

# 水声换能器及基阵

周福洪 编著

国防工业出版社

TB555  
381

207927

# 水声换能器及基阵

周福洪 编著



国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书讲述了水声换能器及基阵的一般原理和某些技术应用的基础理论。

全书共分五章，内容包括：表征水声换能器及基阵主要性能的特性指标，压电陶瓷换能器的一般理论，各类特种压电换能器的理论及其工程设计方法，磁致伸缩换能器的工作原理，几种实用磁致伸缩换能器的工作特性和设计这类换能器时应注意的问题，水声换能器及基阵形成指向性的基本原理，及一些典型声基阵的工程设计原理，水声换能器及声基阵重要特性的几种常规测量方法。

本书可作为水声、声学专业大学生的教科书，对于从事水声及海洋开发专业的科技人员亦有参考价值。



DY 62/03

### 水声换能器及基阵

周福洪 编著

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

房山南召印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张23<sup>1</sup>/<sub>8</sub> 538千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数：0,001—1,120册

统一书号：15034·2812 定价：3.55元

## 前 言

本书是高等院校船舶工程类水声专业统编教材之一。本教材是根据造船工程专业教材审定会议所确定的大纲编写的。

近年来,水声技术发展很快,新型的水声换能器及声基阵的新原理不断出现,且开始应用于水声及海洋开发等技术领域,但上述的新器件是从原有的器件中引伸出来的,基阵的演变情况亦是一样。在本教材中,为了照顾当前工作的需要,又能为近代水声理论研究奠定一些基础,我们把目前广泛使用的换能器及基阵作为母型,对它们进行分析和研究,通过这一过程,首先把基本概念和原理讲清楚,以此为起点,再探讨一些新成果。在本书中附有一些带星号的小节,作者企图扩充课文中基本内容所介绍的某些结果,其中有些以便学员能更好地解决实际问题,另一些是为学生今后从事近代水声技术应具有的知识。

全书共五章。第一章介绍表征换能器及声基阵主要性能的特性指标及对它们进行理论研究时所采用的处理方法。第二章是本课程的重点章节之一,首先讲解压电换能器的一般原理,再通过对几种不同类型压电换能器的理论分析,进一步说明换能器的工作原理及探讨如果设计现代声呐所要求的宽带换能器。第三章讲磁致伸缩换能器的换能原理,并结合工艺要求阐明在设计这类换能器时应注意的问题。第四章亦是本课程的重点,我们较系统地讨论了几种典型基阵的特性及设计原理,特别对相控发射阵及宽带恒定束宽阵进行了较详细的论述,依据近代基阵理论的观点,基阵被视为空间处理器而参与水声站的最佳时空处理系统。在书中相关基阵理论这一节,就是用它作为过渡到研究近代基阵理论所应具备的知识而增添的一节。第五章讲述了用以测量换能器及声基阵特性的几种常规测量方法。

本书承南京工学院华明龙和钱振德二位同志审阅,并提出许多宝贵的意见,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中定有不当或错误之处,欢迎读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 第一章 水声换能器及基阵的概述

第一节 水声换能器及基阵在水声设备中的地位和作用	1
第二节 水声换能器及基阵的分类	1
一、水声换能器的分类	1
二、水声基阵的分类	2
第三节 水声换能器的研究方法及它的一般关系式, 水声基阵的研究方法	3
一、水声换能器的研究方法及它的一般关系式	3
二、水声基阵的研究方法	5
第四节 水声换能器及基阵的主要性能指标	5
一、水声换能器的主要性能指标	5
二、水声基阵的主要性能指标	8

## 第二章 压电陶瓷换能器

第一节 压电陶瓷的物理性能	11
一、压电陶瓷的内部结构	11
二、压电陶瓷的介电特性	15
三、压电陶瓷的弹性特性	21
四、压电陶瓷的压电特性	33
五、压电陶瓷的主要性能指标及各类材料的特性	43
第二节 长度振动模式压电陶瓷振子 ( $\lambda/2$ ) 的理论分析	46
一、长度振动模式的压电方程	46
二、压电棒的纵振动	47
三、机电等效图	49
四、发射工作状态的特性分析	52
五、接收工作状态下的特性分析	56
第三节 纵振复合棒型换能器的理论分析及工程设计方法	62
一、理论模型	62
二、晶堆的机电状态方程式及等效图	63
三、盖板的机械等效图	67
四、纵振复合棒换能器的机电等效图	71
五、发射工作状态下的特性分析	72
六、接收工作状态下的特性分析	78
七、工程设计计算方法	82
第四节 圆柱型换能器的理论分析	84
一、圆柱型换能器的结构	84
二、圆柱型换能器的位移、应变与振动方程	85
三、径向极化压电圆柱的动态理论分析	87

四、径向极化薄壳圆柱型换能器的等效图	92
五、径向极化圆柱换能器的收发特性分析	96
六、切向极化换能器的工作特性分析	99
七、圆柱接收器在低频接收时的静态理论	103
第五节 弯曲圆盘换能器的理论分析	108
一、弯曲圆盘换能器的结构形式	109
二、弯曲圆盘换能器的理论模型和分析方法	110
三、三叠片圆盘的动能	110
四、圆盘的位能	111
五、弯曲圆盘换能器的基本参量	116
六、弯曲圆盘换能器的等效图	122
七、弯曲圆盘换能器在发射工作状态下的特性分析	123
八、弯曲圆盘换能器在接收工作状态下的特性分析	127
第六节 其它各类压电换能器的结构、特性分析及使用场合	128
一、球形换能器的结构、特性分析及使用场合	128
二**、弯曲伸张型压电换能器的工作特性	134

### 第三章 磁致伸缩换能器的简单介绍

第一节 磁致伸缩效应	150
一、磁滞及涡流效应	150
二、磁致伸缩效应	153
三、磁致伸缩方程式、磁致伸缩效应对材料机械和磁性特性的影响及机电耦合系数	157
第二节 圆环型磁致伸缩换能器的理论分析	162
一、圆环型磁致伸缩发射器的特性分析	162
二、圆环型磁致伸缩接收器的特性分析	174
第三节 其他类型磁致伸缩换能器的结构和特性分析	177
一、变压器型和 $\pi$ 型磁致伸缩换能器的结构和特性分析	177
二、弯曲型磁致伸缩换能器的简单介绍	199

### 第四章 水声基阵的理论分析

第一节 形成水声基阵(换能器)指向性的物理原因及其条件,表征指向性特性的几个重要物理参数(指标)	200
一、形成水声基阵(包括换能器)指向性的物理原因及其条件	200
二、表征指向性特性的几个重要物理参数(指标)	202
第二节 简单基阵(包括典型换能器)的指向特性	205
一、点源等间隔的直线阵	205
二、均匀连续直线或细柱换能器的指向性	212
三、点源等间距圆周阵	215
四、椭圆点阵	221
五、任意形状的离散阵的指向性	223
六、连续系统的方向特性函数	224
第三节 基阵由复合系统组成时的指向性	235
一、Bridge 乘积定理	235

二、点源直线阵组成的复合阵 .....	236
三、连续线的复合阵 .....	240
四、矩形(或方形)活塞面的复合阵 .....	241
五、另一种连续线的复合阵 .....	243
第四节 基阵的波束控制——束控 .....	244
一、束控的基本概念 .....	244
二、幅度束控的几种设计方法 .....	245
三、相位束控——利用相位补偿控制波束 .....	257
第五节 相控发射阵的工作特性 .....	267
一、基阵中各基元间相互作用的效应 .....	267
二、振速控制的基本原理 .....	271
三、经振速控制后圆柱阵的指向性 .....	278
第六节 水声换能器及其基阵对宽带信号的指向特性 .....	283
一、功率指向性响应函数 $b(\alpha, \theta)$ .....	283
二、宽带的功率指向性响应函数 $b(\alpha, \theta, \omega)$ .....	286
三、恒定束宽阵的概念和特性 .....	291
四、通过线性组合法来实现恒定束宽阵的设计原理和步骤 .....	293
五、用傅氏变换来设计恒定束宽阵 .....	299
六、利用特定的几何形状及振速分布来获得宽带恒定束宽 .....	305
第七节** 乘积阵的指向特性 .....	307
一、乘积阵的基本工作原理 .....	307
二、由线列阵分裂而组成的相乘阵 .....	309
三、时间平均相乘阵 .....	310
四、双基元经非线性处理后所形成多元等效基阵 .....	313
第八节** 基阵的空间相关特性及相关基阵的理论 .....	320
一、基阵对信号的空间相关特性 .....	323
二、基阵对干扰噪声的空间相关特性 .....	325
三、基阵对宽带信号和宽带噪声的空间相关特性 .....	327
四、基阵的空间处理增益 .....	328
五、线列阵的阵增益的计算 .....	329
六、连续体类型基阵的处理增益 .....	332
七、轴向集中(集聚)系数和空间处理增益的比较 .....	335

## 第五章 水声换能器及基阵的基本性能参数的测量和计算

第一节 水声换能器阻抗或导纳的测量 .....	337
一、平衡电桥法 .....	342
二、矢量分解法 .....	343
第二节 水声换能器的接收灵敏度的测量 .....	344
一、常规互易校准法 .....	345
二、比较法 .....	349
三、测试条件 .....	350
第三节 水声换能器及基阵的发射响应和轴向声压的测量 .....	355
第四节 水声换能器及基阵的指向性图的测量 .....	359

# 第一章 水声换能器及基阵的概述

在本章中，我们将简要阐明水声换能器及基阵在水声设备中所占有的地位和所起的作用，它们的分类、研究方法及主要性能指标。

## 第一节 水声换能器及基阵在水声设备中的地位和作用

近年来，许多国家为了提高潜艇作战能力和增强反潜能力，都在努力加强水声技术的研究。其原因是：水声设备依旧是水下最有效的检测装备，即利用声波来携带信息从而完成对水下目标进行探测和识别的装置。同时，为了开采丰富的海洋资源，特别是对海底石油资源勘探及采集，水声设备亦是一种很有效的工具。世界上很多国家为了加速海洋开发事业的进程，大力进行民用水声设备的研究。

水声设备主要依靠声波来传递信息，显然，这种水声信息设备必须具有一种装置，它既能把电信号转换成声信号，并使这种声波在海洋中传播，遇到目标时产生反射；同时它又能从反射声波中吸取声信号，又把声信号变成电信号，经放大后送到显示器进行观察和识别。满足上述要求的装置便是换能器。对于近代的大型水声设备来说，上述任务将由换能器组成的水声基阵来完成。依据近代信息论观点来看，一台水声检测设备可视为一部水声信息处理装置，并且声基阵将作为参与信号时-空处理中的空间处理器。综上所述，换能器（或基阵）是水声设备中必不可少的关键部件，而且它们是水声检测设备区别其他检测设备（如雷达等）的标志之一。作为水声工程技术人员，当然应对它具有一定的理论知识。对于从事本专业的学生来讲，显然要求能掌握它的最基本的工作原理和测量技术，并要求能了解换能器及基阵的设计思想、具有一定的制造工艺知识和实践能力，为今后工作打下基础。

## 第二节 水声换能器及基阵的分类

### 一、水声换能器的分类

由前节可知，水声换能器是实现电声能量互换的器件。当它处于发射状态时，它把电磁振荡能转换成机械振动能，从而推动水介质进行振动，亦即辐射声能；当它处于接收状态时，它的机械振动系统受到水中声压的作用而产生振动，换能器再把机械振动能转换成电磁振荡的能量。依据工作状态的不同，把换能器分成二类：一类称发射器，即把电磁能转换成声能的换能器；另一类称接收器（或水听器），即把声能转换成电磁能的换能器。实现电声能量之间的转换可通过二种不同的途径来达到：一种可借助于电场中的电-力效应来达到；另一种可借助于磁场中的磁-力效应来实现。因此按其物理效应的不同，它又分为两大类：一类是由电-力效应形成换能的器件，简称电场性换能器；另一类是由磁-力效应形成换能的器件，简称磁场性换能器。

在上述两大类换能器中，再根据物理效应和物质结构上的不同，可再分为若干类型。



- |           |   |               |
|-----------|---|---------------|
| 具有磁场性的换能器 | } | 1. 电动式换能器     |
|           |   | 2. 电磁式换能器     |
|           |   | 3. 磁致伸缩式换能器   |
|           |   | 4. 超导电式换能器    |
| 具有电场性的换能器 | } | 1. 电容式换能器     |
|           |   | 2. 压电单晶换能器    |
|           |   | 3. 压电陶瓷换能器    |
|           |   | 4. 高分子压电换能器   |
|           |   | 5. 铁电反铁电相变换能器 |

目前水声领域中应用最广泛的换能器是压电陶瓷换能器，其原因在于它的性能和制作工艺比其他类型换能器有较多的优点。在本书中主要讨论几种应用较多的压电陶瓷换能器。由于事物总是辩证地螺旋式向前发展的，很难说某种类型换能器完全可取代其他类型换能器，所以对目前也有应用的磁致伸缩换能器在第三章作简要地介绍。至于其他类型的水声换能器，由于当前水声设备中应用较少，就不一一介绍了。倘若读者真正掌握了本书重点讲解的基本换能原理，则分析和研究其它类型换能器的工作特性问题时亦不会产生很大困难。

## 二、水声基阵的分类

由于近代声呐向低频、大功率（兆瓦级）、高搜索率等方向发展，单个换能器已无法满足上述综合性的要求，必须采用换能器组成的基阵来达到近代声呐的技术指标。一般讲来，基阵由许多高效率、高灵敏度和一致性较好的换能器来构成。它的作用：在辐射时，它能把声能尽可能地集中到某一指定方向上，而在其他方位上尽量减少；在接收时，它要能抑制干扰，而又能增强待测信号能量。因此按照工作状态不同，可分为发射阵和接收阵。根据相位叠加原理，不论发射阵还是接收阵，上述问题皆可归结为如何考虑它的空间响应问题——在空间各点因声信号到达该点的程差不同，由不同程差引起相位差的差异，依据相位叠加原理，将在空间形成不同声压（或振速）的振幅分布；或者说是如何考虑基阵的指向性问题。在信息处理方法及数字技术尚未引入水声系统的时候，人们经常通过把换能器排列成不同的几何形状，从而取得某种特定的指向性。运用上述方法所构成的基阵称常规基阵。依据基阵的几何形状不同，常规基阵分为：（1）线列阵；（2）平面阵；（3）圆柱阵；（4）球壳阵；（5）球体阵；（6）马蹄形阵等等。

当数字技术及信息处理方法运用于水声系统后，产生了许多新型的基阵。今将目前已采用的和正在研制的几种比较重要的新型基阵简单地介绍如下。

1. 数字相控发射阵：即利用数字技术进行相位补偿。它的优点是可以不转动基阵，而使辐射波束在所要观察范围内实现波束的电扫描。这样一来，基阵尺寸可做得大一些。

2. 数字多波束接收阵：它主要采用多通道数字时延技术和数字波束形成运算器，在空间同时形成若干个指向性波束。利用这种技术，使得用一个基阵能同时探测若干个方

向的目标,提高了基阵的搜索率和利用率。

3. 相关接收基阵:利用在基阵中不同位置的水听器上所接收到信号与噪声的相关特性(时间相关特性、空间相关特性)的差异,从而对收到的信号加噪声进行相关处理。它具有改善信噪比,提高声呐作用距离的能力。

4. 自适应基阵:它是当前世界各国重点研制的新型基阵。它把统计决策理论及自适应技术应用于水声系统。它把基阵看成空间处理器;同时又使基阵所形成的指向性图案能随外界声场的变化而变化。它能最大限度地抑制人为和环境干扰,从而获得最佳的检测能力。

各类新型基阵是在常规基阵的基础上引伸出来的,我们将着重讨论常规基阵的原理和特性,对新型的基阵仅作简单的介绍。

### 第三节 水声换能器的研究方法及它的一般关系式,

#### 水声基阵的研究方法

##### 一、水声换能器的研究方法及它的一般关系式

水声换能器的研究方法有下列几种:(1)等效网络法——人们首先运用机电类比法把换能器等效为一个电网络,然后通过等效网络来分析其工作特性;(2)瑞利法——利用瑞利原理求出换能器的等效参数,然后建立等效网络对换能器的特性进行分析;(3)有限差分法和有限元法——首先把复杂结构的换能器化整为零,进行离散化,建立局部的表征其特性的矩阵,然后集零为整,把局部的矩阵综合为表征整个换能器的特性整体矩阵,再通过计算机对它进行数值计算,求出其特征量,相应地建立起等效网络,通过它再算出其他的特性。后两种方法与前面的方法密切相关。当我们掌握第一种方法后,其他两种亦就不难理解。下面我们着重讨论第一种方法。任何一种换能器必含有电路,机械振动系统和机电耦合部件,三者是有机结合在一起形成一个统一整体。由于换能器本身包含着电路的、机械的(它其中又包括声的)振动系统,因此在分析问题时应包含电的、力的和声的三种不同处理方法。我们是否能寻找出一种统一处理的方法呢?下面我们来回答上述问题:对于电路系统的特性,众所周知,运用电网络分析法是最方便的。对于机械振动系统,倘若我们应用机电类比,可把一个机械振动系统等效为一个网络,亦可通过网络分析来说明机械振动系统的特性。至于,声振动,从本质上来讲,它本身就是机械振动的一种特殊形式。当机械振动系统推动水介质进行振动而形成声能辐射时,相当于在机械振动系统的等效网络中增加一个辐射阻抗,在这辐射阻抗上所具有的能量,即代表辐射的声能(其中包括有功和无功分量)。这样一来,三种不同的振动系统(机、声和电)的特性皆可通过网络分析法来取得。但机电相互间的联系在网络中究竟怎样来表示呢?这是我们尚待说明的问题。前已指明,在换能器中,机电能量的转换是借助于电场或磁场中的某种物理效应来实现的。而且机电能量是相互转换的,因此任何一种能实现机电能量互换的物理效应必须包含两个方面的效应(两重性):其中一个为“力”效应;另一个为“电”效应。两者是同时并存的。所谓“力”效应,即当换能器电路中存在电流或电压时,能产生作用于机械振动系统上的推动力。例如:在物理学中讲过的电动力效应, $F_l = BIl$ ,它就是一种“力”效应。对于其他能实现机电能量互

换的物理效应，如压电效应、磁致伸缩效应（这些效应在后面章节中将作详细讨论）。它们皆能产生各自的力效应。在这里，我们采用一般关系式来表示，可写成

$$F_i = T_{me} I \quad (1.3.1)$$

上式左边为机械量， $F_i$  为作用在机械振动系统上的推动力，右边  $I$  为电路中电流，它为电学量。 $T_{me}$  为转换系数。例如对于电动力效应来讲： $T_{me} = Bl$ 。对于其他不同的物理效应， $T_{me}$  将对应于不同的量。

另一个是“电”效应。所谓“电”效应，即当换能器机械振动系统中存在振动速度  $v_m$  时，在电路中将产生反馈电压  $E$ 。例如，动圈在磁场中运动时，依据电磁感应定律所产生的感应电势  $E = -Blv_m$ ，它就是一种“电”效应。对于其他能实现机电能量互换的物理效应亦皆有各自的“电”效应。我们亦采用一般关系式来表示，可写成

$$E = T_{em} v_m \quad (1.3.2)$$

上式中  $T_{em}$  表示由机械量变成电学量的转换系数。一般又称它为机电转换系数。例如对于动圈在磁场中运动的情况， $T_{em} = -Bl$ ，亦即

$$T_{em} = -T_{me} \quad (1.3.3)$$

这里我们附带说明一下：对于磁性换能器， $T_{em}$  与  $T_{me}$  符号相反；对于电性换能器  $T_{em}$  与  $T_{me}$  符号相同，这在后面章节再说明。

式 (1.3.1) 及式 (1.3.2) 是表征换能器在能量转换过程中机电参变量的关系式。通过它们可对换能建立一个统一的等效网络。如果有一个外加电压  $V$  作用在换能器电路系统的输入端，电路本身的电阻抗为  $Z_e$ 。在电路中出现电流  $I$  时必定产生“力”效应  $F_i = T_{me} I$ 。 $F_i$  为推动机械振动系统进行振动的推动力。当机械系统进行振动，令其振速为  $v_m$ 。由于“电”效应与“力”效应同时并存，在电路内必产生电压  $E = T_{em} v_m$ （对应于动圈式换能器  $E = -Blv_m$ ），因此在换能器电路系统中应存在下列关系

$$V + T_{em} v_m = I Z_e \quad (1.3.4)$$

或写成

$$V = I Z_e - T_{em} v_m \quad (1.3.5)$$

若令换能器中机械振动系统中的机械阻抗为  $Z_m + Z_r$ ， $Z_m$  为机械振动系统中本身的阻抗， $Z_r$  为辐射阻抗。因此机械振动系统应有下列关系

$$F_i = T_{me} I = v_m (Z_m + Z_r) \quad (1.3.6)$$

显然， $v_m Z_r$  仍代表振动系统对水介质的作用力，我们令它为  $F'$ ，则

$$F' = v_m Z_r \quad (1.3.7)$$

因而式 (1.3.6) 可改写成

$$F' = T_{me} I - v_m Z_m \quad (1.3.8)$$

倘若我们用水介质的反作用力  $F = -F'$  来代替机械振动系统对水介质的作用力  $F'$ 。利用式 (1.3.5) 及式 (1.3.6)，可画出如图 1.3.1 那样的机电耦合的四端网络。

在图 1.3.1 中  $v_m$  是指向输出端的。为了能给出对称形式的四端网络，我们令  $v = -v_m$ ，可把式 (1.3.5) 及式 (1.3.8) 改写成

$$V = I Z_e + T_{em} v \quad (1.3.9)$$

$$F = T_{me} I + v Z_m \quad (1.3.10)$$

其中  $F = v Z_r$ ，那么图 1.3.1 可改画成图 1.3.2，它相当于亨特 (Hunt) 所表示的机电等效图（对称机电耦合网络）。

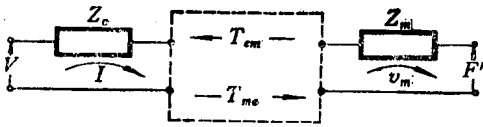


图1.3.1 换能器的机电耦合四端网络

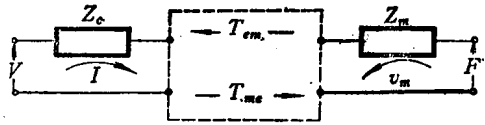


图1.3.2 换能器的对称机电耦合网络

通过以上分析, 我们可知, 整个换能器可等效为一个机电耦合网络。以后我们会看到, 对上述等效图进行分析, 可方便地求出表征换能器工作特性的一些重要的关系式。

## 二、水声基阵的研究方法

对于常规基阵, 人们常遵循相位叠加原理推导出远场的指向性函数, 并利用傅立叶法等改善其指向特性。

对于新型的基阵, 譬如说, 数字多波束阵, 在原有基阵理论引入数字技术。人们常把基阵看作时-空处理器中的空间处理器, 其中有人运用相关理论来研究基阵在有干扰声场中能取得所谓基阵的增益(其定义后面再讲), 在此基础上, 再引入自适应技术构成自适应阵。对于相关基阵理论, 我们将作简略讨论, 而自适应基阵理论已超出本书的范围, 有兴趣者可阅专著。本书将着重讨论常规基阵理论。

## 第四节 水声换能器及基阵的主要性能指标

### 一、水声换能器的主要性能指标

水声换能器的性能指标是很多的, 有工作频率、机电耦合系数和效率等。但对一个实际使用的换能器, 并不是不分场合的一律提出各种要求, 而是根据它的用途或使用场合分别提出要求。例如对发射阵上使用的换能器的性能指标与接收阵上使用的水听器的性能指标就不一样。

#### 1. 发射与接收换能器共同要求的指标

##### (1) 工作频率

换能器的工作频率是由水声设备所要求的工作频率来确定的。水声设备的工作频率是在特定的条件下, 依据声呐方程来选定的。同时换能器的其他一些重要性能指标, 如指向性、发射声功率和接收灵敏度等均随频率变化。我们要根据上述变化规律和实际要求来准确选定换能器的工作频率。对发射器来讲, 一般皆使它工作在谐振基频上, 因它能获得大功率发射和高效率的特性; 对水听器来说, 要求它有平坦的接收响应。军用设备中的换能器的工作频率范围大约在几百赫到几十千赫。

##### (2) 有效机电耦合系数 $k_{eff}$

它是衡量换能器在能量转换过程中, 能量互相耦合程度的一个物理量, 它由下式定义

$$k_{eff}^2 = W_{12}^2 / (W_1 W_2) \quad (1.4.1)$$

其中  $W_{12}$  为换能器中的耦合能;  $W_1$  为电能;  $W_2$  为机械能。

因为换能器的很多重要特性, 如电极限功率、声极限功率和最佳品质因素等皆与它

有关, 它的优劣决定上述特性好坏。它是评定换能器的一个综合指标。

### (3) 频带宽度和机械品质因素 $Q_m$

为了使信号的失真度保持在一定范围内、提高信息流通量及保证批量生产合格率, 换能器的频带宽度不能太窄。在换能器的发射灵敏度或接收灵敏度响应曲线上, 低于最大响应 3 分贝的两个频率差定义为换能器的频带宽度。对于谐振式换能器, 这个频带宽度  $\Delta f$  由换能器的机械振动系统的品质因素  $Q_m$  来确定

$$\frac{1}{Q_m} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (1.4.2)$$

其中  $f_0$  为机械共振频率。 $Q_m$  与换能器的材料、结构尺寸、机械损耗及辐射阻抗有关。机械损耗和辐射阻愈大, 及在共振频率附近处的等效质量小, 则  $Q_m$  愈低和带宽变宽。

### (4) 指向性

一个发射器或接收器的线度, 能和它所在介质中的声波波长相比拟时, 它发射声场中的声压或接收灵敏度随着方位的不同具有一定分布, 这就表征换能器具有指向性。它通常由指向特性函数来描述。

① 发射器指向特性函数的定义: 在远离发射器的声场中, 以发射器的有效声中心为球心的球面上, 不同方向  $(\alpha, \theta)$  处的声压幅值  $p(\alpha, \theta)$  与最大值方向上的声压幅值  $p(\alpha_0, \theta_0)$  的比值称该发射器的指向性特性函数, 以  $D(\alpha, \theta)$  表示

$$D(\alpha, \theta) = \frac{p(\alpha, \theta)}{p(\alpha_0, \theta_0)} \quad (1.4.3)$$

其中,  $\alpha$  是声线在  $xoy$  坐标平面上的投影与  $y$  轴的夹角;  $\theta$  是声线与  $z$  轴的夹角。

② 接收器的指向特性函数: 在平面声波作用下, 水听器的输出电压  $V(\alpha, \theta)$  与最大响应输出电压  $V(\alpha_0, \theta_0)$  的比值。依据声场的互易原理, 同一换能器的接收指向特性函数与发射的相同。在提到指向性时, 必须说明频率。

### (5) 阻抗特性

换能器作为机电耦合网络, 利用这种网络很易求出它的等效输入阻抗。由于换能器在电路上要与发射机末级回路和接收机输入电路相连接, 只有知道它的等效电阻抗时, 才能获得最佳匹配。换能器的输入等效电阻抗和输出等效电阻抗的大小一般在几欧到几千欧范围内。

还有其他的特性指标如耐静水压、耐振和抗冲击、温度稳定性及防海水腐蚀和海生物寄生等。我们就不一一说明了。

## 2. 对发射换能器着重要求的性能指标

### (1) 发射声功率

发射声功率是直接影响声呐作用距离的物理量。在一定频率和采取某种信号处理方法的情况下, 显然, 换能器的发射声功率愈大, 声信号传播愈远, 声呐作用距离亦就愈远。

发射声功率是描述发射器在单位时间内向水介质中辐射多少能量的物理量。在一般情况下, 换能器的发射声功率随工作频率变化, 在共振频率时具有最大的辐射功率。换能器的最大发射声功率受到额定电压 (对压电换能器)、额定电流 (对磁致伸缩换能器)、机械强度及空化条件等限制。

## (2) 发射效率

发射换能器是把电能转变为机械能，再把机械能转变为声能的。因为电振荡和机械振动过程中总要产生损耗，所以电功率中只有一部分转换成机械功率；而机械功率中又只有一部分变成声功率。效率就是描述这种功率转换程度的物理量。人们常用下列三种效率来描述上述过程：即机电效率  $\eta_{em}$ 、机声效率  $\eta_{ms}$ 、电声效率  $\eta_{es}$ ，它们的定义分述如下：

机电效率  $\eta_{em}$ ：它等于机械振动系统所具有的全部有功功率  $P_m$  对于输入换能器的总的有功电功率  $P_e$  之比，记作

$$\eta_{em} = \frac{P_m}{P_e} \quad (1.4.4)$$

其中， $P_e = P_{em} + P_m$ ， $P_{em}$  表示换能器电路系统中电磁损耗的有功功率， $P_m$  包括换能器机械振动系统中的机械损耗功率和辐射出去的声功率。

机声效率：它等于换能器发射出去的总声功率  $P_s$  对机械振动中所具有的总机械功率  $P_m$  之比，记作

$$\eta_{ms} = \frac{P_s}{P_m} \quad (1.4.5)$$

其中  $P_m = P_{ms} + P_s$ ， $P_{ms}$  表示换能器机械系统中的机械损耗功率。

电声效率：是指换能器中，将电能转换成声能的总效率，它等于总的发射声功率  $P_s$  对输入换能器总的有功电功率  $P_e$  之比，记作

$$\eta_{es} = \frac{P_s}{P_e} = \left( \frac{P_s}{P_m} \right) \times \left( \frac{P_m}{P_e} \right) = \eta_{ms} \times \eta_{em} \quad (1.4.6)$$

即换能器的电声效率等于它的机电效率与机声效率的乘积。

对发射换能器来说，上述两种是它的最主要的性能指标。有时也用到下列两种性能指标，如发射灵敏度（即发射响应）和发射器的非线性失真系数。详细情况在用到时再说明。

### 3. 对接收换能器着重要求的性能指标

#### (1) 接收灵敏度

由于声波在接收器表面会产生衍射，一般说来，实际作用在接收器表面的声压  $p_r$  不同于入射声波的声压  $p_i$ （自由场声压），二者关系为

$$p_r = \gamma p_i \quad (1.4.7)$$

其中  $\gamma$  称声场的畸变系数。当接收表面的几何尺寸远小于入射波长时， $\gamma$  趋近于 1。用自由场声压  $p_i$  定义的灵敏度称自由声场灵敏度；用实际作用在接收表面的声压  $p_r$  定义的灵敏度称声压灵敏度。它们之中分别又有电压灵敏度和电流灵敏度。所以接收器的灵敏度有：自由场电压灵敏度、自由场电流灵敏度、声压电压灵敏度和声压电流灵敏度等四种。它们的定义分别说明如下：

自由场电压灵敏度  $M_e$ ，是换能器输出端的开路电压  $e_{oc}$  与声场中引入换能器前在放置换能器处的自由场声压  $p_i$  的比值，即

$$M_e = \frac{e_{oc}}{p_i} \quad (1.4.8)$$

其中  $e_{00}$  的单位是伏； $p_l$  的单位是微帕； $M_e$  的单位是伏/(微帕)，目前国内常用的是(微伏)/(微巴)。自由场电压灵敏度的大小与平面波相对于换能器的传播方向有关。如果换能器是无方向性的，那末不论平面波从那个方向传来，它均相同；如换能器有方向性，它就有不同的大小。

当用分贝来表示时，又称自由场电压灵敏度级。单位是分贝。表示式为

$$M_{e,i} = 20 \log \left[ \frac{M_e}{M_{e0}} \right] (\text{分贝}) \quad (1.4.9)$$

其中  $M_{e0}$  为电压灵敏度的基准值，所取单位应与  $M_e$  相同。通常采用  $M_{e0} = 1$  伏/微帕。

自由场电流灵敏度  $M_i$ ，是换能器输出短路电流  $i$  与换能器未放入平面波声场中之前该点的自由场声压  $p_l$  的比值，即

$$M_i = \frac{i}{p_l} \quad (1.4.10)$$

其中  $i$  的单位是安培； $p_l$  的单位是帕； $M_i$  的单位是(安培)/(微帕)。

自由场电流灵敏度的大小亦与平面波相对于换能器的传播方向有关。

接收器的声压电压灵敏度与声压电流灵敏度的定义与上述定义类似。只要将自由场声压  $p_l$  改为实际作用于换能器表面声压  $p_r$  即可。

接收灵敏度是接收器的一个重要性能指标，其中常用的是自由场电压灵敏度。本书中后面所提到的“接收灵敏度”即是指自由场电压灵敏度。

## (2) 等效噪声压

当换能器用作接收器，特别是把它用作低频宽带接收器。由于接收器内部的电声转换元件(例如压电陶瓷片)在一定温度下内部分子的热运动等将产生噪声，称为自噪声或固有噪声。这自噪声的大小决定了水听器能够测量的有用信号的最小可能值。它包含有许多频率成分。可取在一赫频带宽度上的均方根电压来度量其大小。

设有一正弦声波投射到水听器上(如果水听器尺寸不比波长小很多，则应当沿正入射方向投射到振动面上)，从而此电压输出的有效值等于水听器自噪声在一赫带宽上的均方根电压值，则入射声压的有效值叫做等效噪声压。水听器等效噪声压在数值上等于自噪声在一赫带宽上的均方根电压值与水听器灵敏度的比值。等效噪声压对1微巴基准声压所取的分贝数，称作水听器的等效噪声声压级。

## 二、水声基阵的主要性能指标

由于近代声呐向低频大功率方向发展。近代声呐的技术要求必须由许多基元换能器所构成的基阵来达到。它的性能指标很多，我们仅挑选其中最主要的几个特性指标来加以说明。

### 1. 基阵的指向特性函数

(1) 发射基阵的指向特性函数的定义：它与换能器所定义的指向特性函数相类似。当基阵中基元间隔大于半波长(亦即可忽略基元间相互作用时)，在以发射阵的等效中心为球心的大球面上(在远场)，不同方位  $(\alpha, \theta)$  处的声压幅值  $p(\alpha, \theta)$  与最大响应方向上的声压幅值  $p(\alpha_0, \theta_0)$  之比值称为该发射阵的指向特性函数(或方向特性函数，或指向性图函数)，以  $D(\alpha, \theta)$  表示；

$$D(\alpha, \theta) = \frac{p(\alpha, \theta)}{p(\alpha_0, \theta_0)} \quad (1.4.11)$$

### (2) 接收阵的指向特性函数 (方向特性函数)

依据声场互易性, 对于互易换能器所组成的阵来说, 接收阵的指向特性函数与发射阵的相同。

### 2. 指向性因素 $R_0$ (又称轴向聚集系数 $\gamma_0$ )

(1) 发射阵的指向性因素  $R_0$  的定义: 在远离发射阵的声场中, 在某一固定距离和最大响应方向上的声强度  $I_{\max}$  与同距离处取各方向声强的平均值声强  $\bar{I}$  (或声压有效值平方的平均值  $\bar{p}^2$ ) 的比值, 它表示为

$$R_0 = \frac{I_{\max}}{\bar{I}} = \frac{p_{\max}^2}{\bar{p}^2} \quad (1.4.12)$$

指向性因素  $R_0$  是描述发射阵的声能量集中程度的一个物理量。它与方向特性函数  $D(\alpha, \theta)$  之间的关系为

$$R_0 = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\pi [D(\alpha, \theta)]^2 \sin\theta d\theta} \quad (1.4.13)$$

(2) 接收阵的指向性因素  $R_0$ : 它等于水听器阵由其产生最大响应输出电压的平方, 与具有同一频率和同一均方声压的声波, 从各方向同时到达基阵时, 在其电路输出端产生电压的平方均值的比值。一般讲来, 对于互易换能器所组成的阵, 上述接收阵的指向性因素与发射阵的相同。把  $R_0$  取以 10 为底的对数乘 10, 即称之为指向性指数, 以  $DI$  表示,  $DI = 10 \lg R_0$  分贝。

### 3. 方向锐度角

它是描绘基阵 (或换能器) 指向性图上 “主波束” (又称主瓣) 所张的角度。亦即在主瓣两旁第一个极小值之间的夹角, 以  $\Theta$  来表示, 它如图 1.4.1 所示。

### 4. 波束宽度

用作基阵 (或换能器) 的波束宽度为: 在一频率上, 在包含主轴的参考平面内, 主轴上最大响应 (以 0 分贝表示) 与主轴两边比主轴最大响应低某一分贝数的两点间的开角。习惯上波束宽度是指相应于低 3 分贝的开角 (亦即半功率点之间的开角)。如图 1.4.1 所示。

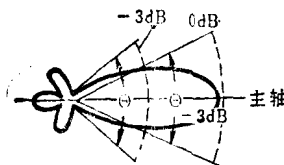


图1.4.1 基阵的指向性图  
(方向锐角度、波束角等)

### 5. 接收基阵的阵增益

在被动式声呐中所装备的水听器阵, 它是在噪声背景下来检测信号的。它作为时空信息处理器中的空间器, 则阵增益表示信噪比改善的一种描述。这种改善是由于基阵具有指向性, 能抑制与信号不是同方向来的噪声而获得的。假设有一信号噪声场, 且信号



能量与噪声能量相等（信号不限于是单频、单方向性的平面波，噪声也不限于是各向同性均匀的扩散场），如果将具有指向性的基阵放到上述假定的信号噪声场中，且基阵的最大响应对准信号源，则基阵输出的信噪比与采用宽带无指向性水听器测得的信噪比之比值，再取以 10 为底的对数并乘以 10 来表示，它就是该基阵的阵增益，记为

$$G(\text{基阵增益}) = 10 \lg_{10} \left[ \frac{(S/N)_{\text{基阵}}}{(S/N)_{\text{无方向性水听器}}} \right] \quad (1.4.14)$$

对于各向同性均匀分布的噪声场，倘若我们考虑仅接收单频信号，那么基阵增益  $G$  与指向性指数值相同。

在许多特定情况下，阵增益与相关处理增益中的空间增益是一致的。

换能器及水声基阵的主要性能指标暂时简要地介绍到这里，在今后讨论各种换能器及基阵时，再进行更详细的说明。