

准平板型声透镜的聚焦原理及其计算

张福成 郭孝武 赵恒元

(陕西师大应用声学所)

1983年8月18日收到

本文阐述了准平板型声透镜的聚焦原理,并根据声的折射定律和到达焦点的声束必须同相的条件,推导出了点声源和平行声束入射时准平板型声透镜的计算公式,并以平行声束入射的情况为例,分别用所推得的公式设计、制作了斜面形和弧面形准平板声透镜,观测了它们的聚焦性能,给出了有关的曲线和图片。经观测,透镜的聚焦性能是令人满意的。

一、引言

声透镜已被广泛地应用于水声、无损检测、医学诊断以及需要聚集声能的各个领域。因此,如何设计制作分辨率高而声能损耗小的声透镜是非常重要的。

正如我们所知费琅和夫衍射图样中心亮点的直径为

$$d = 2.44\lambda f/D \quad (1)$$

式中 D 是圆孔的直径(即我们所要讨论的透镜的孔径); λ 是光波波长; f 透镜焦距。由式中看出,要得到小的 d 值,即分辨率要高,则比值 f/D (通常称为 F 数)必须尽可能地小。这就意味着,在 f 为某一数值时,要提高分辨率必须增大透镜的孔径 D 。然而对一般情况下使用的固体声透镜来说,要增大 D ,则透镜边缘部分的厚度也要相应增大,因而声能在透镜材料中的损耗将大量增加。损耗引起透镜发热,使其聚焦性能受到影响,特别在声强较高时,还将导致透镜的损坏(如塑料透镜)。

Wess 和 Scherg^[1]设计出一种实用于超声聚焦的大孔径、小损耗菲涅耳类型、阶梯式薄透镜^[2-3],但没有详细介绍他们的计算方法。

我们根据声的折射定律和到达焦点的各声束所必须满足的物理条件,推导出了一种厚度

很小的声透镜的计算公式。由于这种透镜的中心和其边缘的厚度相差很小,像一块“平板”一样,我们称它为“准平板型声透镜”。这种透镜的特点是“薄”,因而声能在其中的损耗小,且其孔径可以做得较大。

二、透镜的聚焦原理及计算公式

准平板型声透镜的剖面图如图1所示。下面就点声源和平行声束入射于透镜时的情况分别进行讨论。

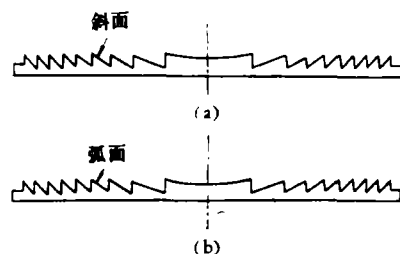


图1 准平板型声透镜剖面图

1. 点声源的情况

设在透镜轴线上的 S 点处(见图2),有一点声源发出声波,有若干声束穿过透镜周围的介质而达于透镜面上。我们先来研究其中的第“ o ”和“ n ”两束声波。其余声束可照此类推。

声束“ o ”穿过介质,到达镜面中心的 A 点

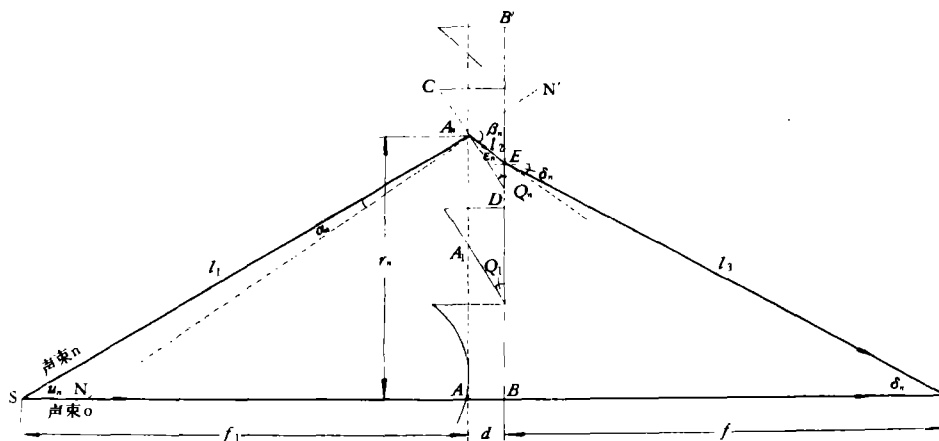


图2 准平板型声透镜聚焦示意图

处。由于声束 o 是垂直地入射在镜面 A 点处，因而不偏折地穿过透镜，并沿其轴线继续向前传播。而声束 n 则到达镜面 CD 的 A_n 点处（设各入射面都是直面，除中心部分外，又都是斜的），折射后经过透镜而达于透镜的另一面 DB' 的 E 点，在这里再次折射后，与沿透镜轴线传播的声束 o 相交于 F 点。因“ o ”、“ n ”两声束在 S 点是同相的，若它们在 F 点处仍能同相，则聚焦的目的便可达到。

由图2可以看出，声束“ o ”自 S 点出发到 F 点所走的路径是 f_1 、 d 、 f ，而声束“ n ”自 S 点到 F 点所走的路径为 l_1 、 l_2 、 l_3 （符号代表的距离见图2）。由于“ o ”、“ n ”两声束在 S 点处是同相的，要它们在 F 点仍然同相，则必须满足：

$$\frac{l_1}{C_1} + \frac{l_2}{C_2} + \frac{l_3}{C_1} = \frac{f_1}{C_1} + \frac{d}{C_2} + \frac{f}{C_1} + \frac{n\lambda}{C_1} \quad (2)$$

λ 是透镜周围介质中之声波波长。在透镜两边与介质的分界面上，分别利用折射定律：

$$\frac{\sin \alpha_n}{\sin \beta_n} = \frac{\sin \delta_n}{\sin \epsilon_n} = \frac{C_1}{C_3} = \mu \quad (3)$$

式中 C_1 和 C_2 分别为周围介质中和透镜中的声速； α_n 、 β_n 、 ϵ_n 和 δ_n 分别为透镜与周围介质两个分界面上的入射角和折射角。经过一些数学运算便得到

$$(f_1^2 + r_n^2)^{1/2} + \mu^2 d / (\mu^2 - \sin^2 \delta_n)^{1/2} + f / \cos \delta_n$$

$$= f_1 + \mu d + f + n\lambda \quad (4)$$

式中

$$r_n = \sin \delta_n [d / (\mu^2 - \sin^2 \delta_n)^{1/2} + f / \cos \delta_n] \quad (5)$$

为第 n 束声波的入射高度。

同样可以求得 θ_n 、 β_n 、 u_n 。

这种透镜除中心部分外，每个小的入射面都是直斜面，所以我们把这样的透镜叫做“斜面准平板型声透镜”。

若以第 n 束声波的入射面的法线 NN' 与透镜轴线的交点 N 为圆心，以 NA_n 为半径，将上述透镜的直斜面加工成圆弧面，则穿经每个小弧面的声束可在 F 点处更好地聚焦，因而整个透镜的聚焦性能可得到改善。第 n 个圆弧面的曲率半径 R_n 为

$$R_n = r_n / \sin \theta_n \quad (6)$$

由圆心到镜面中心 A 的距离 S_n 为

$$S_n = r_n \cot \theta_n \quad (7)$$

这种透镜的每个小的入射面都是圆弧面，所以我们把这种透镜叫做“弧面准平板型声透镜”。

2. 平行声束的情况

(1) 平行声束从透镜的阶梯面一侧入射

在上面讨论的情况中，如果把声源放在距透镜为无限远处，即 $f_1 \rightarrow \infty$ ，就得到平行声束入射的情况。此时，由于(4)式第一项中的 $r_n \ll f_1$ ，因此 r_n 可以略去，则(4)式变为

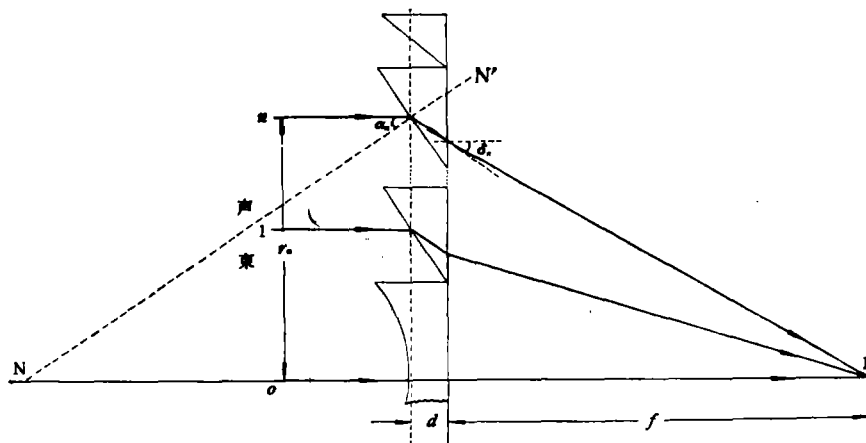


图3 平行声束从透镜的阶梯面一侧入射时准平板型声透镜聚焦示意图

$$\frac{\mu^2 d}{(\mu^2 + \sin^2 \delta_n)^{1/2}} + \frac{f}{\cos \delta_n} = \mu d + n\lambda + f \quad (8)$$

式中

$$\sin \delta_n = \sin \alpha_n [\cos \alpha_n - (\mu^2 - \sin^2 \alpha_n)^{1/2}] \quad (9)$$

α_n 是声束“ n ”的入射角, 此处 α_n 与加工角 θ_n 相等。

将(9)式代入(8)式, 则得

$$\mu^2 d / \{ \mu^2 - \sin^2 \alpha_n [\cos \alpha_n - (\mu^2 - \sin^2 \alpha_n)^{1/2}]^2 \}^{1/2} + f / \{ 1 - \sin^2 \alpha_n [\cos \alpha_n - (\mu^2 - \sin^2 \alpha_n)^{1/2}]^2 \}^{1/2} = \mu d + f + n\lambda \quad (10)$$

(10)式就是我们求得的声束在平行于透镜轴线入射时 α_n 的计算公式。

将(9)式代入(5)式可得声束 n 的入射高度 r_n 。

如前所述, 如果将图3中的每个斜面分别作成弧面, 则透镜的聚焦性能可进一步得到改善。根据几何图形(见图3), 可以求出第 n 个圆弧面的曲率半径为

$$R_n = r_n / \sin \alpha_n \quad (11)$$

各弧面的圆心都在透镜的轴线上, 自第 n 个圆心至透镜中心 A 的距离 S_n 为

$$S_n = r_n \cot \alpha_n \quad (12)$$

(2) 平行声束从透镜平面一侧入射

在上述讨论的情况下, 如果把声源放在透镜的平面一侧, (如图4所示), 且距透镜为无限远处, 即(4)式中 $f \rightarrow \infty$, 便可得到平行声束入射的情况。此时 $\delta_n \rightarrow 0$, (4)式变为

$$(f_1^2 + r_n^2)^{1/2} = f_1 + n\lambda \quad (13)$$

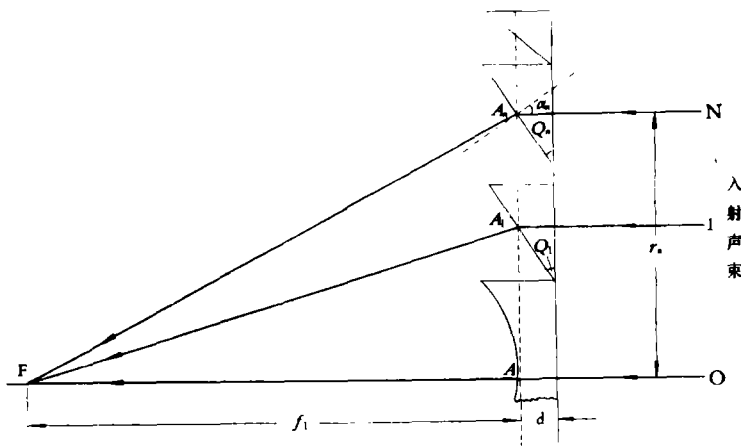


图4 平行声束从透镜平面一侧入射时准平板型声透镜聚焦示意图

由(13)式可得

$$r_n = \sqrt{n\lambda(2f_1 + n\lambda)} \quad (14)$$

由图4所示的几何图形和折射定律, 可以求得

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \sin u_n / (\cos u_n - \mu) \quad (15)$$

进而得到

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \sqrt{n\lambda(2f_1 + n\lambda)} / [f_1 - \mu(f_1 + n\lambda)]$$

$$n = 1, 2, 3 \cdots \quad (16)$$

在此情况下, α_n 为声束 n 的入射角 (与加工角 θ_n 相等)。因此, 由已知的焦距 f_1 , μ , λ , 利用(14)式可以求得 r_n , 利用(16)式即可求得 α_n 。

如将图4中的每个斜面分别加工成圆弧面, 即可进一步改善透镜的聚焦性能。根据几何图形和折射定律, 可以求出第 n 个弧面的曲率半径为

$$R_n = [f_1^2(1 - \mu)^2 + 2f_1n\lambda(1 - \mu + \mu^2) + n^2\lambda^2(1 + \mu^2)]^{1/2} \quad (17)$$

$$n = 1, 2, 3, \cdots$$

每个圆弧面的圆心都在透镜的轴线上, 且与中心弧面 A 的距离为

$$S_n = [f_1^2(1 - \mu)^2 - 2f_1n\lambda\mu(1 - \mu) + n^2\lambda^2\mu^2]^{1/2} \quad (18)$$

$$n = 1, 2, 3, \cdots$$

对于上述斜面形和弧面形准平板型声透镜的中心部分, 都可以作成焦点在 F 处的球面透镜以改善这个部分的聚焦性能。

三、透镜的计算实例

我们以平行声束入射于透镜的毗梯面一侧

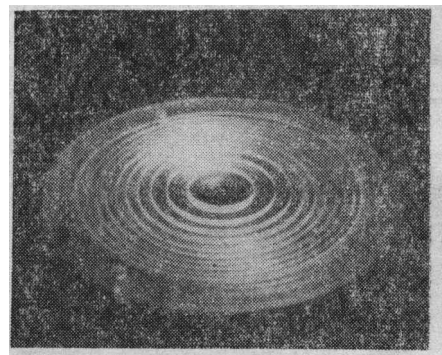
表1 斜面准平板透镜

n	α_n°	r_n (mm)
1	19°5'	17.35
2	24°42'	24.58
3	28°1'	30.28
4	30°9'	35.06
5	31°36'	39.37
6	32°35'	43.30
7	33°15'	46.94
8	33°41'	50.37
9	33°56'	53.66
10	34°2'	56.75

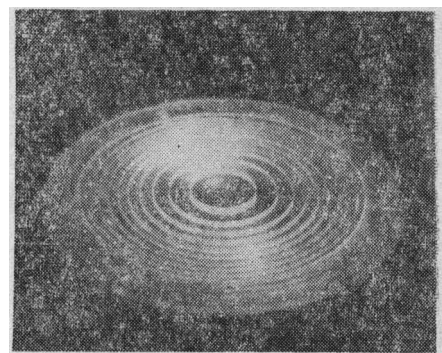
的情况为例, 根据所推导出的上述公式, 分别设计制作了斜面形和弧面形准平板声透镜。透镜材料为有机玻璃, 声速为 2680m/s, 透镜周围介质为水, 声速为 1500m/s, 焦距为 100mm, 超声频率 1.07MHz。对透镜的计算结果分别列于表1和表2中。所作透镜的实物照片示于图5中。

表2 弧面准平板透镜

n	r_n (mm)	R_n (mm)	S_{0n} (mm)
1	17.35	53.07	50.15
2	24.58	58.83	53.45
3	30.28	64.45	56.90
4	35.06	69.82	60.38
5	39.37	75.14	64.00
6	43.30	80.39	67.74
7	46.94	85.61	71.59
8	50.37	90.82	75.58
9	53.66	96.13	79.76
10	56.75	101.41	84.04



(a)

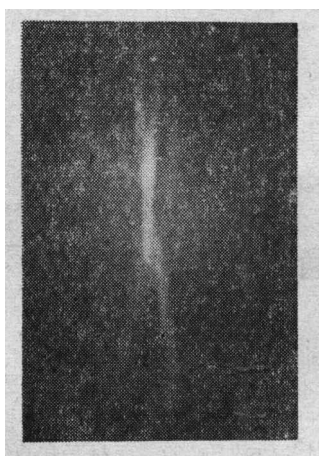


(b)

图5 平行声束入射时准平板型声透镜的实物照片
(a) 斜面形 (b) 弧面形



(a)



(b)

图6 平行声束入射时,焦区声场的照片
(a) 斜面形 (b) 弧面形

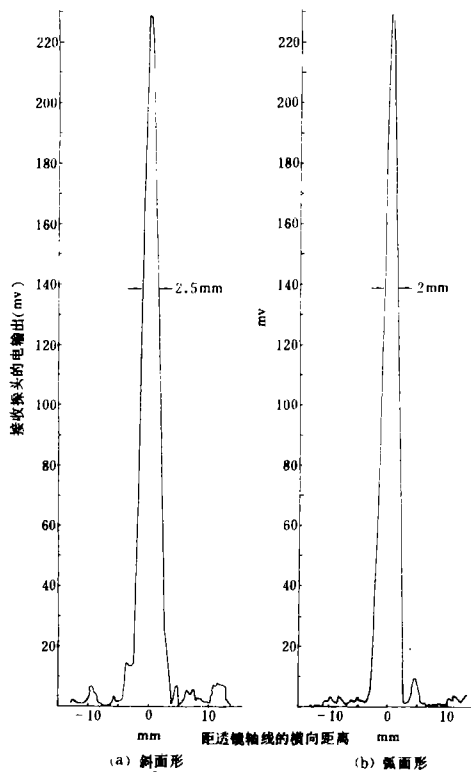
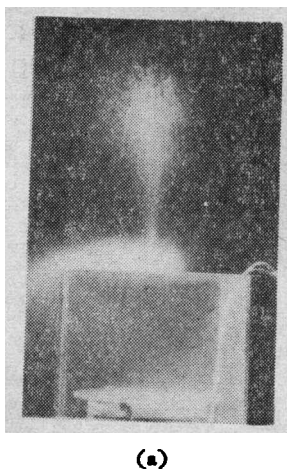


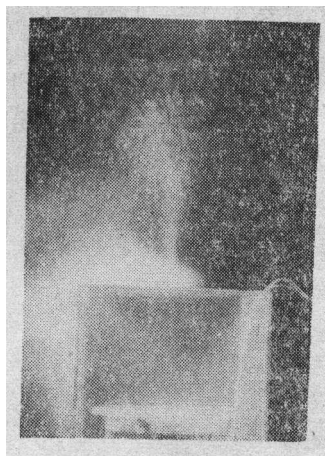
图7 当平行声束入射时在焦平面内测得的
声场分布曲线

四、实验结果

我们用以下三种方法对所作透镜的聚焦性



(a)



(b)

图8 当平行声束入射时透镜喷水的情况
(a) 斜面形 (b) 弧面形

能分别进行了观测:

1. 用暗场法拍摄了透镜焦区声场的照片, 见图 6(a), (b) 所示

2. 用微型声探头测绘了焦区声场分布曲线, 见图 7(a), (b).

根据衍射理论, 费琅和夫衍射图样第一个暗环的半径(也即焦点的半径)等于衍射图样在下降 4.4dB 处的宽度^[4]. 图 7 中曲线下下降 4.4dB 点处曲线的宽度值分别为: 斜面形透镜, 2.5mm; 弧面形透镜, 2.0mm. 分别代入 (1) 式中可得: 斜面形透镜的有效 F 数为 1.5; 弧面形透镜的有效 F 数为 1.2.

3. 将透镜的焦面置于水面附近, 由喷起的水珠观察了透镜对声能的聚集情况. 见图 8

(a)、(b) 照片所示.

由以上三方面观测所得的结果看, 透镜的聚焦性能是令人满意的.

我们用这种透镜把超声聚集到较高的强度, 以作为处理农作物种子之用. 当然也可以把它用于声成象及需要聚集声能的各个领域.

参 考 文 献

- [1] O. Wess, C. Scherg, 1979 International Ultrasonics Conference Proceeding, 1979, 534—539.
- [2] T. Tarnoczy. *Ultrasonics*. 3(1965), 115—127.
- [3] J. Matauschek, *Einführung in die ultrachalltechnik*, 2nd Edition, Berlin, 1962, 295.
- [4] T. Yasuaki and K. Tsuneji, *JASA*, 53-2(1973), 590—595.

医用超声含水高分子耦合剂在武汉通过鉴定准备投产

为适应医学超声(诊断与治疗)技术的迅速发展与普及, 研制与生产国产非油类高分子超声耦合剂已是医学超声界长期的渴望.

武汉市无线电研究所和武汉医学院附属第二医学, 经过三年多的时间, 通过 256 次配方试验, 终于在研制医用超声含水高分子耦合剂方面取得可喜成果. 由南京大学声学研究所生物声学研究室及上海第六人民医院超声研究室等单位协助对各种理化参数进行测试, 说明均达到技术指标要求. 并经上海第六人民医院、武汉医学院附属第二医院、湖北中医学院附属医院及长航总医院等单位的超声波室近二年内对上千例的临床诊断试用, 证明该含水耦合剂的临床诊断效果良好, 图象清晰完整, 性能基本达到美国 AQUASONIC 耦

合剂水平.

此种含水高分子超声耦合剂的特点是: 含水而非油类, 质地细腻、柔软、透明, pH 值为中性, 对皮肤无过敏刺激, 对各种超声换能器面材无腐蚀作用, 消除了油脂类超声耦合剂的种种弊端.

一九八四年五月廿八至廿九日由湖北省科委主持在武汉市召开鉴定会, 一致通过了技术成果鉴定. 认为该医用超声含水高分子耦合剂的研制成功, 具有明显的实用价值和经济效益, 可以代替进口耦合剂广泛用于超声临床诊断与医疗, 为国家节约外汇.

目前正在准备投产, 争取早日供应用户.

(冯若)