

超声换能器设计

陈桂生

海洋出版社

超声换能器设计

陈 桂 生

海 洋 出 版 社

1984年·北 京

内 容 简 介

本书叙述了频率为几千赫至几兆赫的各类常用超声换能器的设计原理和方法。书中以超声换能器的基本设计参数和压电方程入手，推导了各类振动模式超声换能器的等效电路，着重介绍了纵向复合式换能器振子各参数间的关系和各种聚能器的设计。对于每一种换能器的优缺点和使用范围也都作了详细说明。本书列有大量的设计曲线、图表和设计实例，可供设计人员查阅使用。

本书适于从事超声、水声、电声工作的科研人员和工程设计人员阅读，也可供大专院校有关专业师生参考。

超 声 换 能 器 设 计

陈 桂 生

海洋出版社出版 (北京市复兴门外大街一号)

新华书店北京发行所发行 轻工出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：12¹/₂ 字数：260千字

1984年1月第一版

1984年1月第一次印刷

印数：3500

统一书号：13193·0252 定价：3.00 元

0144/21

序

声学是一门比较古老的学科。随着现代科学技术的发展，特别是电子科学技术的发展，声学的研究和应用范围大大扩展。所以声学又是一门年轻的学科。超声是声学学科的一个重要分支，它与国民经济联系密切，近几年来发展迅速，目前广泛应用于工业、农业、国防、科研等各个领域，并且还在继续不断地发展、渗透，其发展前途十分广阔。

超声频率范围很宽，从近十几千赫直至上百兆赫，并向更高的频率扩展。目前限制超声应用发展的是超声换能器不能满足发展要求。设计、研制一个性能良好、结构牢靠、价格低廉的超声换能器历来是超声应用的关键问题。本书着重介绍频率在几兆赫以下的各类压电型超声换能器的设计原理和设计方法。

第一次世界大战期间，法国科学家P. Langevin利用石英晶体制成超声夹心式换能器，在水下进行超声发射和接收，于是世界上第一部声呐诞生了。接着镍、铝-铁合金等磁致伸缩换能器出现；五十年代钛酸钡压电陶瓷的研究应用；六十年代以后，锆钛酸铅压电陶瓷推广使用和不断发展，使超声换能器的研制进入了一个崭新的、蓬勃发展的时期。

超声应用范围很广，编写一本无所不包的超声换能器专著是很困难的。本书是作者累积多年科研工作经验，博览国内外有关资料，取其精华编写而成。本书侧重于压电超声换能器的设计，还着重介绍了各类超声聚能器的设计。内容在“后记”中已交代清楚，所以，本书具有一定的特点和

实用价值。为了祖国的四化建设，为了推广超声技术的应用，我们希望出版本书能起到抛砖引玉的作用，相信不久的将来，一定会涌现出更多更好的有关超声换能器方面的著作。

朱 西

向 大 威

1982.6.

目 录

第一章 概述

1.1 超声换能器的发展简史及其在超声应用中的作用	1
1.2 符号和单位	3
1.2.1 分贝	4
1.3 数学知识	5
1.3.1 复数运算	6
1.3.2 双曲函数	8
参考文献	9

第二章 压电材料

2.1 电致伸缩效应	10
2.2 压电材料的几个重要性能参数	12
2.2.1 压电方程	12
2.2.2 介电损耗角正切 $\text{tg}\delta$	17
2.2.3 机电耦合系数	19
2.2.4 机械品质因数	23
2.3 几种常用压电材料的性能比较	32
参考文献	39

第三章 超声压电换能器

3.1 振子振动模式	41
3.1.1 纵向振动模式	41
简单纵向振子	42
纵向复合式振子 Tonpilz水听器	58
3.1.2 厚度振动模式	71
3.1.3 薄壁短圆柱或环形换能器	75
径向极化环	76

	切向极化分段陶瓷环	82
3.1.4	径向振动模式	85
3.1.5	剪切振动模式	88
3.1.6	压电弯曲和弯张换能器	90
3.2	大振幅超声换能器	91
3.2.1	大振幅超声换能器结构	91
3.2.2	纵向复合式换能器	94
	结构和优点	94
	性能参数	95
	复合棒的几个性能参数解析表达式的推导	97
	振子等效电路	129
	利用等效电路图运算振子各性能参数	134
3.3	超声换能器的性能测量	137
3.3.1	换能器振子的有效耦合系数测量	138
3.3.2	电桥法测量换能器性能	141
3.3.3	换能器灵敏度校准	144
3.3.4	换能器表面振幅测量	146
	加速度计法	146
	激光干涉法	148
	参考文献	148

第四章 半波聚能器

4.1	匹配	152
4.2	圆锥形聚能器	153
4.2.1	纯圆锥形聚能器	153
	弹性振动方程的通解	153
	振速分布、应力分布和频率方程	155
	振幅放大系数	158
	圆锥形聚能器的特殊情况	161
4.2.2	大端面前接平滑圆柱体的圆锥形聚能器	162

边界条件	162
振速分布 应力分布 频率方程	163
振幅放大系数 节面位置	165
4.2.3 小端面后接平滑小圆柱体	168
边界条件	168
振速分布 应力分布 频率方程	168
振幅放大系数 节面位置	170
安装小工具情况	171
4.2.4 圆锥形聚能器装有小工具的情况	173
4.3 指数形聚能器	176
4.3.1 纯指数形聚能器	176
振速分布 应力分布 频率方程	178
振幅放大系数 节面位置	180
4.3.2 大端面前接一平滑圆柱体	187
边界条件	187
振速分布 应力分布 频率方程	188
振幅放大系数 节面位置方程	189
4.3.3 小端面后接一平滑圆柱体	193
边界条件	194
振速分布 应力分布 频率方程	194
振幅放大系数和节面位置方程	196
安装小工具情况	197
4.3.4 纯指数形聚能器安装工具的情况	199
4.4 双曲函数形聚能器	200
4.4.1 纯双曲函数形聚能器	200
振动方程及通解	200
边界条件	202
振速分布 应力分布 频率方程	202
振幅放大系数 节面位置方程	205

4.4.2	大端面前接一平滑圆柱体	212
	边界条件	212
	振速分布 应力分布 频率方程	212
	振幅放大系数 节面位置方程	215
4.4.3	小端面后接一平滑小圆柱体	221
	边界条件	221
	圆柱体部分振速分布 应力分布 频率方程	221
	振幅放大系数 节面位置方程	224
	输出端安装工具的情况	226
4.4.4	纯双曲函数形聚能器安装工具	229
4.5	阶梯形聚能器	230
4.5.1	纯阶梯形聚能器	230
	边界条件	231
	振速分布 应力分布	231
	频率方程 振幅放大系数 节面位置方程	232
4.5.2	纯阶梯形聚能器节面位置	233
	最大振幅放大系数	233
	节面偏移情况	236
4.5.3	纯阶梯形聚能器安装工具情况	246
	频率方程	246
	振速分布和应力分布	247
	振幅放大系数	247
4.5.4	用圆锥形平滑的阶梯形聚能器	250
	边界条件	250
	频率方程 振速分布 应力分布	251
	振幅放大系数	252
4.5.5	以指数函数曲线使外形平滑的阶梯形聚能器	256
	频率方程 振速分布和应力分布	257
	振幅放大系数	259

4.5.6	以双曲函数形使外形平滑的阶梯形聚能器	262
	频率方程 振速分布 应力分布	265
	振幅放大系数	267
小结	273

第五章 四分之一波长超声聚能器

5.1	四分之一波长聚能器特点	279
5.1.1	结构特点	279
5.1.2	四分之一波长换能器振子	282
	边界条件	283
	振速 应力分布 频率方程	283
5.2	四分之一波长阶梯形聚能器	285
5.2.1	纯阶梯形聚能器	285
	边界条件	285
	振速 应力分布 频率方程	286
	换能器前后振速比	286
5.3	四分之一波长圆锥形聚能器	290
5.3.1	纯 $\lambda/4$ 圆锥形聚能器	291
	边界条件	291
	频率方程 振速 应力分布	292
	换能器前后振速比	293
5.3.2	大端面前接平滑圆柱体	296
	边界条件	297
	频率方程	298
	换能器前后振速之比	298
5.3.3	小端面后接一平滑圆柱体	300
	振动方程通解公式	301
	边界条件	301
	频率方程 振速 应力分布	302
	换能器前后振速比	303

5.4	四分之一波长指数形聚能器	305
5.4.1	纯 $\lambda/4$ 指数形聚能器	305
	弹性振动方程通解公式	305
	边界条件	306
	频率方程 振速 应力分布	307
	换能器前后振速比	308
5.4.2	大端面前接平滑圆柱体	312
	振动方程的通解	312
	边界条件	312
	频率方程	313
	换能器前后振速比	314
5.4.3	小端面后接平滑圆柱体	316
	通解公式	316
	边界条件	316
	频率方程	317
	换能器前后振速比	317
5.5	四分之一波长双曲函数形聚能器	322
5.5.1	纯 $\lambda/4$ 双曲函数形聚能器	322
	通解公式	322
	边界条件	323
	频率方程 振速 应力分布	323
	振速分布	324
	应力分布	324
	换能器前后振速比	325
5.5.2	大端面前接平滑圆柱体	330
	振动方程的通解	330
	边界条件	331
	频率方程 振速 应力分布	331
	换能器前后振速比	333

5.5.3 小端面后接平滑圆柱体	334
通解公式	334
边界条件	335
频率方程	336
换能器的前后振速比	337
小结	340
参考文献	345
附录1 薄圆片的径向振动模式	346
附录2 各种表格	352
附录3 符号表	377
后记	386

第一章 概 述

1.1 超声换能器的发展简史及其在超声应用中的作用

超声换能器是实现声能与电能相互转换的器件。它可以把声能转换为电能，也可以把电能转换为声能。超声，则是指频率高于人耳听觉上限的声，其频率一般在20千赫以上。

最早的超声换能器是1917年P. 郎之万(P. Langevin)为水下探测设计的夹心式换能器。这个换能器是以x向切割的石英晶体为压电激活材料，用两块钢板在两侧夹紧而制成的，其谐振频率为17千赫和45千赫等。1933年以后出现的叠片型磁致伸缩换能器，以冲孔镍片为材料，强度高，稳定性好，功率容量大，这些优点促使它迅速地取代了当时的郎之万换能器。1942年出现了铝-铁合金，降低了生产成本，因此被广泛采用。到了五十年代初，电致伸缩材料、钛酸钡铁-电陶瓷材料研究成功，它以介电损耗小、机电耦合系数比较大和足够高的机械强度优于石英晶体、镍和一些合金材料，于是郎之万型超声换能器再度被运用，并成为当时叠片型磁致伸缩换能器的有力竞争者。五十年代中叶又发明了铁氧体磁致伸缩材料，它的特点是涡流损耗小，电声效率达到百分之八十以上，比薄片镍做的磁致伸缩换能器，约高二至三倍，并且它兼有镍和其他合金材料作成的磁致伸缩换能器的一些特有优点，例如强度比较高等。此外，工艺上它是由铁氧体粉末经过简单模压烧结制成，换能器的形状可以根据需要进行设计，所以直到现在，铁氧体换能器仍为广大设计者所欢迎，并广泛地

应用于各个工业领域，例如国内外有一些渔探仪声基阵就是用铁氧体材料作成的。

从五十年代，锆钛酸铅压电陶瓷的发现、研制，到六十年代被推广使用，前后花了近十年时间。它的应用在压电材料史上揭开了新的一页。锆钛酸铅与钛酸钡相比，具有耦合系数大，压电系数大，居里点高，以及通过各种成分的变更能在很大范围内调整性能，以满足多种不同需要等优点，因此锆钛酸铅系陶瓷得到愈来愈广泛的应用。近十多年，这种材料迅速推广，在许多方面替代了原先的压电陶瓷材料。与此同时，由于压电陶瓷换能器的结构、类型不断的改进和发展，声学性能也进一步得到提高。

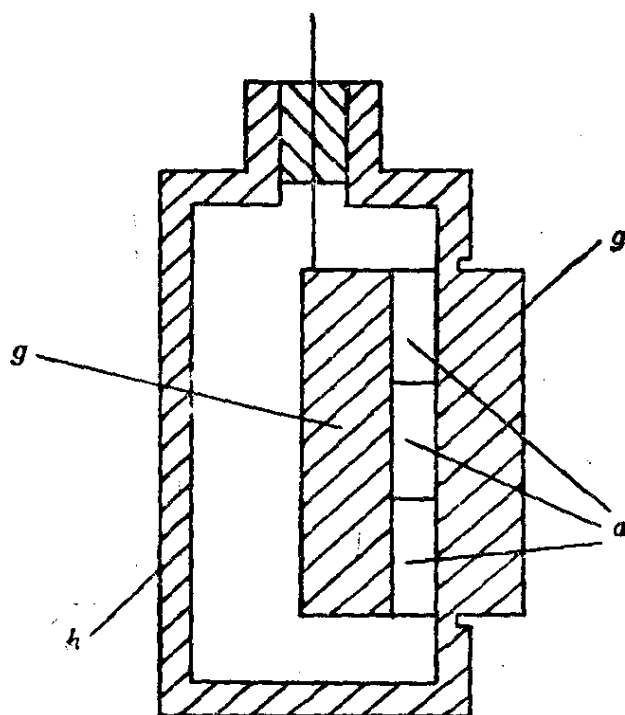


图 1.1 郎之万换能器结构示意图

a——石英晶体 g'——前盖板 g——后盖板 h——外罩

超声振动的频率范围很宽，在20千赫以上的均属超声。目前，利用钛酸铅 (PbTiO_3) 的厚度伸缩振动的三次谐波模式，已经制成高达100兆赫以上的高频压电陶瓷振子。振子厚度只有

70微米，能与高频石英晶体振子相比，而最高的超声振子的频率可达1000兆赫。如果用波长表示超声波段的范围，在液体、固体中最短的超声波长为微米量级，可以和可见光波的波长相比较。正因为超声波的波长可以如此的短，才使其具有许多特殊的用途。目前超声应用的范围很广，远远超出声学范围，并已经应用于化学、核子物理学、生物学、医学、通讯技术、材料试验、材料加工以及其他技术领域，而且对超声测量精度、测量范围、超声功率等提出了越来越高的要求。目前妨碍超声在技术、科学实验等方面广泛应用的原因，正是由于缺少能够适合于应用，并且性能良好、结构牢靠、经济耐用的超声换能器。超声换能器历来是各种超声应用的关键部件，国内外均花力量进行研究，读者可以从有关的刊物上了解到近年来所取得的成就。

1.2 符号和单位

本书所用到的符号很多，涉及到声学、电学和力学，此外还有一系列的压电参数的定义、符号。我们尽量使用广大声学技术工作者通用的，为大家所熟悉的术语和符号，并力求避免对不同的量使用同一符号。我们用英文字母的大小写加以区别，例如以 k 表示波数，而用 K 表示机电耦合系数；以 S 表示弹性力学中的应变，而用 s 表示柔顺性，这样即使在同一公式中出现，也不会引起混淆。此外还在字母的右上角或右下角用足标加以区别，例如， Q_m 表示材料的机械品质因数，而 Q_m^L 表示有声负载的换能器的机械品质因数，等等。即使作了这些努力，还会有个别字符重复，但随文将注明，不致引起误会。例如不会把辐射面积 S 误为应变，因为读者能在上下文中很清楚的加以辨别，从而知道它的确定的含义。

当用数学表示某一物理问题时，如果需要定量分析其中各个物理量间的关系，则首先必须定量的定义有关物理量，还说明每

个物理量是如何度量，以及度量时采用何种标准单位制。本书采用了我国正在推行的国际单位制。

1.2.1 分贝

在声学中，一个量的级具有特殊的意义。它是某一个量与它同类量的基准值之比的对数。如果上述定义的级用分贝为单位，其值等于该比值的通用对数的10倍。例如：

$$\text{声强级} \quad L_I = 10 \lg(I/I_0) \quad (\text{a})$$

$$\text{声功率级} \quad L_W = 10 \lg(W/W_0) \quad (\text{b}) \quad (1.1)$$

$$\text{声压级} \quad L_p = 20 \lg(p/p_0) \quad (\text{c})$$

式中 I_0 、 W_0 、 p_0 分别为声强级、声功率级、声压级的基准值，一般参考基准值都要加以说明。过去基准值使用比较混乱，如声压级的基准值就有达因/厘米²（微巴）、 2×10^{-4} 达因/厘米²、牛顿/米²以及微牛顿/米²等四种。在水声学中，声压级基准值采用微巴；空气声学则采用人耳在 10^3 赫的闻阈 2×10^{-4} 达因/厘米²。现在要统一改用国际单位制（SI制）。据国际标准ISO31/Ⅶ-1978（E）知，声压单位采用帕（Pascal），符号为Pa，虽暂允许沿用巴为单位，但巴不作为标准单位。在我国的声学计量标准中，也不再使用微巴这个声压单位。在计算声级时，采用的声压级基准值为：在空气中 $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ；在水声学中， $P_0 = 1 \mu\text{Pa}$ ，而声强级、声功率级的基准值分别为 $I_0 = 1 \text{pW}/\text{m}^2$ （ $1 \times 10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$ ）， $W_0 = 1 \text{pW}$ （ $1 \times 10^{-12} \text{W}$ ）。对于换能器的自由场灵敏度级的定义为

$$M = 20 \lg(M/M_0)$$

其基准值，在空气中为 $M_0 = 1 \text{V}/\text{Pa}$ ；在水声学中为 $M_0 = 1 \text{V}/\mu\text{Pa}$ 。

上述几种声压级基准值的关系如下图所示：

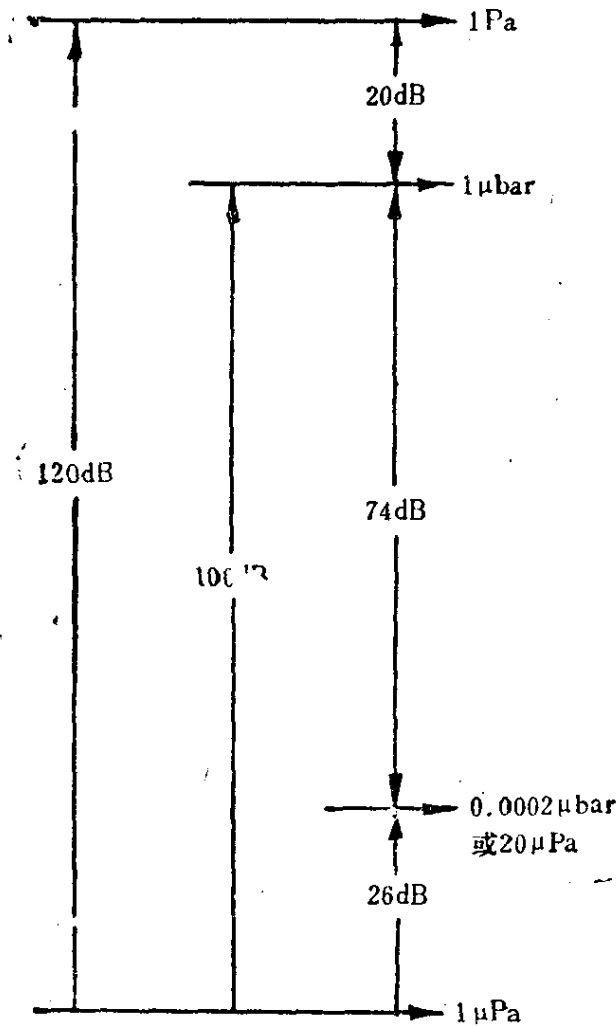


图 1.2 几种声压基准级的关系

1.3 数学知识

在各类压电换能器和超声聚能器的分析和运算中，都会遇到求解微分方程的问题。本书中有一些变系数常微分方程，虽然求解它们的方法并不复杂，但所得到各物理参量的解析表达式都比较复杂，其中，出现的数学函数形式不仅有三角函数、指数函数、双曲函数，而且有一些变数是复数。为了能够直观分析，便于工程设计，应通过曲线定量地表示各参量之间的相互变化关系，这