

用空间采样方法研究声场空间分布

王朔中

(中国科学院声学所东海研究站)

本文讨论用空间采样技术测绘水下声场空间分布规律的实验。进行这样的实验首先要有一个小的无方向性的水听器。实验时水听器在被测声场中扫描,连续记录声压和探头坐标的读数。为了避免相位计算中容易出现的差错,将原始数据通过内插法进行一次变换,从而获得了满意的结果。本文分别给出一个平面波声场和一个尖劈边缘附近衍射声场的声压幅度和相位分布图,这些实验结果显示了场分布的清晰图象。和理论图形相比较,说明实验结果是可靠的。

在研究声场的分布规律时,如果在空间逐点进行测量,绘制出声学参数的空间分布图,则能提供一幅场的直观图象,显示其分布的细节。这无疑深入了解声场性质的一个有用的实验方法。为了绘制一幅声场分布图,需要具备在空间采集大量数据,并有对这些数据进行处理的能力。实现空间采样的首要条件是有一个合适的探头,还要有一套使探头在声场中扫描和定位的装置。本文介绍一个在池中测绘尖劈边缘附近衍射声场的实验。实验中所使用的数据采集系统已由另文作了介绍^[1]。这里将讨论实验方法,包括水听器和数据处理的问题,给出实验结果,并将这些结果和理论进行比较。

料是PZT-4压电陶瓷,轴向极化,电极为上下两平面。支承杆由不锈钢管制成。实验所使用的声波频率为51KHz,因而在自由场中的波长 $\lambda=29.4\text{mm}$ 。晶片用环氧树脂密封,其外径不大于3mm,比波长小一个数量级。支承杆的外径为1.5mm。晶片和支承杆之间的联结细颈是一段非刚性的绝缘导线,这是为了消除杆和晶片之间的机械耦合,以使水听器的输出电压仅与晶片所在位置的声场有关,而不受支承杆振动的影响。

一、水听器

1. 结构及几何尺寸

在声场中进行逐点采样时,为了使被测声场不受显著的扰动,并使所测得的量能够代表声场中某一点的特性,必须使用几何尺寸很小的水听器,实验中使用的水听器结构如图1所示。它由圆柱状晶片、支承杆以及联结晶片和杆的一小段细颈所组成。晶片材

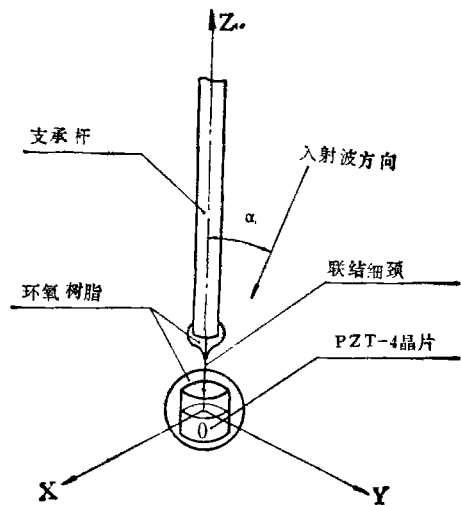


图1 实验用水听器

2. 指向性的考虑

实验所要记录的量是声压，它是一个标量，所以水听器的响应必须是无方向性的。一个水听器有方向性说明它在一定程度上对声压以外的物理量(声压梯度)是敏感的。如果使用这样的水听器，得到的数据将不能直接使用。本文要讨论的是一个尖劈对入射平面波的衍射。假定劈的宽度远大于波长，而且平面波入射方向与劈的边缘垂直，则在劈边缘中部附近的声场可以近似地看成是一个二维场。对这种二维声场进行测量时，只要水听器在一个平面内是无方向性的，并使这一平面和劈的边缘相垂直就行。

根据其对称性不难看出，图1所示水听

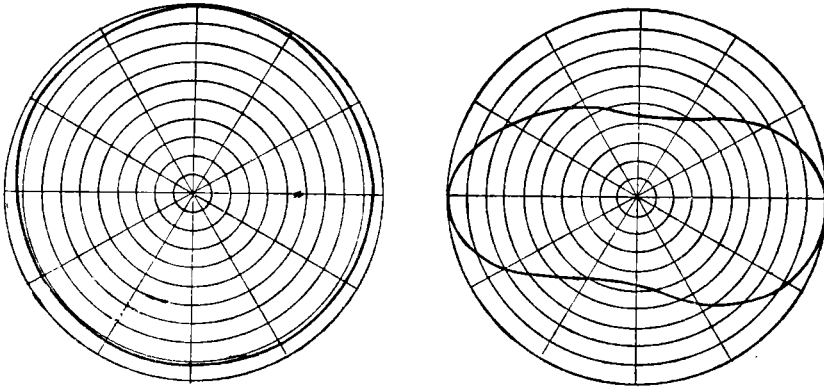


图2 水听器的指向性
(a) O—XY 平面 (b) O—XZ 平面

如果要进行三维测量，则需要进一步减小晶片的几何尺寸，或降低工作频率。但由以下的讨论可以知道，过份地减小尺寸或降低频率会使水听器的性能变差。采用径向极化的空心球制成的水听器可望得到较为理想的指向特性，但是要满足尺寸小的要求却有困难。另一种方法是使用有方向性的探头，然后根据已知的探头指向特性对所得结果进行修正。这种方法曾被用于电磁波近场的测量中^[3,4]。V. G. Welsby*曾提议用一种迭代法来进行修正，即用原始数据作为第一级近似，去估计声压的梯度。然后用所得的结果以及已知的水听器指向特性去修正声压的第

器在O—XY平面内应是无方向性的。设晶片的厚度为 l ，入射平面波与晶片轴线OZ的夹角为 α 。近似地认为晶片上下两端面上的声压分别为常数，则可求得水听器输出电压为^[2]。

$$U \approx k(1 + e^{jkl \cos \alpha}) \quad (1)$$

其中 k 为常数，它正比于晶片的压电常数和声压。当 $kl \ll 1$ 时，式(1)右边括号中第二项近似等于1，因而 U 近似地与 α 无关。这就是说，这时水听器在包含OZ轴的平面内也是无方向性的。但实验中所用晶片的厚度 l 在1.3~2.0mm之间，而 $k = 2\pi/\lambda = 0.214\text{mm}^{-1}$ ，因而 $kl = 0.28 \sim 0.43$ 。在这种情况下式(1)给出的 U 是 α 的函数。实验测得水听器在O—XY和O—XZ平面内的指向性如图2所示。

一级近似。这一过程可以反复进行直至得到稳定的结果。

3. 灵敏度和信噪比

研究声场空间分布，尤其是在测量阴影区声压时，要求水听器有足够高的灵敏度和信噪比。

一个电致伸缩陶瓷制成的水听器，在工作频率远低于其谐振频率时，其等效电路如图3所示。图中 C 代表电极间的电容与晶片的机械力顺的总和， C_L 为电缆的电容， R_L 为

* 未公开发表的备忘录, Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Univ. of Birmingham, England.

前置放大器的输入电阻,而 U 为诱导电动势:

$$U = Mp,$$

这里 p 为声压, M 为水听器的开路电压灵敏度。

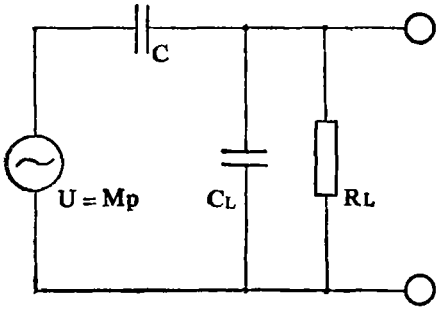


图3 水听器的低频等效电路

对于一个给定的水听器, M^2C 是一个正比于晶片体积 V_c 的常数^[5,6]:

$$MC^2 = \epsilon_{33}^T g_h^2 V_c = f_h V_c \quad (3)$$

式中 ϵ_{33}^T 是晶片材料的介电常数, g_h^2 为材料的压电常数。Young^[5] 定义了一个参数 \bar{p}_H^2 :

$$\bar{p}_H^2 = \frac{4kT_0 R_\theta}{\omega M^2 C} = \frac{4kT_0 R_\theta}{\omega f_h V_c} \quad (4)$$

其中 k 为 Boltzman 常数, T_0 为绝对温度, R_θ 为水听器的指向性因子。Young 指出, \bar{p}_H^2 是一个衡量水听器性能好坏的指标。他给出了 \bar{p}_H^2 和信噪比之间的关系 (见 [5], eqs.(7)、

(17)、(19)): \bar{p}_H^2 愈小, 可以获得的信噪比愈高, 因而水听器的性能愈好。由 (3)、(4) 两式可知, 如要 \bar{p}_H^2 小, 则 M^2C 要大, 或 $f_h V_c$ 要大。 $f_h = (\epsilon_{33}^T g_h^2)$ 大, 意味着选择较好的晶片材料。 V_c 大即要求加大晶片尺寸。但以上已经指出, 用于空间采样实验的水听器晶片尺寸受到限制, 因此 V_c 通常都很小。在二维测量中, 可以适当加大晶片厚度。另外, 可用几个薄片迭加起来, 按一定的方式排列各片的极化方向, 并联结各电极, 以提高 C 。当 $C = C_L$ 时, 将能得到最大的有效电压灵敏度^[7]。

二、实验安排和数据处理

1. 实验安排

如图4所示, 实验中使用一个由多孔PVC制成的劈形障碍物。图中画出了入射声波的传播方向和所要测绘的区域。入射波的波长为29.4mm。实验时发射换能器与所关心的区域相距在3m左右, 因而可以近似地看成是平面波入射。另外, 按上节所述, 将把这一尖劈衍射问题当作二维问题处理, 因此可使用图1所示的水听器。

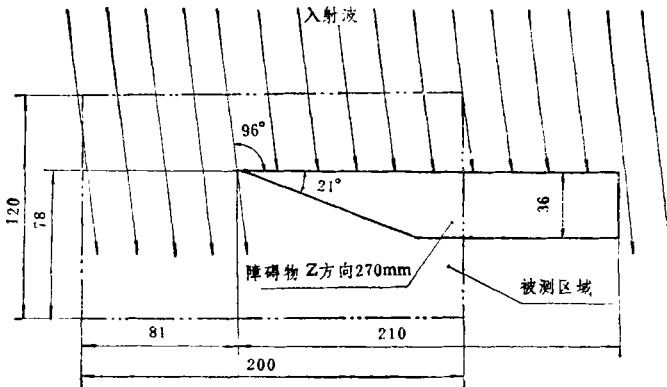


图4 尖劈形障碍物的衍射实验

发射声波是一系列脉冲, 每个脉冲包含16个正弦波周期。适当地选择脉冲重复频率, 并使发射换能器和水听器尽量远离水池四

壁、底部和水面, 以将从界面来的反射声波和有用的信号分离开。水听器所接收到的脉冲如图5所示, 其中只有 $t = t_0$ 以后的3~4个

周期是有用的。在此之前,来自尖劈边缘的衍射波尚未到达水听器,而在这有用区段以后不久($t > t_4$),接收信号上又迭加了来自边界的反射波。微微移动水听器, t_4 以后的部分会发生剧烈的变化,而 $t_3 \sim t_4$ 之间的有用信号部分则比较稳定。

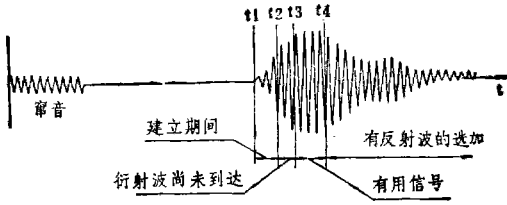


图5 接收到的声脉冲

水听器在声场中的运动可以由数据采集系统中的计算机控制:预先确定采样点的坐标,使水听器依次移到这些位置上,将代表声压的读数存入计算机中。另外,也可以使水听器独立地在声场中连续运动,在运动中读取数据,同时记录水听器的空间坐标。实验采用了后一种方式。为了避免扰动被测声场,水听器在水中移动的速度不能太快。

2. 数据处理

在图4所示的被测区域中对600~800个点进行采样。对于第n个被测点,记录 V_{cn} 、 V_{sn} 、 V_{xn} 和 V_{yn} 四个数据。 V_{cn} 和 V_{sn} 为水听器输出电压的一对正交分量,它们代表被测点的声压 p_n 。 V_{xn} 和 V_{yn} 为代表被测点 x 、 y 坐标的一对电压。声压 p_n 可以表达为:

$$p_n = |p_n| e^{j\phi_n}, \quad (5)$$

其中 $|p_n|$ 为声压幅度, ϕ_n 为相位。实验的目的是要给出声压幅度的空间分布图和波阵面(即等相位面)图。声压幅度可以很方便地求得:

$$|p| = A\sqrt{V_c^2 + V_s^2}, \quad (6)$$

A 为比例系数。而在利用 V_c 和 V_s 求相位时,只能得到 $0 \sim 2\pi$ 之间的值 ϕ' :

$$\phi' = \begin{cases} \tan^{-1}(V_s/V_c), & V_c > 0, V_s \geq 0, \\ \tan^{-1}(V_s/V_c) + \pi, & V_c < 0, \\ \tan^{-1}(V_s/V_c) + 2\pi, & V_c > 0, V_s < 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \pi/2, & V_c = 0, V_s > 0, \\ 3\pi/2, & V_c = 0, V_s < 0 \end{cases}$$

ϕ' 是空间的不连续函数:沿声波的传播方向, ϕ' 将由 0 逐渐增大到 $2\pi - \varepsilon$ ($\varepsilon \rightarrow 0$), 然后突然降至 0 。为了反映声波在空间的传播特性,同时也为了便于绘制波阵面图,需要求出:

$$\phi = \phi' + 2m\pi \quad (m \text{ 为整数}) \quad (8)$$

设探头在声场中连续地运动, ϕ' 由 $2\pi - \varepsilon$ 降至 0 时(即当 $V_c > 0$, 而 V_s 由负变正时), m 值应增加 1 , 反之, 当 ϕ' 由 0 跳变为 $2\pi - \varepsilon$ 时(即当 $V_c > 0$, 而 V_s 由正变负时), m 值应减 1 。这样求得的 ϕ 在空间是连续的。在自由场中, ϕ 沿声波传播方向单调地上升。

每一个采样点对应的 m 值可以在逐点处理测量数据时求得。但当相邻两点之间 V_c 和 V_s 同时改变符号时,将无法确定以后的 m 值,因而会产生差错,使全部实验数据失效。在自由声场中,只要保持相邻两个采样点之间的距离 Δ 小于 $\lambda/4$, 就不会发生 V_c 、 V_s 同时易号的情况。但实际上感兴趣的是有障碍物存在的情况。这时,某些区域里的波阵面可能十分密集,事实上又不可能无限增大采样密度,因此 $\Delta < \lambda/4$ 的条件无法保证得到满足。另外,在实验中有时由于外界的干扰等原因,也可能造成个别数据误差较大,这同样会造成相位值计算的错误。

由此可见,按采样点的先后次序,直接从原始数据 V_{cn} 、 V_{sn} 、 V_{xn} 、 V_{yn} ($n=1, 2, \dots, N$) 去计算相位分布,往往会导致错误的结果。克服这一缺点的一个方法是将原始数据通过内插法转换为另一组数据 $V_{c_{ij}}$ 、 $V_{s_{ij}}$ ($i=1, 2, \dots, I; j=1, 2, \dots, J$), 它们代表一个空间网格各交点上的声压值。这一网格在被测的矩形区域中共有 IJ 个交点。下标 ij 代表这些交点的空间坐标。每一对 $V_{c_{ij}}$ 、 $V_{s_{ij}}$ 的值都是由邻近区域内多达 24 个原始数据点通过内插法求得的。如果需要,还可以增加参与内插法的原始数据的数目。这样,只要原始数据在空间的分布足够密,而且足够均匀,就在实际

上消除了原始数据中存在的个别孤立缺陷可能造成的致命影响。

现在,当按(7)(8)两式去求任一网格交点上的相位值时, m 值是从这一点以及与之相邻的四个网格交点上的 V_x 、 V_y 值得到的,而不是象原来那样由前一个(或后一个)采样点推得。由于原始数据的次序不再影响计算结果,所以在测量中允许探头在声场中按任意路线运动,必要时可以跳至任何一处以补充数据。局部数据的缺陷至多只影响某一小区域,而不会使全部数据失去意义。

为了获得质量较好的图形,网格应尽可能细一些。如在图4的矩形区域中,取 $I=161$, $J=97$,则相邻网格交点之间的距离在 x 、 y 两个方向上分别为1.25mm和1.2mm,这和自由场中的波长相比是很小的,因而可望得到满意的结果。

三、实验结果

1. 平面波声场的测绘

测绘自由声场的目的在于检验实验系统和数据处理方法。实验中发射换能器和水听器相距约3m,声波频率为51KHz($\lambda=29.4$ mm),因此在被测区域内的声波可以近似地看成是平面波。被测区域的面积为200mm×120mm。

图6为测绘结果,其中箭头代表入射波方向。图6(a)为波阵面图。由图可见,波阵面互相平行,且与入射方向相垂直。这些波阵面微微弯曲,因为声源事实上并非位于无穷远处。图中相邻等相位面之间的相位差为 $\pi/2$,测得它们之间的距离(平均值)恰好为 $\lambda/4$ 。

图6(b)给出了声压幅度的分布。在理论上,声压幅度在被测范围内应为一常数,而图中却呈现波浪形的小起伏。容易看出,在 x 、 y 两个方向上起伏波浪的峰和谷的数目恰好等于相应方向上的半波长数目。这些起伏

显然是由接收机两个通道增益不一致所造成的。必要时可在数据处理中对此进行修正。

2. 尖劈状障碍物附近的声场

这一实验已如图4所示,衍射体是由多孔PVC制成的劈状障碍物。在图4虚线所围区域中共采集765个点的数据,绘得声场分布图见图7。图7(a)为波阵面图和图7(b)为声压幅度分布图。为了和理论进行比较,在图8中给出了相应的理论结果^{[2][8]}。这里假定尖劈是由绝对软的材料所制成,劈的夹角以及入射角与实验一致。在绘制图8时,用了波动方程在绝对软尖劈边界条件下的严格解:

$$p(r, \theta) = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n e^{i\nu_n r} / 2 J_{\nu_n}(kr) \cdot [\cos \nu_n(\theta - \theta_0) - \cos \nu_n(\theta + \theta_0)], \quad (9)$$

其中 $J_{\nu_n}(kr)$ 为 ν_n 阶 Bessel 函数, ν_n 由下式给出:

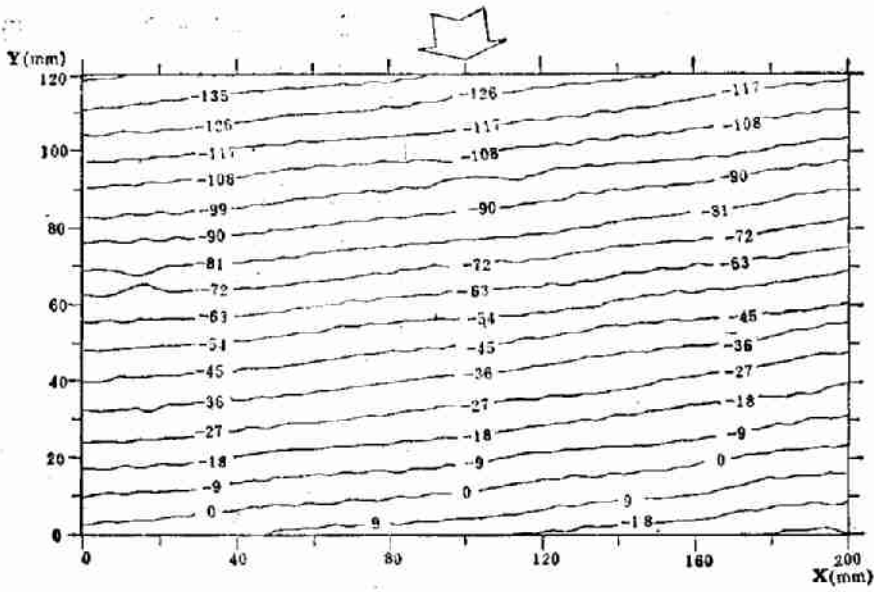
$$\nu_n = \frac{n\pi}{2\pi - \beta}, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

ε_n 的定义是:

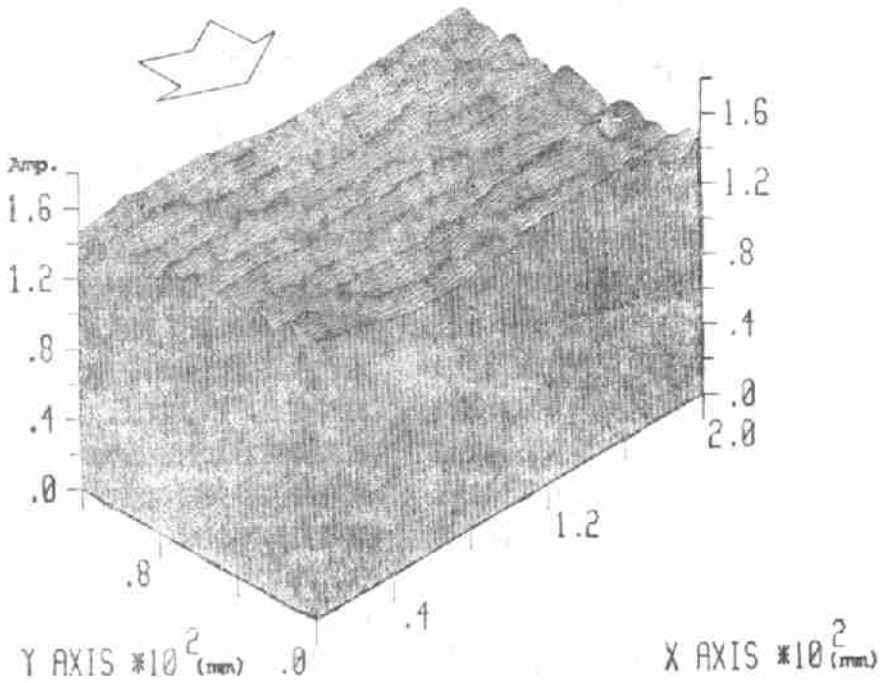
$$\varepsilon_n = \begin{cases} \frac{1}{2}, & n=0, \\ 1, & n=1, 2, \dots \end{cases} \quad (11)$$

β 为劈的夹角, θ_0 为入射角。这里取 $\beta=21^\circ$, $\theta_0=96^\circ$ 。

关于图8所示声场分布的详细讨论可参阅[8]。比较图7和图8,可见实验结果和理论在主要方面是相符的。由于障碍物由多孔材料制成,和水相比,其声学特性是软的。在尖劈面对入射波方向的前面(反射区)有一簇峰带和谷带向侧面弯曲伸展,在通过劈正面的延伸平面时,峰带和谷带保持较大的起伏,而且一直伸展到入射波的“下游”方向。劈的表面是声压的一个谷带。这些是软劈衍射场的主要特征。如果使用硬劈,则在劈正面的延伸平面上,峰和谷的起伏会消失(理想情况下),而且在通过这一平面后,峰谷之间互相转变。另外,硬表面应是声压的一个峰带。

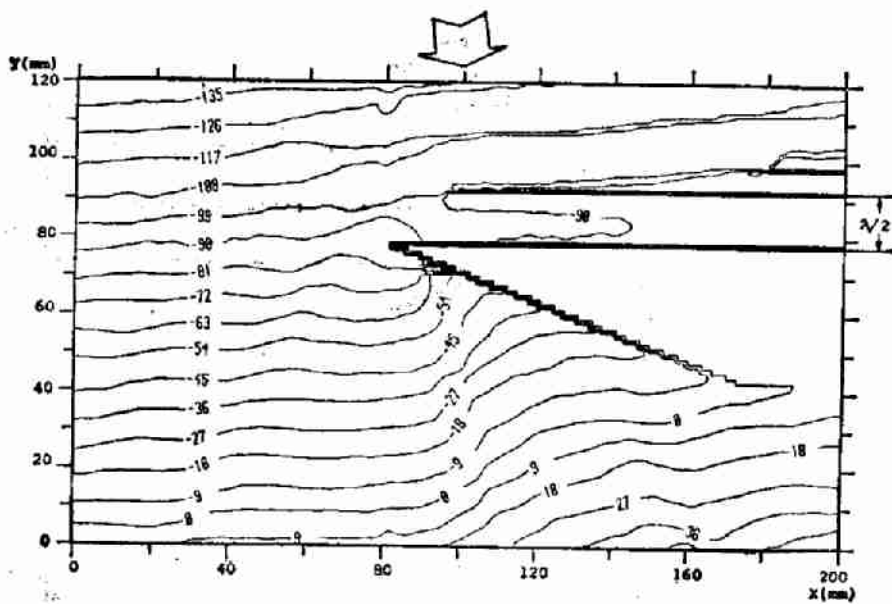


(a) 波阵面图

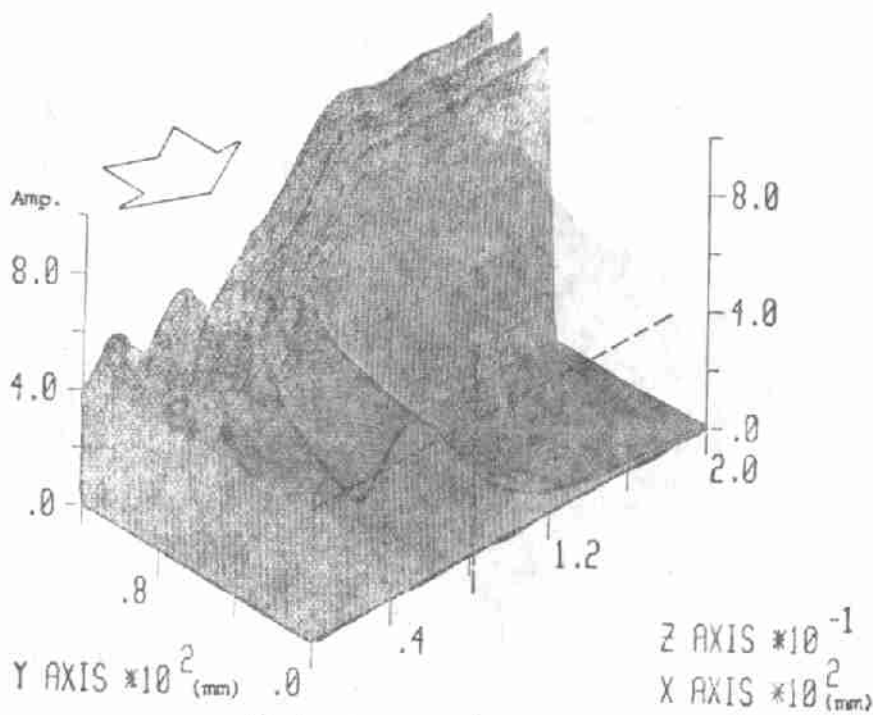


(b) 声压幅度分布

图6 平面波声场的空间分布

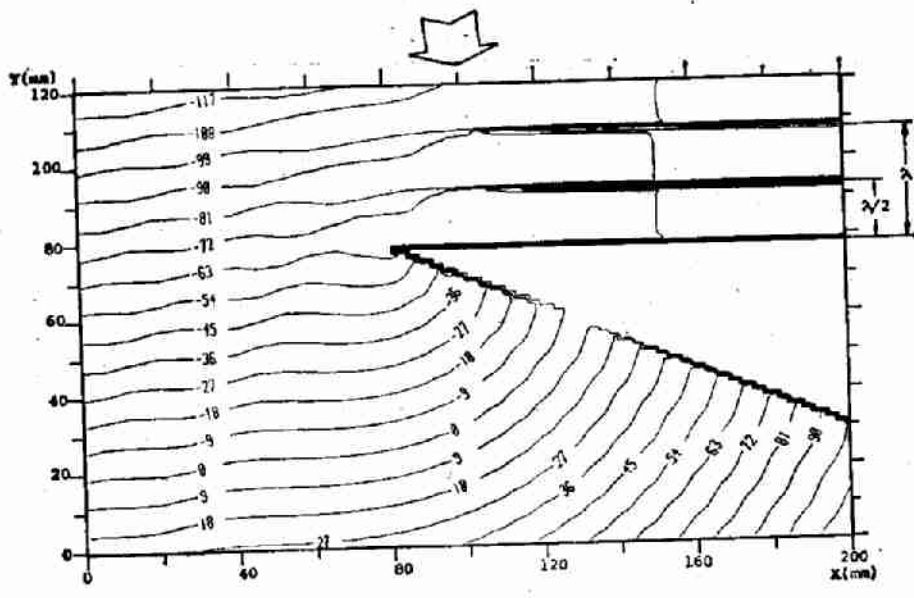


(a) 波阵面图

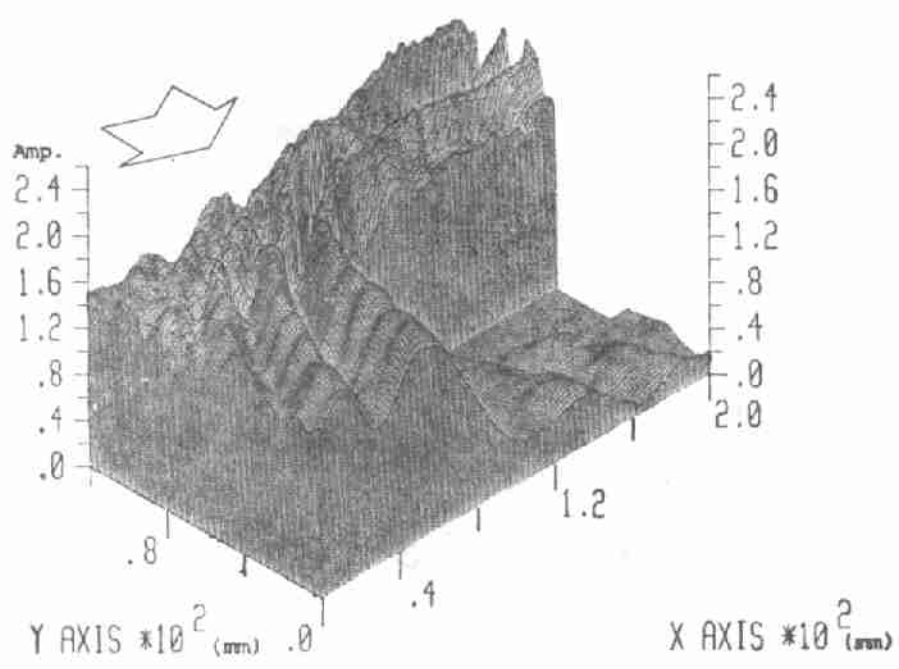


(b) 声压幅度分布

图7 劈状障碍物附近的声压分布



(a) 沈阵面图



(b) 声压幅度分布

图8 尖劈边缘附近的声压分布(理论结果)

用光-声效应测定低频压电传感器的灵敏度

殷庆瑞 黎 光 王天宝

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

本文叙述了利用固体中的光-声效应而引起的热弹性膨胀作为点声源,测定了低频弯曲压电传感器的灵敏度随位置的逐点分布、10~300赫范围内的频率响应,确定了传感器的灵敏区以及灵敏度随压力变化的线性关系。该方法实验装置简单,能同时给出灵敏度的绝对值和相对值,特别是能在次声范围内标定传感器的灵敏度,是一种新的测量方法,具有实际应用价值。

一、引 言

100年以前, Alexander Bell首先观察到了固体中的光-声效应^[1],它的实际应用还是本世纪七十年代以后的事情。近十年来,人

们利用这种效应制成了研究物质结构的光-声谱仪和光-声显微镜,研究对象涉及到有机、无机、半导体、金属等材料的有关物理、化学问题,在材料科学的许多方面获得了广泛的应用^[2]。1963年, White首先分析了脉冲激光照射在固体上而产生的声学特性^[3]。后

另一方面,由于实验中所用障碍物的材料并不是绝对软的,所以在反射区内驻波的峰比理想情况低得多,谷又比理想情况高得多。此外,注意到实际的障碍物并不是一个理想的劈,它在三个自由度上尺寸都是有限的。在所研究的区域中,不仅有位于区域内的劈边缘所产生的衍射波,也有来自其它各边缘的衍射波。这些波的迭加使声场发生了复杂的畸变。在阴影区,测得了相当高的声压幅度,波阵面也不象图8(a)中所显示的那样,为一簇以边缘为轴的同心圆柱面。在反射区,峰带和谷带有错位现象,并呈现某些不规则的起伏。可以设想,如果使用尺寸较大的劈,所得结果将会和图8更接近。

由本节所给出的声场分布图,可见所使用的实验方法是可靠的。空间采样实验所得到的结果将有助于对声场性质的进一步理解。

参 考 文 献

- [1] 王朔中:“微计算机化低速数据采集系统”,《声学技术》,1983,4
- [2] Wang, S.: “Diffracted Acoustic Fields with Application to Echo Formation”, Ph. D. Thesis, Univ. of Birmingham, 1982
- [3] Kerns, D. M.: “Correction of Near-Field Antenna Measurements Made with an Arbitrary but Known Measuring Antenna”, *Electron. Lett.*, 6, 346, 1970
- [4] Baird, R. C. et al: “Recent Experimental Results in Near-Field Antenna Measurements”, *Electron. Lett.*, 6, 349, 1970
- [5] Young, J. W.: “Optimization of Acoustic Receiver Noise Performance”, *J. A. S. A.*, 61-1471, 1977
- [6] Woolett, R. S.: “Hydrophone Design for a Receiving System in which Amplifier Noise Is Dominant.”, *J. A. S. A.*, 34, 522, 1962
- [7] Rijnja, H. A. J.: “Small Sensitive Hydrophones”, *Acustica*, 27, 182, 1972