

特种传声器

T E Z H O N G C H U A N S H E N G Q I

吴宗汉 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

特种传声器

吴宗汉 朱彪 欧阳小禾 张杏 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

由于科技发展和学科互渗、交叉而衍生形成了一些特种传声器。这些传声器的具体应用已相当普遍,而且随着电子工业的发展,产品不断向微型化、功能化、集成化方向发展,对这些特种传声器的需求,也在日益扩大。无论是民用通信、国防军工以及其他高科技产品配套等诸多领域都要应用。当然,我们难以要求相关的技术人员花更多时间去查询、了解原本不属于一个单一学科的技术,为此,我们从传声器这一角度出发,将这些多学科传声器,以一条“声—电转换”的红线贯穿起来,汇编成书,供相关技术人员学习、参考,是很有意义的。

编者曾在几年前提出了要重视特种传声器的看法,当时提出的是三种传声器:一是 MEMS 硅传声器;二是光学光纤传声器;三是数字信号传声器。取其三种传声器的第一个英文字母,即“S”、“O”、“D”,而戏称为“SOD”,以便让技术人员容易牢记,后来又发展到阵列传声器、压电驻极体传声器等其他种类的传声器,综合这些而制成的 PPT,编者曾应邀在多种场合演示,介绍这些备受瞩目的特种传声器,听众反应强烈,都希望能有这类书籍面世。但是,目前国内外尚无系统论述该领域知识的书籍,应该说,这在一定程度上也算是一个空白。为了满足现实的需求,特编写了本书,也算是填补了这个小小的空白。

本书编写中,充分考虑到了读者对应用的需求,而且对生产配套的应用也多有考虑,另外,本书始终紧扣“声—电转换”,使读者能根据自己工作特点进行选择、比较、应用。

本书的写作分工是:第2章由朱彪执笔,第3章、第5章由欧阳小禾执笔,第4章由张杏执笔,余下的部分的执笔及对各章的修改、订正、补充均由吴宗汉负责,书稿整体的整合亦由吴宗汉负责。由于执笔者都是利用业余时间,抽空撰写的,因而不可避免地影响了行文的流畅。有些地方不免会有明显的不连贯痕迹,这还望读者谅解。本书编撰过程中,得到了许多人的关心、支持和帮助,他们是:深圳豪恩声学股份有限公司的王丽、李军、徐世和、温志锋、朱纪文、陈虎等;深圳市新厚泰塑胶电子有限公司的林朝阳、李铠。本书初稿完成后,又向深圳的何鸿钧,广州的俞锦元,东莞的应正铭,北京的王润礼、刘萍,天津的王以真,西安的陈克安,宝鸡的桑志明,南京的林靖波、丁德胜、王式民等诸位专家及相关领导征求意见,根据反馈意见对初稿进行了修改、补充。此外,我的学生蒙圣杰、唐啸及远在丹麦 DTU 的马桂林等人,都一直给予我鼓励和支持。我作为本书的策划人和编者的代表,对相关人员的支持、关心和帮助表示衷心的感谢。

吴宗汉

目 录

第 1 章 传声器简介	1
1.1 传声器的原理及分类	1
1.1.1 传声器按作用原理分类	2
1.1.2 传声器按换能原理分类	2
1.1.3 传声器按响应特性分类	5
1.2 传声器的应用及市场前景	6
第 2 章 MEMS 电容传声器	11
2.1 MEMS 电容传声器介绍	11
2.2 MEMS 电容传声器市场前景	14
2.3 MEMS 电容传声器封装制作工艺	17
2.4 MEMS 电容传声器的 MEMS 芯片设计制作	19
2.5 MEMS 电容传声器的发展方向	34
第 3 章 数字信号传声器	37
3.1 数字信号	38
3.1.1 采样与量化	38
3.1.2 影响数字音频质量的技术参数	39
3.1.3 数字音频文件的存储量	41
3.1.4 数字音频信号的编码与压缩	42
3.2 数字信号传声器的应用	51

3.3	数字信号传声器的发展方向	54
第4章	光纤传声器	57
4.1	光纤传声器的基本工作原理及类型	58
4.2	光纤传声器的结构	69
4.2.1	光纤传声器的组成结构及其工作原理	69
4.2.2	光源的选择(LED 和 LD)	72
4.3	常用的两种类型的光纤传声器	82
4.3.1	反射式强度型光纤传声器	84
4.3.2	光栅型光纤传声器	88
4.4	光纤传声器的发展动向	89
第5章	压电驻极体传声器	95
5.1	压电效应及其在传声器上的应用	96
5.1.1	压电效应	96
5.1.2	压电效应的应用	99
5.2	常见压电材料	100
5.2.1	压电单晶体	101
5.2.2	压电陶瓷	101
5.2.3	压电聚合物	101
5.2.4	压电复合材料	102
5.2.5	新型压电单晶	102
5.3	压电驻极体膜	103
5.3.1	驻极体压电膜的特点及优势	104
5.3.2	几种常见驻极体压电膜简介	105
5.3.3	驻极体压电膜的制备	106
5.4	压电驻极体传声器	106
5.4.1	常见结构与优势	106

5.4.2	性能参数	112
第6章	其他特种传声器介绍	114
6.1	激光传声器	114
6.1.1	光纤传声器	114
6.1.2	主动式远距离激光传声器	115
6.2	阵列传声器和小阵列传声器	128
6.2.1	线性传声器阵列	128
6.2.2	小阵列传声器系统	133
6.2.3	硅传声器阵列与声源识别系统的结合	136
6.2.4	大表面的传声器	138
6.3	唇语传声器	139
6.4	无线传声器与无源无线传声器	141
6.4.1	无线传声器	141
6.4.2	无源无线传声器	144
6.5	固导传声器	144
6.6	波型传声器	148
6.6.1	抛物面反射镜式传声器	148
6.6.2	金属片透镜式传声器	150
6.6.3	波域板透镜式传声器	152
6.6.4	利用材料中声速不同制成的透镜式 传声器	153
6.6.5	功能梯度材料作为传声材质的声透镜	159
参考文献		163

第 1 章 传声器简介

1.1 传声器的原理及分类

电声学是声学的一个分支。它是研究声能和电能相互转换的原理及其应用的学科,主要研究电声换能原理,有时也泛指用电子器件产生、检测和控制声音的技术,包括利用电子技术产生各种频率、波形、强度的声音以及有关声音的接收、放大、储存、传输、加工、记录和测量分析技术。但是,从频率范围来看,主要局限于可听声频段,因此它与语言通信、人们的文化生活和主观感觉密切相关。

从电声学的发展史来看,1876 年美国发明家 A. G. 贝尔发明了电话(送话器和受话器),实现了声电信号相互转换,开创了电声学。美国发明家 T. A. 爱迪生于 1877 年发明了留声机,首次实现了声音的记录。传声器、扬声器和耳机的研制,不但发展了换能器理论,而且提供了实用的电声器件。1898 年,丹麦工程师 V. 波尔森发明了磁性录音机,为现代磁带录音机奠定了基础。大约在 1919 年,第一次用电子管放大器和电磁式扬声器做扩声实验。电动扬声器的出现实现了声音的高质量重放,并与立体声原理结合形成了高保真立体声技术,发展了磁带录音机和密纹唱片。1931 年以前唯一能使用的声接收器仅有炭粒式传声器,从 1932 年开始使用高质量的电容传声器。20 世纪 70 年代以来,设计了专业和家用声系统,如扩声系统、立体声系统、人工混响系统和环境声系统等。电声设备的发展涉及声

音的记录和重发,数字技术和大规模集成电路应用于声学领域,开创了数字声频技术。其中脉码调制录音机、激光声频唱片和数字式盒带录音机已使声音的记录和重发达到了高保真的程度。

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。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,炭粒式换能器只能把声信号转换为电信号,而气流调制式则只能产生声能;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。传声器则是一个声—电换能器。它是由声学系统里的能量来策动,同时将能量转换成电能量输送到电系统中的元器件。在电系统里显现的波形,是相应于声学系统里的波形的。目前,常见的传声器是按以下方法分类的。

1.1.1 传声器按作用原理分类

按作用原理来划分,传声器可分为压强式、压差(振速)式,或压强和压差(振速)组合式。压强式传声器的电响应是由于作用的声波的压强变化所形成的,这样的传声器是无指向(全向)的。压差(振速)式传声器的电响应相当于声波在声媒质里传播时所产生的质点速度,这样的传声器具有双向(8形指向特性)、单向(心脏形指向特性)等空间分布响应效果。压强和压差(振速)组合式传声器的电响应是由上述二者的组合效果。

1.1.2 传声器按换能原理分类

按换能原理来划分,传声器可分为炭粒式、电磁式、电动式、电容式、晶体式、电子式、热线式等。

炭粒式传声器是炭粒间的接触电阻因受声压作用而变化,

进而起换能作用的。

电磁式传声器是由一个受声波作用的膜片,连接在一个电枢上,这个电枢处于一个磁场中,当膜片受声波作用而使电枢有位移变化时,则磁路中磁阻变化、磁通变化,这样就使围绕在电枢外的线圈里产生电动势,而这个电动势是和声波作用相对应的。

电动式传声器在有些书上也称为动导体传声器,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,因而产生电压输出的一种传声器。若一个受声波作用的膜片和一个线圈相连,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,因而产生电压输出,也有称为动圈传声器的。若不是线圈而是一个直导体,则称为感应传声器。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,则成了带式传声器。这里还需指出的是,电磁式传声器和电动式传声器是不可混淆的两类换能原理的装置,电磁式传声器输出线圈中的电动势是感生电动势而不是电动式传声器输出的动生电动势。

电容式传声器是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 V ,则“电容”极板上的电量 $Q = CV$,而“电容”的电容量又是符合 $C = \epsilon S/d$ 的规律, 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,则相应的 d 就会随之按外来声信号振动,而使 d 有规律地变化,因而 C 也同样有规律的变化。不过,当 d 变大时, C 则变小;反之亦然。由于 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电动势。拾取这个诱生电动势,就可以把声—电转换过程完成了。这种电容式传声器早在1932年就被制成了,但未得到发展,直到1947年小型的电容式传声器被制成,才显露出它的优良特性。一个直径约2cm的传声器,其膜片的基本共振频率是9000Hz左右,该电容式传声器是高度被阻尼了的,因此得以保持到15000Hz以上的均匀响应,而且控制膜片的密度、质量和膜片的张力等,还可达到预期的频率响应效果。

电子式传声器是由一个膜片连接的细杆,封装在一个真空中,它被作为阳极(板极),与其相邻的是一个旁热式的阴极,声压作用使膜片运动而带动细杆运动,则使真空管的输出变化,这就是电子式传声器,但是,此款传声器已很少见了。

晶体式传声器实际是指压电晶体传声器(也有称为压电传声器的),它是利用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)来显现的。若 e 为内电压, x 为由于加上外力引起晶体的变形的有效振幅, K 为晶体的压电常数,则 $e = Kx$ 。这种压电传声器有两种:一种是直接策动,即声压作用直接作用在晶体上;另一种是膜片策动,即声压作用直接作用在和晶体相连而耦合的膜片上,这种压电传声器也有两种,一种是以前常用的罗谢耳盐的单晶,一种是后来常用的钛酸钡多晶陶瓷,作为传声器用得不多,但作为水听器却用得非常普遍。

热线式传声器是由一条通以电流加热的细金属线组成的。当经过金属线的空气流动引起冷却作用,使金属线的电阻值变化,而这个空气流动引起的冷却作用,却是由于声压作用而产生的,由此,可以将声压作用和金属线的电阻值变化,直接对应起来而形成热线式传声器。

1.1.3 传声器按响应特性分类

按响应特性来划分,传声器可分为指向性的(双向8形、心脏形、单指向、超指向等)和无向性的。这除了和传声器系统的材料、结构、声压作用等因素有关外,构成传声器振动系统的声元件的特殊外形也决定了传声器的指向特性。前面简单介绍了—些指向特性与声压作用的关系,这里再作进一步的介绍。双向8形传声器所表示的空间分布的响应在 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 变化,并以 0° 、 180° 处最大,在空间呈8形,这是一阶压差式传声器的特性,它的电响应对应于在空间内两点的压力差。一般说来,当这两点之间的距离小于波长时,压力梯度就相当于质点的速度。若将一个双向8形传声器和一个全向传声器组合或者用一个单元件的传声器和一个适当声延迟的系统组合起来,就成了一个单向组合传声器了。这个组合单向传声器对随机声能量响应的效率,是与组成这个组合单向传声器两部分元件之间的相角有一定的函数关系,这样就会形成心脏形了。若不是由两部分组成的,要做成一个单元件单向传声器就要有一个单元件声—电换能器和一个有相移特性的网络组合。这个相移网络可以用阻尼材料形成。上面提到的压差是一阶压差,这也就是相当于声压的梯度,若某个压差传声器其响应相当于压力梯度,这个压差传声器就叫做二阶压差传声器,以此类推,相应于声压梯度的阶数就会有相应的高阶压差传声器。一阶或一阶以上压差传声器都是定向的,而且其指向性是随着压力梯度幂次的增加而增加的。例如,二阶压差单轴传声器的使用是为了在大距离或者在声学困难条件下,且需要高度指向性时拾声用的。在电视、电影录音棚里,录音的传声器常吊在吊杆上,一个二阶压差传声器对随机声的响应是一个全向传声器对随机声响应的 $1/9$,而这个二阶压差传声器所增加的指向性效率使它可以比全向传声器所用的

拾声距离大 3 倍多,也比具有心脏形指向性图案的单向传声器的拾声距离大 1.8 倍。利用压差或幕次阶的压差制成的传声器,可以做到其尺度比声波波长小,它可以用在做微型传声器上,这种类型的传声器还有抛物面反射镜式传声器、线阵列传声器等。指向性传声器除了上述的利用压差或幕次阶的压差外,还有利用波的干涉特性的波形传声器。为了得到各种形状的指向性特性,传声器的尺度必须和波长差不多,这种类型的传声器是反射器、声透镜、线阵列传声器,但这对微型传声器是难以满足的。

此外,还有喉式传声器、唇式传声器、声透镜传声器、线阵列传声器、无线传声器等,在相关部分再作介绍。

1.2 传声器的应用及市场前景

进入 21 世纪,随着信息产业和消费电子领域的迅猛发展,对电声行业及其周边产业有了更为迫切的需求,无论是从产品的数量上、品质上,还是从功能上、尺寸上,都提出了更为严格的要求。

“十一五”期间,国内对电声元器件的需求如下:

扬声器:32.1 亿只

传声器:1.9 亿只

送受话器:7 亿只

耳机传声器组:0.2 亿只

国际市场(到 2010 年)的需求如下:

扬声器:43.9 亿只

送受话器:12.1 亿只

传声器:8 亿只

对电声产品的要求也从单纯通信联络的语言传递,转变为

兼有娱乐欣赏的享受型了;从过去对环境噪声可以忍耐型,转变为对环境噪声有要求,需要有高音质、高生活质量不可忍耐型了。电声产品通过和半导体行业、微电子行业的相互渗透,正在向集成化、微型化、高功能化方向发展,例如,MEMS 传声器就是其中一种值得介绍的新器件。MEMS 技术是通过微制造加工技术在硅片上或其他材料的基板上,制造出微传感器、微控制器、微电子电路等单元,再通过微执行机构的配合而形成能具体执行指令动作的完整的微系统,这就叫微机电系统(MEMS)。这种设计尺寸微小,仅在微米(μm)和纳米(nm)之间。微机电系统的叫法不一,例如:

美国:Micro - Electro - Mechanical System (MEMS)

日本:マイクロマシン (Micromachines)

欧洲:Micro - System Technology (MST)

中国:微机电系统(MEMS)

传声器(包括 MEMS 传声器)现已大量应用到消费电子用器件,如笔记本计算机、个人计算机、PDAs(个人数据处理器)、Wii(计算机游戏)等方面;用在生物医学电子,如 MEMS 人工耳蜗、数字化 MEMS 听诊器、数字化 MEMS 助听器等方面;用于新兴产业的,如新兴的 MEMS、RF - MEMS 被动元件、微应用流体力学器件、MEMS 微显示器件、压力传感器、可携式摄像机、数码相机、DSC 等(尤其是 CMOS MEMS 传声器整合传感器与电子及信号处理技术,使元器件与电路技术整合,促进了电子元器件部件化、功能集成单元化,并能微型化)。其他还在军工企业、机器人自动机等领域得到应用。

电声产品还在向消/吸声、抗噪声、声场控制、语言识别等方向拓展延伸。

根据 YOLE 以及 IDC 的报告显示,2005 年全球传声器市场总出货量 20 亿只,主要是使用驻极体电容传声器(ECM),2008

年总出货量 33 亿只, YOLE 估计, 2011 年总出货量要达 42 亿只, 这对 MEMS 电容式传声器来说是具有诱人的空间的。2006 年整体 MEMS 电容式传声器市场销量为 2.69 亿只, 达 1.16 亿美元。根据 YOLE 估计, 2011 年手机的 MEMS 电容式传声器搭载率可达 65%, MEMS 电容式传声器占传声器市场比例达 39%。未来 MEMS 电容式传声器的发展重点是头戴式传声器和笔记本计算机市场, 而对一些特种传声器的要求也更为迫切。

传声器向集成化、微型化、高功能化方向发展。这里要花点笔墨介绍一些驻极体电容式传声器的知识, 因为驻极体电容传声器的发明, 才使传声器的微型化迈开了新的一步并得以产业化。这里讲一点发展史, 早在 1839 年, 法拉第 (Faraday) 就提出了“电介质”的概念, 指出当外电场减小至零后, 电介质中仍然可能保持一定的剩余电矩, 即材料内可能存在电场。这一重要概念的提出为驻极体材料的研究和发展奠定了理论基础。1892 年英国科学家 Heaviside (海维赛德) 首次定义出上述经极化的电介质为驻极体, 因此, 驻极体的发展已经经历了一个多世纪。驻极体是永磁体的类比词, 因为就英文词汇而言, 它们具有相同的词根“et”, 意指驻极体是一种带有准永久电荷的“永电体”。

自从 1919 年日本物理学家江口利用巴西棕榈蜡、树脂和硫黄的共混体通过提纯及热极化, 研制成世界上第一块人工驻极体后, 人类才开始了对驻极体性质的系统研究。第二次世界大战期间, 由 Eguchi 研制的蜡驻极体电容式传声器由日本军界首次应用于舰船通信和战地电话。这种电容式传声器的最大优点是: 由于自偏置, 驻极体电容式传声器无需外加直流偏压, 从而电容式传声器省略了在常规电容式传声器工作时所必需的外加电源系统, 这一特性大大节省了生产成本和简化了设备。因为理论计算和实验结果都已指出, 具有相应灵敏度的非驻极体电容式传声器需提供外加偏压 70V ~ 280V。然而, 由于这类蜡驻

极体电容式传声器的体积大和电荷储存寿命低,使其应用受到很大的限制。驻极体最重要的应用是1962年由 Sessler 和 West 在美国贝尔(Bell)实验室首先研制出的第一个以柔性聚合物 FEP 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年由日本索尼公司首先投放市场。4年后的1972年,这类传声器在日本的年产量达1000万只。现在这类驻极体电容式传声器的世界年产量已突破10亿只,目前至少90%的适用于各种目的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,可望制成微型化、可集成化的机敏元器件而已成为驻极体领域近年来的研究热点。

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年代初在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 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占3篇,从而推进了驻极体在这一领域中理论研究和应用。

电声技术在政治、军事、经济、文化等领域内有广泛的应用,并开始进入医疗领域。在军事应用方面主要有抗噪声通话、噪声环境下弱信号的提取、远距离扩声、环境噪声实验和声定位等。标准传声器用于测量声信号。高保真传声器和扬声器用于广播、录音和扩声等。加强声接收器的指向性可以在室内扩声系统中抑制声反馈和混响干扰,在强的背景噪声中拾取微弱的声信号。常见的声接收器的指向性有圆形、8字形、心脏线形等。指向性接收器常用于抗噪声通信中。高噪声环境下军事通

信用换能器多采用一阶、二阶等抗噪声送话器以及骨导式送话器。在一些特殊场合可以用抛物面反射式、透镜式、管式等接收器以获得强指向性,也可以采用多个接收器阵,如将传声器排成列阵,有时称为声天线或声望远镜。指向性接收系统可分为无源式的和有源式的两种。无源式的是由多个传声器以一定距离排列或用一个背极板为一定形状的大面积薄膜驻极体换能器构成。有源式的则为可控列阵,通过对列阵的输出信号用微机实时处理进行扫描。高保真耳机的结构已有很大进展,如采用电动式振膜,重放频率范围已达 $20\text{Hz} \sim 20000\text{Hz}$ 。大功率声辐射系统可以用作高声强环境实验用的声源以模拟火箭噪声,也可用于远距离广播,如对近海航行的舰船预报雾警、对敌广播或在航空母舰上直接指挥飞机起飞和降落。从应用技术来看,录音和扩声还使用了无线传声器和压力区传声器,压力区传声器也称为界面传声器或平面传声器(PZM)。

电声换能器趋于向宽频带、低失真、高抗噪声能力、高效率等方向发展,并开发其他新型电声器件,如数字式扬声器、数字式耳机、光纤传声器、航海中通信用抗干扰送受话器和有源抗噪声送受话器等。立体声传输已从双通路发展到四通路并且提出了反映环境感的环绕声系统。电声技术使声音在产生、变换、记录和传输过程中采用数字编码方式,其动态范围、信噪比和通路分离度都可达到或超过 90dB 。已经实用的数字声频设备有数字延时器、数字混响器、脉码调制录音机、激光声频唱片、数字式盒带录音机等。数字耳机和扬声器已提出了实验模型,数字传声器也在研制开发中。数字声频设备将做到轻巧、可靠性高,并能实现复杂的或快速的控制功能。此外,录音技术会出现新的突破,如可录音、抹音的磁粉光学唱片以及用大容量集成电路存储器录音的全固态录音技术。