宽带稀疏圆柱阵的实验研究

耿成德

（中船总公司七院七一五所）

本文通过对宽带稀疏圆柱阵试验给出的测试结果与理论值的相当吻合这一点，验证了我们在设计圆柱阵中所采用的理论计算公式在工程上的实用性。文中还特别指出当选用适当的幅度加权因子对宽带稀疏圆柱阵中出现的大旁瓣(栅瓣)是能够进行有效抑制的。

一、引　　言

近年来，人们对稀疏基阵的研究发生广泛的兴趣。70年代的联邦德国产品阿特拉斯(ATLAS)CSU—3小型多功能潜用声纳系统和70年代末80年代初法国研制的Eledone“刺鲀”潜用声纳设备中的被动声纳圆柱基阵，都采用了条形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方案。这种方案的优点是可以在保证基阵性能的前提下减少电子线路的复杂性和降低水下分机的成本。

许多研究者对带声障板的稀圆柱阵也进行了理论探讨。哈船院老师提出了“分离聚氨酯障板振动的宽带散射理论模型”，他们对一块矩型障板在刚性圆柱体上的振动模式进行了理论和实验探讨，认为只有按一定条件制作的4点简支的分离障板才能在较宽的频带内产生均匀的宽带强散射波。文献[1]对以空气腔为反声障板的稀疏圆柱阵的水平指向性进行了研究，指出由于障板的反射作用，每个阵元除有通常由位置程差引起的相移外，还有一个附加相移。我们的湖上试验表明，即使对由于声障板散射作用所带来的附加相移进行“完全补偿”，测试结果也没有明显改善。这是因为测试设备的系统误差远大于附加相移，掩盖了文献[1]中所述的“完全补偿”的好处。

几年前我们对宽带稀疏圆柱阵也开展了一些理论和试验研究工作。由于用有限元法计算圆柱阵近场特性的程序设计相当复杂，因此，为便于计算机模拟计算，也为工程实现的可能性，我们提出了适于工程设计计算的理论模型[2]。它是基于通常的非透声曲面阵设计，使用了根据克希霍夫近似而得出的实衍射波因子，代替由于声障板宽带散射引入的与频率有关的复衍射波因子，并考虑到在圆柱阵垂直平面内水听器条的错开排列。试验表明，当频率升高，布阵变稀，障板散射增强，用实衍射波因子代替基元因子的近似需作修正了。我们认为对圆柱阵的一个局部来说，我们把置于圆柱阵障板前的一个点源视为它被置于一个无限大的平面障板前，无疑，对较大的圆柱阵这种近似是可行的。这样，我们就可按平面障板前的虚元法或镜面反射原理来近似确定圆柱阵障板前的阵元指向性了，为了验证所建立的理论模型的可靠性，最近我们又进行了一次湖上试验，本文从试验结果出发，扼要阐述了声障板的散射作用，布阵的疏密对指向性的影响，稀疏阵的特点以及宽带平滑作用。

二、试验用理论公式

文献[2]曾给出过归一化空间指向性函数，为了完整性，这里再简略列出。频率为

f的空间指向性函数为

$$V_f(\theta,\phi)=\frac{1}{N}\left|\frac{\sin(NU_1/2)}{\sin(U_1/2)}\right| \frac{[G_1+G_2)^2+(H_1+H_2)^2]}{\left|\sum_{m=1}^{2M}W_m\sin(KH\cos\phi_m)\right|}$$

式中

$$G_1=\sum_{m=1,3}^{2m-1}E(\theta_m)W_m\cos U_2 \qquad (2)$$

$$G_2=\sum_{m=3,4}^{2M}E(\theta_m)W_m\cos(U_2-U_1/^2) \qquad (3)$$

$$H_1=\sum_{m=1,3}^{2M-1}E(\theta_m)W_m\sin U_2 \qquad (4)$$

$$H_2=\sum_{m=3,4}^{2M}E(\theta_m)W_m\sin(U_2-U/_2) \qquad (5)$$

$$U_1=KD\sin\theta \qquad (6)$$

$$U_2=KR[\cos\theta(\phi-\phi_m)-\cos\phi_m] \qquad (7)$$

$$E(\theta_m)=\begin{cases}\sin(KH\cos\theta_m) & \text{当}\ |\theta_m|\leqslant Q\\ 0 & \text{其它}\end{cases} \qquad (8)$$

$$Q=\pi-\sin^{-1}[R/(R+H)] \qquad (9)$$

2M为圆柱阵工作扇面内的水听器条数，N为每条水听器的基元数，D为水听器条中基元间隔，K为水中圆波数，R为圆柱半径，W_m为幅度加权因子，ϕ_m为水听器条的中心坐标角，$E(\theta_m)$(θ_m为圆柱阵上基元的法线方向与声波入射方向的夹角)为基阵的声软障板散射引起的屏蔽因子，H为阵元的有效声中心离障板的距离。

宽带指向性函数$V_{\Delta f}(\theta\cdot\phi)$可表示如下形式：

$$V_{\Delta f}(\theta\cdot\phi)=\left(\frac{1}{f_2-f_1}\int_{f_1}^{f_2}V^2_f(\theta,\phi)df\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (10)$$

式中f_1和f_2分别为宽频的下限频率和上限频率，指向性指数则用下式表示：

$$DI=10\log\frac{\pi}{\int_0^{\pi}d\phi\int_0^{\pi/2}V^2_{\Delta f}(\theta,\phi)\cos\theta\,d\theta} \qquad (11)$$

我们对具有耐压反声软障板的实际基阵(real array)测量了单个阵元的指向性，结果表明，在高频段(F≥5.66KHz)与(8)式相当吻合；低频时用实衍射波因子$\frac{1}{2}(1+\cos\theta_m)$来代替$E(\theta_m)$较合适。

三、试验概述

1.试验方法简述

具有加聚氨酯包复的耐压泡沫塑料反声软障板用螺栓支撑在圆柱阵圆周表面的四点上；为充分发挥障板的散射特性，带前置放大器的水听器工作面朝向声障板，相邻垂直水听器条中的基元交错排列，构成稀疏布阵，如图1所示。

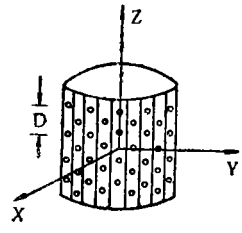


图1 稀疏布阵示意图

用噪音法(宽带噪声发射，窄带滤波接收)和连续波法分别测量基阵的宽带指向性和单频指向性。

测试系统采用了自动回转装置，通过PC—1500计算机对测试数据进行自动采集和实时处理。

2.试验结果及讨论

(1)稀疏布阵的特点

为了比较，我们同时给出了密排布阵的结果，在试验圆柱阵中我们沿准线把在大约150°扇面中密布28条水听器称为密排布阵；

而把相间抽去一条，由14条组成工作扇面称为稀疏布阵。水平指向性$V_1(\alpha)$的测试结果示于图2。

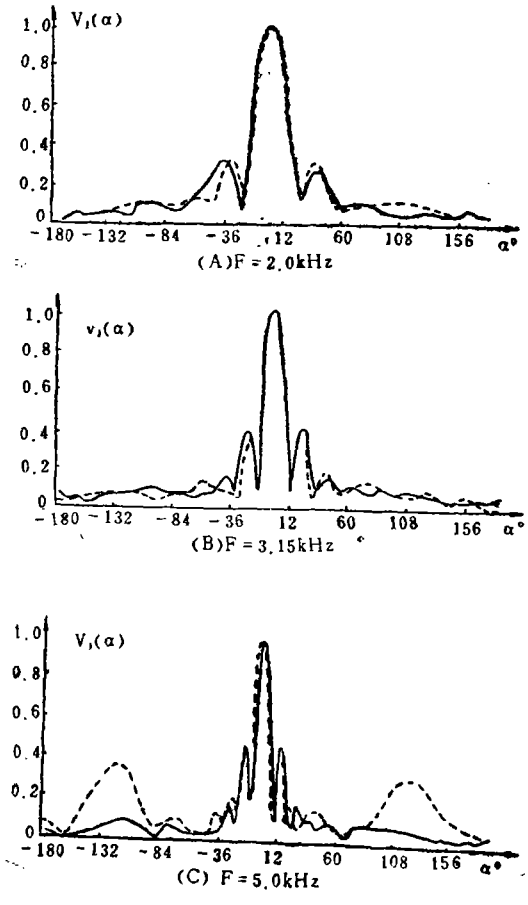


图2 稀密排布阵的指向性图比较

图中实线为密排布阵的指向性图，虚线为稀疏布阵的指向性图。由图可见，稀疏布阵的主瓣比密排时的稍窄，第一副瓣较低，这可能就是反声障板的宽带散射作用所致，而密排时，由于固定水听器的金属构架使声障板的散射作用受到了阻碍，当f≥3.7KHz后，由于$\frac{H}{\lambda}>\frac{1}{4}$使得在水听器的幅射面不能形成同相迭加[1]，导致阵的第一副瓣明显增大；当f≥5.0KHz，由于稀疏布阵中不再满足连续条件，使得在±110°方位附近出现大的旁瓣(类似于线列阵中的栅瓣)，而在密排布阵中，因满足连续布阵条件，这个"栅瓣"自然就被抑制了。

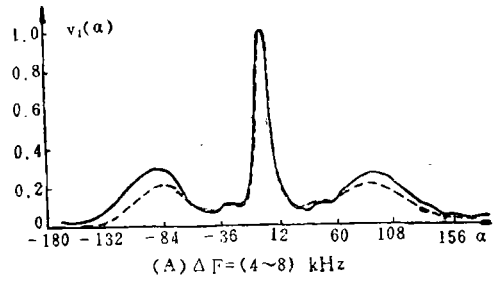
2)幅度加权对"栅瓣"的抑制

如上所述，在稀疏布阵中，当频率高于某一值时，会在基阵指向性图主瓣两侧大约100°方位附近出现两个对称的大旁瓣(栅瓣)(参看图2(C)))。即付极大，文献〔1〕对它的特点进行了阐述。但对稀疏阵出现大旁瓣的原因尚无明确的解释。可以认为圆柱基阵工作扇面中几条边缘水听器具有近似相等的相位差，因而它们对100°方位附近的入射波近似是等幅度、等相位迭加。显然，稀疏阵的大旁瓣就是这种迭加的结果。于是我们选择适当的、工程上能实现的余弦平方束控因子进行加权，以达到破坏工作扇面中几条边缘水听器的近似同相迭加效应。试验中，选择在中间频率(5.66KHz)上进行幅度加权调整，对高频段（单频和宽带）的测试结果示于图3。图中实线为均匀加权的指向性图，虚线为幅度加权的指向性图。为明了起见，表1列出了加权前后的大旁瓣归一化幅值Ψ。

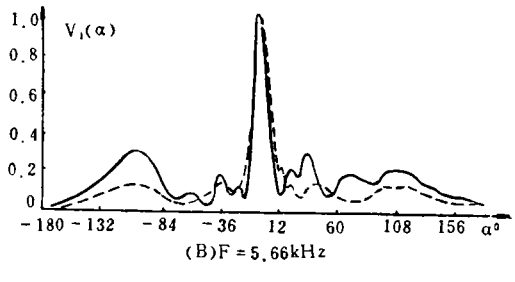
表1 大旁瓣在加权前后的归一化幅值Ψ

F(KHz)		Ψ	
		加权前	加权后
5.66	左	0.31	0.14
	右	0.23	0.14
8.0	左	0.56	0.45
	右	0.49	0.43
(4—8)	左	0.32	0.19
	右	0.24	0.18

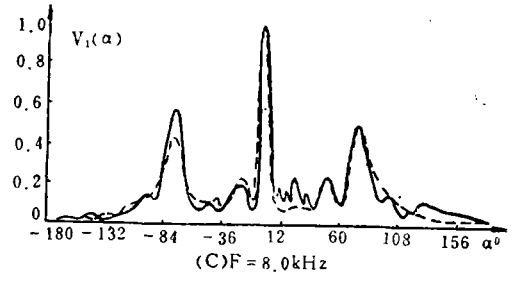
由图3和表1看出，只要选择合适的加权因子，用幅度加权的办法，不仅对第一付瓣，而且对由于稀疏布阵后，在高频段不满足基元间隔的连续性条件出现的两个远离主瓣的大旁瓣也有抑制作用(最大可抑制41%左



(A) ΔF=(4~8) kHz



(B)F = 5.66kHz



(C)F = 8.0kHz

—均匀加权

————幅度加权

图3 幅度加权对指向性图大旁瓣的抑制

右)。试验中还发现，如要较好地抑制较高频段的大旁瓣，则应在此频段进行幅度加权调试，而此权系数值对低频的旁瓣抑制仍起作用。

3)指向性的实测值与理论计算值的比较

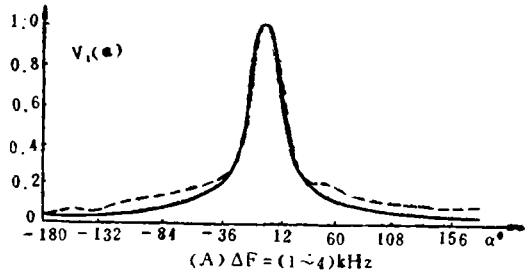
为了比较，我们除了给出按前节理论公式计算的理论值外，还列出了法国Eledone声纳技术说明书(DASM82/06/739JLC)给出的指向性技术参数值（本试验基阵的参数同于Eledone)。而且既给出宽带信号的结果，也给出3个典型单频值,但指向性图只给出宽带的。

• 水平指向性$v_1(a)$的比较

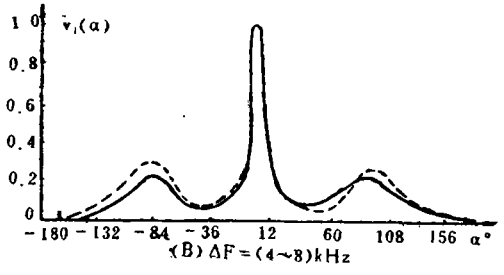
表2列出1～4KHZ和4～8KHZ的宽带信号及其相应几何中心频率2KHZ和5.66KHz以及8.0KHZ的水平指向性特性的理论值与测试值。表中θ为指向性函数图的半功率点夹角(度)；Ψ_1为第一旁瓣的归一化幅值。相应的宽带信号的指向性曲线示于图4,图中实线为理论值，虚线为测试值。

表2 水平指向性的比较

F(KHz)		测试值 θ	测试值 Ψ_1 左	测试值 Ψ_1 右	理论值 θ	理论值 Ψ_1	Eledone
宽带	1～4	21.8	0.21	0.21	19.0		18.0
	4～8	7.6	0.32	0.27	8.2	0.22	7.5
单频	2.0	23.0	0.19	0.25	23.0	0.25	
	5.66	8.6	0.25	0.25	8.5	0.22	
	8.0	6.0	0.25	0.19	5.8	0.26	



(A) ΔF=(1~4)kHz



(B) ΔF=(4~8)kHz

——理论值————测试值

图4 宽带稀疏圆柱阵水平指向性理论值与测试值的比较

• 垂直指向性$v_2(a)$的比较

同样我们将圆柱阵垂直布放时测的指向性值与理论值的比较列于表3,宽带的指向性曲线绘于图5。

表3 垂直指向性比较表

F(KHz)		测试值			理论值		Eledone
		Θ	Ψ1		Θ	Ψ1	Θ
宽带	1—4	51.8	0.03	0.07	49.0		48.0
	4—8	20.2	0.13	0.23	20.8		21.0
单频	2.0	61.8	0.07	0.05	60.0		
	5.66	22.2	0.19	0.25	22.0	0.14	
	8.0	17.2	0.42	0.38	16.2	0.19	

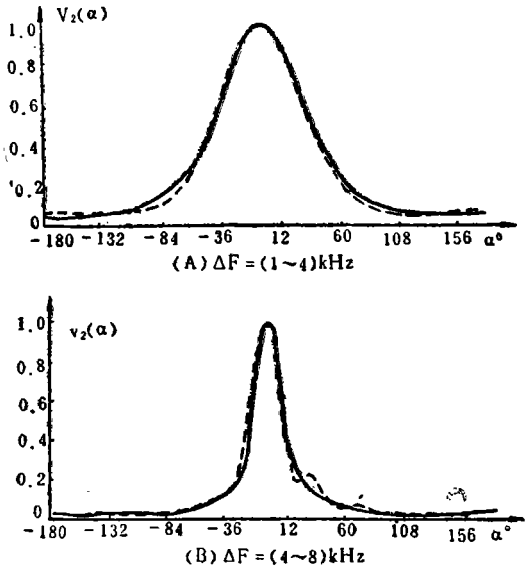


图5 宽带稀疏圆柱阵垂直指向性理论值与测试值的比较

从表2、表3和图4、图5看出：无论是对低频或是高频，也不管是对单频或是宽频带，稀疏圆柱阵水平指向性与垂直指向性的试验图形与理论图形的主瓣宽带相当一致；水平指向性图中大旁瓣出现的方位和达到的高度也相当吻合。测试图形中旁瓣幅度比理论值高，这是水听器条的不一致性（幅度与相位的起伏）所致。

4）指向性指数(DI)的比较

对宽带稀疏圆柱阵指向性指数(DI)的测量计算，这里近似采用了Bobber·R·J提出的方法[3]，现将此法得到的DI测试值与按(10)式计算得到的理论值一并列于表4，表中同时列出了Eledone值。|ΔDI|表示测试值与理论值的偏差。

表4 指向性指数的比较

F(KHz)	DI(dB)			|ΔDI|(dB)
	测试值	理论值	Eledone	
1～4	14.12	13.96	14 5	0.16
4～8	22.79	21.25	21.0	1.54
2.0	13.1	13.80	14.6	0.70
5.66	21.84	21.16	20.8	0.68
8.0	24.52	22.57	22.4	1.95

由表4可以看出：无论是对单频还是对宽频带，均有|ΔDI|<2dB据文献[3]的分析，和提供的公式估算指向性因数 $R\theta$ 的综合误差约为±1.0dB。由此可见，DI的实测值与理论值已相当吻合了。还可看出，测试值或理论计算值与Eledone值也吻合得很好，其误差也多在2dB以内。

比较宽带与单频的测试值可知，用几何中心频率的指向性指数来估算宽频带的指向性指数是可行的，其误差也在2dB以内。

由于图4和图5中4～8KHz的指向性测试图形与理论图形的旁瓣有明显差别，从而导致了4～8KHz的DI值产生较大的偏差(|ΔDI=1.54dB)，显然这个偏差在误差范围之内。

四、结束语

试验表明，当形成指向性图的工作扇面中各条水听器的幅度比较均衡和用延迟精度较高的数字延迟线代替精度较差的LC延迟线时，测试指向性图更趋于理论图形。

选用适当的幅度加权因子加上宽带平滑，可对宽带稀疏圆柱阵中出现的大旁瓣(栅瓣)产生明显抑制作用。

指向性特性(指向性参数和DI值)的测试结果与理论值相当吻合，说明在宽带稀疏圆柱阵设计中所采用的理论计算方法作为工

超声技术在国民经济中的应用

徐开兴

（中船总公司七二六厂）

本文是以介绍应用为目的，收集了近几年来一些超声技术应用和信息，编写的综述。介绍超声技术在工业生产上和国民经济中的应用情况。着重介绍超声技术在超声检测、加工、清洗和焊接等方面应用取得的最新成果。

一、前　言

超声波是一种频率高于人们听觉阈的声振动波。常用频率在十千赫至几十兆赫。超声波应用大致可分为：用超声波使物体或物性变化的功率应用和超声波得到若干信息的通信(检测、信息)应用。一般，前者的超声波功率要比后者大10倍左右。就功率而言，由于应用目的不同，所需大小也不同。一般来说，功率大效果好。例如，在液体中发射足够大的功率超声波，就会产生“空化现象”，用于清洗、油的乳化、固体粒子的液中扩散、高分子的分解与重聚、促进化学反应、脱气等；在气体中发射大功率超声波，可加速烟雾粒子的凝聚、食品干燥等；在固体射中发大功率超声波，可作振动粉碎，金属材料切削和塑性加工，焊接金属和塑料及促进粘合剂固化等等。

超声技术是一门以物理、电子、机械以及材料学为基础的通用技术。对提高产品质量，保障生产安全和设备运行，降低生产成本，提高生产效率特别有效。因此，世界各国对此都非常重视。在我国，对超声技术的应用研究也十分活跃。

目前，超声技术研究和应用的范围已从船舶、冶金、机械等扩大到二十多个工业和其他经济建设部门，并取到了很好的社会效益和经济效益。这里作部分应用介绍。

程估算是适用的。

应用微机对测试数据实现自动采集的实时控制方法，对大型圆柱阵的测试是一次成功的尝试，在换能器和基阵测试工作中应予广泛采用。

测试工作得到了试验小组全体同志的协助，特别是袁文俊、楚龙宝、付临泰、宋明凯、李先荣、贺永学，宋兰英等同志，他们分别在测试方案的实施，水听器的提供，基阵架的设计方面给予了许多帮助，在此一并表示感谢。

参考文献

〔1〕徐俊华、兰军，“具有反声障板的圆柱(弧)基阵水平指向性的研究”，声学学报第10卷，第3期，1985年

〔2〕耿成德，“宽带稀疏圆柱阵指向性指数计算”，舰船科学技术，第8期，1985年

〔3〕R.J.Bobber，《Apperoximation to the directivity index》AD—778660，1974