



材料内部成象用球面换能器 ——平凸透镜系统的聚焦 特性研究

赵柏秦 陈戈林 张克潜

(清华大学无线电电子学系)

1985年3月13日收到

声显微镜的一个特点是能够对材料内部成象。本文提出一种球面换能器——平凸透镜系统，可以在材料内部得到比较好的聚焦。文中还分别用几何声学方法和波动理论分析了系统的球差和衍射象差。最后介绍了实验装置及测试结果。

一、引言

声显微镜等声成象系统的主要功能之一是观察物体内部结构。目前常用透镜进行深层成象时都有一些不足之处，如象差大、损耗高等，都影响成象质量。为解决这些问题，我们提出并研制成功了一种新的聚焦系统——球面换能器——平凸透镜，它可以减小内部成象透镜的象差及损耗。

二、透镜结构及工作原理

球面换能器——平凸透镜结构如图1所示。它是由球缺及附于球面外表的换能器组成。

当换能器的两电极间加上高频电压时，换能器发出球面声波。声波在球缺底部平面处产生折射。由于一般固体中声速 c_1 大于耦合液中声速 c_2 ，声波折射角小于入射角，整个声束在折射后会有所发散(见图2)。当声波通过耦合液进入样品，在样品界面产生第二次折射，声束又有所会聚。最后在材料内部聚焦。

这种透镜的主要特点是：

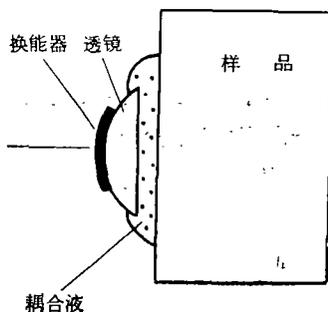


图1 球面换能器——平凸透镜系统

1. 由于透镜和样品间耦合液层对声束的发散作用，使声波射入样品时的入射角小于临界角，避免了样品表面产生声表面波。这个耦合液层就象有“预校正”声波入射角的作用，以免声波入射角超过临界角。

2. 若选择透镜材料，使它的声速和样品的声速一致或相近，将使样品界面产生的球差进一步减小。这样可以在样品内部深层得到更理想的焦点。

3. 透镜和样品的相邻面是平面，平面间距离可以调节到最小，使耦合液层的声程较短。而固体的衰减可小于液体。这种结构可以减小声镜系统的声衰减，有利于提高工作频率，得到较高的分辨率。

三、象差分析

下面定量分析几何象差及衍射斑的大小。

1. 几何象差

用几何声学方法可以计算界面折射产生的几何象差。这种透镜的典型声线如图 2 所示。由于界面的影响，声线在焦点处形成一个直径非零的声斑。声斑的大小与耦合液及液层厚度有关。

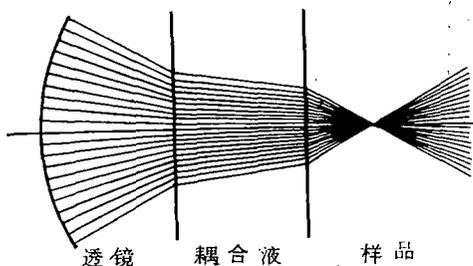


图 2 典型声线图

按几何声学，还可以得到材料内部的声线方程(见图 3)

$$y = -x \tan \theta + (d + x_0) \frac{\sin \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

式中 $n = c_1/c_2$, c_1 为透镜及样品材料声速 (我

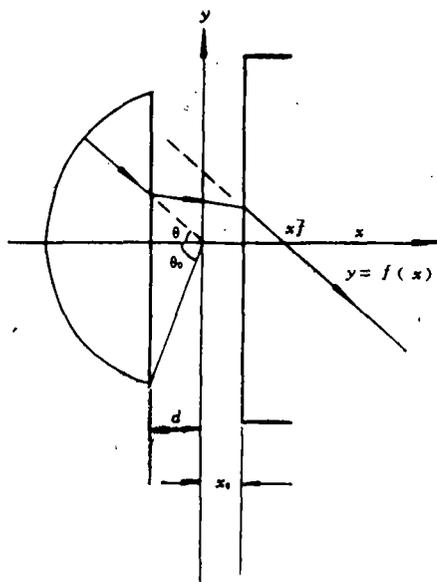


图 3 计算焦平面几何声斑的坐标系

们取两者声速相等以简化运算), c_2 为耦合液声速。按(1)式对不同入射角计算函数值,作出声束包络,确定其焦点位置 x_f 及声斑半径,我们得到,当换能器半张角 $\theta_0 = 30^\circ$, 耦合液层厚度小于 2mm 时,声斑半径可小于 $10\mu\text{m}$ 。由(1)式还可看出,只要保持透镜与样品间距 $d + x_0$ 一定,则焦点位置 x_f 及声斑半径 $y(x_f)_{\text{max}}$ 一定,与 d 及 x_0 各自的数值无关。这样,当我们选用不同厚度的透镜 (d 不同),而同时维持 $x_0 + d$ 不变,就可以在样品内部不同深度 $x_f - x_0$ 上得到直径相同的声斑。

2. 衍射效应

若忽略透镜几何象差,则分辨率主要取决于衍射效应。没有耦合液层时,均匀介质中球面换能器焦平面处声场分布为^[1]

$$u(r) = \exp\left(\frac{ikr^2}{2f}\right) \int_0^{R_0} J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda f} R_1 r\right) \times \frac{R_1 f}{\sqrt{f^2 - R_1^2}} dR_1 \quad (2)$$

式中各符号意义见图 4。 f 是透镜焦距, R_1 是透镜口面上的半径变量, r 是焦平面上的点。

但在本透镜系统中,在透镜和样品之间存在耦合液层。球面声波要通过两个平行平面所夹的耦合液层。这种结构难于求出严格解。我们提出虚拟移相板法以简化求解。

按傅里叶光学理论^[2],成象系统球差的影响可用在系统出射光瞳前加的虚拟移相板来模拟。我们把本透镜系统中的耦合液层看成介质板,并移至透镜换能器的口面(如前所述,不影响聚焦特性)。再用广义光瞳函数来表示介质板对球面波的影响。

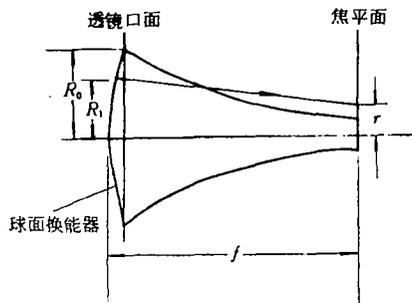


图 4 球面换能器积分示意图

如图 5 所示, 在系统出射光瞳口面上加上一块介质移相板后, 其广义光瞳函数为^[3]

$$P(R_1) = \begin{cases} T^2 e^{-(\alpha+j\beta)l} & R_1 \leq R_0 \\ 0 & R_1 > R_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 T 为界面功率透射系数, $\alpha + j\beta$ 为介质板的传播常数, l 为声波在介质板中经过路径长度, R_0 为球面换能器在口面上的投影半径, R_1 是口面上的半径变量. 由 Snell 定律^[4]

$$T = \frac{z_1 D^2}{z_2} = \left(4 \frac{m \cos \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \right) / \left(\frac{m \cos \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} + 1 \right)^2 \quad (4)$$

其中 $z_1 = c_1 \rho_1$, $z_2 = c_2 \rho_2$, 分别为固体和耦合液体的声阻抗, D 是场强透射系数, $n = c_1 / c_2$, $m = \rho_1 / \rho_2$, θ_i 为入射角. 一般材料中, 当 $\theta_i < 30^\circ$ 时, T 的变化小于 10%, 介质内的衰减随 R_1 的变化也较小. 为简化计算, 认为 T 及 αl 是常数并略去. 则

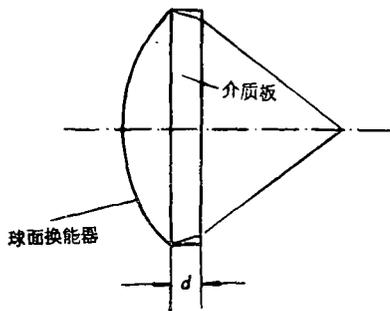


图 5 计算衍射声斑原理图

$$P(R_1) = \begin{cases} \cos \phi & R_1 \leq R_0 \\ 0 & R_1 > R_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$\phi = \beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{\cos \theta_i}$$

这里 θ_i 是介质板内的折射角, 是 $R(\theta_i)$ 的函数. 因此可得考虑了介质板影响的系统在焦平面处声场分布表达式

$$u(r) = \exp\left(\frac{jk r^2}{2f}\right) \int_0^{R_0} J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda f} R_1 r\right) \times \frac{R_1 f}{\sqrt{f^2 - R_1^2}} \cos \phi d R_1 \quad (6)$$

若令 $f = 150\text{MHz}$, $d = 0.2\text{mm}$, 计算结果如图 6 所示. 焦面声场分布主瓣的 3dB 宽度为 1.4λ , 第一旁瓣低于主瓣 27dB.

计算中所作近似, 使(6)式仅适用于 d 较小的情况. 据分析, 当 $d/\lambda < 20$ 时, (6)式计算结果的误差小于 15%, 是可以允许的.

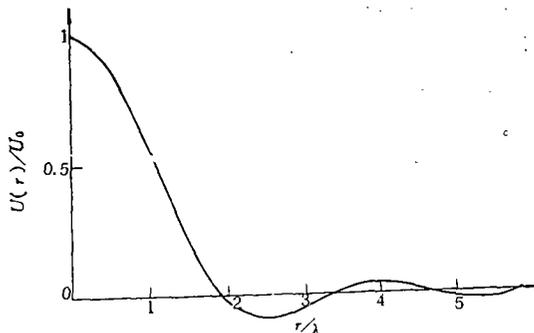


图 6 焦平面声压分布计算结果

四、实验结果

我们测试了这种系统焦平面处的声压卷积曲线. 实验装置如图 7. 其中接收透镜是超半球透镜, 焦点在透镜体内.

当 $f = 150\text{MHz}$ 时, 声压卷积曲线如图 8. 主瓣 3dB 宽度为 1.5λ , 第一旁瓣低于主瓣 23dB, 和理论分析结果比较一致. 当改变讯号频率时, 分辨率与频率成线性关系.

以旁瓣低于主瓣 10dB 为阈值, 测出声腰纵向长度约为一个波长左右.

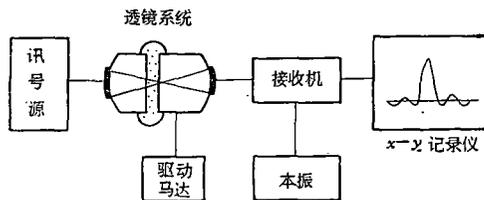


图 7 声压分布测量装置原理图

使用透镜的曲率半径为 7mm, 可在 150—300MHz 频率范围内工作. 根据目前工艺条件, 透镜尺寸可以缩小 3—4 倍, 工作频率即可达 1GHz, 按上述实验结果, 在材料内部可得到优于 $10\mu\text{m}$ 的分辨率.

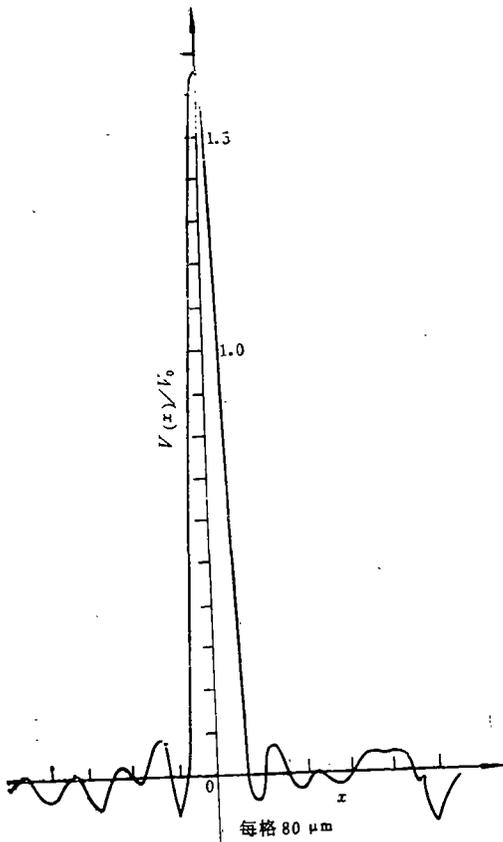


图 8 声压卷积曲线测量结果

五、结 论

我们提出并研制成功一种球面换能器——平凸透镜系统。其主要特点如下

1. 由于象差预校正及水中声程减短，在相

同频率下，它的聚焦深度优于高声速单透镜和球面换能器透镜。而且不存在表面波对内部结构图象的干扰。由于孔径角大于缩小孔径透镜，在相同频率下，分辨率将高于后者，可以在材料内部具有较好的聚焦特性。因此，本透镜在用于深层成象时是优于上述各种透镜的。

2. 焦平面处声场分布主瓣的 3dB 宽度为 1.5λ ，声腰纵向长约一个波长。第一旁瓣低于主瓣 20dB 左右。

3. 这种声镜的制作工艺简单，加工容易，便于成批生产。按目前条件，我们可以做出工作频率在 1GHz 以上的平凸透镜。

我们目前所做工作仅是初步的，现正对成象系统性能作进一步的研究。但可以预料，球面换能器——平凸透镜系统将是一种在深部成象方面有希望的透镜系统。

作者在工作中得到乐光启，罗淑云，李德杰、胡思正等同志的热情帮助和支持，谨表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 李德杰,陈戈林,张克潜,应用科学学报,12-4(1984),322.
- [2] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, M. GRAW-HILL Book Company, 1968, 121.
- [3] E. A. Ash, Scanned Image Microscope, Academic Press London, 1980, 85.
- [4] B. A. Auld, Acoustic Fields and Waves in Solids, Wiley-Interscience Publication, 1973, Vol. 2, 22.

数字式多分层多波束系统指向性的计算机模拟

李启虎 项定长 吕小燕 董 琍

(中国科学院声学研究所) (中国船舶工业总公司)

1983 年 5 月 5 日收到

用横向滤波器形成多波束是数字式声呐的一种新的波束成形方法。这种系统的指向性与采样频率、分层比特数及延时补偿的量化误差有关。系统实际指向特性与理想稳态特性之间的差异将直接影响声呐的性能。本文给出计算这种系统指向性的各种必要公式。同时在计算机上进行系统模拟。模拟的结果可为数字式声呐某些参数的选取提供依据。