

非球面大孔径固体-液体复合声透镜 及其水下成象应用的研究

寿文德

(上海交通大学)

本文介绍一种水下聚焦声成象用的、孔径为 300 毫米的非球面固体-液体二元声透镜的设计和结构工艺特点。给出了最佳面形方程和象差计算曲线。运用声学理论, 推导了透镜效率的计算公式, 算得 1 兆赫时效率为 8%。另外, 推导了使用声透镜的水下聚焦声成象系统的观察距离的计算公式, 并给出了系统的观察距离的计算曲线。

在 4 米长的水池中进行的聚焦声成象系统的实验中, 声透镜成功地获得了水下物体的满意的反射声象和透射声象。透镜的角分辨率达 0.6° 。实验表明, 此种型式的声透镜可作为水下显示系统的空间处理器。

引 言

在水下显示领域, 当光学装置受到水的浑浊度和衰减的限制时, 声成象技术就显出了它的优越性, 成为水下观察物体的有效手段。声成象的基本目的是使来自被观察声场中物体反射的声强度的空间分布成为可见的光学图象。聚焦声成象系统就是使用声透镜完成空间处理, 利用换能器阵列实现换能, 通过电子设备检测和显示, 完成声成象过程。其功能顺序见图 1。^[1]

声透镜的聚焦方式同光学透镜(或微波透镜)使光(或电磁辐射)聚焦相类似。斯奈尔定理是折射的基本规律。声透镜的设计可借用光学透镜设计中所用的公式和程序。迄今所作的大量研究表明: 现代光学中用透镜所完成的功能, 几乎都可以转移到超声领域。

然而, 声透镜同光学透镜相比又有它不同的特点。在水下显示中, 水中的声波波长比光

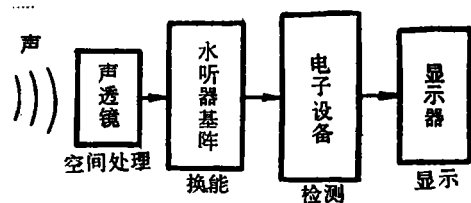


图 1 聚焦声成象的功能顺序

波波长要大于倍以上, 所以声透镜的分辨率在理论上要比同样孔径的光透镜的分辨率低千倍。声波在任何边界都会发生变化, 纵波碰到声透镜会发生波型转换, 还会反射。声波在媒质中被吸收、散射, 发生衰减。因此, 在设计中应注意下列问题: 透镜材料的选择, 应使其声阻抗率尽可能与水的声阻抗率相接近; 材料的声速和水的声速相差要求尽量大; 选用低吸收系数的材料; 尽可能减少折射面的数目, 减少插入损耗。

从理论计算得知(见式 18), 聚焦声像的平均声强与透镜的 F 数(即 $F=f/D$, f 为焦距)成反比, 与透镜的效率 E 成正比。另外从衍射

理论计算的圆孔衍射的角分辨率公式:

$$\alpha = 1.22 \lambda / D \quad (1)$$

式中 D ——透镜的有效孔径;

λ ——象方媒质中的声波波长。

显见, 1 兆赫声波波长要比可见光大二千多倍。要提高声透镜分辨率, 达到光透镜的水平, 其有效孔径亦应扩大二千多倍。但因存在各种象差, 单纯增加球面透镜的孔径, 球面透镜的有效孔径不一定会提高, 甚至会使分辨率下降。当然, 提高工作频率能有效地提高分辨率(如在超声显微镜中), 但在水下显示中, 则会使声衰减明显增加, 造成观察距离缩短, 这是不可取的。相反, 为了提高观察距离, 往往还要降低工作频率。为不使分辨率降低, 就要求增大有效孔径。同时, 从提高聚焦成像系统的接收灵敏度出发, 也需要增加有效孔径, 以降低 F 数。

声透镜的设计

Kageyoshi Kalakura 等曾研制过一个直径 260 毫米的水声成像非球面固体-液体透镜²⁾。采取增大有效孔径的措施, 主要是选用两种声折射率分别大于 1 和小于 1 的材料, 并应用非球面技术, 以减小象差。

从光学象差理论知道,^[3] 单球形折射面的三级球差 S_{III} 可表示为:

$$S_{III} \approx -\frac{h^2}{2r^2} (n_1/n_2)^2 S_0' \quad (2)$$

$$r = (1 - n_1/n_2) S_0' \quad (3)$$

式中 h ——光线高度;

r ——折射面的球半径;

n_1 ——物方媒质的声折射率;

n_2 ——象方媒质的声折射率;

S_0' ——象方焦距。

单一球面的声线折射的几何关系见图 2。

由式(2)显见, 若 $n_2 \gg n_1$, S_{III} 将变得很小。

我们选择 $n_1 = 0.55$ 的有机玻璃和 $n_2 = 1.44$ 的有机硅油作透镜材料, 则相应的球差便大为减小。

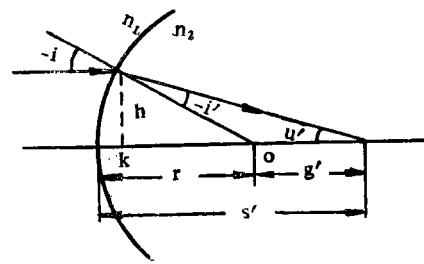


图 2 单一球面的声线折射

为了最大限度地减小球差, 我们也采用非球面的设计。根据光学设计的经验, 对视场不大的情况, 球面透镜成像的主要象差来自球差。我们在光学计算中亦以消球差为主要目标, 用计算机进行非球面的面形曲线的设计, 反复进行声线路径的计算, 评价其象差, 综合分析各种面形曲线的优缺点, 最后选定最适用的面形。

我校同上海机械学院光仪专业协作, 对 Kageyoshi Kalakura 等的非球面固体-液体复合声透镜进行核算分析。该透镜的基本结构如

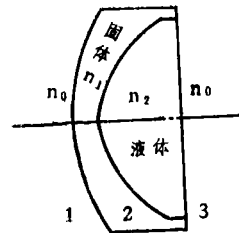


图 3 固体-液体复合透镜, 第二折射面为非球面

图 3 所示。透镜的固体部分采用聚甲基丙烯酸甲脂(有机玻璃), 声折射率 $n_1 = 0.54$, 液体是有机硅油, 声折射率 $n_2 = 1.63$ 。

第一折射面为球面, 曲率半径为 74.1 厘米。第二折射面为非球面——椭球修正面:

$$x = a \left\{ 1 - \frac{1}{b} (b^2 - \rho^2)^{1/2} \right\} + \alpha \rho^4 \quad (4)$$

$$\rho^2 = y^2 + z^2 \quad (5)$$

式中 $a = 2.199$ 厘米为短半轴;

$b = 20.830$ 厘米为长半轴;

$\alpha = -1.507 \times 10^{-5}$ 为修正项参数。

第一表面到第二表面间距为 2 厘米；第二表面到第三表面间距为 10 厘米；透镜焦距为 19.9 厘米；透镜直径为 26 厘米。

利用幂级数

$$(1+\varepsilon)^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}\varepsilon - \frac{1}{2\cdot 4}\varepsilon^2 + \frac{1\cdot 3}{2\cdot 4\cdot 6}\varepsilon^3 - \frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6\cdot 8}\varepsilon^4 + \dots$$

($|\varepsilon| \ll 1$)

可将上述非球面展开成下列标准形式：

$$x = t + a_1 \left(\frac{y^2 + z^2}{r^2} \right) + a_2 \left(\frac{y^2 + z^2}{r^2} \right)^2 + \dots + a_n \left(\frac{y^2 + z^2}{r^2} \right)^n$$

我们取 $n=5$ ，已可保证精度。然后，利用共轴球面系统和旋转曲面的空间光学追迹公

式，计算 27 条等间隔的平行光线以不同的入射角度通过透镜的三个折射面后，在焦面上的交

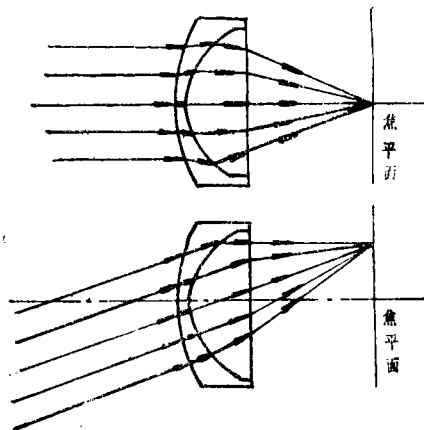


图 4 透镜的空间声线路径示意图

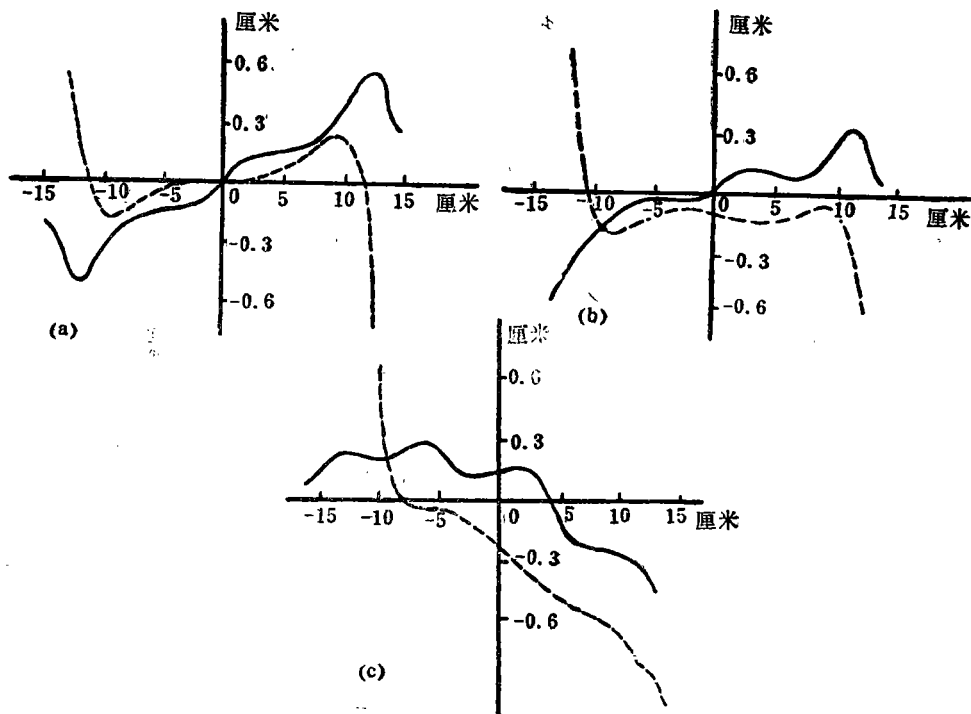


图 5 本设计与日本透镜在不同入射声线下计算数据的比较
平行声线的入射角：(a) 0° ；(b) 5° ；(c) 10°

纵坐标表示每条入射声线与焦平面的交点同所有声线与焦平面的交点的平均中心(重心)之间距离的子午分量，横坐标表示入射的平行声线的高度。虚线表示日本透镜的计算结果，实线表示我们设计的透镜的计算结果。

点,用它们的密集程度来评价聚焦性能,以判别象差的大小(参见图4)。

在核算 Kageyoshi Katakura 透镜的基础上,我们把它作为设计的原型,按比例缩放到直径30厘米,焦距30厘米,并以国产的有机玻璃($n_1=0.55$)和201*甲基硅油($n_2=1.44$)的折射率代入,重新进行计算。同时,为简化加工程序,提高精度,把第一折射面改为平面,还把各折射面间的顶点距离保持在2厘米和10厘米,反复修改面形系数(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5),用计算机进行光学系统的自动设计,在视场角与各入射方向的象差之间折衷,最后选定最为合理的最佳折射面面形。⁴

我们设计的透镜结构如下:

第一折射面为平面。

第二折射面为非球面:

$$x = t + a_1 \left(\frac{y^2 + z^2}{r^2} \right) + a_2 \left(\frac{y^2 + z^2}{r^2} \right)^2 + \dots + a_5 \left(\frac{y^2 + z^2}{r^2} \right)^5 \dots \quad (6)$$

式中 $a_1 = 15.012$ 厘米;
 $a_2 = 16.637$ 厘米;
 $a_3 = -126.392$ 厘米;
 $a_4 = 428.547$ 厘米;
 $a_5 = -483.245$ 厘米;
 $r = 29.363$ 厘米;
 $t = 2.0$ 厘米。

第三折射面为平面;透镜焦距为30厘米;透镜直径为30厘米。

在设计计算中,计算11条等间隔的平行光线以 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 入射角经过透镜折射后在焦平面上的交点坐标。并求出这些交点的重心和每个交点与重心的距离,用这个距离来衡量透镜的象差大小。图5表示我们的透镜与日本 Kageyoshi Katlakura 等人的透镜的计算数据的比较。

从图中可见,在声线垂直入射透镜时,象差略大于日本透镜,但在声线斜入射时,象差比日

本透镜有明显改进。

结构与工艺

本设计声透镜结构安装图示于图6。整个透镜由有机玻璃前透镜、甲基硅油后透镜腔、 $\lambda/2$ 有机玻璃板、硅油补偿室及壳体等组成。考虑到有机玻璃的热胀系数甚高,约为一般金属的十倍(其线胀系数在50%湿度和 20°C 时为 $7.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)。因此,整个壳体不宜用金属。我们采用了有机玻璃溶合的结构。又因有机硅油的热胀系数亦高达 $6.46 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,为此专门设计一个硅油补偿室让硅油热胀时有充足的扩张余地,避免硅油膨胀引起透镜较大的变形。第三折射面采用 $\lambda/2$ 厚度有机玻璃板使声能损耗减小,也保证一定的强度。

有机玻璃前透镜的非球面用数控车床切削而成,并抛光。在透镜装配过程特别是折射面

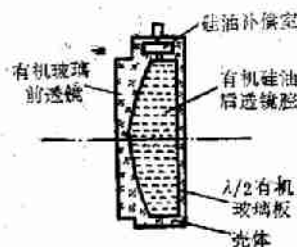


图6 声透镜的构造



图7 实际的透镜照片

配合时, 严格保证安装尺寸及共轴性, 保证质量。

图 7 示出实际透镜的照片。

非球面声透镜效率的计算

将这个声透镜应用于聚焦声成像水下显示系统, 并估计观察距离, 就必须知道它的传输声能的效率。

为推求整个透镜的传输效率, 我们忽略了声波由液体入射到固体时的波型转换问题, 即不考虑固体中的横波。假定在远离透镜而在其声轴上的一个点声源发出的球面波到达透镜表面时, 可以看作为一系列声强为 I 的平面波垂直

入射透镜的表面。先分析一束声线的传播途径, 参见图 8。应用几何声学的方法计算该声线经过三个折射面的折射、衰减后, 可得到声线离轴高度为 y 时, 经过三个折射面后的声能传输系数, 我们称之为透镜的透射率函数 $T(y)$, 由下式表示: [5] [6]

$$T(y) = T_0 T_1 T_2 10^{-0.1(\alpha_1 x + \alpha_2 t')} \quad (7)$$

式中 $T_0 = \frac{4\rho_0 c_0 \rho_1 c_1}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)^2}$ 为声线在第一折射面 A 点处的声功率透射率;

$T_1 = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2}{(\rho_2 c_2 \cos\theta_1 + \rho_1 c_1 \cos\theta_2)^2}$ 为声线在第二折射面 B 点处的声功率透射率;

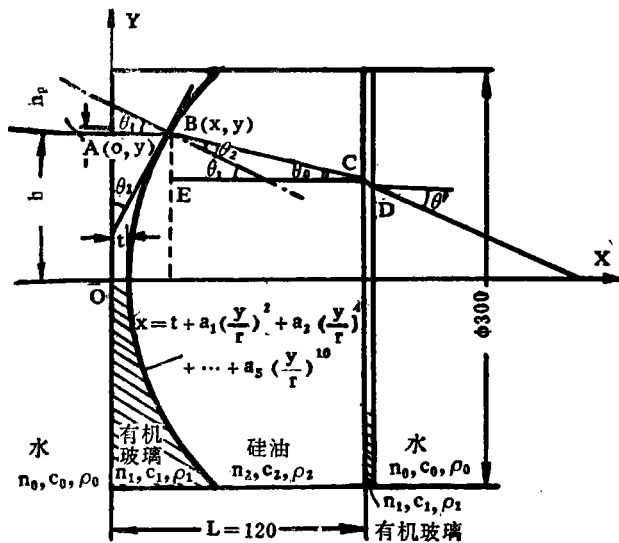


图 8 声透镜的结构和声线的路径

T_2 ——声线透过第三折射面 C、D 点处的声透射率的下限;

α_1, α_2 ——分别为有机玻璃, 硅油中的衰减常数(分贝);

$t' = BC$ 为声线在硅油中的声程长度。

对于限定孔径为 $2a$ 的透镜, 平均声透射系数 $Q(a)$ 由下式表示:

$$Q(a) = \frac{W}{\pi a^2 I} = \frac{2}{a^2} \int_0^a T(y) y dy \quad (8)$$

式中 $W = 2\pi I \int_0^a T(y) y dy$ 为透过整个透镜的总

声功率。

显而易见, 被积函数 $T(y)y$ 由透镜的材料、形状和声学结构决定, 它是 y 的函数。可用近似积分方法求出它的积分值。

在设计过程中, 我们定义平均声透射系数除以透镜的 F 数平方为相对于一个 $F/1$ 的透镜的效率 E :

$$E(a) = \frac{Q(a)}{F^2} = \frac{Q(a)}{(f/2a)^2} = \frac{8}{f^2} \int_0^a T(y) y dy \quad (9)$$

根据材料的声学参数，计算透镜的透射率函数 $T(y)$ 、平均声透射系数 $Q(a)$ 和相对于一个 $F/1$ 的透镜的效率 $E(a)$ 。并将计算结果绘成图 9 所示的曲线。

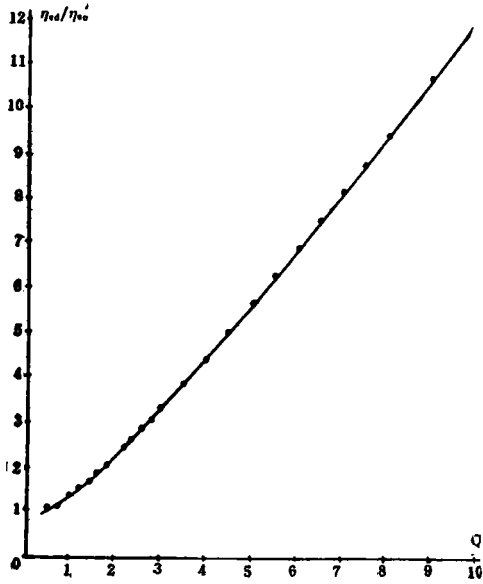


图 9 非球面固体-液体声透镜的透射率函数 $T(y)$ 、平均声透射系数 $Q(a)$ 和相对一个 $F/1$ 的声透镜的效率 $E(a)$ 的计算曲线

从 $T(y)$ 曲线可见，随着透镜的入射声线的高度逐渐增大，其透射率迅速变小。故随着孔径 $2a$ 的扩大，平均声透射系数也逐渐下降。然而，由于透镜的“通声”孔径不断增加，所截获的声功率仍然不断增加，结果相对于一个 $F/1$ 透镜的效率 $E(a)$ 还是随孔径的增加而不断地提高。

计算曲线还表明：因为有机玻璃衰减系数较大，而原设计的前透镜也甚厚。（主要考虑扩大视野和提高分辨率），以致在 1 兆赫频率时，效率为 8%。在透镜的边缘区域透射率 $T(a)$ 仅为 2% 左右。我们认为假如对视场要求不很大的情况下，可把透镜减薄。例如把有机玻璃前透镜减薄为 1.3 毫米，则效率即可提高到 18.9%。另外，若选用小衰减系数的材料，如聚苯乙烯或特种硅橡胶作前后透镜，也可使透镜效率有较大的提高。

水下观察距离的计算

应用非球面固体-液体复合声透镜于水下观察系统，构成图 10 的水下声成象的声路图。假定声源为圆形活塞换能器 T ，发射声功率为 W_a ，以 45° 的入射角射向波束扩展器上，被扩展为近 30° 的波束，其半功率点处的半束宽为 φ' ，指向性因数为 R_θ ；水下目标 O 距声扩展器和声透镜的距离均为 d ，目标为半径 R 的刚性球体，反射系数为 K ；声透镜的效率为 E ，孔径为 D ，最大视角为 2ϕ ，焦距为 f ，成象时的缩小倍数为 M ，象转换器（即接收基阵）的检测阈（或灵敏度）为 I_s ；水中的衰减常数为 α （以分贝标度）。

由指向性因数定义可知，在目标处声轴上声强 I_{i0} 为：

$$I_{i0} = \frac{W_a R_\theta}{4\pi d^2} \cdot 10^{-0.1\alpha d} \quad (10)$$

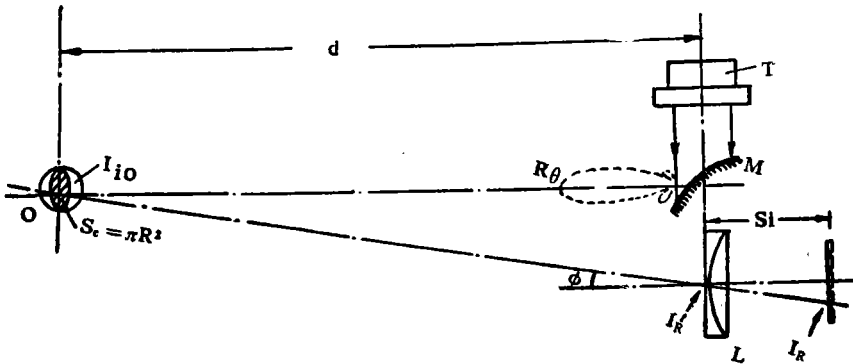


图 10 聚焦声成象水下观察系统的水下声路图

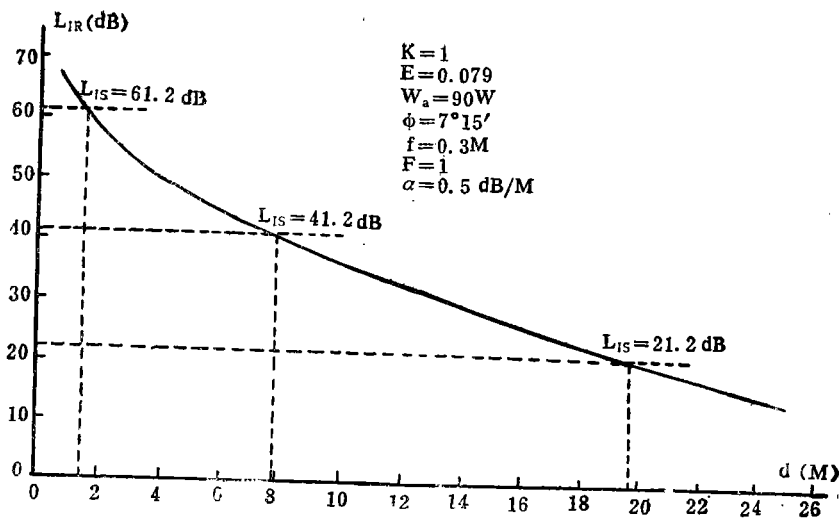


图 11 水下观察系统的距离计算曲线

但在下降 3 分贝(即半功率点处)波束角 $2\phi'$ 内, 物体所受辐射的最低限度的声强 I_1 为:

$$I = 0.5I_{10} = \frac{W_a R_0}{8\pi d^2} \cdot 10^{-0.1\alpha d} \quad (11)$$

被目标 O 截获的声功率 W_2 为:

$$W_2 = K S_e I_1 = K (\pi R^2) I_1 \\ = \frac{K W_a R_0 R^2}{8d^2} \cdot 10^{-0.1\alpha d} \quad (12)$$

式中 $S_e = \pi R^2$ 为目标球的截获面积。

假定目标的反射能量是向全向空间扩展的(参照 R. J. Urick 推导球体目标强度的方法)⁷, 则声透镜的前表面处的回波声强 I_R' 为:

$$I_R' = \frac{W_2 \cdot 10^{-0.1\alpha d}}{4\pi d^2} = \frac{K W_a R_0 R^2}{32\pi d^4} \cdot 10^{-0.2\alpha d} \quad (13)$$

被声透镜所收集的声功率 W_3 为:

$$W_3 = I_R' \cdot \cos \phi \cdot \pi (D/2)^2 \\ = \frac{K W_a R_0 R^2 D^2}{128d^2} \cos \phi \cdot 10^{-0.2\alpha d} \quad (14)$$

透过声透镜的透射声功率 W_3' 为:

$$W_3' = E W_3 = \frac{E K W_a R_0 R^2 D^2 \cdot \cos \phi}{128d^2} \cdot 10^{-0.2\alpha d} \quad (15)$$

根据高斯公式, 可得:

$$M = S_o / S_1 = d / S_1 = \frac{d}{f} (1 - f/d) \quad (16)$$

在接收基阵上象的面积 S_o' 为:

$$S_o' = S_e / M^2 = \pi R^2 / M^2 \\ = \pi (Rf)^2 d^{-2} (1 - f/d)^{-2} \quad (17)$$

于是, 在象平面上声象的平均声强 I_R 可表示为:

$$I_R = \frac{W_3'}{S_o'} = \frac{K E W_a R_0 \cos \phi \cdot (1 - f/d)^2}{128\pi d F^2} \cdot 10^{-0.2\alpha d} \quad (18)$$

式中 $F = f/D$ 为声透镜的 F 数。

设象转换器(接收基阵)的检测灵敏度(检测阈)为 I_s , 则要使目标能被观察到, 必须满足下列条件:

$$I_R \geq I_s \quad (19)$$

以均方根声压为 1 帕斯卡的平面波的声强 I_0 (即 0.67×10^{-6} 瓦/米²) 为参考级, 可把声象的平均声强级 L_{IR} 表示为:

$$L_{IR} = 10 \log (I_R / I_0) \\ = 10 \log K + 10 \log E + 10 \log W_a \\ + 10 \log R_0 + 10 \log (\cos \phi) \\ + 20 \log (1 - f/d) - 20 \log F \\ - 20 \log d - 2\alpha d + 35.8 \text{ 分贝} \quad (20)$$

应用上式, 假定 $K = 1$, $E = 0.079$,

$W_a=90$ 瓦, $\phi=7^{\circ}15'$, $f=0.3$ 米, $F=1$, $\alpha=0.5$ 分贝/米, 可算出 $L_{IR}-d$ 的关系曲线, ④ 见图 11 所示。

如果装置的检测阈为 61.2 分贝, 则观察距离为 1.5 米; 若将检测阈提高到 41.2 分贝, 则观察距离为 7.9 米; 若再将检测阈提高到 21.2 分贝, 则观察距离可达 19.8 米。

实验结果

使用研制的非球面固体-液体复合声透镜, 在 4 米 \times 1.7 米 \times 1.7 米的实验室消声水槽中对各种目标进行了成象试验。取得了目标的声透射象和反射象。声源频率为 1 兆赫, 象变换器和显示器是 35 \times 35 压电方阵和阴极射线示波管。它们共同组成水下超声电视。

图 12 表示在紫铜板上挖出“X”形孔作为目标在 0.5 米远处的透射声象。图 13 表示圆柱形黄铜棒及其在 0.5 米处的反射声象。图 14 表示一个铁制“O”形垫圈及其在 0.5 米处的反射声象。

从上述试验的结果中可见, 聚焦成象用的

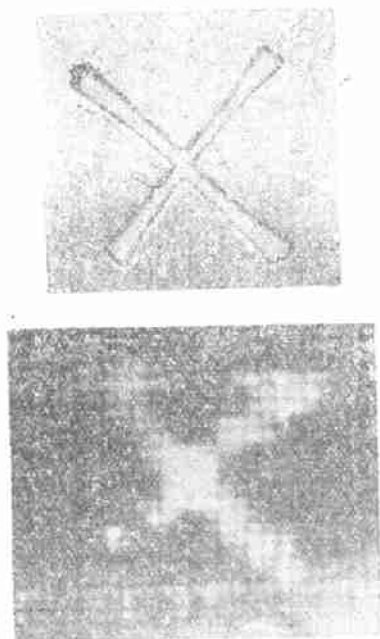


图 12 “X”形孔的透射成象



图 13 黄铜棒的反射成象



图 14 “O”形垫圈的反射成象

非球面固体-液体复合声透镜有较高的分辨率和成象质量, 视角也有所增大, 能满足水下聚焦声成象系统的要求。透镜的角分辨率为 0.6° , 已超过成象系统的压电方阵的基间隔所决定的角分辨率。实验证明, 此种型式的声透镜可以作为水下声成象系统的空间处理器。

用双超声束多普勒效应定量测定 血流速度的技术和仪器

王威琪 邵谦明 姚林鑫

(复旦大学电子工程室)

超声多普勒血流测量技术逐渐被广泛地应用于超声诊断中,但由于声束和血流间夹角会影响(速度的)测量结果,使这种无创伤测量技术逊色不少。只有克服夹角的影响,超声多普勒技术才能被用来定量地测定血流速度。目前虽有几种克服夹角影响的报道^[1-4],但它们都有不完备的地方:^[5]有的需要使用微处理机进行运算;有的不能对不同的深度血管都适用;有的需要在探头上附加机械装置,使设备趋于复杂。

我们研究了用双超声束多普勒效应进行定量测定血流速度的原理并研制了仪器。所研制的仪器在模拟实验和临床应用中都取得良好的

结果。

用双超声束多普勒效应定量测定血流时要求血管和声束保持同一平面,但这对操作者来说并不困难。如果要求声束和血流不在同一平面内的血流速度能被定量测量,则处理方法和仪器设备都比较复杂。

当两个声束同时照射到同一血管,如图 1 所示,它们的发射频率分别为 f_{01} , f_{02} , 与血管的夹角分别为 ϑ_1 , ϑ_2 。每个声束都会产生多普勒效应,若只考虑多普勒频率 Δf_1 , Δf_2 的绝对值,

本透镜的设计承蒙上海机械学院贺莉清、余季白同志的热心指导,光学计算工作是杨国胜同志完成的,特致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Booth, N. O., Sutton, J. L., Holographic Acoustic Imaging AD/A-002257, 1974. 8.
- [2] Kageyoshi Katakura, Masaharu Kopayashi, Yasuaki Annaka, Tsuneji Koshikawa, Under-ater Viewing System, 1972, 第二国际海洋开发会议资料。

- [3] 鲁西诺夫:《技术光学》, 1962.
- [4] 南京大学数学系计算数学专业编:《光学系统自动设计中的数值方法》。
- [5] 寿文德:“非球面复合声透镜的效率计算”, 1979. 4.
- [6] 何祚辅、赵玉芳著:《声学理论基础》, 国防工业出版社, 1981.
- [7] R. J. 鸟立克《工程水声原理》, 国防工业出版社, 1972 年
- [8] 上海交大八三〇教研组水下超声电视课题组:“水下超声电视试验装置(一个聚焦声成像水下观察试验装置)”, 1979. 4;《海洋仪器》, 1981 年第 1 期。