

# 低频宽带大功率镶拼圆管换能器

刘公侠 陈兴华

(北京长城无线电厂 北京 100088)

2001 年 11 月 6 日收到

**摘要** 本文介绍了在研制由镶拼圆管组成的低频、宽带、大功率换能器时,为展宽频带所采取的设计方案、制作和实验结果。

**关键词** 镶拼圆管, 换能器, 低频, 宽带, 阻尼

## High power mosaic cylindrical transducer of low frequency and broad band

LIU Gongxia CHEN Xinghua

(Beijing Great Wall Radio Factory, Beijing 100088)

**Abstract** The paper describes the design for extending the frequency band, the manufacture and the experimental results in developing a high power, low frequency and broad band transducer, which is built of mosaic cylinder.

**Key words** Mosaic cylinder, Transducer, Low frequency, Broad band, Damping

### 1 引言

为了实现远距离探测和通信,总希望能有一个低频,宽带,大功率和适用于深水工作的换能器。对于某些我们所熟知型式的换能器,在水密、耐压或电声性能等方面还存在着一些不甚理想的实际问题,所以采用工作性能稳定可靠的镶拼圆管换能器仍是人们经常采用的换能器之一。

一般来说,圆管型换能器在谐振频率低于 3kHz 时,通频带要大于 1kHz 以上是较难做到的。但是,通过我们合理设计镶拼圆管的结构尺寸,结合采取较为有效的措施将几个镶拼圆管组合在一起,获得了谐振频率小于 3kHz,带宽达到 2kHz,其它电声性能亦较为理想的

圆柱型换能器。

### 2 设计原理

镶拼圆管振子由多个压电陶瓷条和镶拼的金属条粘结而成,每一个压电陶瓷条和一个金属条构成一个镶拼单元,如图 1 所示,其基本结构尺寸为:

$$\pi D_m = n(L_0 + L_3)$$

式中,  $D_m$ —镶拼圆管的平均直径;

$L_3$ —陶瓷条的(周向)厚度(两银电极间的距离);

$L_0$ —金属条的(周向)厚度;

$n$ —镶拼单元数目。

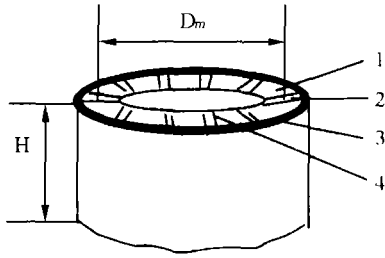


图1 镶拼圆管示意图

- 1— 压电陶瓷条      2— 金属镶拼条  
3— 环氧玻璃布层    4— 银电极

不考虑水介质的同振质量，镶拼圆管的径向谐振频率为

$$f_r = 1/n[(\rho_0 L_0 + \rho_3 L_3)(S_0 L_0 + S_{33}^E L_3)]^{1/2} \quad (1)$$

其中， $\rho_0, S_0$  分别为金属条的密度和柔性系数； $\rho_3, S_{33}^E$  分别为压电陶瓷条的密度和柔性系数。

利用压电材料切向极化的镶拼圆管的其它参数有，镶拼圆管的有效机电耦合系数  $K_{eff}$ ，机电转换系数  $N$ ，等效密度  $\rho_e$  和等效柔顺性系数  $S^E$  等。

$$K_{eff}^2 = K_{33}^2 / (1 + S_0 L_0 / S_{33}^E L_3) \quad (2)$$

$$N = N_3 / (1 + S_0 L_0 / S_{33}^E L_3) \quad (3)$$

$$\rho_e = \rho_3 (1 + L_0 \rho_0 / L_3 \rho_3) \times (n L_3 / \pi D_m) \quad (4)$$

$$S^E = S_{33}^E (L_3 / L_0 + S_0 / S_{33}^E) \times (n L_0 / \pi D_m) \quad (5)$$

$$K_{33}^2 = d_{33}^2 / S_{33}^E \epsilon_{33}^T \quad (6)$$

$$N_3 = 2\pi A d_{33} / S_{33}^E L_3 \quad (7)$$

$$A = HT \quad (8)$$

式中， $T$ — 镶拼圆管的径向壁厚；

$H$ — 镶拼圆管的高度；

$d_{33}$ — 压电陶瓷的压电常数；

$A$ — 圆管的纵向截面积；

$K_{33}$ — 压电陶瓷的机电耦合系数；

$N_3$ — 压电陶瓷条的机电转换系数。

从公式 (2) 和 (3) 可以看出，镶拼圆管的有效机电耦合系数  $K_{eff}$  和机电转换系数  $N$  与镶拼条的厚度  $L_0$  密切相关。

利用镶拼圆管的等效机电图，还可以得到如下的关系：

$$Q_m = 2\pi A \epsilon_{33}^T k_{eff}^2 / f_r (R_m + R_s) d_{33}^2 n L_3 \quad (9)$$

式中， $Q_m$ — 机械品质因素；

$R_m$ — 机械阻；

$R_s$ — 辐射声阻；

$\epsilon_{33}^T$ — 压电陶瓷的自由介电常数。

为使由镶拼圆管组成的低频换能器能有较宽的频带，由公式 (2) 和 (9) 可以看出，在预定的谐振频率  $f_r$  下，可以采取增大机械阻  $R_m$ ，调节镶拼条的厚度  $L_0$ ，采用不同柔顺性  $S_0$  的拼条材料，以减小镶拼圆管的有效机电耦合系数  $K_{eff}$ ，达到降低机械  $Q_m$  值、增大带宽的目的。当然，机械阻  $R_m$  的增大，镶拼条所占比例的增加，将影响到换能器的电声性能，这一点应该在设计中需要注意的。

按照上述展宽换能器频带的方法，所设计的换能器将由多个镶拼圆管组成，而每个镶拼圆管中陶瓷条与金属拼条的尺寸比例不尽相同，使镶拼圆管间的谐振频率略有差异；镶拼圆管振子中适当加入一些的阻尼材料，这样既可以展宽频带，又可以调整某些电气参数，确保换能器能有较好的电声性能。

此外，为了使换能器具有良好的水平方向性，根据圆形阵连续性条件，组成换能器的每个镶拼圆管振子的拼合单元数  $n$  应满足条件  $n \geq K D_m + 2$  ( $K$  为水中波数)。例如，若工作频率  $f_r = 3\text{kHz}$ ， $D_m = 300\text{mm}$  的镶拼圆管，则要求  $n \geq 6$ 。但为了获得良好的径向振动性能，减少镶拼圆管因元件粘合等原因造成的振幅分布不均匀，以及考虑到对由镶拼圆管组成的换能器的电声性能要求，我们需要更多的拼合单元。

### 3 实验结果

图 2 为试制的镶拼圆管换能器的外形图, 其高度  $h=400\text{mm}$ , 外径  $\phi=310\text{mm}$ 。换能器

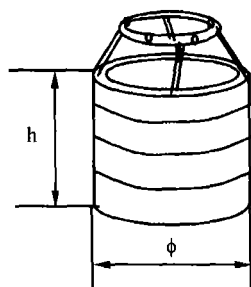


图 2 镶拼圆管换能器外形图

由 4 个镶拼圆管组成, 每个镶拼圆管由 72 个拼合单元所组成。其中, 有的镶拼圆管在陶瓷条中镶拼铝金属条, 有的镶拼圆管则全部用压电陶瓷条, 在保证满足有关设备对换能器所提

出的设计要求的前提下, 适当调配陶瓷条和铝条的厚度, 使各种镶拼圆管的尺寸基本相同以利组装。每个镶拼圆管外面绕制玻璃钢施加预应力。4 个镶拼圆管组合在一起后, 再在外表面灌注一层含有防水性能的聚氨酯胶, 以提高换能器长期在深水中工作时的水密性能。

为了降低镶拼圆管的机械  $Q_m$  值, 尽量减少镶拼圆管间的差异, 我们在镶拼圆管内部加敷了一层特制的灌注胶, 其目的是适当加大镶拼圆管振子的阻尼, 以增加换能器的频带宽度。

图 3 是换能器在水中测得的电导曲线。测量结果表明, 换能器的谐振频率小于  $3\text{kHz}$ , 通频带大于  $2\text{kHz}$ , 谐振点处的等效电阻小于  $350\Omega$ , 电声效率大于  $80\%$ , 接收电压灵敏度以及水平方向性不均匀性等, 均取得了令人满意的结果。

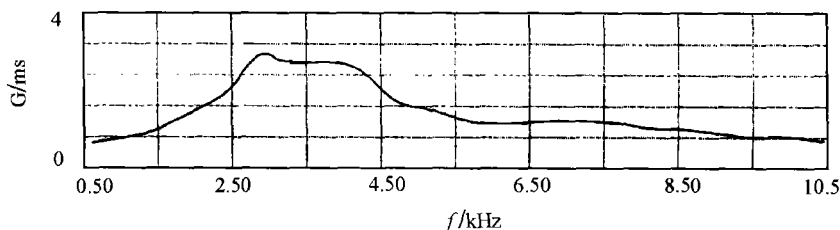


图 3 换能器在水中的电导曲线

所测定的换能器发送电压响应级与频率关系曲线, 如图 4 所示。由该曲线可以看出, 从

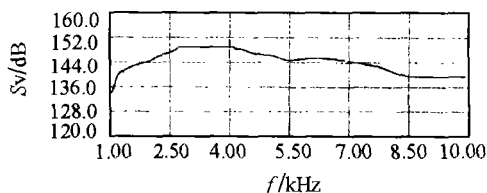


图 4 换能器的发送电压响应曲线

$2\text{kHz}$  到  $10\text{kHz}$  的频率范围内, 发送电压响应级大于  $140\text{dB}$ (基准值:  $1\mu\text{Pa}\cdot\text{m}/\text{V}$ ), 起伏小于  $\pm 4\text{dB}$ , 具有相当宽的发送带宽, 是一个很好的发射换能器。

由图 5 所示的换能器在  $f=3\text{kHz}$  时的电输入与声输出关系曲线可以看出, 随着发射电压

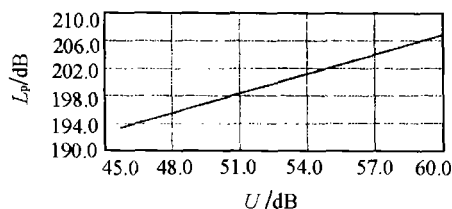


图 5 换能器的电输入与声输出曲线

的增加, 换能器始终呈现出良好的线性关系。考虑到测试时所用的发射机功率限制的原因, 试验电压只能加到  $1000\text{V}$ , 但这时的声源级已

达到了 207.9dB (基准值:  $1\mu\text{Pa}$ ), 若无发射机功率的限制, 可望声源级能超过 210dB。

换能器与 1000W 大功率发射机匹配联调, 经过长时间的连续工作考核结果表明, 换能器性能良好、稳定可靠。可见换能器的功率容量是相当大的。

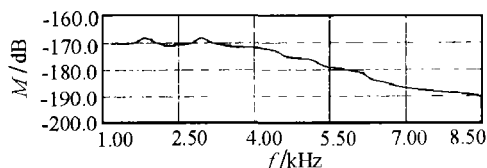


图 6 换能器的接收电压灵敏度响应曲线

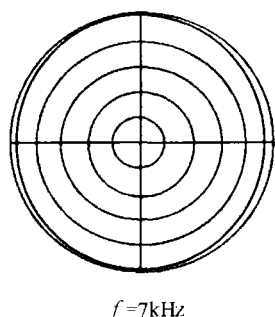


图 7 换能器的水平方向性图

如图 6 所示, 换能器在 1kHz~4kHz 频率范围内, 有着良好的接收电压灵敏度响应, 接收灵敏度大于 -172dB(基准值:  $1\text{V}/\mu\text{Pa}$ ), 起

伏小于  $\pm 3\text{dB}$ 。

我们还分别测定了换能器在频率为 3kHz、5kHz 和 7kHz 时的水平方向特性。图 7 所示的是在  $f = 7\text{kHz}$  时测得的水平方向特性图, 其水平方向不均匀性不大于  $\pm 0.5\text{dB}$ 。而频率为 3kHz 和 5kHz 时的水平方向特性则比 7kHz 时的水平方向特性更好。对声纳设备而言, 则是一个良好的低频宽带接收器。

## 4 结论

换能器电声性能参数的测量是由国防水声计量一级站负责进行的。电声性能测量结果和有关各种试验结果表明, 换能器的各项性能指标完全能满足低频、宽带、大功率和深水工作的要求。换能器在某些电声性能和工作稳定性等方面, 还优于相似工作频段下的自由溢流式换能器; 其某些电声参数、体积与重量比等技术性能还优于某些国外的同类产品。

## 参 考 文 献

- 1 周福洪编著. 水声换能器及基阵. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- 2 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾编著. 压电换能器和换能器基阵. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- 3 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬编著. 声学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.

(上接第 31 页)

计量测试工作, 较好地解决了所遇到的实际问题。

**致谢** 我的同事吴胜举副教授、陈玲助理研究员曾给予本工作诸多有益帮助, 作者在此深表谢意。

## 参 考 文 献

- 1 国家技术监督局. JJG176-95 中华人民共和国计量检定规程. 声校准器. 北京: 中国计量出版社, 1996 年. 1-14.
- 2 陶擎天, 赵其昌, 沙家正. 音频声学测量. 北京: 中国计量出版社, 1986 年. 44-46.
- 3 蒋渭鑫, 张明铎. 计量技术与管理, 1989, (6): 6-8.
- 4 IEC942-1988, Sound Calibrators.