艺与平面工艺及微机械加工技术兼容,可制成微型化、集成化的敏感元器件而已成为驻极体领域的研究热点。

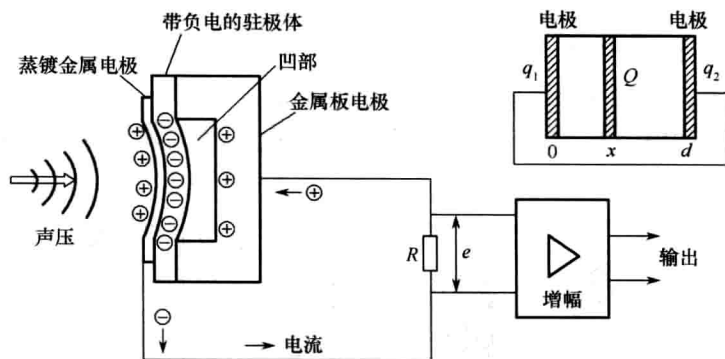


图 1-5 驻极体电容式传声器原理

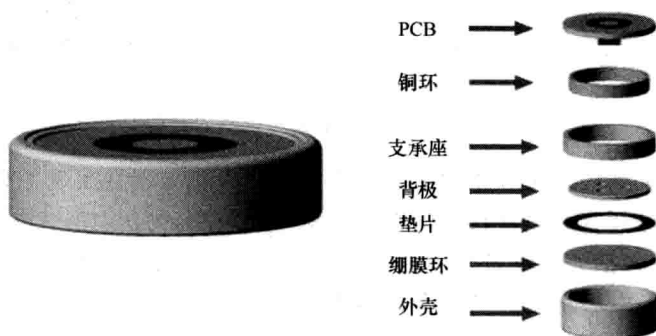


图 1-6 驻极体电容式传声器实物结构

有机非线性光学研究始于 20 世纪 60 年代中期,近年来发展迅速。尤其是 20 世纪 90 年代初,驻极体界掀起了以驻极体方法从材料制备到极化工艺,以及偶极与空间电荷相互作用的电荷动力学规律等方面研究有机非线性光学材料的热潮。如 1991 年第 8 届国际驻极体(ISE 8)的巴黎会议上,7 篇邀请报告中有关非线性光学驻极体报告就占了 3 篇,从而推动了在这一领域中理论研究和成果应用的发展。

此外,作为驻极体基本组成部分的生物驻极体及复合材料驻极体近年来也取得了瞩目的进展。驻极体的其他重要应用还包括驻极体辐射计量仪、驻极体空气过滤器、驻极体人工器官及其他一些功能元器件。

5. 压电式传声器

压电式传声器利用其具有压电特性的晶体,在外力(声压)作用下变形而产生电动势(内电压)。若 e 为内电压, x 为由于外力引起的晶体变形的有效振幅, K 为晶体的压电常数,则

$$e = Kx$$

压电式传声器有两种:一种是直接策动,即声压直接作用在晶体上。另一种是膜片策动,即声压直接作用在与晶体相连而耦合的膜片上,这种压电式传声器又有

两种:一种是用罗谢耳盐单晶制成的;另一种是用钛酸钡多晶陶瓷制成的。压电式传声器作为水听器用得非常普遍。由于高分子科学突飞猛进的发展,现在薄膜高分子压电材料已经在取代常规压电材料方面显露头角了。

图 1-7 是传统的压电式传声器的结构。实际上,现在使用薄膜高分子压电材料已不多,这里不专门介绍了。

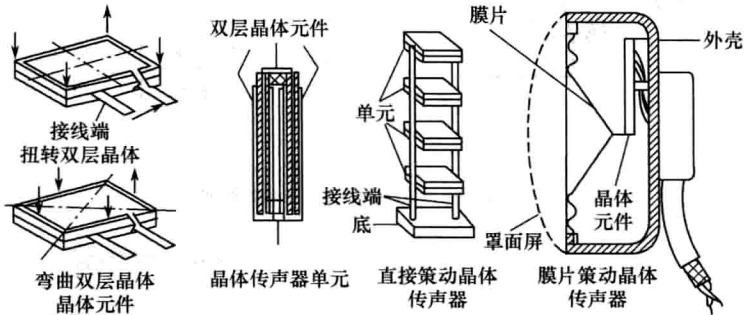


图 1-7 传统的压电式传声器的结构

含封闭孔洞结构的聚合物薄膜经过适当的电极化处理后表现了突出的压电活性。由于它同时具有压电材料和驻极体的特点,被命名为压电驻极体,制成的压电驻极体传声器,包括一片制备好的多孔压电驻极体薄膜,膜两面蒸镀了铝,作为电极。薄膜通过导电胶均匀贴敷在金属板表面,金属板背面通过铜环与结型场效应管(JFET)的栅极连接;薄膜的另一面与外壳接触来接地。

压电驻极体薄膜接收到外界的声音信号,通过压电效应将声信号转换为电信号。电信号由铜环传入 JFET,再经过阻抗变换输出信号。制成的压电驻极体传声器如图 1-8 所示。

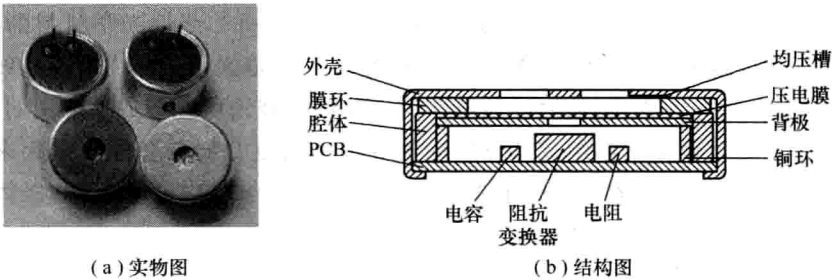


图 1-8 压电驻极体传声器

1.2 电一声换能器件原理

电一声换能器是由电学系统里的能量来策动,将能量转换成声能输送到声系统中去的元器件。按换能原理来划分,有动圈式、静电式、压电式、舌簧式(电磁

式)、放电式等类型;按辐射、耦合特性来划分,有直接耦合至空气、通过喇叭(号筒)耦合至空气、耦合至耳窝、海尔扬声器等类型。

1.2.1 按换能原理划分的电声器件

按换能原理来划分,扬声器分为以下几种。

1. 动圈式扬声器

动圈式扬声器如图 1-9 所示。

扬声器是典型的电—声换能器,它可将声能辐射到室内或室外。目前常用的两种扬声器是直接辐射式扬声器和喇叭式扬声器;直接辐射式扬声器的膜片直接与空气耦合,这就是图 1-9 所示的动圈式扬声器;喇叭式扬声器的膜片则是通过喇叭来与空气耦合。

由于直接辐射式扬声器结构简单,占用空间小和响应特性均匀而被广泛应用。任何简单的直接辐射式扬声器在中频时都可以得到均匀的响应。

2. 静电式扬声器

静电式扬声器从原理上可以看做是电容式传声器的逆变换,即把电容器的一个电极作振动组件,从外界输入电信号,使之完成电—声换能过程而向外辐射声能。

图 1-10 是静电式扬声器的原理。

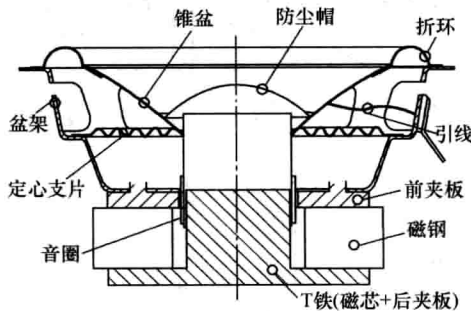


图 1-9 动圈式扬声器

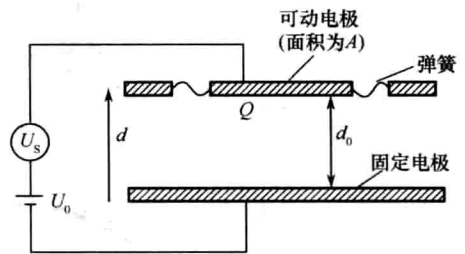


图 1-10 静电式扬声器原理

由图 1-10 可知,作用在可动电极上的力应为

$$F_e = \frac{\partial}{\partial d}(Q) = \frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{1}{2}CU^2\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}\frac{\epsilon A}{d}U^2\right) = -\frac{\epsilon A}{2d^2}U^2$$

式中

$$U = U_0 + U_s(t), \quad |U_0| \gg |U_s(t)|$$

因此

$$F_e = -\frac{\epsilon A}{2d^2}(U_0 + U_s)^2$$

当可动电极在 $d = d_0$ 处时,作用力为

$$F_e = -\frac{\varepsilon A}{2d_0^2}(U_0 + U_s)^2 = -\frac{\varepsilon A}{2d_0^2}(U_0^2 + U_s^2 + 2U_0U_s)$$

因为 $|U_0| \gg |U_s|$, 所以

$$F_e = -\frac{\varepsilon AU_0^2}{2d_0^2} - \frac{\varepsilon AU_0}{d_0^2}U_s$$

上式中第一项是偏置电压作用的静态力,第二项是与 U_s 有关的随时间变化的力,是实际起作用的力。由此可知: F_e 的方向是指向 d 减少方向的; F_e 并不与所加电压成正比。

图 1-11 是单端静电式扬声器的基本结构,图 1-12 是其实物。

3. 驻极体扬声器(受话器)

在图 1-10 中有外加偏压 U_0 ,若使用驻极体,由于驻极体能自给偏压,则外加偏压 U_0 就不需要了。若做成推挽式结构,则中间为振膜,两边为电极,电极板上开有小孔,以使声音不受阻碍。这种结构有以下两种形式:

(1) 中间的振膜为一般振膜,两边分别为不同极性的驻极体(两边也可用同极性驻极体,不过就需要增加一个反相器才能使振膜振动加强),如图 1-13 所示。驻极体表面电位都为 U_0 (即 $\pm U_0$),信号电压为 e_0 。

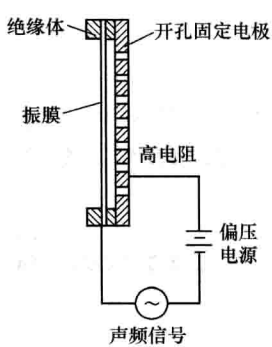


图 1-11 单端静电式扬声器基本结构

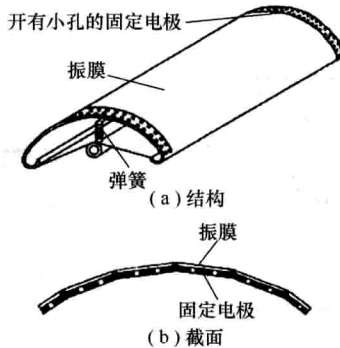


图 1-12 单端静电式扬声器实物

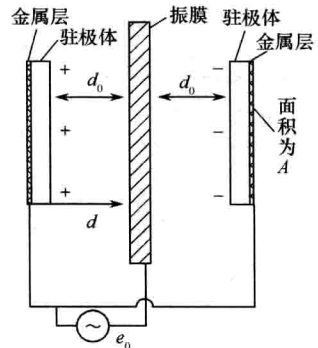


图 1-13 推挽驻极体静电式扬声器原理

合力为

$$F_1 + F_r = \frac{-\varepsilon A}{2d_0^2}U_0^2 + \frac{\varepsilon AU_0e_0}{d_0^2} + \frac{\varepsilon A}{2d_0^2}U_0^2 + \frac{\varepsilon AU_0e_0}{d_0^2} = \frac{2\varepsilon AU_0e_0}{d_0^2}$$

(2) 若振膜由驻极体兼任,两边电极是一般的金属电极,则有图 1-14 所示原理图。

图 1-14 中:

ε_0 、 ε_1 :空气及驻极体的介电常数, $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1^*$ 。

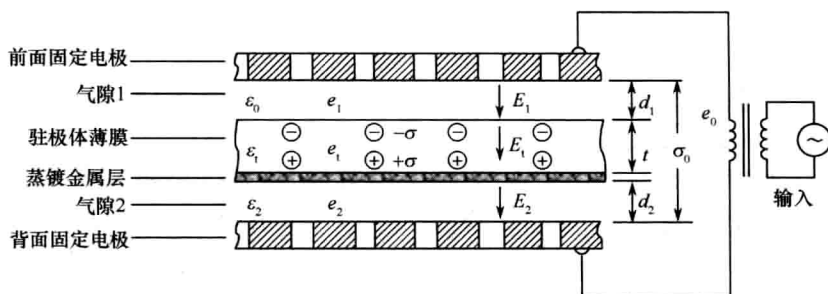


图 1-14 振膜驻极体静电式扬声器原理

σ : 驻极体的电荷面密度。

E_1, E_2 : 气隙 1、驻极体、气隙 2 中的电场强度。

e_0 : 加在固定电极之间的信号电压。

e_1, e_2 : 气隙 1、驻极体、气隙 2 中的信号电压。

d_1, d_2 : 气隙 1、气隙 2 的距离。

t : 驻极体薄膜的厚度。

由图 1-14 可见, 由于驻极体有永久性的表面电荷, 其在空气隙一侧(蒸镀金属层的另一面)将形成一个直流永久电场。在这里, 又由于两固定电极上加有交流信号, 使这个空气隙中的电场发生强弱变化, 因而振动膜随信号振动而发出声音。

另外, 对蒸镀金属涂层的一侧来说, 由于有金属涂层, 驻极体的表面电荷不产生直流电场(因金属涂层的屏蔽效果), 但交流信号电场本身依然能加入。这部分电场产生使振动膜工作的 2 次高谐波成分作用力。此作用力将抵消空气层中发生的 2 次高谐波成分作用力。

这种在理论上无失真的驻极体振动膜方式, 具有新型的消去失真的结构特征。另外, 振动膜很轻巧, 具有很高的效率, 下面先作定性的考虑: 若把驻极体产生的直流电压称为 U_0 , 而加在两个空气隙中的交流信号电压称为 e_0 , 则使驻极体振动膜工作的力可以表示为

$$F \propto (U_0 + e_0)^2 - e_0^2 = U_0^2 + 2U_0e_0$$

交流成分的 2 次项被消除了。可见, 这种结构中高次谐波是不存在的。对于图 1-14 所示的结构, 可以画出其力—声—电类比图, 如图 1-15 所示。

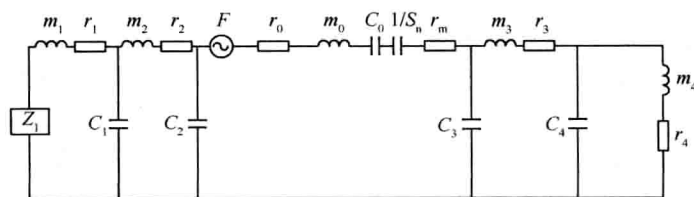


图 1-15 受话器(扬声器)等效电路