

# 凸形弧线旋转曲面声透镜研究

何家忠<sup>1</sup>, 张福成<sup>2</sup>

(1. 韶关大学物理系, 广东 韶关 512005; 2. 陕西师范大学应用声学研究所, 西安 710062)

**摘要:** 通过对凸形弧线旋转曲面声透镜在不同面形参数下的声场的数值计算, 研究了透镜面形参数与其声场分布特征间的关系, 证实透镜面形参数对声场分布有明显影响, 根据在声场中尽可能长的距离范围内, 获得声束宽度较小, 旁瓣水平适中的声束的要求, 提出了透镜的优化面形参数。结果得到实验验证。

**关键词:** 聚焦; 透镜; 声场

中图分类号: O422.2 文献标识码: A

## Study of convex revolving arc curved surface lens

HE Jia-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Fu-cheng<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China;

2. Applied Acoustics Institute, Shanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** The acoustic fields of the transducer with a convex revolving arc lens are calculated numerically for various shape parameters, and the relations between the shape parameters of the lens and the acoustic field characteristics are investigated. The optimum shape parameters of the lens are determined to get a narrow acoustic beam-width over a longer axial range while the sidelobe level is moderate. The theoretical results are verified with experimental results.

**Key words:** focusing; lens; acoustic field

### 1 引言

聚焦声束在无损伤检测等领域有着广泛应用, 透镜式聚焦系统的研究一直受到重视, 新型的透镜不断推出<sup>[1,2]</sup>。有研究表明<sup>[3]</sup>, 透镜的面形参数对声场分布有明显影响。本文根据在声场中尽可能长的范围内, 获得声束宽度较小, 旁瓣水平适中的聚焦声束的要求, 对凸形弧线旋转曲面声透镜面形参数进行优化研究。

### 2 声透镜声场分布的理论

图1是凸形弧线旋转曲面透镜示意图。该透镜是由一段圆弧(曲率半径为  $R$ , 曲率中心  $O$  离  $Z$  轴距离为  $b$ )绕  $Z$  轴旋转而成。圆弧方程为:

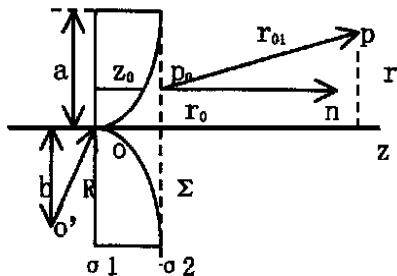


图1 声透镜聚焦场

收稿日期: 2000-06-19; 修回日期: 2000-12-28

作者简介: 何家忠(1965-), 男, 湖南汝城人, 硕士, 讲师, 主要从事声场和声信息研究。

$$(z_0 + \sqrt{R^2 - b^2})^2 + (r_0 - b)^2 = R^2 \quad (1)$$

由(1)式得不同  $r_0$  处透镜的厚度:  $z_0 = \sqrt{R^2 - (r_0 - b)^2} - \sqrt{R^2 - b^2}$ , 图中  $\sigma_1$  是透镜平面,  $\sigma_2$  是紧靠透镜之后, 垂直于对称轴  $Z$  轴的平面, 平面声波垂直入射到  $\sigma_1$  面上, 经过透镜后认为在  $\sigma_2$  面上孔径为  $2a$  的有限孔面上产生声振动, 声场中任意一点  $p(z, r)$  上的声振动, 是  $\sigma_1$  上各点声振动发出的二次波在该点干涉的结果。忽略声波在薄透镜表面的反射及内部的吸收, 认为声波通过透镜后, 其振幅大小不发生变化, 仅产生位相变化,  $\sigma_1$  上位相变化可表示为<sup>[4]</sup>:  $t = \exp[jk(m-1)Z_0]$ , 其中  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  为透镜周围媒质中声波波长),  $m = v_{\text{媒质}}/v_{\text{透镜}}$  ( $v$  为波速),  $\sigma_1$  上声压复振幅分布  $U_0$  与  $\sigma_2$  上  $p_0$  点声压复振幅分布  $U(p_0)$  之间的关系为:  $U(p_0) = U_0 t = U_0 \exp[jk(m-1)Z_0]$ , 根据瑞利-索末菲衍射积分公式<sup>[5]</sup>, 声场  $p(z, r)$  点声压复振幅表示为:

$$U(p) = \int_{\sigma_1} \exp(jkr_{01}) \frac{U(p_0) \cos(n, r_{01})}{j r_{01}} r d r_0 \quad (2)$$

其中:  $r_{01} = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \theta + (z - z_m)^2}$ ,  $\cos(n, r_{01}) = \frac{z - z_m}{r_{01}}$ ,  $z_m$  为  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  平面间的距离, 对于薄透

镜  $z_m$  可忽略。

### 3 声场计算结果及分布特征的讨论

用(2)式进行了数值计算, 令  $a/f = 20$ ,  $R/a = 12.5$ , 透镜材料假定为聚苯乙烯, 其中声速 2340 m/s, 透镜周围媒质为水, 声速 1500 m/s, 对应不同的透镜面形参数  $b/a$ , 计算出相应的声场分布。

表 1 声场各评价参量的理论值( $a/f = 20$ ,  $R/a = 12.5$ )

面形参数 $b/a$	焦距 $F/a$	焦点处声束宽度 $b_f/a$	声束扩散角 $^\circ$	主旁瓣相差 12dB 以上的区域 $Z/a$									
2.0	10.6	0.40	0.85	8.6 20									
2.4	9.2	0.34	0.80	8.0 15									
2.6	8.6	0.32	0.75	7.2 13.6									
2.8	8.0	0.74	7.0 11	3.0	7.6	0.28	0.70	6.8 9.6	3.2	7.2	0.25	0.69	6.5 8.5
3.0	7.6	0.28	0.70	6.8 9.6									
3.2	7.2	0.25	0.69	6.5 8.5									

表 1 为声场评价参量的理论值, 图 2 为轴向声压分布图, 表中声束宽度指 -6dB 声束宽度, 主旁瓣相差 12dB 以上的区域只考虑了  $z/a = 20$  区间。声场沿声轴 -6dB 声束截面形状在焦点以远和圆形活塞式换能器远场 -6dB 声束截面形状相似, 即声束在焦点以远的整体形状是以声束扩散角为张角的圆锥形<sup>[6]</sup>, 但声束扩散角较圆形活塞式换能器减小了(声束扩散角是 -6dB 声束边线与声轴的夹角为 )。

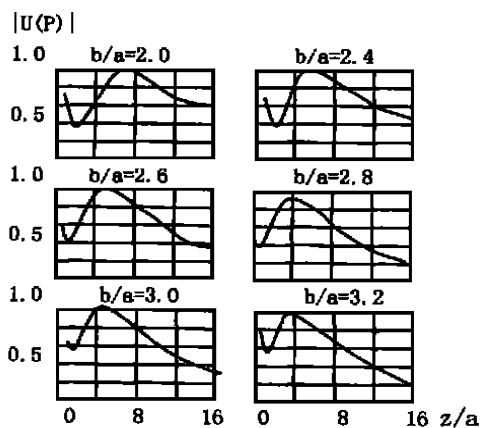


图 2 轴向声压分布图

从表 1 可看出, 当透镜面形参数  $b/a$  逐渐增大时, 声场焦点处 -6dB 声束宽度和 -6dB 声束扩散角均减少, 焦点逐渐向透镜方向移近, 声束逐渐变得细长。然而,  $b/a$  值增大时, 声场旁瓣水平也上升, 主旁瓣相差 12dB 以上的声束区域在变小, 声压下降较快, 为了在声场中尽可能长的范围内, 获得声束较细、声压较高、旁瓣水平又保持适中高度的声束。我们认为  $b/a = 2.4 \sim 2.6$  为理想取值范围。

$b/a = 2.4$  时, 声场  $Z/a = 7 \sim 13.2$  范围, 声束宽度小于  $0.44a$ , 其中在  $Z/a = 8 \sim 10.2$  范围,

声束宽度小于  $0.36a$ , 焦点处声束宽度为  $0.34a$ 。

$b/a = 2.6$  时, 声场  $Z/a = 6 \sim 13.6$  范围, 声束宽度小于  $0.44a$ , 其中在  $Z/a = 7 \sim 10.6$  范围, 声束宽度小于  $0.36a$ , 焦点处声束宽度为  $0.32a$ 。

### 4 实验及结果

按优化面形参数  $R/a = 12.5$ ,  $b/a = 2.6$  设计制作了透镜, 材料为聚苯乙烯, 在水中测量声场, 采用 1MHz 的连续声波, 其水中波长 1.5mm, 设计  $a = 30\text{mm}$ ,  $R = 375\text{mm}$ ,  $b = 78\text{mm}$ , 测量系统如图 3 所示。

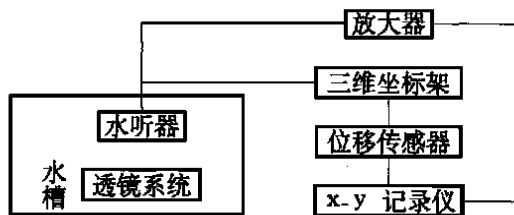


图 3 实验系统

透镜系统放入水槽底部, 微型水听器固定在三维坐标架上, 坐标架能三维移动并定位, 移动 X 轴, 水听器可左右移动, 其位移由位移传感器测定, 作为记录仪 X 输入, 水听器的电信号经前置放大器, 作为记录仪 Y 输入, 调整 z 轴与声轴重合, 对于不同 Z 值, 移动 X 轴, 使水听器径向扫描, 记录仪绘制出对应不同 Z 值的径向声压分布。表 2 列出了透镜声场实测值和相应的理论值。实验在  $21\text{cm} < Z < 36\text{cm}$  的范围进行测量, 从较宽区域的测量结果看, 基本与理论值相符。

表 2 透镜声场各评价参量实测值与理论值 ( $R = 375\text{mm}$ ,  $b = 78\text{mm}$ ,  $a = 30\text{mm}$ ,  $f = 1\text{MHz}$ )

场点离透镜的距离 $Z/\text{cm}$	22	25	28	31	34
-6dB 声束宽度/mm	实测值 10.5	10	10.5	10.8	12.5
	理论值 9.9	9.6	10.2	10.8	11.7
第 1 旁瓣比主瓣下降/dB	实测值 13.3	14.8	14	13.5	14.8
	理论值 12.7	15	14.6	14	13

#### 参考文献:

- [1] H. Z. Wang, Y. He, Y. H. Yang. Ultrasound characteristics of focused axisymmetrically curved surface transducer [J]. IEEE trans. Ultrason. ferr. & freq. control, 1989, UFFG-36: 63-72
- [2] C. B. Burckhart, H. Hoffmann, P. A. Grandchamp. Ultrasound axicon: Advice for focusing over a large depth [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1973, 54(6): 1628-1630
- [3] 小野泽元久, 石井勇五郎. 超音波探伤用金属圆锥式集束探触子 开发 [J]. 非破坏检查, 1984, 33 (12): 915-922
- [4] 吕乃光. 傅里叶光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 92-94.
- [5] 高健波, 张福成. 菲涅耳声透镜聚焦性能的研究 [J]. 声学学报, 1988, 13(5): 369-375
- [6] 云庆华等. 无损探伤 [M]. 北京: 劳动出版社, 1982. 126-135.