

水声学

水 声 学

（上册）

（下册）

（上册）



中国科学院声学研究所图书馆

内 容 提 要

本书重点介绍各种常用水声换能器的原理、设计和测量技术，并且扼要讨论了换能器基阵的设计、水声物理基础、水中目标的听测和回声定位以及声纳信号处理等问题。

本书适合于从事水声、电声、超声工作的同志阅读，也可供大专院校有关专业的师生作为教学参考。

Underwater Acoustics

利昂·坎普主编

John Wiley & Sons公司 Wiley-Interscience 出版部

1970年

水 声 学

《水声译丛》编辑组出版
江苏省南通市东方红印刷厂印装

内部发行

内 容 提 要

本书重点介绍各种常用水声换能器的原理、设计和测量技术，并且扼要讨论了换能器基阵的设计、水声物理基础、水中目标的听测和回声定位以及声纳信号处理等问题。

本书适合于从事水声、电声、超声工作的同志阅读，也可供大专院校有关专业的师生作为教学参考。

Underwater Acoustics

利昂·坎普主编

John Wiley & Sons公司 Wiley-Interscience 出版部

1970年

水 声 学

《水声译丛》编辑组出版
江苏省南通市东方红印刷厂印装

内部发行

本书内容比较通俗实用，因此，对于初学者来说是一本较好的入门书，对于具有一定工作经验的同志也有参考价值。原书中尚有不少错误，译校者已尽力作了改正。译文中可能还有一些缺点和错误，敬请读者及时批评指正。

本书第1—8章以及附录Ⅲ由陈桂生同志译，冯绍松同志校；第9、10两章以及附录Ⅰ、Ⅱ由陈克棠同志译，张叔英同志校。在译校、出版过程中，曾经得到不少同志特别是国营西南向阳机械厂汪元美同志的热情帮助，特此致谢。

《水声译丛》编辑组

目 录

第一章 摆动力学	1
1.1 符号及单位.....	2
1.1.1 分贝.....	3
1.2 简谐振子.....	4
1.2.1 相位.....	6
1.3 复数.....	9
1.4 薄壁圆环谐振子.....	11
1.4.1 阻尼环.....	13
1.5 受迫振动.....	17
1.5.1 以受策动振子作声源.....	21
1.6 振荡系统的共振.....	24
1.7 相位问题.....	27
习题.....	29
第二章 分布系统	32
2.1 引言.....	32
2.2 均匀棒.....	32
2.2.1 有边界条件的均匀棒.....	38
2.2.2 平面波的能流.....	41
2.3 传线问题.....	46

2.3.1	垂直入射于边界层上的反射	46
2.3.2	共振棒	49
2.3.3	等效半波复合振子	54
2.3.4	复合纵向振子的品质因子	60
	习题	63
	参考文献	65
第三章	波动声学	66
3.1	描写质点性质的方法	66
3.1.1	拉格朗日描述	66
3.1.2	欧勒描述	67
3.1.3	欧勒描述中质点性质函数的时间导数	67
3.2	三维波动方程式	68
3.2.1	连续性方程式	69
3.2.2	牛顿第二运动定律	71
3.2.3	声学近似	73
3.2.4	压强与凝缩之间关系	74
3.2.5	凝缩和压强起伏的波动方程式	74
3.2.6	速度起伏的波动方程式	75
3.2.7	摘要	76
3.3	速度势	76
3.4	波动方程式的平面波解	78
3.4.1	平面波解的物理意义	78
3.4.2	一些解的例子及一些特殊关系	79
3.5	声阻抗率	81
3.6	流体中的波速	81

3.7	平面声波在界面上反射与传射	82
3.7.1	垂直入射——两种介质	82
3.7.2	垂直入射——三种介质	85
3.7.3	斜入射——两种介质	86
3.8	球面扩散波情况下波动方程的解	88
3.9	简单声源	89
3.9.1	声源强度	89
3.9.2	单极子声源的辐射	90
3.9.3	偶极子声源的辐射	91
3.9.4	在无限障板中活塞声源的辐射	93
3.9.5	活塞声源的辐射阻抗	97
	习题	102
第四章	基础射线声学	103
4.1	引言	103
4.2	声线的路径	104
4.2.1	声线路径为圆时的方程式	104
4.2.2	声线路径与声速梯度之间的关系	105
4.2.3	对等声速梯度剖面求解声线路径的几何方法	106
4.2.4	海水的声速	108
4.2.5	几种声线路径	109
4.3	海水中声的衰减	110
4.4	单个质点散射的简化理论	111
4.5	水下混响	113
4.5.1	波列长度与发声长度	113

4.5.2	体积混响的简化理论	115
4.5.3	表面混响的简化理论	117
	习题	118
第五章	电声转换	119
5.1	电声换能器——四端网络	119
5.2	动圈式换能器	122
5.3	声源的等效电路	124
5.4	动圈式换能器作水听器	129
5.5	动生阻抗和导纳	131
5.6	动生图和效率	136
5.7	最大效率和功率极限	138
	参考文献	144
第六章	磁致伸缩和压电系统	146
6.1	引言	146
6.2	磁场	147
6.3	有空气隙的磁路	149
6.4	涡流	153
6.5	磁致伸缩	157
6.6	机电耦合系数	159
6.7	极化	161
6.8	磁致伸缩卷环	163
6.9	等效电路	164
6.10	自由浸沉卷环声源的设计及性能	168
6.10.1	自由浸沉卷环的带宽和频率	174

6.10.2	大功率发射时的性能	175
6.11	机电状态方程	176
6.12	薄壁陶瓷环	180
6.12.1	分段陶瓷环	184
6.13	压电陶瓷的纵向振子	187
6.14	各种类型的压电陶瓷纵向振子	192
6.14.1	两边镀银的棒	193
6.14.2	对称负载的压电棒	193
6.14.3	一端自由的压电棒	195
6.14.4	复合式压电振子	195
6.15	压电弯曲园片换能器	198
6.16	压电晶体的 I R E 标准	199
	习题	203
	参考文献	205
第七章	辐射指向性图	208
7.1	引言	208
7.2	指向性图表示方法	209
7.3	点源线列阵的指向性图	210
7.3.1	双点源组成的声源	210
7.3.2	多点源组成的声源	213
7.3.3	连续的线声源	215
7.4	分段线声源	216
7.5	束控	220
7.6	平面声源	231
7.6.1	声源级的控制	233

7.7	分裂波束及复合指向性图	234
7.7.1	共形基阵及扫描波束	237
7.8	指向性指数	238
7.8.1	指向性因子的计算	241
7.9	换能器表面的衍射效应	243
	习题	243
	参考文献	244
第八章	换能器的测定	246
8.1	引言	246
8.2	校正程序	247
8.3	互易性	249
8.3.1	互易校正	251
8.4	声源的测定	253
8.5	换能器的功率极限	257
8.6	水听器的性能极限	263
8.6.1	热噪声	264
8.6.2	等效噪声声压级	265
8.7	水听器灵敏度	267
	习题	270
	参考文献	271
第九章	听测和回声定位	273
9.1	声纳	273
9.1.1	被动声纳	274
9.2	噪声	274

9.2.1	噪声掩蔽	275
9.3	探测距离	279
9.4	回声定位	284
9.4.1	距离方程	284
9.4.2	回声定位用的声源	285
9.4.3	目标强度	287
9.4.4	混响	288
9.4.5	多普勒效应	291
9.4.6	多普勒效应对于听觉分辨力的影响	292
9.5	声纳讨论中所用的符号	296
	习题	297
	参考文献	299
第十章	声纳信号处理	300
10.1	引言	300
10.2	信号处理机的实现	308
10.2.1	非相干时间处理机	311
10.2.1.1	在被动声纳中的应用	324
10.2.1.2	在平百显示口上观察被动声纳的 输出	327
10.2.1.3	声纳接收机参数的选择	328
10.2.1.4	主动声纳	329
10.2.1.5	主动声纳实例	332
10.2.1.6	关于其他非相干处理机的讨论	338
10.2.2	相干处理机	341
10.2.2.1	简单的匹配滤波器	342

10.2.2.2	多能匹配滤波器, 复制相关器	315
10.2.2.3	复制相关器的实现	347
10.2.2.4	最佳处理机实例	357
10.2.2.5	非相干处理机与匹配滤波器之比较	356
10.2.2.6	处理机性能与带宽的关系	360
10.2.3	摘要	361
10.3	实际情况的考虑	361
10.3.1	归一化	362
10.3.2	符号结构	363
10.3.3	显示器	367
10.3.4	未来的发展	367
	参考文献	365
附录 I	波形的统计特性	367
	参考文献	381
附录 II	波形采样	382
附录 III	各种表格	393
	参考文献	400
习题答案		401

第一章 振动力学

水声学很清楚地叙述了声与振动的关系。在水声学中，声的发生或接收是用一个机械器件的振动来实现的。产生某一声级所需的振动位移的量级，值得我们予以注意，有时甚至会使我们感到惊异。位移的峰值振幅如为可见光波波长的三倍时，产生的声级是相当高的；而弱的声级所对应的振动位移比原子的间隔还小。在水中，周期的与非周期的声都可运用。但是两者都要用到频率这个概念。由于两种介质的性质以及适应这两种介质特性的仪器的效能都不同，所以在水中可能运用的频率范围比在空气中大很多。

本章先介绍一些简单振动系统的基础数学。因为机电器件应用最广泛，适用的地方也多，所以只限于讨论机电器件。至于激励方法放在后一章中讨论。根据作用不同，我们可以把机电声源分成三个部分：具有两端或更多端的电学部分；具有两端或更多端的机械部分；两者之间的相互转换部分（中间部分）。此中间部分的性能必须由这两组端点处的参数来判定。

由于在电端测量较为方便，故这就成为对系统进行测量的通用方法。一旦系统设计好并求出了等效转换因子以后，则用一个等效电路来分析系统最为有效。但是，因为中间部分的设计是一个力学问题，所以先从讨论简谐振子的力学问题着手比较合适。

人们熟习空气中使用的小尺寸、薄结构的接收及发送器

件，故可能对在水中使用的一些相当笨重的发声及接收器件感到惊讶。在设计上这两种声源的绝然不同与两种介质的极端不同的物理特性有关，还有个因素是水中的声源实际需要的功率都比较大。在给定的频率上，通过相同的面积，发射相同大小的平面波声功率所需要的声压在水中要比在空气中大60倍，而所需要的运动振幅的量级正好相反。因此具有柔顺性大及位移振幅大的扬声器宜于做空气声源，而只允许有小位移的硬的压电棒适于作为水下声源。因为声波在介质中传播的波长是确定辐射表面尺寸的一个有意义的量，所以两种介质声速的不同使辐射表面尺寸也不同。因为水的声速大约是空气声速的四倍半，所以水中的辐射器如具有和空气中同样的指向性，其面积是空气中的 $(4.5)^2$ 倍。

1.1 符号及单位

在继续讨论之前，我们试图先说一说声学术语并定义一些为大多数声学工作者熟悉的符号。这里所以说“试图”是因为难于确定那些是为大多数声学工作者都同意的。人们认为美国标准协会的刊物是有关这方面的最好的情报来源。所以关于是否大家都接受，符号之间和单位之间有无矛盾等就无需争论不休。任何想建立一套新的符号的作者，尽管他那套符号是合乎逻辑的，但总会给阅读带来不少麻烦。事实上，我们的问题同时涉及到力学、电学及声学，这带来的困难更大，例如 I 这个符号是常用的并有其确定的定义，但是它在力学，电学及声学上的含意完全不相同。因此，当在某一讨论中出现一个或一个以上这样的符号时，就会在一定范围

内引起混淆。

声学科技人员采用MKS单位制已经很迟，其原因可能是因为这门科学中的主要分支很早以来一直是采用以任意定义的生理效应作为参考级的单位制。近代发展起来的水声技术已开始使用这种单位制。回顾过去的数据时，我们必须十分小心，因为这些数据常用一组混合的没有清晰定义的单位来描写，所以这些数据可能很难予以解释。

在MKS制单位中，可以很方便地把一个力学量转换成一个相类比的电学量，反之亦然，因此MKS制的优点是十分令人信服的。就转换系数或机电变压器来说，不需要转换因子。遗憾的是参考声压的选取尚未统一^①。通常用的是达因/厘米²或微巴，0.0002达因/厘米²，牛顿/米²以及微牛顿/米²。我们可以由这些米制参考量中的一个来求出离声源一码处的声压级。但是比较一致的是倾向于用微巴，本书也是利用这单位作为表示发送及接收响应中的声压级，然而，一般来说声压用牛顿/米²来表示。

1.1.1 分 贝

在声学中，一个量的级具有特殊的意义。它是一个量与其参考量（当然是同类的）之比的对数。上面定义的级以分贝为单位，其值等于该比值的常用对数的10倍。参考量必须予以说明，如已为大家所明确的就无需加以说明。在作声压与某些变量的函数图时，当比率从1:1到1:10000这样的范围内变化时就可看到采用分贝的好处。用分贝来表示可使作

^①自1969年起国际上已把声压单位定为Pascal(帕)，符号Pa，单位为牛顿/米²。

——译注

图既简单又明瞭，这在线性坐标纸上很难做到。

实际上，由于分贝标度应用非常方便故为人们所广泛使用。例如，在传输问题中，一平面波穿过界面从介质1向介质2传播时，我们完全可以把强度 I_1 与 I_2 之比用分贝之差来表示。如：

$$10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log I_1 - 10 \log I_2$$

因：

$$I_1 = \frac{p_1^2}{\rho_1 c_1} \quad I_2 = \frac{p_2^2}{\rho_2 c_2}$$

式中 P 为有效（均方根）声压， ρ 与 c 分别为两种介质的密度及声速，我们还可写为：

$$10 \log \frac{I_1}{I_2} = 20 \log \frac{p_1}{p_2} + 10 \log \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$$

除非 $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ ，否则声压的平方比不等于强度比，因而用分贝表示声压比是没有意义的。

1.2 简谐振子

我们常选用基本的振动系统来说明声的一些基本概念。因为这些概念大多数不仅对于产生声的振动机理适用，而且对由振动而产生的声波也适用，所以这些概念在两方面都有用。这种简单振子通常可抽象地用一个集中在一点的质量 m 以及一个一端与此质量相连而另一端固定的弹簧来表