

离散障板稀疏圆柱基阵

王育生 刘振江

(哈尔滨工程大学 哈尔滨, 150001)

陈景德

(国营六一三厂 沈阳, 110003)

1993年3月17日收到

摘要 本文设计了一种新型的离散障板稀疏圆柱基阵。它采用了离散的三叠层宽带散射矩形反声障板, 阵元接收面朝向障板和基阵阵元稀疏排列的布阵技术。阐述了基阵的设计特点并理论计算了障板和基阵的设计原理和声学性能。经过湖上试验和数据分析, 证明这种新型的基阵和法国 ELEDONE 基阵的声学性能相当, 是一种先进的新型潜用圆柱基阵。

Discrete baffle thinned cylinder array

WANG Yusheng and LIU Zhenjiang

(Harbin Engineering University Harbin, 150001)

CHEN Jingde

(State-Run Factory No. 613 Shengyang, 110003)

Received March 17, 1993

Abstract A new kind of thinned cylinder array with discrete baffle has been designed. It has adopted the discrete three-layer wideband scattering rectangular acoustical reflecting baffle and the technology of array arrangement in the way that the receiving faces of array elements are arranged toward the baffle and array elements are thinly ranged. This paper shows elaborated design features of the array and calculated acoustical performances of the baffle and the array theoretically. By means of experiments made in a lake and data analysis. It has been proved that it is an advanced new cylinder array used in under-water sound measurements.

一、引言

圆柱基阵在水下声呐设备中的应用是很广泛的。这是因为圆柱基阵便于在电路上实现延时补偿, 易于形成多波束进行空间搜索, 搜索范围广, 搜索速度快。因此, 圆柱基阵在舰船声呐, 特别是在潜艇上得到了广泛应用。

目前, 圆柱基阵多是采用连续障板和密排阵元的布阵技术。例如我国采用的空气腔圆柱基障板和密排的条形水听器的布阵技术。由于一般的圆柱基阵尺寸较大, 重量较重, 给工程使用带来不便。近年来, 为了提高圆柱基阵的性能, 人们对离散障板稀疏圆柱基阵的研究发生广泛的兴趣。70年代末80年代初法国研制成功了先进的 ELEDONE 潜用声呐设备中的被动声呐圆柱基

阵, 其特点是 1. 离散障板; 2. 水听器在水平圆周稀疏、在垂直平面内错开排列的稀疏布阵技术; 3. 水听器接收面朝向障板。我们研制的离散障板稀疏圆柱基阵, 提出了利用分离障板振动的宽带散射理论模型的新颖设计思想来设计圆柱基阵, 并经过湖上试验, 证明离散障板稀疏圆柱基阵具有优良的特性和工程应用价值。本文扼要介绍三叠层宽带散射矩形障板, 离散障板稀疏圆柱基阵的设计原理和声学性能, 湖上试验和数据分析及其工程应用性能。

二、基阵的设计原理

1. 三叠层宽带散射矩形障板的设计^[1]

实用的水听器基阵, 为了获得需要的指向性响应, 提高空间处理增益, 一般都设计有各种形式的声障板, 如空气腔障板, 各种材料的复合障板等都取得了应用成果。目前国内外的障板设计无论在材料方面还是在障板形式上都出现了多样化, 灵活化, 新颖化的趋势。本文设计的一种新型障板是三叠层网状结构, 外用聚氨脂橡胶包敷而成的耐高静水压的矩形反声障板。将这种障板采用四点简支边界条件安装在圆柱形基阵架上, 利用障板振动的多模理论, 可以展宽障板散射声场的频率范围, 从而使其振动模式(对称-对称模式, 对称-反对称模式, 反对称-对称模式, 反对称-反对称模式)的本征频率覆盖在基阵的工作频率 2kHz—8kHz 范围之内, 使基阵获得良好的工作特性。

三叠层矩形反声障板的结构如图 1 所示。

三叠层网状结构由刚性强的钢丝编织而成(图 2), 层与层间呈 60 度夹角编织, 从而保证障板材料特性是各向同性的, 层间形成大小不一的孔, 孔间隙填充空气, 最外层用聚氨脂橡胶包敷, 保证水密性。

在选择金属编织材料, 编织间距, 包敷材料时, 充分考虑形成的复合材料的等效抗挠刚度和等效面密度值应满足矩形障板本征值的要求。

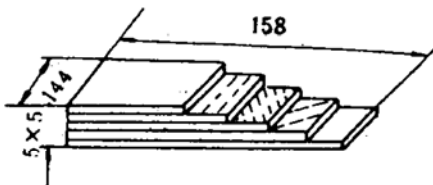


图 1 障板结构示意图

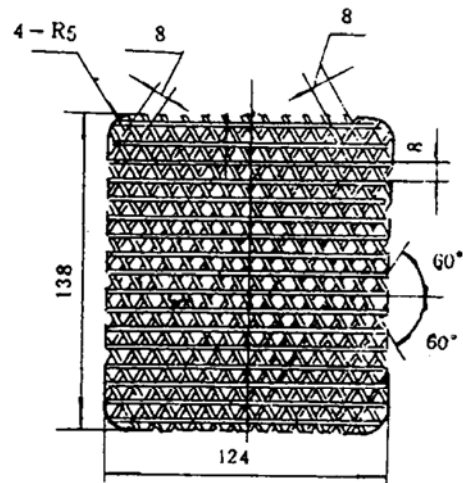


图 2 三叠层网状结构图

这种矩形反声障板, 结构强度高, 能承受高静水压力。试验用的矩形障板都做过 12 小时每平方米 36 公斤静水压力试验, 无变形。

利用高压声管可以测得该反声障板的复反射系数。

我们可以看到, 三叠层结构的反声障板不仅在常压下有较高的反射系数, 而且它对流体静压力没有敏感性, 在较高的静水压力下仍具有较高的反射系数(图 3), 从而保证这种反声障板可用

于深水声呐基阵中。

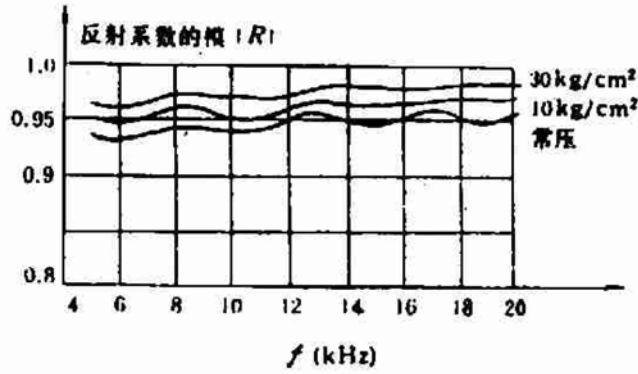


图3 不同高静水压下反射系数同频率的关系

阵元在障板前 50 毫米, 在 2kHz—10kHz 入射声波的激励下, 阵元指向性没有出现元宝形, 有利于改善基阵的指向性, 见图 4。

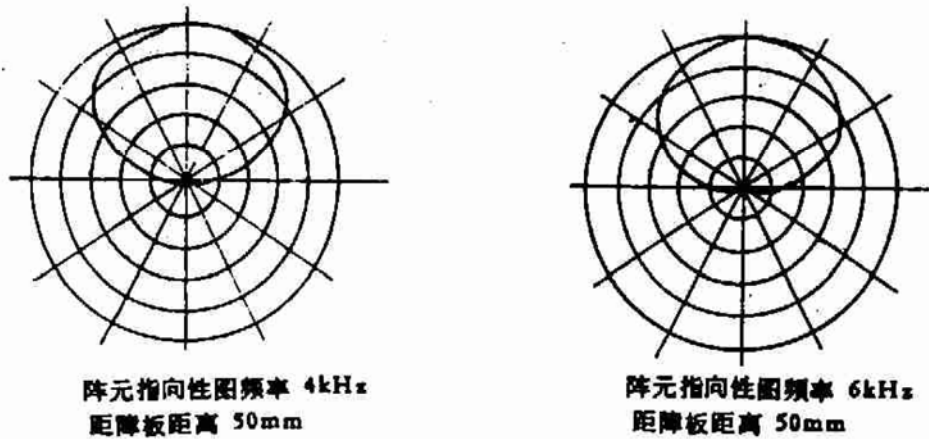


图4 阵元指向性图

实测数据表明, 矩形障板在入射声波激励下, 在 2kHz—10kHz 内, 产生较强的衍射场, 其强度大于入射波强度, 所以在障板前 30 毫米处, 水听器电压灵敏度响应得到增益 3dB—7dB。

2. 离散障板稀疏圆柱基阵的设计原理

1). 基阵的设计

基阵的装配外形图见图 5。

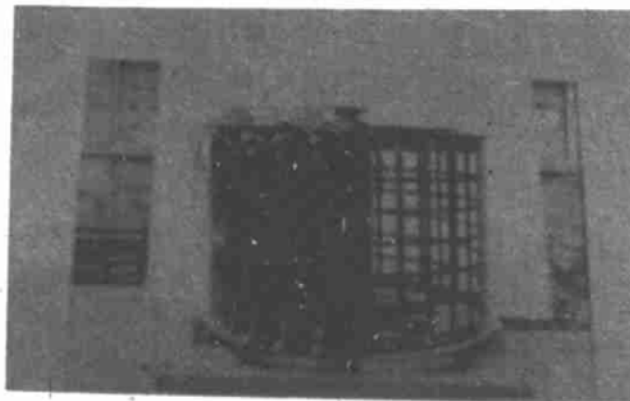


图5 基阵装配外形图

该基阵的组成部份和主要参数如下:

(1). 三叠层宽带散射矩形障板。该障板共 192 个, 镶拼在格子结构基阵架上形成离散圆柱形障板。每个障板尺寸的长 144 毫米, 宽 158 毫米, 厚 25 毫米。

离散矩形障板在声学性能上有明显的优点:

(a) 各个矩形障板由于入射声波方向不同, 所激励的振动特性也不同, 这样扩展了基阵接收声波的频率范围;

(b) 离散障板可以避免连续刚性障板产生的不必要的水波, 有利于基阵的接收特性。

(2). 纵向振动水听器阵元。该水听器阵元共 128 个, 体积小, 重量轻, 结构强度好, 可靠性高。布阵时阵元接收面朝向障板。

(3). 水听器线列阵。沿圆柱障板周向, 均匀布放 32 条线列阵, 每个线列阵由 4 个水听器阵元固定在支撑板上并联组成。线列阵阵元稀疏排列, 其间距为 160 毫米, 阵元接收面朝向障板。

为改善基阵垂直指向性响应, 相邻两条线列阵的阵元, 在轴向错开排列, 错开距离是阵元间距的一半, 从而破坏了相邻阵元排列的周期性, 使相邻阵元的垂直旁瓣不能同相叠加。它的优点是: 在经济上减少大量阵元, 大幅度降低成本; 在声学性能上, 提高了高频段的指向性指数。

(4). 基阵架。基阵架外直径为 1470 毫米, 高度为 1140 毫米。沿周向均匀分布 32 个矩形孔, 沿轴向每排均匀分布 6 个矩形孔, 共 192 个矩形孔。矩形孔的尺寸为 110 毫米 \times 125 毫米。

(5). 阵元接收面至障板的距离为 0—50 毫米可调。

(6). 工作频率范围为 1—4kHz 和 4—8kHz。

2). 基阵的设计原理

(1). 理论模型与基本方程

我们假设: 1) 基阵是将 192 块宽带散射障板镶拼安装在一无限长的弹性薄圆柱壳体上。2) 宽带散射障板和圆柱面共形。3) 声波为斜入射的平面波, 波矢量位于 xoz 平面内, 且与 x 轴夹角为 η , 坐标系的选取如图 6。

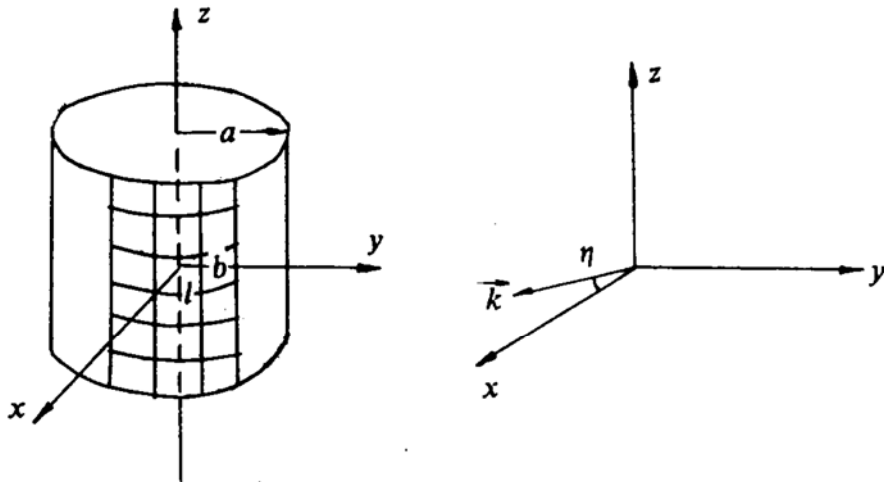


图 6 理论计算声场的坐标系

由于该基阵是由 192 块宽带散射障板所构成, 其近场空间分布取决于每块障板的近场散射特性。因此必须首先研究单块障板在基阵中不同位置时的近场散射特性。因此可假设单块障板是在无限长的刚性柱面上。

设单块障板距圆心的距离为 a , 长为 b , 宽为 l , 所对半径为 a 的圆心张角为 β , 在计算不同

位置时近场分布的坐标系的选取见图 7。

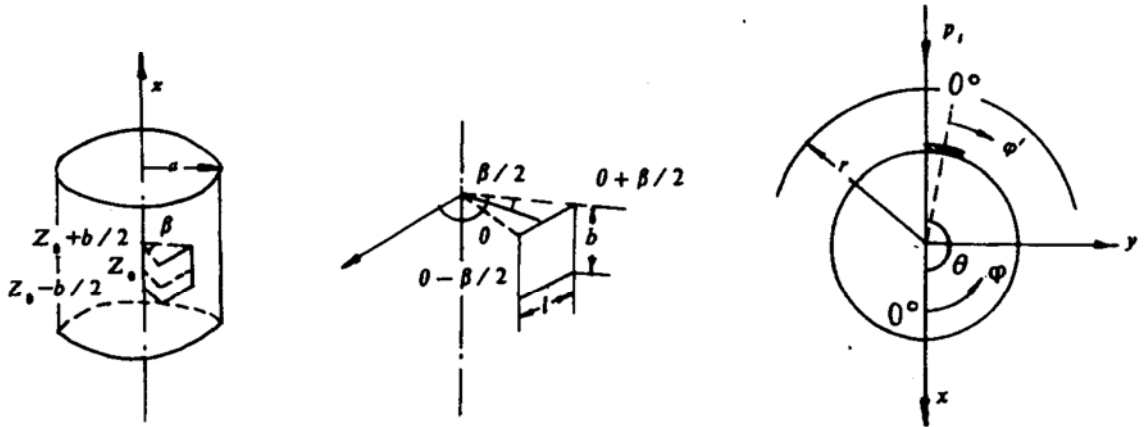


图 7 单块障板计算声场的坐标系

入射声波

$$p_i(x, Z, t) = p_0 \exp \{ i [(kx \cos \eta + kz \sin \eta) - \omega t] \} \quad (1)$$

我们考虑单频稳态情况, 故省略因子 $\exp(i\omega t)$, 得到在柱坐标系中 $r > a$ 时近场的总声场的解^[2]。

$$\begin{aligned} p(r, \varphi, Z) = & p_0 \sum_{L=0}^{\infty} \varepsilon_L i^L J_L(kr \cos \eta) \cos L\varphi \cdot \exp(ikZ \sin \eta) \\ & - p_0 \sum_{L=0}^{\infty} \varepsilon_L i^L \frac{J'_L(ka \cos \eta)}{H'_L(ka \cos \eta)} H_L^{(1)}(kr \cos \eta) \cos L\varphi \cdot \exp(ikz \sin \eta) \\ & - \frac{i\omega\rho}{4\pi^2} \int_{Z_0-b/2}^{Z_0+b/2} \int_{\theta-\beta/2}^{\theta+\beta/2} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{L=0}^{\infty} \varepsilon_L \omega(\varphi', Z') \frac{H_L^{(1)}(r\sqrt{k^2 - \xi^2})}{\sqrt{k^2 - \xi^2} H_L^{(1)}(a\sqrt{k^2 - \xi^2})} \\ & \cdot \cos L(\varphi - \varphi') \exp[i\xi(Z - Z')] d\varphi' dz' d\xi' \end{aligned} \quad (2)$$

其中,
$$\varepsilon_L = \begin{cases} 1 & L=0 \\ 0 & L \neq 0 \end{cases}$$

(2) 式中三项的物理意义很明显, 式中第一项为入射声场, 第二项为刚硬柱的散射声场, 第三项则是有限板在声波作用下的振动再辐射声场, 其中 k 为 $r > a$ 空间的波数, ω 是有限板的法向振速。

根据有限板的振动特性可知, 对于障板的两条中线 $Z = Z_0$ 和 $\varphi = \theta$, 存在四种振动形式, 即对称-对称模式, 对称-反对称模式, 反对称-对称模式和反对称-反对称模式。

我们以对称-对称模式为例来计算有限障板的近场的总声场, 其它模式可同样依此推导。

由于障板是镶在柱面上, 故板上微元应满足弹性壳体运动方程^[3]。为了求出 (2) 式的解析解, 我们将有限障板的轴向, 圆周方向和径向的振动位移分量和入射声波 p_i , 刚硬柱的散射声场 p_s 和有限障板的散射场 p_s 都写为双级数形式:

$$p_i(a, \varphi, Z) + p_r(a, \varphi, Z) = \sum_m \sum_n E_{mn} \cos \frac{m\pi}{\beta} (\varphi - \theta) \cos \frac{n\pi}{b} (Z - Z_0) \quad (3)$$

$$p_s(a, \varphi, Z) = \sum_m \sum_n D_{mn} \cos \frac{m\pi}{\beta} (\varphi - \theta) \cos \frac{n\pi}{b} (Z - Z_0) \quad (4)$$

式中 E_{mn} , D_{mn} 为系数, $m, n = 1, 3, 5 \dots$ 。

利用正交性, 可将近场的总声场写为

$$p(a, \varphi, Z) = \sum_m \sum_n (E_{mn} + D_{mn}) \cos \frac{m\pi}{\beta} (\varphi - \theta) \cos \frac{n\pi}{b} (Z - Z_0) \quad (5)$$

将有限障板各位移分量的双级数形式代入弹性圆柱壳体运动方程, 比较等式两边系数并整理后, 可得到一组关于径向振速的展开系数 A_{mn} 的无穷方程组:

$$A_{mn} = \frac{E_{mn} - \sum_{p \neq m} \sum_{q \neq n} A_{pq} Z_{mnpq}}{\frac{E_1}{i\omega a} \frac{D}{D_1} + Z_{mnmn}} \quad (6)$$

式中 $E_1 = E / (1 - \nu^2)$, 其中 E 为有限障板的杨氏模量, ν 为其泊松系数,

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{n\pi}{b} a \nu; & a_{12} &= \frac{1 + \nu}{2} \frac{m\pi}{\beta} \frac{n\pi}{b} a; \\ a_{13} &= \frac{n^2 \pi^2}{b^2} a^2 + \frac{1 - \nu}{2} \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} - \omega^2 a^2 \frac{\rho_1}{E_1}; \\ a_{21} &= \frac{m\pi}{\beta} + \frac{h}{8a^2} \frac{\nu}{1 - \nu} \frac{m\pi}{\beta} \left(1 - \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right); \\ a_{22} &= \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} + \frac{1 - \nu}{2} \frac{n^2 \pi^2}{b^2} a^2 - \omega^2 a^2 \frac{\rho_1}{E_1}; \\ a_{23} &= \frac{1 + \nu}{2} \frac{m\pi}{\beta} \frac{n\pi}{b} a; \\ a_{31} &= \frac{h^2}{24a^2} \left[2 \left(\frac{n^2 \pi^2}{b^2} a^2 + \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right) - \frac{4\nu}{1 - \nu} \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} + \frac{2 + \nu}{1 - \nu} + 1 - \omega^2 a^2 \frac{\rho_1}{E_1} \right]; \\ a_{32} &= \frac{m\pi}{\beta}; & a_{33} &= \frac{n\pi}{b} a \nu; \end{aligned}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= \frac{\nu}{2(1-\nu)} \frac{n\pi}{b} a; & b_{12} &= \frac{1+\nu}{2} \frac{m\pi}{\beta} \frac{n\pi}{b} a; \\
 b_{13} &= \frac{n^2 \pi^2}{b^2} a^2 + \frac{1-\nu}{2} \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} a^2 - \omega^2 a^2 \frac{\rho_1}{E_1}; \\
 b_{21} &= \frac{\nu}{2(1-\nu)} \frac{m\pi}{\beta}; \\
 b_{22} &= \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{n^2 \pi^2}{b^2} a^2 - \omega^2 a^2 \frac{\rho_1}{E_1}; \\
 b_{23} &= \frac{1+\nu}{2} \frac{m\pi}{\beta} \frac{n\pi}{b} a; \\
 b_{31} &= -\left[\frac{a}{h} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \right]; \\
 b_{32} &= \frac{m\pi}{\beta}; & b_{33} &= \frac{n\pi}{b} a\nu;
 \end{aligned}$$

以上各式中 ρ_1 为有限障板的密度, h 为其厚度。若令 $Z_{mn} = \frac{E_1}{i\omega a} \frac{D}{D_1}$, 则可得关于振速的展开系数 $\{A_{mn}\}$ 的方程组

$$(Z_{mn} + Z_{mnmn}) A_{mn} + \sum_{p \neq q} \sum_{q \neq n} A_{pq} Z_{mnpq} = E_{mn} \quad (9)$$

或写为矩阵形式

$$[\mathbf{Z}][\mathbf{A}] = [\mathbf{E}] \quad (10)$$

从 (9) 式中求出 $\{A_{mn}\}$, 代入 (2) 式, 便可得有限障板在声波作用下在 $r > a$ 区域的近场的声场。

(9) 式的物理意义是很明显的, 它表示作用于障板的 (m, n) 模的广义力 (E_{mn}) 与两部分力平衡, 一是障板作 (m, n) 模振动的机械阻力, 因此 Z_{mn} 就代表障板的机械性能, 即机械阻抗; 另一部份是障板作 (p, q) 模振动产生的声场作用于按 (m, n) 模振动时障板面上的声压力, Z_{mnpq} 正是反映模式振动之间的这种耦合作用。因此 Z_{mnmn} 是第 (m, n) 模的自辐射阻抗, Z_{mnpq} 是各种模间的互辐射阻抗。

采用同样的推导方式, 可得到对称-反对称模式, 反对称-对称模式和反对称-反对称模式的近场的声场分布。用迭加原理可最后求得有限障板在 $r > a$ 区域的近场的总声场。

(2). 基阵的近场空间分布

由于声波的人射方向对任何一块障板都是不同的, 因此需要对不同的人射波和障板法线的夹角来进行对每块障板的振动系数的计算。从而可求得各种角度下每块障板的近场空间分布。

从单块障板散射场的规律可知, 声波斜入射时, 散射场对障板法线而言是不对称的, 散射场对邻近障板的影响范围约在 $1/2$ 块障板范围内。因此, 我们对声波斜入射时靠最大值一边的 $1/2$ 块障板范围内进行迭加, 称为迭加区。这样我们就可得到基阵的近场空间分布。

(3). 基阵的水平指向性

由于入射声波的人射角不同, 每个障板的振动也就不同, 基阵的近场分布也不同, 因此给于诸阵元的振幅和相位也不同, 显然它们是声波入射角的函数。

在入射声波的作用下引起障板振动而给予诸阵元的振幅和相位的数据是这样确定的: (1) 在已知的声波入射角情况下, 求得基阵近场分布的数值解; (2) 阵元所在位置处声场的幅值和相位, 就是该阵元的振幅和相位; (3) 改变不同的频率、入射角、阵元接收面离障板的距离, 就可得到计算水平指向性所需的全部阵元的振幅和相位的数据。

获得了由于障板振动而给予诸阵元的振幅和相位的数据后, 就可按常规的圆柱基阵水平指向性求和公式计算其水平指向性。

(4). 基阵的垂直指向性

用相同的方法可计算基阵的垂直指向性。

(5). 基阵的指向性指数

我们对该基阵的指向性指数进行了计算, 见表 1。

表 1 基阵的指向性指数(dB)

频率(kHz)		1	2	3	4	5	6	7	8
阵元接收面 距障板的距离 (mm)	10	10.79	13.51	15.99	17.27	19.91	20.04	19.81	20.49
	20	10.16	13.52	15.91	17.05	19.79	19.58	19.40	19.33

该基阵和法国 ELEDONE 基阵的指向性指数的比较见表 2。

表 2 离散障板稀疏圆柱基阵和法国 ELEDONE 基阵的指向性指数(dB)

频率(kHz)	1-4	4-8
离散障板稀疏圆柱基阵	13.5	19.9
ELEDONE 基阵	14.5	21.0

三、湖上试验和数据分析

1. 湖上试验

湖上试验是于 1987 年 3 月到 4 月在中国科学院声学研究所千岛湖试验场进行的。基阵位于水下 10.3 米, 测量收发间的距离是 20 米。

基阵近场测量方框图见图 8。

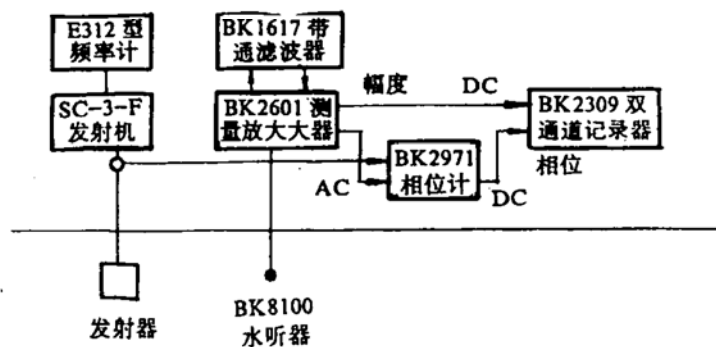


图 8 基阵近场测量方框图

基阵测量系统方框图见图 9。

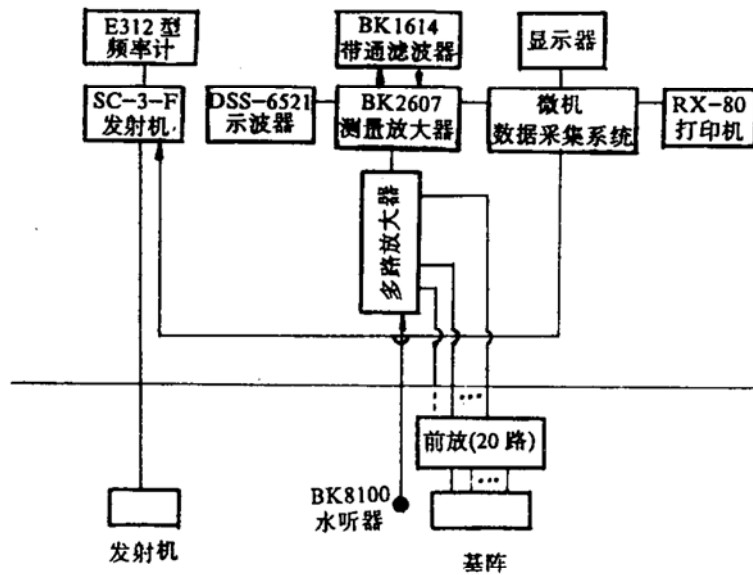


图 9 基阵测量系统方框图

2. 数据分析

我们在试验中取得的数据中, 典型的举出一部份数据。

(1) 水平指向性, 见图 10。

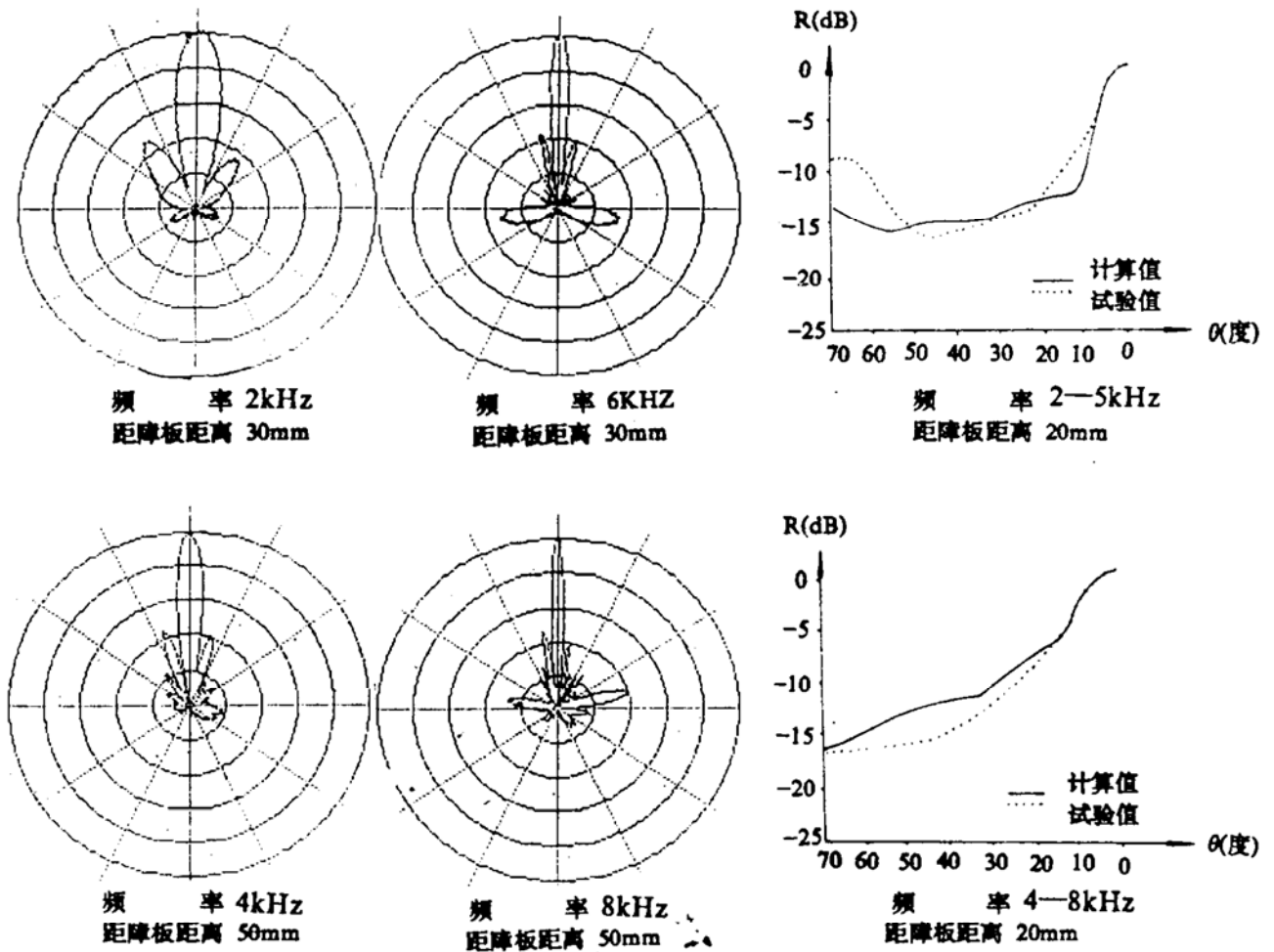


图 10 基阵水平指向性

(2) 垂直指向性, 见图 11。

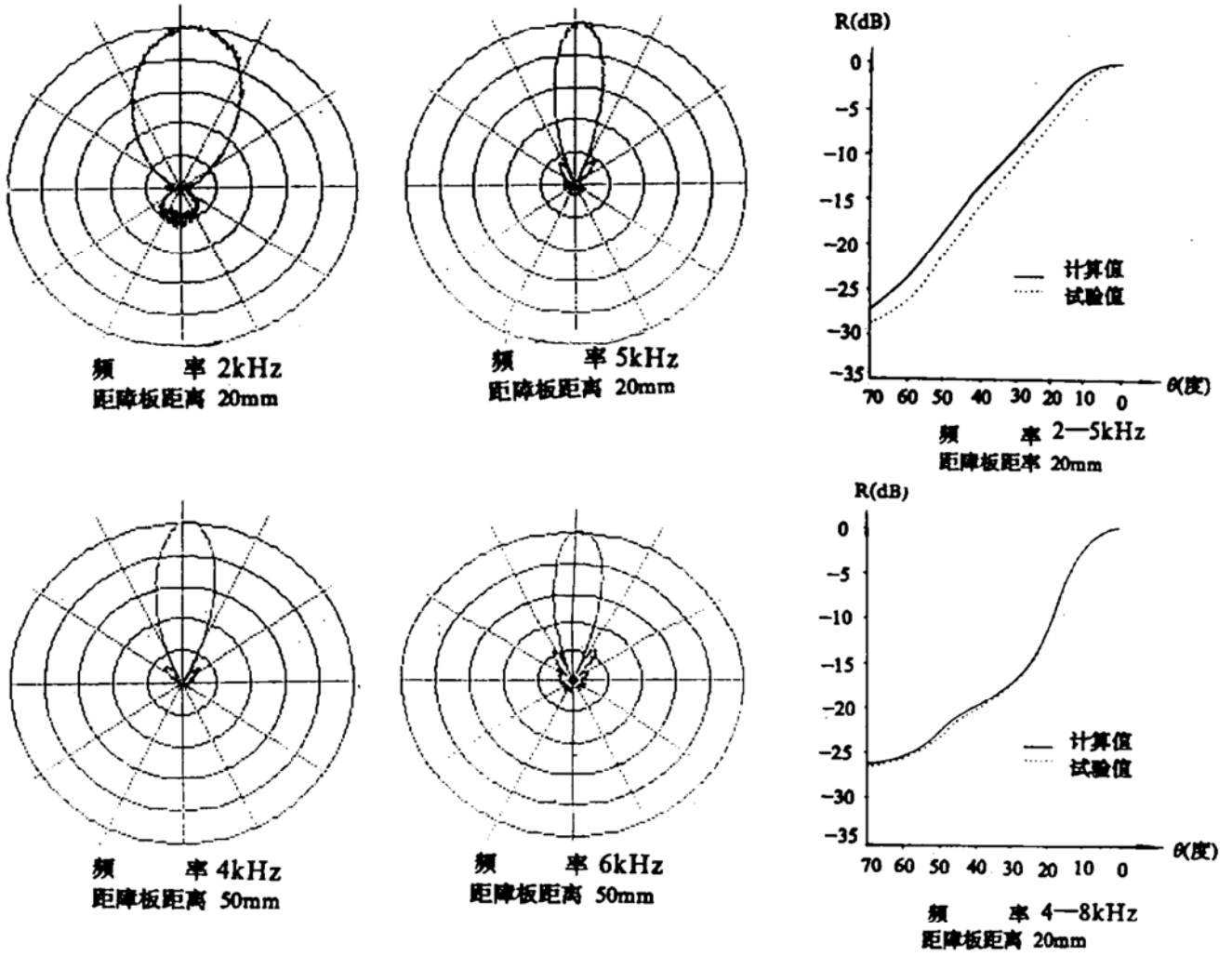


图 11 基阵垂直指向性

(3) 离散障板稀疏圆柱基阵和法国 ELEDONE 基阵的主要技术性能指标示于表 3。

表 3 离散障板稀疏圆柱基阵和法国 ELEDONE 基阵的主要技术性能指标

主要技术性能指标	直径 (mm)	高度 (mm)	线列阵 阵元数目	线列阵 阵元数目	阵元 数目	每个 波束的 形成方 法	指向性指标			指向性指标		
							1—4kHz			4—8kHz		
							水平 指向性 $2\theta_{-3dB}$	垂直 指向性 $2\theta_{-3dB}$	指向性 指数	水平 指向性 $2\theta_{-3dB}$	垂直 指向性 $2\theta_{-3dB}$	指向性 指数
离散障板稀疏圆柱基阵	1530 — 1620	1140	32	4	128	12个 线列 阵信 号组 成	18°	32°	13.5 dB	7.5°	21°	19.9 dB
ELEDONE 基阵	1800	900	32	4	128	12个 线列 阵信 号组 成	18°	48°	14.5 dB	7.5°	21°	21 dB

五、结 论

1. 三叠层网状结构的矩形障板, 镶拼成圆柱形离散障板, 对工作扇面以外的点源干扰具有很强的抑制作用, 可以扩展基阵的接收频率范围, 在 1kHz—8kHz 频段内改善了基阵的指向性响应。

2. 这种新型障板在 2kHz—10kHz 能改善阵元的指向性特性, 特别是高频可消除不希望有的元宝形指向性特性, -3dB 指向性开角大, 这样可获得很好的基阵指向性特性。

3. 这种新型障板在 2kHz—10kHz 频带范围内, 可使水听器电压灵敏度增高 3.1dB — 7.6dB 。

4. 阵元纵向稀疏排列, 能够得到密排阵所要求的垂直指向性响应, 能够改善高频段的指向性响应, 提高高频段的指向性指数。同时可节省大量的水听器阵元, 有利于降低造价, 提高基阵的可靠性。

5. 离散障板稀疏圆柱基阵的声学性能, 优于空气腔障板, 优于各类无限大多层复合连续障板。

在本课题研究过程中, 多次得到中国科学院声学所所长侯自强研究员, 哈尔滨工程大学周福洪教授、何祚镛教授的指导和咨询; 得到中船总军工部 [焦洪彦], 原海装电子部余春, 中国科学院声学研究所千岛湖试验场和课题组全体同志的支持, 在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] 陈景德、王育生, 应用声学, 1992, No.3, 20—25.

[2] Lyamshev L. M., "Sound Scattering for Infinite Thin Cylindrical Shell", Soviet physics, Acoustics, 2(1958), 161—167.

[3] Kemnard E. H., "The New Approach to Shell Theory: Circular Cylinders", J. Appl. Mech., 3(1953), 33—40.