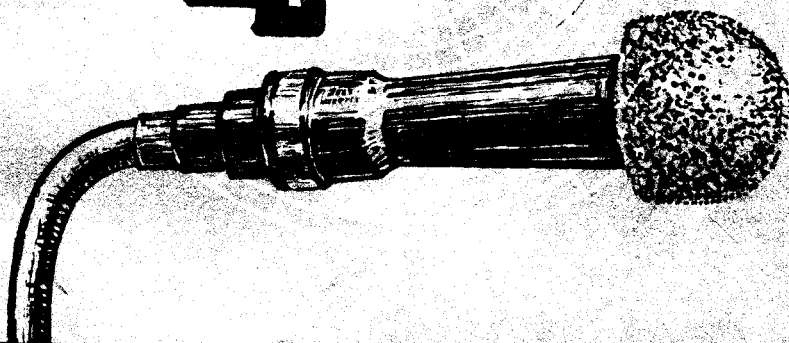
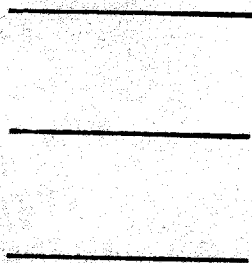
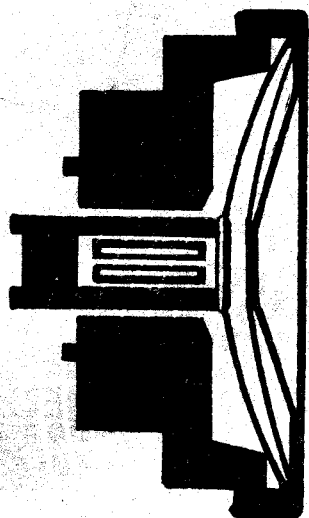




电声学

传声器、耳机和扬声器

内 容 简 介

本书根据电声学的基本原理,阐述传声器、耳机和扬声器的构造、性能及用途。全书共分六章。第一章介绍换能器设计原理和技术。第二、三、四章分别阐述耳机、传声器和扬声器的构造和性能。第五章介绍测量技术。第六章是有关的各种附录。书中叙述具体详尽,可供我国设计制造电声器件参考,也可供有关科研人员参考。

为介绍近年来的新发展,中译本中根据最新资料编写了“国外电声器件发展近况”,附在正文之后,作为补充材料。

本书翻译分工如下:第一章由南京大学包紫薇等译,第二章由红声器材厂译,第三章由南京电声器材厂与红声器材厂合译,第四章由北京第一无线电器材厂译,第五章由广州有线电厂与广州电子仪器厂合译,第六章由上海电讯器材厂译、南京大学魏荣爵校。全书由王忠毅统一校订。

M. L. Gayford

ELECTROACOUSTICS

Microphones, Earphones and Loudspeakers

Butterworth, 1970

电 声 学

传声器、耳机和扬声器

[英] M. L. 盖福德 著

包紫薇 等 译

王忠毅 校

责任编辑 陈咸亨

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1981年12月第一版 开本:787×1092 1/32

1981年12月第一次印刷 印张:12 1/8

印数:0001—6,800 字数:275,000

统一书号:15031·372

本社书号:2263·15-7

定价: 1.90 元

原 序 节 译

语言是人类直接沟通思想的主要方式,无疑也是最方便的方式。电子学系统和电话系统全球规模的发展,对人类文化有不可估量的利益。电子学和无线电的传输系统,近年来在效率和复杂性两方面都已飞速发展。先进的新概念,使通道数量日益增加,其方法包括诸如在语言、听觉和人类其他感官(如视觉)中消去存在的多余信息或非必要信息的仪器设备。

声学换能器,如传声器和耳机等,是人和传输系统的分界面。如今这些换能器必须满足的性能要求,要比过去较简单系统的更加严格得多。此外,现在普遍认为生物工程学*和美学上的考虑也比以往更重要了,系统两端的仪器在这方面也应当要求一致。

传声器、耳机和扬声器,除用于语言通信外,在许多领域内也有广泛应用,例如用在扩音、广播、录音、家庭文娱、语言实验室、发音矫正、助听、医学和心理学研究等方面。另一个广阔应用领域,是进行各种声学测量和声学分析。此外,在工业生产自动控制、监听和警报系统中,也广泛应用声学技术。

声学换能器在每一特殊用途中都带来了它本身的问题和特殊的要求。设计这些器件,需要把科学技术与工艺技能结合起来,本书试图对这些要求作一些评价。本书还介绍了有关机理,对于使用这些器件的人也会有好处的。

按照常规,需要对本书篇幅加以限制。因此,现代的广阔

* ergonomy, 即 biotechnology, 是生物学和工程技术资料应用于人和机器的相互调节问题的科学。——译者注

超声学领域和特超声学新分支在本书中大都删去了，但在适当地方列出了一些其他著作供参考。

.....

关于单位制问题在此作一些说明，采用米·千克·秒制确实进展很慢，英国工程技术人员仍主要沿用英尺、英寸、英里等等。在声学中，目前大家仍然沿用厘米·克·秒制的声压和声级。然而，一些压电材料的物理常数则采用米·千克·秒制。鉴于这种情况（估计还会持续一段时期），作者也打算随大流，采用习惯作法。例如扬声器箱子木材的密度以磅每立方英尺表示，声压以达因每平方厘米表示，压电材料的某些物理常数则用米·千克·秒制等，因为这是制造厂实用的，并与所涉及的计算一致。

为了便于单位换算，本书附录中提供了英制和米制，厘米·克·秒制和米·千克·秒制等之间的完备的易于使用的换算表。

本书是标准电话电缆公司的专题丛书之一，该丛书主要是提供有关现代电子学全貌的教学材料和一般资料。书中提到的材料和设计的特殊用途和应用，应按有关制造厂的说明书加以核对。

M. L. 盖福德

目 录

引言	v
第一章 换能器设计原理和技术	1
1.1 基本换能器原理	1
1.2 有源换能器原理	5
1.3 无源换能器原理	9
1.4 用于传声器和其他换能器设计的类比线路	11
1.5 关于换能器中磁性设计的考虑	15
1.6 用于小型动铁换能器的磁系统	24
1.7 电动器件磁系统的设计	26
1.8 动圈恒磁系统的磁性测量	37
1.9 压电换能器的设计	39
1.10 低噪声阻抗变换用输入放大器	55
1.11 全向性传声器和指向性传声器的基本特性	57
1.12 关于传声器和耳机灵敏度额定值和阻抗的考虑	66
1.13 换能器设计的机械方面	69
1.14 传声器对机械振动和风噪声的敏感性	74
第二章 通信用送话器与耳机	81
2.1 引言	81
2.2 碳粒送话器	83
2.3 半导体(压敏晶体管)送话器	96
2.4 非自放大式换能器概述	97
2.5 特殊的动铁换能器和接触式换能器	100
2.6 电话用受话器及其他用途的耳机	108
2.7 抗噪声送话器	145
2.8 耳机的立体声重放	151
第三章 高质量传声器和通用型传声器	154
3.1 高质量传声器与广播要求	154
3.2 播音用和通用传声器	156

3.3	高质量播音室用传声器	161
3.4	播音室用电容传声器	181
3.5	播音员用抗噪声传声器	198
3.6	“波”式强指向性传声器	200
3.7	无线电传声器	204
第四章	扬声器	218
4.1	影响扬声器性能的基本因素, 以及扬声器在室内的使用	218
4.2	动圈扬声器的驱动装置	224
4.3	理想的动圈驱动装置的基本理论	232
4.4	动圈扬声器的结构	236
4.5	静电扬声器	241
4.6	离子扬声器	245
4.7	扬声器箱	246
4.8	扬声器箱的结构	253
4.9	电分频网络的设计	259
4.10	指向性声柱形(线声源)扬声器	262
4.11	扬声器的维护与使用	264
第五章	扬声器和换能器的声学测量	268
5.1	主观测量	268
5.2	语言分析	273
5.3	客观测量	280
5.4	压强测试用标准传声器	284
5.5	仿真嘴和仿真耳	289
第六章	附录	298
6.1	通信中特别涉及到声换能器性能方面的重大发展	298
6.2	换算表	321
补充材料		
	国外电声器件发展近况	王忠毅、赵克勤 331
	索引	369

第一章 换能器设计原理和技术

1.1 基本换能器原理

传声器和接收装置是包括声系统、机械系统和电系统的能量转换器件。其所用的换能机理,通常是许多可能的机-电转换原理的一种,它可以是可逆过程,也可以是不可逆过程。在大多数情况下,为了改善空气和换能机构之间的耦合,需将机械系统伸展成为振膜或号筒的形式。在另外一些情况是,换能器可以设计成轻巧适度和分布的形式,这就构成了振膜和换能器的复合系统。如带式 and 电容式传声器就是这种例子。

这些系统的大多数往往都是效率很低的能量转换器,通常需要加上相当大的电放大。此外,在空气和任何一般机械结构之间总不可能得到很好的匹配,因为它们的密度相差得很远。

因为绝大部分电-声转换或电-机转换所能利用的物理能量转换过程不很有效,这就使声波中原有的很微小能量遭到进一步损失。一直到五十年代有了电子放大器之前,实际上能用的换能器原理的数目受到了严重的限制。

各种可能用的换能机构列在表 1.1 和表 1.2 中。

换能器基本上可以区分为“无源”器件和“有源”器件,前者靠机械运动产生电功率或声功率,后者依靠调制从外源提供的单向电流或空气流。

目前,在所有可能的换能机理中,用到传声器和受话器上

表 1.1 换 能

换能原理	工 作 方 法	灵敏度(效率)	有效频率范围
电阻性的	(i) 碳粒被压缩	高输出0.1—5伏	50 赫— 5 千赫
(a)接触电阻变化(A)	(ii) 受压之下的碳片堆	高输出	0—50 赫
(b)应变计(A)	(i) 碳条或石墨涂料(绷紧的). (ii) 粘合或不粘合的硅或金属丝(绷紧的).	低输出	0—3 千赫
电容性的	(i) 压力驱动振膜相对于背极而运动.	低输出	0—1 兆赫
电容传声器(A)	(ii) 通过后部相移孔的压力梯度驱动振膜		
被调制的空气流(A)	在空气压力流线上以电磁式工作的瓣膜	高输出辐射器	将近 50 赫—3 千赫
可变磁阻的	(i) 单向纵调制空气隙的磁阻.	作为传声器, 是低输出; 作为受话器, 是中等输出	50赫—10千赫
(a)可动的衔铁用固定的恒磁体极化(P)	(ii) 磁差动平行作用系统. (iii)磁差动摇摆衔铁系统. (iv)双向对称的平衡衔铁系统.		
(b)运动的恒磁体,靠近软磁的线圈轭铁(P)	(i) 具有平行作用的磁差动结构 (ii) 具有纵向平衡作用的磁差动结构.	低输出	50赫—10千赫

A: 有源的; P: 无源的.

的只是很少数。其他很多原理,由于效率低,现有的结构材料不适宜或机械的易碎性以及其它种种原因,都不能用在商品上。目前所采用的主要原理都列在表中。哪些原理是可逆

器 原 理

应 用	典型的源输入 阻抗	结 构	配套的放大器或仪器类型
电话或通信的压强式或梯度式送话器	低阻抗 (100—300)欧	见正文	具有阻性或变压器耦合输入的、简单的真空管或晶体管放大器
甚低频传声器和压强测量传声器			
由于耦合困难，一般不用作传声器；用于压力或位移换能器	低阻抗 (0.1—10欧)		
压力测量标准传声器或播音室用传声器；超声传声器和水听器；指向性的播音室用传声器	小容量的 源阻抗 (5微微法—100微微法)		低噪声、高输入阻抗的电子管或场效应晶体管放大器，具有高阻的门电路辅以发射极输出电路或自举电路
高功率扬声器 (海船上用的呼喊器)	与动圈扬声器一样	振荡的球顶形滑动瓣膜	功率放大器加上压缩空气流
电话或通信用送话器或受话器	低或中阻抗 (50—2000欧)	见正文	灵敏的电子管或晶体管放大器

的,表中也已指明.

对某些较少用的原理不作详细评述. 下面各节概述近代通用的各种换能器的基本原理.

表 1.2 换能器原理

换能原理	工 作 方 法	灵敏度(效率)	有效频率范围	应 用
(i) 压电结型送话器(A) (ii) 三极热离子电子管中的可动栅极(A)	(i) 半径 12 微米的探针在 pn 结上直接施加压力; (ii) 易弯曲的玻璃/金属栅极, 要求密封.	中—高输出, 用在实验通信送话器上	理 论 上 可 能的响应为 0—10 千赫	现仅在电话或通信送话器上试用.
压电换能器(P)	(i) 末端负载或静压作用直接作用于纵向膨胀体晶体或陶瓷棒上; (ii) 振膜耦合到扭转或挠曲方式的双型元件或单晶、或陶瓷片层, 或多层元件上; (iii) 在挖空的双型元件“声电池”上施以静压作用.	声阻抗和电阻抗高的传声器和受话器, 低—中等的输出	0—2 兆赫	电话、通信和高质量送话器, 受话器, 水听器和水声探测器, 校正用压强测量传声器.
电动式换能器(p)	(i) 铜丝或铝丝、铜带或铝带的多匝音圈, 装在具有柔顺的外缘的锥形或球顶形膜片上, (动圈器件); (ii) 可动金属带的电动传声器或受话器.	低输出传声器中输出受话器 高质量传声器	1—50 千赫	电话、通信和高质量传声器和受话器.
磁致伸缩换能器(p)	线圈绕组紧密耦合到适度软的或陶瓷的磁性材料棒或片层上.	低输出的发声器或传声器.	1—100 千赫	水下声源或传声器.
离子扬声器(p)	加在电离空气上的高频调制静电场.	低输出辐射器, 需要号筒.	1—50 千赫	高音喇叭.

关于典型的源输入阻抗、外形以及配套的放大器或仪器, 见正文和参考资料.

A: 有源的; P: 无源的,

1.2 有源换能器原理

1.2.1. 变阻换能器

现代采用的所有的变阻换能器中，大家最熟悉的要算碳粒送话器了。碎粒状的碳粒置于能施加压力的两壁间，当碳粒受到一个可变压力时，碳粒产生一个比较大的电阻变化，这一特性大家都了解。它的表面接触现象的性质以及避免电弧和其他不利效果所需的预防措施，已在很多权威著作中详细讨论过。它们大都与把碳应用在送话器、可变电阻调节器和其他器件上有关。许多工艺学都牵涉到现代碳粒送话器中如何成功地应用碳粒的问题。自从电话设备第一次应用以来的七十多年过程中，碳的成分和加工以及送话器设计的细节一直在不断进展着。

碳粒送话器的主要优点是价廉而结构简单，并且是以较小的声压力变化产生较大的电阻变化，从而得到较高的电输出。这就在极化直流上产生了良好程度的调制。主要的局限性是电噪声与非线性失真，以及由于接触表面的电和机械的损耗而使寿命缩短等。在防止由于碳粒散开或堆集结塞而引起的性能上大幅度变化方面，也碰到过困难。有关的理论、设计细节，以及将局限性减到最低限度的方法等，将在碳粒送话器一节中叙述。换能过程是不可逆的，也就是说，当交变电流通过碳粒时不能产生有用的机械压力变化。

应变计原理所依据的事实是，细小的金属丝或半导体丝的机械应变，能够产生有用的电阻变化，它也能调制一个直流电流。可以做到使送话器振膜的运动通过一个适当的连接件拉紧一根细丝，但其输出很低，并且难以做成牢固的机械系统。硅或其他半导体的小棒比金属有效得多，在那些能够利用较

大的机械输入的拾音器或其他换能器中，已用来代替金属细丝。但对大多数实际应用来说，应变计式的送话器的输出仍嫌太低了。这个原理或可用来作测量高声压级的传声器，但可能要考虑到机械滞后效应和非线性效应。这个原理是不可逆的，用它做成的是有源换能器。

1.2.2 变容换能器

电容传声器从四十五年前 E. C. 温特首次制成起，就以能作稳定的校准器件，从而开辟了整个精确的声学测量领域而闻名。它的基本构造是，一片导电薄膜紧绷在绝缘体上，放在金属背极前面，薄膜与金属极板构成电容器的两个极板，其电容量约为 50 微微法左右。如果电容器带电，那么声压引起薄膜的任何运动都将引起电容量的变化，也就改变了两极板之间的电势。目前这一原理主要应用于精密测试传声器和播音室用的高音质传声器，这是由于问题牵涉到要求传声器放大器具备高输入阻抗的缘故。现代半导体和集成电路的发展也许会给电容传声器原理带来广泛应用的可能性。电容传声器一般要 50 至 200 伏的极化电压，但现在已能在用绝缘体隔开的薄膜和背极上面形成驻极体型的介电电荷，以省去外加供电。电容传声器的理论和实用将在电容传声器一节中详述。这一原理是可逆的，但都用于有源系统之中。

1.2.3 压电结型换能器

这是一种比较新的原理，它是以硅或锗半导体基体中的 pn 结的一种特殊性能为依据的。几年前发现，如果在半导体结的紧邻区域内加上范围极小的局部压力，那么通过结的电流就会增加。如果压力是通过一个直径很小的探针针尖准确地施加在结上，这个效应就非常大。要注意将这个效应与硅“应

变计”效应或硅棒上由张力或静压所产生的体阻变化效应区分开来。后一效应也可以用纯探针在表面任何部位上产生出来。真正的压电结效应比应变计效应要大好几个数量级，为了要制造出输出较高的器件，它已被用到实验性送话器上、拾音器上和其他的换能器上。但这些设计远没有广泛得到应用，因为机械上与结构上有困难。这些困难主要在于，如果要接近最高效率，就必须将一个直径比 1 密耳*还细的针尖准确地放在结线上，并且须用极为接近于半导体材料内断裂应力的外力对它施加预压。

这些效应的理论还是不完整的，但除了叙述根据压电结效应而设计晶体管送话器之外，我们还将概述一下效应的理论问题。这些换能器可被认为是自放大类型的有源调制换能器，其放大类型与碳粒送话器有一定的相似之处。它们是不可逆的，因为电流通过半导体结是不能在材料中产生机械应力的。

压电结型换能器的理论^[4-13]

这个效应一直被称为各向异性应力效应(ASE)**，又因为它涉及直接在结型半导体上施以机械作用，因此可能成为目前所发明的最引人入胜的新型送话器结构之一。压电结效应本身可能产生非常高的换能效率。

应变计效应用于送话器的可能性是不大的，但它可用于拾音器、工业和仪器等的换能器上，在这些场合中，机械力都大得多，故本底噪声电平不成为问题。

对压电结 ASE 效应本身，已作了许多科学研究，同时关于

* 1 密耳=0.001 英寸。——译者注

** ASE 为各向异性应力效应(anisotropic stress effect)的英文缩写词。——译者注

将各种粗细的机械探针加到现今所有的结型晶体管许多不同种类上所产生的结果,也发表了很多报告.硅平面器件对这种实验是很方便的,因为它的发射-基极在表面上象个台阶,容易看得出来,探针就可以安装在上面. 只有以适当的压力且十分准确地施加在结上才能得到最高的灵敏度. 要实际使用目前的晶体管类型,尚有各种困难;灵敏度高、机-声组合牢固、价廉而又易于制造的新类型正在探索之中. 有一种所谓的梁式引线晶体管,尺寸很小,其沉淀金属的连接梁也很小,并且很准确地置于表面上,这有利于应用探针^[13].

最根本的一项要求看来是应当发展在非常低的预压情况下能得到高灵敏度的材料. 有效应力的应用面积也需要大大地扩大. 这样一种器件的优点是也许有可能制成一种集成微电子系统中的一个部件,这种集成系统包括线路和器件,在送话器线路中还起到其他的辅助功能的作用,如再放大、限幅、数字编码、线路涌流的防护,以及对未来的电话机或传声器器件可能要求的其他功能.

尽管已经作了许多研究,尽管也提出了种种解释,这个效应的物理机理至今还不清楚.

目前妨碍利用有效的压电结型送话器的主要实际困难,仍在于如何将外力高度准确地集中在结上. 最典型的是须将一根直径为 0.5 密耳(12.5 微米)的蓝宝石探针尖安装在一条宽度小于 2 微米的线上. 当任何负载超过 30 克时,易出现永久性的损坏,其表现为灵敏度显著下降并伴以噪声骤升. 这样数量级的负载在机械冲击和震声过程中很可能会发生,因此希望在振膜与探针棒之间能有某种形式的顺性的去耦连接器. 在实验室条件下,利用微调定位器等是能够容易做到所要求的位置准确性和探针的预压. 但在实用送话器生产中要保持所要求的精确度,就引出了一些严重的设计问题.

一个有趣的因素是，这个效应在应力频率高到 1.5 兆赫时，也曾成功地演示出来，这暗示了也许适用于超声器件。温度、老化和机械滞后对各类器件的影响仍在测定之中。

最近有人谈到一种集成硅针换能器，其中的 pn 结生长在一个 1 密耳的针尖中，针尖上直接加上负荷，以形成一个灵敏的压力元件而不存在任何难以办到的调节问题^[48]。

1.3 无源换能器原理

1.3.1 电动换能器

顾名思义，它所依据原理的是载流导体的磁感应和磁的相互作用的基本定律。一个在磁场中运动、切割磁力线的导体，会感应出电动势；同时一个载流导线处于磁场中也会受到一个垂直于导线和磁场这两者的力。这个原理显然是可逆的，它构成一切动导线传声器和受话器设计以及普遍采用的动圈扬声器设计所依据的基础。它的好处是基本上不存在非线性，因而适合于设计成各种尺寸的各式各样的器件。后面还要讲到动圈和带式传声器。

1.3.2 磁阻可变（动铁）换能器

这种系统恰好与上述系统相反，它的线圈固定而线圈所包围的磁通量则是变化的，变化的原因是磁路部分的运动，从而改变着一个或几个空气隙的磁阻。主要目标是要得到最大的灵敏度和最小的非线性。除了单磁性回路是基本的之外，还有平衡衔铁和半平衡衔铁的系统。基本设计原理包括最佳磁极化，交流磁通路和单向磁通路的分路，以及在每条通路使用最佳磁合金等问题。可在两个设计思想体系中任择其一：(i) 在磁路各部分避免磁饱和，或 (ii) 使可动磁零件象已

饱和的“磁替续元件”一样地工作。固定的绕组和可动的磁零件的采用使动铁原理适于做廉价而牢固的器件和更专用的设备。可动的元件可以是软磁材料也可以是恒磁体做成。后者质量较大，往往不利于做声学换能器。但做拾音器还是可以的。

利用这个原理制成了很多送话器和受话器，这些器件的磁通量载体的运动与磁路的总磁阻是互相影响的。极化磁通量通常由一个恒磁体提供，磁路的一部分上绕着通电的线圈。配有恒磁体，是本原理与可变电感原理区别的标志，在可变电感原理中线路电感的变化不需要任何磁极化，如同某些工业换能器类型那样。而此处线圈电感的变化是由于铁芯或叶片的运动，它可以对导致偏转的量作稳态测量。

最早期的电话受话器就具有单向动铁系统的简单形式，这种单向系统是用恒磁棒与绕着线圈的极靴串联组成的。磁性振膜与极靴中间隔开一个小空气隙，这个空气隙磁阻的变化调制着恒磁体产生的极化磁通量。对于磁路的任何一种给定的设计方式，都存在着一个最佳的能产生最高效率的极化磁通量。简单的系统并不是很有效的，而且本来就是非线性的，而这种系统中更精细的形式则是采用双向或平衡衔铁结构，就可大大降低非线性。

这一原理是可逆的，用作送话器和受话器都可以。它们都是无源器件，毋需用极化电压，电动势由振膜运动直接产生。有关理论和某些主要应用的描述见有关磁阻可变送话器和受话器的若干章节。

1.3.3 压电换能器^[14-17]

这个效应发生在各种天然晶状材料中，且可以用人工办法在一系列的铁电陶瓷材料^[14]中感生出来。“铁电”这个名词的意思是，材料在静电场中电极化的方式类似于铁磁材料在

磁场影响下磁极化的方式。压电效应是无源而可逆的；材料的应变可以使在与应变方向垂直的两个面上产生横跨的电动势，反之亦然。这效应一般不大，只有罗谢尔盐是例外，而它有机械和气候上的局限性。压电晶体送话器和受话器的有关理论和设计都将在相应的章节中讨论。

1.3.4 磁致伸缩换能器

必须将这一原理与其他磁感应效应加以区分，因为它纯粹是由于铁磁材料的弹性伸长或压缩，在电绕组上感应出电流的过程与其逆过程。因此它可以用来做有源的、可逆的换能器。它的效率一般是不够高的，不适宜用作声学换能器，但可以作为共振超声器件。这时，它对介质的耦合得以改善，从而弥补了其基本效率低的缺点^[18]。

1.4 用于传声器和其他换能器设计的类比线路

正类比，即质量与电感等效、顺性与电容等效、机械阻或声阻与电阻等效，是大家都熟知的。一般说来，这种类比方法所以比较容易掌握，是在于电网络中的电流与相应的机-声网络中环流着声的体速度等效比较容易想象。反类比，由费尔斯通首创的，可简化某些类比表示的型式，但它却较难于直观理解，因而很少被采用，除非是在某些包括速度起伏（如磁带运转）^[19]的机械线路中。电类比的主要价值在于：电路理论已发展到高度水平，真实电路的建立和测量都比较容易，而且用电学理论的术语来说明复杂的机械系统的相互作用，是大多数通信工作者比较容易理解的。电路的研究还能很容易为模拟式和数字式计算机编程序。

类比电路的产生，是起因于发现机-声系统的运动微分方