

式中: $j = 2, 3, \dots, n-1$ 。

R ——球面的曲率半径;

a_n ——球形换能器的孔半径;

a_1 ——球形换能器最内侧的球冠的孔半径;

a_j ——第 j 个球环带的较大的那一个孔半径。

设最内的环带的幅度加权系数为 x_1 , 依次向外各球环的幅度加权系数为 x_2, x_3, \dots, x_n , 则可先求出以 a_1, a_2, \dots, a_n 为孔半径的球面聚焦换能器在空间 Q 点的声压分布 $P_{a_1}, P_{a_2}, \dots, P_{a_n}$, 最后算出整个加权换能器在 Q 点的声压分布为:

$$P_Q = X_n P_{a_n} + (X_{n-1} - X_n) P_{a_{n-1}} + \dots + (X_1 - X_2) P_{a_1}$$

改变分割的环带数 n 和加权系数 X 的分布, 可以对声场分布进行控制。选择 $n = 5, 7$, 并采用线性分布的和高斯分布的加权系数, 分别计算其声场分布并与简单球面(未加权)的声场分布加以比较, 取得了有实用意义的结果。

B4 矩形超声换能器方阵的研究

孙福成 宋健 江以萍 朱峰

(上海交通大学 上海·200030)

在我们研制的超声加热治癌系统中为了增大加热面积和增大加热深度, 我们选用9片方片压电晶片组成一个方阵(3×3), 每片大小为 $3.0\text{cm} \times 3.0\text{cm}$, 这样可以方便地对不同形状和不同深度的肿瘤加热治疗。各个换能器发射的功率大小、频率相互独立, 总的超声场是非相干的。

圆形活塞声源只需要一维(半径 r)来描述, 而矩形换能器声源需要二维(x, y)来描述, 矩形声源产生的声场分布不存在轴对称情况, 所以其声场分布比较复杂, 矩形活塞声源所产生的声场分布依赖于声源的两边长之比, 以及边长与辐射声源声波的波长之比, 对于任一声源要想描述其声场分布, 就必须对换能器产生声场的多个横截面和纵截面内的声场分布进行描述。常用的声场计算方法有Fourier变换法和分割声源为很多小面元的方法, 对于矩形声源产生的声场用解析法难以表达, 我们采用计算机数值解法, 将每个连续方片分割成许多形状与声源相似的小矩形(或方形)面元, 并假设矩形声源镶嵌在一无限大的平面刚性障板上, 则空间某点的声压可表示为:

$$P_0 = \oint \frac{jk \rho_0 c_0}{2\pi r} u \frac{e^{-(\alpha + jk)r}}{r} ds \quad (1)$$

为了与波长 λ 联系起来, 把上式改写为

$$P_0 = \frac{j \rho_0 c_0}{\lambda} \oint u \frac{e^{-(\alpha + jk)r}}{r} ds \quad (2)$$

式中的积分是对整个辐射面积分, ρ 为介质密度, c 为声波的相速度, u 为矩形板的振速, λ 为波长, k 为波数, α 为衰减系数, r 为声场中某点至面元 ds 的距离, 此式可用Huygens原理

计算。为了能通过计算机将声场计算出来，可将声源分割成足够多的矩形小面元，这些小面元必须满足能象点源那样小。这样场中某点总声压是整个声源中无数个 ds 的叠加

$$P_0 = \frac{j \rho_0 c_0}{\lambda} \sum_{n=1}^N u_n \oint \frac{\exp[-(\alpha + jk)r]}{r} dA \quad (3)$$

式中 N 为小面元 $\Delta A = \Delta h \cdot \Delta w$ 的个数， u_n 为面元 dA_n 的表面振速，一般情况我们称整个矩形面上振速全都相同。

为了简化推导，面元 dA_n 的中心坐标用 (x_n, y_n) 表示，并另外建立一个辅助坐标系 (x_0, y_0) ，其原点设在 dA_n 的中心处，两坐标轴与主坐标轴一致，这样(3)式可表示为：

$$P_0 = \frac{j \rho_0 c_0}{\lambda} \sum_{n=1}^N u_n \int_{-\Delta h/2}^{\Delta h/2} \int_{-\Delta w/2}^{\Delta w/2} \frac{e^{-(\alpha + jk)r}}{r} dx_0 dy_0 \quad (4)$$

进行适当的近似，并规定其适用的范围，可以找到一个易于数值计算的声压表达式：

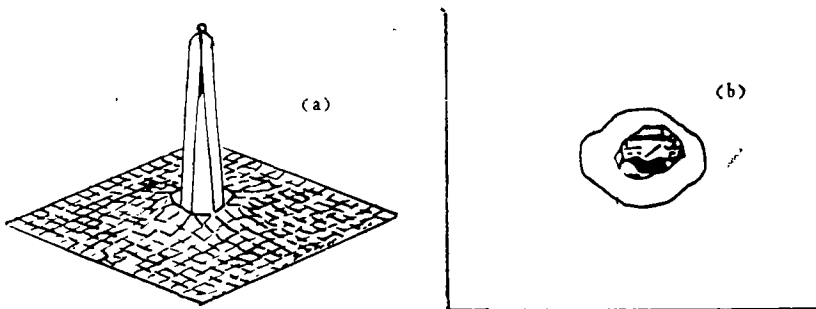
$$P_0 = \frac{j \rho_0 c_0 \Delta A}{\lambda} \sum_{n=1}^N \frac{u_n}{R} e^{-(\alpha + jk)R} \text{sinc} \frac{kx'_n \Delta w}{2R} \cdot \text{sinc} \frac{ky'_n \Delta h}{2R} \quad (5)$$

式中 $R = \sqrt{z^2 + (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} = \sqrt{z^2 + x'^2_n + y'^2_n}$ R 比 x_0, y_0 大得多。

Δw 的确定： $\Delta w \leq \sqrt{4\lambda z/F}$ ，常数 F 表示边长为 Δw 的面元到场中某点的距离与近场距离的比值，一般 F 取10，取 Δw 的大小，考虑到是声源的整数倍，同理 Δh 也可以决定下来了，我们的情况是一个方形声源，故 $\Delta w = \Delta h$ 。在确定 Δw 和 Δh 的值后在PC机上可以算出矩形声源的声场分布。

在我们的系统中超声频率为： $f = 1\text{MHz}$ 、 $\alpha = 0.1$ 、 $c = 1500\text{m/s}$ ， ρ 取水密度值， $\lambda = 0.15\text{cm}$ ，近场距离 $D_0 = \frac{S^2}{4\lambda} = 15\text{cm}$ ， $S = 3.0 \times 3.0 = 9\text{cm}^2$ 。

计算结果表明，与圆片活塞产生的声场比较，声束宽度及对称轴上极小值的位置极相似，且矩形声源的声场在近场区内的横向声压分布更加均匀。另外在近场区的圆形片声场轴上分布的最小值为0，而矩形片声场轴上声压分布的最小值不为0，因此矩形源声场比圆形源声场分布更均匀，起伏较小，适合加热。



(a) 声压分布(归一化)

(b) 声压等高线分布

图1 $z = 1.0\text{cm}$ 横断面上声压分布

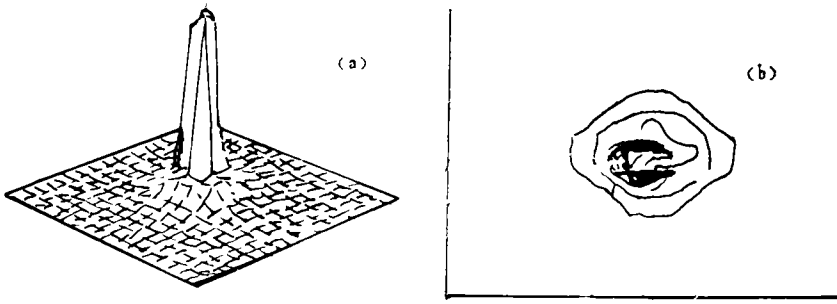


图2 $z = 2.0\text{cm}$ 横断面上声压分布

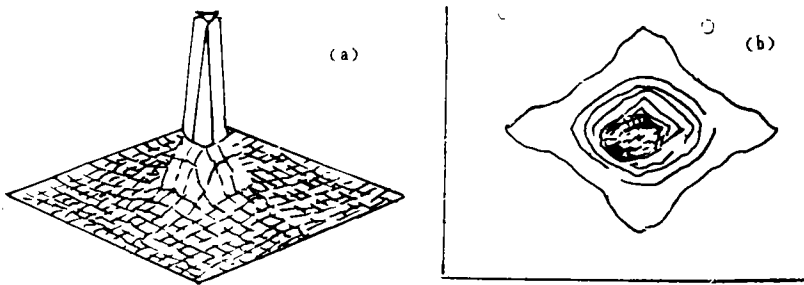


图3 $z = 10\text{cm}$ 横断面上声压分布

B5 一种具有多共振频率的功率超声换能器

林书玉 张福成 郭孝武

(陕西师范大学应用声学研究所 西安·710062)

本文研究了一种具有多个共振频率的功率超声换能器。该换能器由一夹心式振子及一个弯曲振动薄圆盘组成，夹心式振子产生的纵向振动通过模式转换变成圆盘的轴对称弯曲振动，因此，该换能器也可看成中心驱动的弯曲振动圆盘换能器。由于圆盘的弯曲振动模式比较丰富，因此，在纵向振子的激励下，圆盘能够在不同的弯曲振动模式上达到共振，从而使该换能器具有多个共振频率。另外，由于该换能器是由两个振动元件(夹心式纵向振子及弯曲振动圆盘)复合而成，因此复合系统会产生不同的复合频率，从而使换能器在不同的频率上共振。总结全文，其主要研究内容可归纳如下：

1. 从理论上推出了该换能器各部分的共振频率方程，为此类换能器的设计提供了理论依据。

2. 从理论上给出了该换能器的等效电路，在此基础上，定性地解释了该换能器为何具有多个共振频率的原因。

3. 实际设计了一些由纵向振子与圆盘组成的多频超声换能器，并对其共振频率、等效阻