

超声检测用球面声透镜聚焦规律的研究

晏荣明

(南昌航空工业学院 南昌·330034)

本文提出了球面声透镜声场的计算方法,并在此基础上研究了声焦距的计算方法和几种参数对聚焦的影响规律。

On the focusing laws of spherical lens for ultrasonic testing

YAN Rongmin

(Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang·330034)

A calculation of sound field is put forward for spherical lens. The calculating method of acoustical focal length and the influence of several parameters on the focusing of spherical lens is studied in this paper

1 前言

在超声无损检测中,球面声透镜是一种常用的聚焦方法。目前,用以计算球面声透镜焦距的公式是 $F_0 = R/(1-n)$ ^[1]。其实,这个计算结果只是其光焦距,与实际的焦距(即声焦距)有一定偏差,另外,在超声检测中,通常希望得到较长的焦距(以探测埋藏较深的缺陷)和提高聚焦程度(以提高检测灵敏度和信噪比)。但是,这些尚缺乏系统的理论指导。本文试图通过对球面声透镜声场的理论计算,来推导声焦距的计算方法,并为提高焦距和聚焦程度提供理论依据。

2 声轴线上声压及声焦距的计算

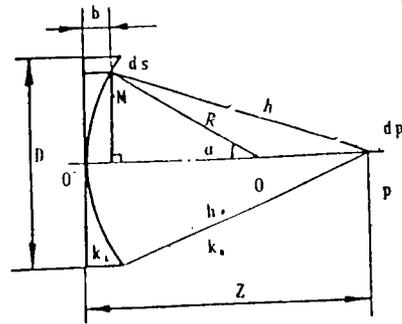


图1 球面声透镜模型

球面声透镜的模型见图1。由于球面的对称性,取径向微小圆环为微圆 dS ,它在中心轴线上任意一点 P 处产生的声压 dp 为^[2]:

$$dp = j \frac{k_2 \rho_2 c_2 U_A}{2\pi \cdot h} \cdot \exp[j(\omega t - k_2 h - k_1 b)] dS$$

收稿日期: 94-3-28; 修回日期: 94-5-2

式中:

k_1, k_2 ——分别为声波在透镜材料和中间介质两种介质中的波数。

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1}; \quad k_2 = \frac{\omega}{c_2}$$

ρ_2 —— P 点处的密度

c_2 ——声波在中间介质中的声速

U_A —— dS 上质点的振动速度幅值。

因为透镜的口径不很大,而且远小于观测的距离,同时又远大于声波波长,所以整个球面上质点的振速幅值近似相等。这样,整个透镜在 P 点处所建立的声压为:

$$P = j \frac{k_2 \rho_2 c_2 U_A}{2\pi} \cdot \oint \frac{e^{j(\omega t - k_2 h - k_1 b)}}{h} \cdot dS \quad (2)$$

经计算得:

$$dS = -\frac{2\pi R h}{Z-R} \cdot dh, \quad b = \frac{Z^2 - h^2}{2(Z-R)}, \text{ 代入(2)式, 并整理后得:}$$

$$P = j \frac{k_2 \rho_2 c_2 U_A}{2\pi} \cdot e^{j\omega t} \cdot \exp\left[jk_2 \cdot \frac{n Z^2}{2(Z-R)}\right] \cdot \frac{-2\pi R}{Z-R} \cdot \int_z^{h_0} \exp\left[-jk_2 \left(h - \frac{nh^2}{2(Z-R)}\right)\right] dh \quad (3)$$

取其模,并省去积分号前的常数:

$$|P| = \frac{R}{|Z-R|} \left| \int_z^{h_0} \exp\left[jk_2 \left(h - \frac{n \cdot h^2}{2(Z-R)}\right)\right] \cdot dh \right| \quad (4)$$

式中 R 为球面声透镜的曲率半径; Z 为声轴线上所考虑的点离晶片的距离;

$$n = \frac{k_1}{k_2} = \frac{c_2}{c_1}$$

$$h_0 = \sqrt{(Z-R + \sqrt{R^2 - (D/2)^2})^2 + (D/2)^2}$$

这就是球面声透镜所建立声场中声轴线上的声压分布。可见,只要已知换能器的频率 f ,晶片直径 D ,透镜的曲率半径 R 和声速 c_1 及中间介质声速 c_2 ,即可计算其声压分布,声轴线上声压最大值所在点即为透镜的声焦点,该点离晶片的距离即为声焦距 F_s 。图2表示用频率为1.25MHz,晶片直径为35mm的换能器与R40mm有机玻璃球面声透镜所组成的聚焦探头在水中建立声场时,声轴线上的声压分布理论值与实验结果比较。声场试验是在水槽中进行的,反射体为 $\phi 3\text{mm}$ 的钢球,以此测量探头声轴线上不同位置处的回波幅度,以及声束宽度(6dB法)。可见,实测波幅最高点及声束最窄点与理论计算声压最高点基本吻合,此时, $F_{\text{实测}} = 79\text{mm}$,

$F_s = 77.2\text{mm}$, $F_0 = 86.6\text{mm}$,结果表明,声焦距 F_s 与实测值很接近,而光焦距 F_0 则存在一定误差。

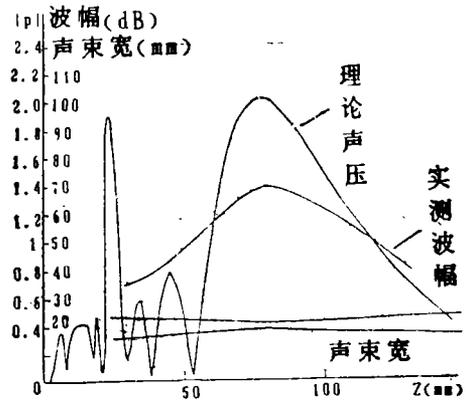


图2 R40mm球面声透镜聚焦声场理论与实测比较

对不同的曲率半径 R ,分别以式4和 $F_0 = R/(1-n)$ 计算其声焦距 F_s 和光焦距 F_0 ,同时定义:

$$f_a = F_a/N; \quad f_0 = F_0/N$$

式中:

$$N = D^2/4\lambda_2, \text{ 为换能器在中间介质中}$$

的近场长度, 可得:

$$f_a = 0.025f_0^5 - 0.207f_0^4 + 0.660f_0^3 - 1.163f_0^2 + 1.324f_0 - 0.037 \quad (5)$$

这就是球面声透镜聚焦声场的声焦距的计算公式(其适用范围为 $R30\text{mm} \sim R800\text{mm}$), f_a 与 f_0 间的函数关系还可用图3表示, 从曲线变化趋势来看, f_a 的极限为 1, 即声焦距 F_s 的极限为所用换能器在中间介质中的近场长度 N , 而从 $F_0 = R/(1-n)$ 可知, 焦距与曲率半径成正比, 与所用换能器无关。其实, 光焦距的表达式是射线声学的近似结果, 在声波波长甚小于透镜尺寸和测量距离(即可不考虑衍射效应)时才适用。

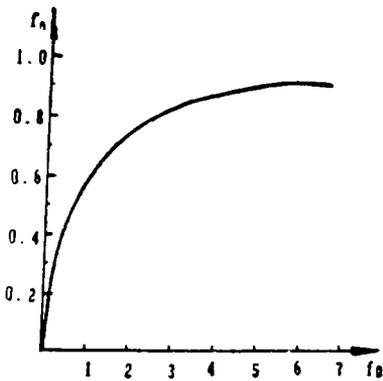


图3 f_a 与 f_0 关系曲线

3 几个参数对聚焦规律的影响

在超声无损检测中, 衡量聚焦效果优劣的指标有两个: 焦距长度和能量汇聚的程度(即聚焦程度), 通常都希望获得较长的焦距和较高的聚焦程度, 经分析, 影响聚焦效果的因素主要有: 透镜曲率半径 R , 换能器频率 f , 晶片直径 D , 这里主要以聚焦声场中声轴线上声压分布的理论计算结果为基础进行分析。

3.1 三参数对焦距长度的影响

(a) 透镜曲率半径 R

以 1.25MHz, 晶片直径为 35mm 的换

能器与曲率半径分别为 $R = 30\text{mm}$ 、 40mm 、 100mm 的透镜(其材料为有机玻璃)在水中建立声场为例, 计算其声轴线上声压分布及 $\phi 3$ 钢球反射波幅的实测结果如图 4 所示。可见理论计算和实测结果均表明, 透镜曲率半径愈大, 则焦距愈长。

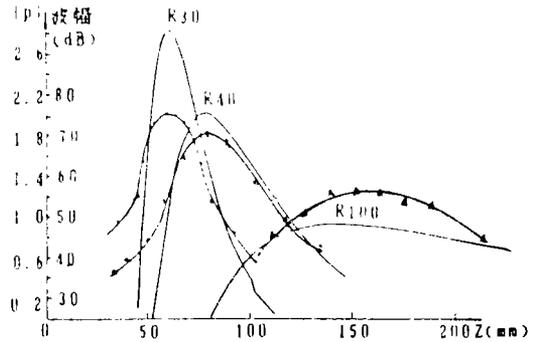


图4 透镜曲率半径对聚焦效果的影响

(b) 换能器频率

以曲率半径 R 为 100mm 的有机玻璃透镜和晶片直径 D 为 28mm 而频率分别为 1.25MHz、2.0MHz 和 2.5MHz 的换能器组成的聚焦探头在水中建立声场为例, 计算其声轴线上的声压分布如图 5 所示。结果表明, 换能器频率愈高焦距愈长。

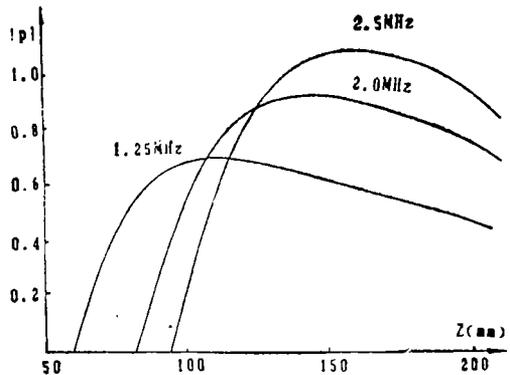


图5 频率对聚焦效果的影响

(c) 晶片直径

以曲率半径为 100mm 的有机玻璃透镜和频率为 1.25MHz 而晶片直径为 20、28 和 35mm 的换能器组成的聚焦探头, 在水中建立声场为例, 计算其声轴线上声压分布如图 6 所

示。结果表明：晶片直径愈大焦距愈长。

直径愈大，聚焦程度也愈强。

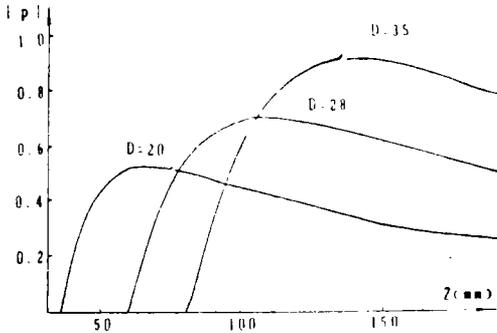


图6 晶片直径尺寸对聚焦效果的影响

3.2 三参数对聚焦程度的影响

聚焦程度(即能量汇聚的程度)可以从声轴线上最后一个声压极大值的大小进行比较。

(a)透镜曲率半径对聚焦程度的影响如图4所示,曲率半径愈小,其焦点处的声压值和钢球反射波幅均愈高,即理论和实验均表明:曲率半径愈小,聚焦程度愈强。

(b)换能器频率的影响由图5可见:在其它条件相同时,频率愈高聚焦程度愈强。

(c)晶片直径的影响由图6可见:晶片

4 结论

(1)球面声透镜聚焦时,其焦距应以声焦距来表示,而且其极限为近场长度;

(2)在其它条件相同时,透镜曲率半径越大或换能器频率越高或晶片直径越大则焦距越长;

(3)在其它条件相同时,透镜曲率半径越小或换能器频率越高或晶片直径越大则聚焦程度越好。

(4)本文的理论推导是在连续波的条件下进行的,而实验中所用的换能器则是以脉冲波方式激励的,从实验结果可知,尽管存在一定误差,二者基本吻合,误差的另一个来源则是球面声透镜的加工精度

本课题研究中承蒙哈尔滨焊接研究所王旭友先生的可贵帮助,特此诚致谢意!

参考文献

- 1 云庆华.无损探伤.劳动出版社,1982年
- 2 杜功焕.声学基础(下册).上海科学技术出版社,1981:100

(上接118页)

典型元音的基音提取,并对嘶哑语音几个典型元音的基音进行了分析。同时,还对正常语音和嘶哑语音的频谱进行了比较分析。分析结果与其它软件结果完全相同。由于SSPS主要部分用C语言编写,故而SSPS软件与其它信号处理软件相比,具有功能强,效率高,可移植性好等特点。本系统有一定推广使用价值。

参考文献

- 1 L. R. Rabiner等编.朱雪龙等译.语音数字信号处理.科学出版社,1983年
- 2 孙家广等.计算机图形学.清华大学出版社,1988年
- 3 宛延阔.C++语言和面向对象程序设计.清华大学出版社,1993年
- 4 程启明等.用离散余弦/正弦变换提取基频.声学技术,1990,9(1):40~46