

~~334470~~

# 水聲換能器講義

## 上册

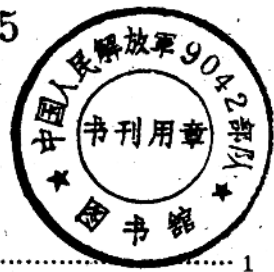
周福洪 郑士杰 編

內部材料

1962年8月

334470

47985



# 上册目录

## 第一章 水声换能器绪论

§ 1—1 水声换能器的地位与任务	1
§ 1—2 水声换能器的分类	2
§ 1—3 水声换能器的研究方法	3
*§ 1—4 水声换能器的主要性能指标	5

## 第二章 电动式水声换能器

§ 2—1 电动式换能器的原理结构图及机电转换关系式	11
§ 2—2 电动式发射器的分析	13
(一) 机械振动方程式	13
(二) 电路状态方程式	14
(三) 发射器的等效图	15
(四) 发射器的功率与效率	18
§ 2—3 电动式接收器的分析	20
(一) 接收电压	20
(二) 电路状态方程式	20
(三) 机械振动方程式	20
(四) 接收器的等效图	21
§ 2—4 电动式换能器的可逆性	23
§ 2—5 电动式换能器的优缺点和计算举例	25



## 第三章 电磁式水声换能器

§ 3—1 铁磁材料的基本特性	31
§ 3—2 电磁式换能器工作原理与发射、接收特性	33
(一) 电磁式换能器的原理结构图	33
(二) 电磁式换能器的物理效应及其能量转换关系式	33
(三) 电磁式换能器的发射—接收特性	35
**§ 3—3 电磁式发射器的分析	38
(一) 磁路的基本知识	38
(二) 电路状态方程式	41
(三) 机械振动方程式	43
(四) 等效电路图	44
(五) 发射器的功率与效率	46
**§ 3—4 电磁式接收器的分析	47
(一) 基本工作原理	47
(二) 开路接收电压灵敏度	48
**§ 3—5 电磁式换能器的计算举例	48

## 第四章 磁致伸缩式水声换能器

引言: 磁致伸缩换能器的实际应用与有关知识介绍	52
-------------------------	----

DK27/10

§ 4-1 磁致伸缩效应	55
(一) 纵向磁致伸缩正效应	55
(二) 纵向磁致伸缩反效应	59
(三) 横向磁致伸缩效应与其他磁致伸缩效应	60
(四) 用磁畴学说来解释磁致伸缩现象	60
(五) 机电转换系数与机电耦合系数	62
*(六) 磁致伸缩效应对铁磁材料的机磁性能的影响	64
§ 4-2 圆环形磁致伸缩发射器的分析	69
(一) 机械振动方程式	69
(二) 电路状态方程式	72
(三) 发射器的等效图	73
(四) 发射器的功率和效率	76
§ 4-3 圆环形磁致伸缩接收器的分析	78
(一) 机械振动方程式	78
(二) 电路状态方程式	79
(三) 接收器的等效图	79
(四) 接收器的工作特性	81
§ 4-4 圆环形磁致伸缩换能器的计算举例	82
§ 4-5 磁致伸缩换能器的阻抗分析和性能测试	85
(一) 阻抗分析	85
(二) 利用圆图求换能器的机电参量	89
** (三) 转速测定法	91
(四) 换能器功率特性曲线的测量和应用	99
(五) 换能器接收灵敏度的测量	95
§ 4-6 棒型磁致伸缩式发射器的分析	95
引  言	95
(一) 电路状态方程式	96
(二) 机械振动状态方程式	97
(三) 对称盖板的双面发射器的发射特性	102
(四) 对称盖板的单面发射器的发射特性	108
*(五) 不对称盖板的棒型发射器的分析	111
§ 4-7 棒型磁致伸缩接收器的分析	114
(一) 双面接收器特性	115
(二) 单面接收器特性	117
§ 4-8 棒型磁致伸缩换能器的计算举例	118
§ 4-9 介绍几种主要的磁致伸缩换能材料的性能	124
(一) 金属磁致伸缩换能材料	124
(1) 金属镍	124
(2) 铝铁合金	127
(3) 镍铁合金	131
(4) 钴铁合金	133

(5) 鍍結合金 .....	134
(二) 鐵氧體磁致伸縮換能材料 .....	135
(4) 鐵氧體材料的結晶結構 .....	136
(2) 鐵氧體材料的磁生形成淺說 .....	138
(3) 磁致伸縮鐵氧體的機磁性能 .....	138
(4) 鐵氧體磁致伸縮換能器 .....	144
<b>附表一：幾種主要磁致伸縮換能材料的性能參數一覽表 .....</b>	<b>150</b>
<b>附表二：常用材料的聲學特性參數表 .....</b>	<b>146</b>
<b>附表三：單位換算表 .....</b>	<b>147</b>

# 第一章 水聲換能器緒論

## 引 言

本章主要內容是簡要介紹水聲換能器的一些基本概念和基本問題，共分如下四節：第一節是介紹水聲換能器的地位、作用和任務；第二節是介紹水聲換能器的分類；第三節是介紹水聲換能器的研究方法；第四節是介紹水聲換能器的性能指標。

### § 1-1 水聲換能器的地位和任務

水聲換能器是指在各種水聲設備中所使用的換能器。所謂“換能器”，顧名思義可知，它是指那些能將某種形式的波動能量轉換成另一種形式的波動能量的裝置或器件。簡言之，凡是那些能實現任何形式的能量間互換的設備，都可以統稱為“換能器”。如能實現電聲能量互換的裝置叫電聲換能器；實現機械能與聲能互換的裝置叫機械換能器；實現光電波動能量互換的設備叫光電換能器；等……。由於電聲換能器比其他種換能器具有更大的優越性，例如，能量轉換的效率高，產生和變換電的振盪信號很方便，所產生的信號頻率也可控制得比較準確，等……。因此，在現代的各種水聲觀通設備中最常用的換能器，就是一種適用於水下工作的特殊的電聲換能器。在本講義中，我們所研究的也只限於此種水聲換能器。

水聲換能器是各種水聲觀察通訊設備中所必不可少的極為重要的一個組成部分。大家知道，在水面上或在陸上進行觀察和通訊時，最常用的設備是雷達和無線電設備，它們都是利用電磁波來傳遞信息的，由於電磁波在空氣中傳播時衰減很小，因而用它們能在空氣中觀察和通訊距離很遠。但是電磁波在海水中傳播時衰減就很大，所以，雷達和無線電設備是不能利用來有效的對水下觀察和通訊的。到目前為止，只有聲波在水中傳播時衰減較小，因此在水下可以利用聲波攜帶信息傳送到較遠的距離上。所以現今的水下觀通設備多半是借助於聲波來完成對水下觀察和通訊任務的，因此我們又常稱這些設備為水聲觀通設備。很明顯，這種水聲觀通設備必須要有一個能產生、發射和接收聲波的器件，這就是水聲換能器。一般的水聲觀通設備都可看成是由如下兩大部分組成：一是電子設備：產生、放大、接收和指示電信號的設備，它具體包括發射機、接收機、指示器等很多電子設備；二是水聲換能器：它是完成電聲信號轉換的。如圖 1-1-1 所示，為幾種常用的水聲設備的簡單方塊圖。

從以上三個圖中所以看出：水聲換能器乃是電子設備與水下信號聲場間相互聯繫的紐帶。顯然可以認為：水聲觀通設備中的換能器與無線電、雷達設備的天線是地位相當、作用相似的，都是起着耳目的作用。只不過換能器是發射和接收聲波信號；而天線是發射和接收電磁波信號，因此，水聲換能器不僅是水聲觀通設備的重要組成部分，而且也是水聲觀通設備區別於一般無線電設備的標誌之一。所以鑑定一部分水聲儀器性能的好壞，往往是首先看它的換能器性能如何。作為海軍水聲工程技術幹部，當然應該對它具有一定的知識和了解，因此水聲換能器課程是我們專業的一門重要的課程。

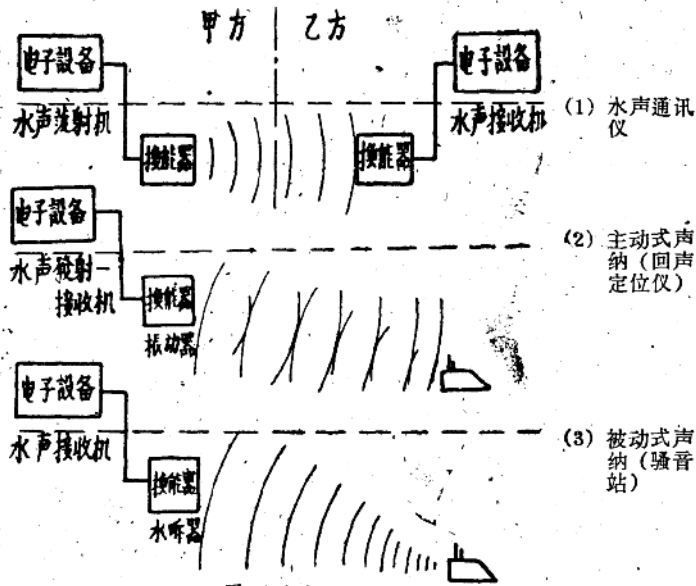


图 1-1-1

如上所述可知,水声换能器的任务,就是产生声波信号并向水介质中发射和接收声波信号。具体来讲,当换能器工作在发射状态(此时简称它为发射器),它的任务就是把电的振盪能量先转换为机械振动系统的振动能量,再推动水介质向外辐射声波能量;当换能器工作在接收状态(此时简称它为接收器),它的任务与发射过程相反,是先把水介质中的声波信号通过机械振动系统振动耦合到电路中并变成电信号,然后再把电信号送到接收和指示设备上。

在本节最后,我们再附带说明一下本课程的内容和任务。本课程主要是讲解几种最常用的水声换能器的基本理论和分析研究的方法;指出各种换能器的发射特性和接收特性;并介绍有关水声换能器的测量实验和设计计算等知识,从而使学员通过本课程的学习,掌握水声换能器方面的最基本的一些知识。

### § 1-2 水声换能器的分类

水声换能器按其能量转换的原理来分,可分为两大类;一类是具有磁场的换能器;一类是具有电场的换能器。前者是借助于磁场的磁—力效应来实现电声能量互换的;而后者是借助于电场的电—力效应来实现电声能量互换的。但不论是那一类换能器都可看成是由两个基本部分所组成:一是电路系统部分,一是机械振动系统部分。在换能器内部,电路系统和机械振动系统之间是通过某种物理效应而相互发生联系的,从而完成机电能量之互换;在换能器外部,它的电路系统是与发射机的末级输出回路或与接收机的输入电路相匹配的,而换能器的机械振动系统,则以其振动表面与介质声场相匹配着。如

图1—2—1所示。

换能器的内部电路系统，通常总是包含一个电容 $C_0$ 或一个电感 $L_0$ 的储能元件。当

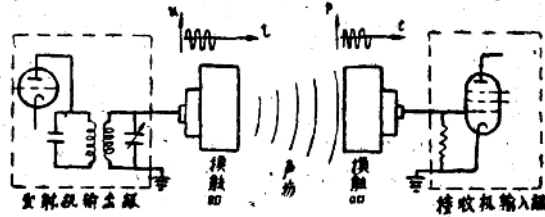


图 1-2-1

换能器工作在发射状态时，从发射机的输出级送来一个足够大的电振荡信号，这就引起其储能元件的电场或磁场发生变化，而借助于电场或磁场的某种“力效应”，就可对换能器的机械振动系统产生一个推动力，使之进入振动状态，从而向水介质中辐射出声波信号，这就完成了发射声信号的任务。当换能器工作在接收状态时，其能量转换过程与上相反，首先是声场中的信号声压作用在换能器的振动面上，使其机械振动系统进入振动状态，而机械振动系统发生振动时，就会引起换能器的电路储能元件上的电场或磁场发生相应的变化，借助于系统的某种“电效应”就在其电路系统中产生一个相应于声信号的应电势或应电流，这就完成了接收声信号的任务。很明显，具有磁场的换能器，其内部的储能元件一定是电感元件 $L_0$ ，而具有电场的换能器，其内部的储能元件一定是电容元件 $C_0$ 。

在上述两大类换能器中，又根据其工作原理或储能元件的具体形式不同，可再分为若干小类：

- |           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 具有磁场的换能器： | } | 1. 电动式。   |
|           |   | 2. 电磁式。   |
|           |   | 3. 磁致伸缩式。 |
| 具有电场的换能器： | } | 4. 压电式。   |
|           |   | 5. 电致伸缩式。 |
|           |   | 6. 电容式。   |

目前在水声观通设备中最常采用的是磁致伸缩式换能器、压电式换能器和电致伸缩式换能器，我们将在第四章和第五章中重点地介绍它们。电动式换能器和电磁式换能器是水声观通设备中最早采用的换能器，虽然在总的方面不如上述三类换能器的应用价值大，但是它们在水声测量设备和次声频收听系统中还有所应用，因此我们将在第二章和第三章中分别作一简要地介绍。至于电容式换能器，它在水声设备领域中并未得到充分使用就被淘汰掉了；只是在空气电声装置中它有比较广泛的应用。因此我们对它不作讨论。

### § 1-3 水声换能器的研究方法：

在近代声学的各个领域中，很普遍地应用着电学和无线电技术方面的研究方法和成果。因此，在声学基础的开头一章中就介绍了机电类比的概念。在电声学中，由于所讨

论的中心问题就是电声信号如何变换的问题，所以就离不开电子学的一些研究方法和基础知识了。例如，对应电的耦合网络、传输线、等效图和等效方程式，在这里就有机电的耦合网络、机械传输线、机电等效图和机电等效方程式等……。换能器本身就是一个机电耦合网络，因此我们经常是用电子学和声学的方法来讨论问题的。

在前一节中，我们讲述了换能器中的电声能量间的互换是借助于电场或磁场的某种物理效应来实现的；而且，不论是那种型式的换能器，它实现电声能量互换的物理效应均包括两个方面的效应：一个是“力效应”：把作用在换能器电路系统中的电流或电压转换为作用在机械振动系统的推动力的物理效应，即实现把电学量(电流或电压)转变为力学量(振速或力)的效应，如大家所熟知的电动力效应，电磁铁吸引衔片的力效应等……；另一个是“电效应”，把作用在换能器的机械振动系统上的力或振速转换为电路系统中的应电势或应电流的物理效应，即实现把力学量(或声学量)转换为电学量的效应，如大家所熟知的电磁感应定律等……。所以，根据各种换能器的“力效应”和“电效应”，我们就能得到它们的机电参量转换关系式也叫机电相关方程式，这是我们在研究换能器时首先应建立的一组关系式。

仅仅有了机电转换关系式还不能决定换能器的工作状态，还必须进一步求出它的电路系统的状态方程式和机械振动系统的状态方程式，只有这三组基本关系式都已确定了之后，换能器的工作状态才能完全被确定。所谓机械振动系统的状态方程式(又可简称为机械振动方程式)；就是描写一个换能器的机械振动系统，处于工作状态时，它的力与振速的关系式，也就是说，机械振动方程式是描写换能器的机械一边的振动特性的。而电路系统的状态方程式(又可简称为电路状态方程式)，是描写换能器的电路一边的振盪特性的，即描写电路系统中信号电压与信号电流之间的关系的。由于换能器的机械一边与电路一边是互相耦合的，所以，机械边的振动会影响到电路边的平衡，而电路边的变化也会影响到机械边的振动。因此我们常常可以利用以上三组基本关系式组合联立，来求得换能器的工作特性。

根据换能器的三组基本关系式，我们可以作出换能器三种形式的等效图。第一种是同时包含电路一边和机械一边的等效图，我们称之为“等效机电图”。第二种是把机械一边元件和参量通过机电转换完全化为电路一边的元件和参量，这样就把整个换能器等效成为一个纯电路系统，我们称此种等效图为“等效电路图”。第三种是将换能器等效为一个纯机械振动系统的等效图，我们称此为“等效机械图”。这些等效图的作用很大，利用它们可以很方便地求出换能器工作时的几个重要的性能指标。

以上我们只笼统地谈了谈对换能器的分析研究方法，没有举例加以具体说明，这是因为我们将在第二章以电动式换能器为例来详细说明这些分析研究方法，包括推导三组基本关系式和建立三种等效图，并利用它们来求出换能器的工作性能。

本节最后，我们想把换能器与大家所熟悉的变压器作一简要的对比，以加强大家对换能器的了解：

由于我们总是要求各种水声换能器，要能在相同的频率下来进行电声能量的互换，所以也有人认为：必须能在相同的频率下实现电振盪能与机械振动能间互换的设备，才叫电声换能器。由此看来换能器是可以和变压器类比起来，因为变压器也是在同一频率下



实现低压电振盪能与高压电振盪能之间互换的，只不过变压器是通过磁路耦合来互换两种电振盪能量的；而换能器是通过机电耦合系统来实现电声能量互换的。

大家知道，变压器在工作过程中，初级（或次级）电压通过磁路耦合使次级（或初级）有一电压，这相当于换能器中，电路一边通过机电耦合给机械一边一推动力或振速（力效应）；或机械一边通过机电耦合给电路一边有一电压或电流（电效应）。所以，对应变压器的初级与次级间有一电压（或电流）的转换关系式，换能器中电路边与机械边也有一转换关系式。

在研究变压器的能量传输关系时，往往必须列出三个关系式：（1）初级电路方程式，（2）次级电路方程式；（3）初级与次级间转换关系式。因此，我们在研究换能器的能量转换与传输关系时，也必须列出它的三个基本关系式：（1）电路状态方程式，（2）机械振动方程式，（3）机电转换关系式。在研究变压器时，也常把次级元件反映到初级建立初级等效电路图，或把初级元件反映到次级建立次级的等效电路图，这与换能器的“等效电路图”、“等效机械图”也是相对应的。

#### \*§ 1-4 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，计有：（1）工作频率，（2）机电耦合系数（3）机电转换系数，（4）品质因数，（5）频率特性，（6）方向特性，（7）阻抗特性，（8）振幅特性（9）非线性失真系数，（10）发射器的功率、效率，（11）发射灵敏度，（12）接收灵敏度，（13）温度稳定性和时间稳定性，（14）机械强度、重量等……。但是，对一个实用换能器并不是不分场合的一律提出这样多的性能要求，而是要根据它的用途或使用场合不同，分别提出不同的性能指标要求。例如，对战斗器材上用的换能器与对水声测量仪器上用的换能器，所提出的要求就不相同。再如对作发射用的换能器所注意的性能指标与对接收器所注意的性能指标也不相同。下面就分别地加以介绍。

#### （一）发射器与接收器共同要求的指标

##### （1）工作频率：

对一个工作在声频或超声频带内的水声换能器，恰当地选取它的工作频率是非常重要的。因为它不仅关系到换能器的频率特性与方向特性，而且还对换能器的发射功率、效率和接收灵敏度等重要性能指标有直接的影响，所以换能器工作频率的选取是应与整个水声设备的工作频率相适应的，因为它直接关系到整个水声设备的作用距离。因而，一般情况下，它是根据对整个水声设备的战术技术论证来选定的。

对发射换能器而言，一般都是工作在它本身的谐振基频上，因为这样可获得最佳工作状态，取得最大的发射功率和效率。通常主动式声纳换能器的工作频率选择在10千赫到30千赫。对主动式声纳换能器而言，接收状态下的工作频率是与发射状态下的工作频率是近似相等的。而对专作接收用的被动式声纳换能器（即水听器）它的工作频率是一个较宽的噪声频带，所以，一般选取此时换能器自身的谐振基频要比此噪声频带的最高频率还要高，以便保证换能器能有平坦的接收特性。

##### （2）换能器的机电转换系数 $\alpha$ 与机电耦合系数 $k_e$ ；

所谓换能器的机电转换系数 $\alpha$ ,就是指在换能器机电转换过程中转换后的力学量(或电学量)与转换前的电学量(或力学量)之比,若以 $\alpha$ 来表示此机电转换系数,则有:

$$\alpha = \frac{\text{力或振速}}{\text{电压或电流}} \quad (\text{对发射换能器})$$

$$\alpha = \frac{\text{感应电势或感应电流}}{\text{力或振速}} \quad (\text{对接收换能器})$$

一般情况下,应取发射器的 $\alpha$ 与接收器的 $\alpha$ 相等。

所谓换能器的机电耦合系数 $k_e$ ,是指换能器在能量转换的过程中,能量互相耦合程度的一个物理量,其定义如下:

$$k_e^2 = \frac{\text{机械振动系统因“力效应”而获得的交变机械能量}}{\text{电磁系统所储藏的交变电磁能量}} \quad (\text{对发射器})$$

$$k_e^2 = \frac{\text{电磁系统因“电效应”而获得的交变电磁能量}}{\text{机械振动系统因声场信号作用而储藏的交变机械能量}} \quad (\text{对接收器})$$

对各种具体形式的换能器, $\alpha$ 与 $k_e$ 均有具体的表示式,这留待以后各章中再来介绍。在研究磁致伸缩换能器与电致伸缩换能器时,人们习惯于用 $k_e$ 来描写和评定它的性能,而对其他几种换能器, $k_e$ 是不常使用的。

### (3) 换能器的品质因数 $Q$ :

由于换能器本身是由电路系统和机械振动系统两大部分构成的,可以大家也常用电路系统的电品质因数 $Q_e$ 和机械系统的机械品质因数 $Q_m$ 来共同描写换能器的品质因数。在无线电基础与声学基础两课程中,已经分别讨论了 $Q_e$ 与 $Q_m$ ,这里就不再重述。我们可以利用换能器的“等效电路图”和“等效机械图”,来求出换能器的等效 $Q_e$ 和 $Q_m$ ,因为换能器的 $Q$ 值与换能器的工作频带宽度 $\Delta f$ 和传输能量的效率等有密切的关系,所以,我们研究换能器的 $Q$ 值是很有意义的事情。

换能器的 $Q$ 值大小,不仅与换能器的材料、结构、机械损耗的大小有关,还与其辐射声阻抗 $Z_s = \bar{R}_s + jX_s$ 有关,所以同一个换能器处于水中与处于空气中的 $Q$ 值是不相同的,例如,某种形式的石英压电晶体换能器,在水中测得的 $Q_m \approx 15$ ,而在空气中测得的 $Q_m \approx 50,000$ ;而同样形式的钛酸钡晶体换能器,水中测得的 $Q_m \approx 28$ ,空气中测得的 $Q_m \approx 200$ 。

对各类换能器在各种具体振动形式下的 $Q$ 值,留待以后各章中再介绍。

### (4) 换能器的阻抗特性:

根据换能器的“等效机械图”和“等效电路图”,我们可以很容易求出换能器的等效电阻抗和等效机械阻抗,换能器作为机电四端网络它具有一定的特性阻抗和传输常数,这些我们在以后各章中将陆续讲到。研究换能器的阻抗特性具有很重要的实际意义,由于换能器在电路上是与发射机的末级回路和接收机的输入电路相匹配,所以,求出换能器的等效输入电阻抗是很重要的。此输入电阻抗可概括表示如下:

$$Z_{s, \text{in}}(\omega) = R_{s, \text{in}}(\omega) + jX_{s, \text{in}}(\omega)$$

其中, $R_{s, \text{in}}, X_{s, \text{in}}$ 分别表示此换能器的等效输入电阻和输入电抗,而且它们均是工作频率的函数。换能器的输入电阻抗的大小,一般约在几个欧姆到数千欧姆左右。

### (5) 换能器的频率特性:

所谓换能器的频率特性,就是指换能器的一些重要参数指标随工作频率变化的特性。例如,对一个接收换能器就看它的接收灵敏度随工作频率变化的特性,而对一个发射换能器我们是看它的发射功率和效率随工作频率变化的特性。对不同用途的换能器我们对它的频率特性也提出各不相同的要求,例如对被动式声纳站的换能器,我们希望它的接收灵敏度频率特性曲线尽量平滑些,也就是说,不论是低频噪声还是高频噪声,只要是它的幅度差不多,则水听器所产生的输出电压的大小是近似相等的。

### (6) 方向特性 $R(\theta, \alpha)$ :

在声学基础课程中,已讲到过:不论是水声发射器还是接收器都具有一定的方向特性。根据换能器的使用场合不同,我们对换能器的方向特性提出不同的要求,例如,对声纳换能器,作定向测位用时,我们希望它的方向特性曲线的主花瓣尖锐些,而在搜索目标时,就希望它的方向特性曲线扁平些好,一个发射换能器,方向特性曲线的尖锐程度就决定了它的发射声能的集中程度;对一个接收换能器而言,它的方向特性曲线尖锐程度将会决定其探索空间方向角的范围。所以,水声换能器的方向特性的好坏是直接影响整个水声设备的作用距离的。在本讲义的第七章中,我们将对各种换能器的方向特性作专门的探讨。

## (二) 对发射换能器着重要求的性能指标

### (1) 发射声功率:

这是声学基础已讲过的概念。它是描写一个发射器在单位时间内向介质声场辐射声能多少的物理量。换能器的发射声功率一般是随着工作频率而变化的。例如,一个主动式声纳换能器在其机械谐振频率上可获得最大的发射声功率。根据用途不同,水声换能器的发射声功率一般在几瓦至几十千瓦之间。另外,还有两种功率概念,一是换能器所消耗的总的电功率 $P_e$ ,二是换能器的机械振动系统所消耗的机械功率 $P_m$ 。此外,有些个别地方还用视在功率的概念。例如,换能器的电源的视在电功率等。

### (2) 发射效率:

换能器作为能量传输网络我们有必要来研究它的传输效率,在这里我们常用如下三个效率的概念:即“机电效率 $\eta_{m/e}$ ”、“机声效率 $\eta_{m/s}$ ”和“电声效率 $\eta_{e/s}$ ”。它们的定义分别叙述如下:

所谓“机电效率 $\eta_{m/e}$ ”:就是指换能器中,将电能转换为机械能的效率,它等于机械振动系统所取得的全部有功功率 $P_m$ 对于输入换能器的总的信号电功率之比,记为:

$$\eta_{m/e} = \frac{P_m}{P_e} \quad (1.4.1)$$

其中,  $P_e = P_{en} + P_m$ ,  $P_{en}$ 是表示换能器的电路系统的有功电磁损耗功率。所以,换能器的机电效率高,就表示它的电损耗功率 $P_{en}$ 愈小。

所谓“机声效率 $\eta_{m/s}$ ”:就是指换能器的机械振动系统中,将机械能转换成声能的效率,它等于发射器的发射声功率 $P_s$ 对于机械振动系统所消耗的有功机械功率 $P_m$ 之比,记为:

$$\eta_{s/a} = \frac{P_s}{P_e} \quad (1.4.2)$$

由于  $P_{in} = P_{out} + P_{loss}$ ，其中， $P_{loss}$  是表示换能器机械振动系统的摩擦损耗功率。所以，换能器的机声效率高，则表示它的机械损耗功率  $P_{loss}$  愈大。

所谓“电声效率  $\eta_{e/s}$ ”，就是指换能器中，将电能转换成声能的总效率，它等于发射声功率  $P_s$  对于输入换能器的总的信号电功率之比。记为：

$$\eta_{e/s} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{P_s}{P_{out}} = \eta_{s/a} \cdot \eta_{e/a} \quad (1.4.3)$$

所以，换能器的电声效率是等于它的机电效率与机声效率的乘积。

换能器的效率是与换能器类型、结构、材料等多方面因素有关，并且也与工作频率有关，一般说来，压电换能器的电声效率最高，可达90%，一般是在30%—70%之间；磁致伸缩换能器的电声效率就低些，一般在20%—60%的范围；电动式或电磁式换能器的电声效率要低一些。

提高发射换能器的电声效率也是我们应该注意的事。也有些书用输出系数来描写换能器的能量传输特性，所谓换能器的输出系数，就是指换能器的输出声功率（即发射声功率）与输入的视在电功率之比。

### (3) 发射器灵敏度：（发射器响应）

这是在换能器测量中常用的一个指标。它又有电压灵敏度与电流灵敏度之分。

所谓换能器的发射电流灵敏度，是指在某一指定的方向上，离发射器有效声中心一米处所产生的声压与输入电端的工作电流的大小之比。常记为  $M_i(\omega)$ 。

$$M_i(\omega) = \frac{p(\omega)}{I(\omega)} \quad (1.4.4)$$

根据声波发射器的通常特性，可知：此  $M_i(\omega)$  不仅是工作频率  $\omega$  的函数，还是方位角的函数；也就是说，在不同的方向上，距发射器有效声中心均为1米远的地方所产生的声压大小是不同的。通常在测量换能器的性能，都是测换能器轴线方向上一米远处的声压与输入电流之比。它的单位是“微巴/安”。

所谓换能器的发射电压灵敏度，是指在给定的方向上，离发射器有效声中心1米远处所产生的声压与输入端之信号电压的比值。常记为  $M_u(\omega)$

$$M_u(\omega) = \frac{p(\omega)}{U(\omega)} \quad (1.4.5)$$

发射灵敏度我们还常用分贝值来表示，所选用的基准电压灵敏度为1微巴<sup>①</sup>/伏；基准电流灵敏度为1微巴/安。

### (4) 发射器表面的振幅分布：

这是描写发射换能器在工作时，振动表面上各点的振动幅度是如何分布的。例如，

① 此处定义：1微巴 = 0.1牛/厘米<sup>2</sup> = 1达因/厘米<sup>2</sup>，1巴 = 10<sup>6</sup>微巴 ≈ 1大气压，但也有些书定义：1达因/厘米<sup>2</sup> = 1巴。

活塞式振动器其表面各点的振幅分布是相同的,这是一种最简单的振幅分布。实际换能器往往是四周固定不动,中间振幅最大的非均匀振幅分布。由于振动器的表面振幅分布不同,会导致于振动器的方向特性不同,所以,我们研究换能器在工作时的振幅分布是很有意义的。今后将在第七章中阐述这个问题。

(5) 发射器的非线性失真系数  $k_f(i)$  或  $k_f(u)$ :

所谓发射换能器的非线性失真(或非线性畸变):是指输入电信号与输出声信号间的非线性转换关系。由于有些换能器的物理效应是近似的线性效应,所以在信号转换的过程中,除了有相同频率分量的信号产生外,还有其他谐波分量产生。

设:换能器的电声信号转换关系为:

$$p = a_1 i + a_2 i^2 + a_3 i^3 + \dots \quad (1.4.6)$$

式中,  $i$ ——输入信号电流。

$p$ ——换能器因电流的力效应而产生的声压信号。

若令:  $i = I_m \cos \omega t$

$$\begin{aligned} \text{则有: } p &= a_1 I_m \cos \omega t + a_2 I_m^2 \cos^2 \omega t + a_3 I_m^3 \cos^3 \omega t + \dots \\ &= A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \cos 3\omega t + \dots \end{aligned}$$

定义非线性失真系数为:

$$k_f(i) = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}}{A_1} \quad (1.4.7)$$

(三) 对接收换能器着重要求的性能指标:

(1) 接收器的灵敏度  $\eta(f)$  (接收声场的响应):

这是我们对接收换能器最感兴趣的一个性能指标。又有接收器的电压灵敏度与电流灵敏度之分。

所谓接收器的电压灵敏度  $\eta_u(\omega)$ : (自由场电压响应) 就是指接收器的输出电压;与在声场中引入换能器前,该点的自由声场之声压的比值。记为  $\eta_u(\omega)$ :

$$\eta_u(\omega) = \frac{U(\omega)}{p_0(\omega)} \quad (1.4.8)$$

式中,  $U(\omega)$  是表示接收器电负载上所产生的电压。

$p_0(\omega)$  是表示接收器接收面处自由声场的声压。

接收电压灵敏度的单位为:“毫伏/微巴”或“伏/微巴”。也有用分贝值来表示的:

$$\bar{\eta}_u(\omega) = 20 \log_{10} \frac{\eta_u(\omega)}{\eta_{u0}(\omega)} \quad (\text{分贝}) \quad (1.4.9)$$

基准灵敏度取为:  $\eta_{u0}(\omega) = 1$  “毫伏/微巴”或“伏/微巴”。目前一般的水声换能器的接收灵敏度为  $\eta_u(\omega) = 10^{-3}$ —— $10^{-2}$  “毫伏/微巴”,即  $\bar{\eta}_u(\omega) = -60$ —— $-30$  分贝。

所谓接收器的电流灵敏度  $\eta_i(\omega)$ : (自由场电流响应) 就是指接收器的输出电流,与声场中引入接收器前,该点的自由声场之声压的比值。可记为:

$$\eta_i(\omega) = \frac{i(\omega)}{p_0(\omega)} \quad (1.4.10)$$

一般我们不大使用接收电流灵敏度的概念来讨论问题。

(2) 接收器的振幅特性:

所谓接收器的振幅特性,就是指当所接收的声信号的幅度,从小逐渐增大时,看其相应的信号电压的幅度的变化。如图1-4-1所示,为接收器的输出电压 $U$ 与自由声压 $p_0$ 的振幅特性曲线。从图中可以看出:在小信号的接收情况下,接收器可以有很好的线性转换关系,由图中可求出线性部分的接收电压灵敏度:

$$\eta_u = \frac{U}{p_0} = \tan \theta \quad (1.4.11)$$

而到大信号的接收情况时,则非线性转换关系就比较显著了。此时我们可类似对发射器的分析方法来分析大信号接收器的非线性失真。

换能器的性能指标,我们暂时笼统地就介绍到这里,今后在讲解各种具体换能器时,还要更深入更细致地来分析这些性能指标。

除此而外,对换能器的机械强度往往也要特别注意的,尤其是对装备到军舰上的战斗器材;性能的稳定性的,不论对船用换能器还是测量用的换能器也都应加以充分的重视。

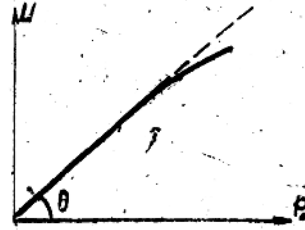


图 1-4-1接收器的振幅特性

## 第二章 电动式水声换能器

### 引言

电动式换能器在空气电声学领域中有着相当广泛地应用,例如,电动式扬声器、电动式传话器等。在水声观通设备中,它是最早被采用来作为水声发射器的,但由于它本身结构特点的限制不能产生较大的声功率,因此它在水声设备中应用并不广泛,它只能作小功率的水声发射器和低频宽带的水声接收器,因此,在一些水声测量设备中还采用电动式换能器来作校准换能器用,例如美国试制的J—9型水中宽频带换能器,就是进行某种水声测量和校准标准换能器的高精度的电动式换能器,它的工作频带在40赫芝到20千赫芝之间。(有关J—9型换能器的设计和工作特性,将在专门的章节中加以介绍。)虽然目前舰用的各种声纳换能器已很少采用这种电动式换能器了,但当水声设备的工作频率向低声频范围发展时,电动式换能器还有它一定的地位,事实上,有些国家装备的某种海岸听测系统,就是采用这种电动式换能器的。

本章的中心内容是简要地介绍电动式换能器的工作原理和发射与接收特性;并且我们还想通过这一章来具体地阐明换能器的一般分析研究方法和建立它的三组基本关系式和三种等效图的方法。本章共分五节:第一节是介绍电动式换能器原理性结构和它的机电转换关系式;第二节是分析电动式发射器;第三节是分析电动式接收器;第四节是讲解电动式换能器的可逆性;第五节是电动式换能器的设计计算举例。最后一节内容不在课堂上讲授,仅供学习上有余力的学员参考阅读。

### § 2-1 电动式换能器的原理结构图及机电转换关系式

#### (一) 原理性结构图

电动式换能器的原理结构图可用2-1-1示意。此类换能器一般均可看成是由两大部

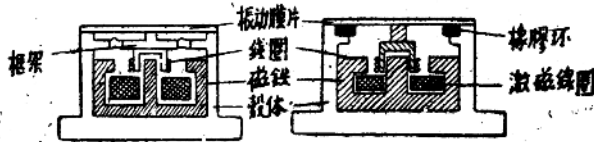


图 2-1-1

分组成:一是产生磁场的磁路部分;二是由振动膜和线圈与框架等可动部分所构成的机械振动系统部分。

磁路部分,是由磁铁组成,这种磁铁可以用好的水磁铁来做;也可以用电磁铁来作,为了要建立一个恒定磁场,当然此电磁铁的激磁绕组中应通入直流极化电流。至于磁铁的形状可以做成圆筒形状也可以做成蹄形或条形,不过一般常做成圆筒形状,圆筒的中央轴线上有一圆柱磁钢,使磁通集中在空气隙中,构成了一个很强的恒定磁场。

可动部分,由绕在框架上的电磁线圈组成,并处于恒定磁场中,当线圈中通入交变工作电流时,由于磁场对载流导线有力的作用,就会推动线圈及其框架运动。因而也就带动振动膜振动,从而向外部介质辐射声波。在活塞振膜后面加了一圈橡皮环,它能起到阻尼作用,当振动时,它能产生附加衰减,以降低系统的机械品质因数 $Q_M$ ,因此这对改善它的工作频带宽度是有好处的。

实际换能器的结构图要远比图2-1-1复杂得多,例如,为了要适应深水下工作,往往在磁铁后边加一个补偿箱,来调节换能器内部的压力。再如电磁线圈与外部电路的连接要有电缆及其水密装置等等。

## (二) 机电转换关系式

电动式换能器的“力效应”,就是电工原理中介绍的电动力效应。它说明一个载流导线或线圈在磁场中将受到机械力的作用,如图2-1-1所示,是一个长度为 $l$ 的线圈置于一恒定磁场 $B_z$ 中;当线圈中有一交变信号电流 $I$ (有效值)流过时,由于磁场与电流间的相互作用,线圈上就会受到一交变的机械力 $F$ (有效值)的作用,因为线圈是位于与磁场相垂直的方向上,所以作用在线圈上的交变机械力的有效值可用下式表示:

$$F = B_z l I \quad (2.1.1)$$

式中, $F$ —机械振动系统(线圈与振动膜)上所受的机械力的有效值,以“达因”为单位。

$B_z$ —磁铁的恒定磁感应强度,以“高斯”为单位。

$l$ —线圈的导线长度,以“厘米”为单位。

$I$ —工作电流的有效值,以“CGS制电磁单位电流”为单位。

显然,这里的交变力信号 $F$ 与交变电流信号 $I$ 是在同一频率下转换的,因此,线圈与振膜在此交变力 $F$ 作用下也就产生同频的交变机械振动,从而向水介质中发射出同频的声波信号。

电动式换能器的“电效应”,就是电磁感应定律所描写的一种物理效应。从图2-1-1也可看出,当振动膜受到交变声信号(即声压)作用而振动时,必然也带动了线圈在磁场中作相应的振动,因而也就发生了导线切割磁力线的现象;所以就会在线圈中产生一感应电势,这样就实现了把一个声压信号转换成同频的电压信号的任务。设此时振动膜与线圈在声压作用下的振动速度为 $\xi$ (有效值),则所产生的应电势的有效值 $e_\xi$ 为:

$$e_\xi = B_z l \xi \quad (2.1.2)$$

式中, $e_\xi$ —因“电效应”而在线圈中产生的应电势的有效值,电磁单位。

$\xi$ —线圈的振动速度的有效值,以“厘米/秒”为单位。

从公式(2.1.1)与(2.1.2)中可以看出:电动式换能器的力学量( $F$ 或 $\xi$ )与电学量( $I$ 或 $e_\xi$ )之间的比值为一个与时间无关的常数,根据第一章中机电转换系数的定义,我们就可得到电动式换能器的机电转换系数 $\alpha$ 如下:

$$\alpha = \frac{F}{I} = \frac{e_\xi}{\xi} = B_z l \quad (2.1.3)$$

于是,我们又可将(2.1.1)与(2.1.2)两式改写为:



$$\left. \begin{aligned} F' &= \alpha I = B_m l i \\ e_g &= \alpha \dot{\xi} = B_m l \dot{\xi} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.4)$$

并称(2.1.4)式为电动式换能器的机电转换关系式。

## § 2-2 电动式发射器的分析

### (一) 机械振动方程式

换能器工作在发射状态时,能量的主要转换过程是电能转换为声能的过程,也就是把电的信号转变为声的信号的过程,能实现这种转换的物理原因,对电动式发射器而言就是电动力效应。根据(2.1.1)式,若电流以“安培”为单位,则因1“安培”=10“电磁单位”,则(2.1.1)式应改写为:

$$F' = 0.1 B_m l I \quad (2.2.1)$$

在以后我们讨论各种换能器时,请大家要注意电磁单位或静电力单位与实用制单位的换算问题。

在此力 $F'$ 作用下,线圈与振动膜将进入振动状态,由于振动膜是四周固定的,所以,此振动系统是个不均匀的分布参数振动系统,若要精确地来研究此振动系统的状态,则会使问题变得比较复杂,而且也超出了本课程的范围,在这里我们用等效成集中参数的机械振动系统来讨论它的振动特性。

设:线圈及其框架是个纯质量元件 $m_1$ ,并认为它附加在振动膜的中央,图2-2-1所示,振动膜本身质量为 $m_2$ ,它可以等效成为一个等效质量元件 $(m_2)_{eq}$ 和一个等效弹性元件 $(D_2)_{eq}$ 所构成的集中参数系统,根据声学基础课程中所讲过的内容可知其关系式为:



图 2-2-1 机械振动系统等效图

在 $f = f_0$ 时,

$$\left. \begin{aligned} (m_2)_{eq} &= 0.18m_2 \\ (D_2)_{eq} &= \frac{1}{(C_2)_{eq}} = 5.0 \frac{Y_0 h^3}{a^2 (1-\sigma^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2a)$$

在 $f \ll f_0$ 时,即低频段

$$\left. \begin{aligned} (m_2)_{eq} &= 0.2m_2 \\ (D_2)_{eq} &= \frac{1}{(C_2)_{eq}} = 5.6 \frac{Y_0 h^3}{a^2 (1-\sigma^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.2b)$$