

聚焦超声的辐射力计算与高强度聚焦 超声功率测量实验

寿文德 王一抗 钱德初

(上海交通大学生物医学工程系 上海·200030)

叶方伟 彭兴礼 童艺 陈迅 王芷龙

(重庆医科大学医学超声工程研究所 重庆·630043)

本文研究聚焦超声场的辐射力计算。应用几何声学方法,推导了聚焦超声作用于测试靶上的辐射力的通用公式,讨论了全反射靶和全吸收靶上的辐射力。最后给出了应用辐射力法测量高强度聚焦超声装置的声功率的实例,其结果与量热法测得的声功率接近,偏差不大于3%。

关键词: 聚焦超声, 辐射力, 计算, 测量

Radiation force calculation of focused ultrasound and its experiment in high intensity focused ultrasound

SHOU Wende WANG Yikang QIAN Dechu

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai · 200030)

YE Fangwei PENG Xingli TONG Yi CHEN Xun WANG Zhilong

(Chongqing University of Medical Sciences, Chongqing · 630043)

In this paper the calculation method about radiation force has been studied. The formulas of radiation force acting on targets in the focused ultrasonic field are derived using ray acoustic method. The radiation forces on the totally reflecting target and on the totally absorbing target are discussed. Finally a measured result of acoustic power of a high intensity focused ultrasonic equipment by radiation force method is given.

This result is very close to that measured by the calorimetry and the deviation between them is less than 3%

Key Words: focused ultrasound, radiation force, calculation, measurement

1 引言

辐射力法是液体中超声场功率测量的一种基本测量方法^[1,2],早已为国际上公认^[3]。国际电工委员会为此颁布过标准文件^[3,4]。其

侧重点是测量平面波的声功率。K. Beissner曾在若干假设的前提(几何声学、无衍射高频限制时和远场指向性为矩形函数)条件下,导出了聚焦超声场中全吸收靶上的辐射力计算公式^[5],其结果与应用瑞利公式进行数值计

第一作者: 寿文德, 男, 1941年7月生, 教授

收稿日期: 98-4-6; 修回日期: 98-6-4

算的聚焦声场对全吸收靶的辐射力所得的结果符合得很好。在 ka 及聚焦半开角 30 时 (k 为圆波数, a 为聚焦换能器的半孔径), 其偏差小于 0.8%。充分说明其理论假设具有合理性。本文在这个基础上, 应用几何声学方法研究聚焦超声场的辐射力计算的通用公式, 并作初步实验验证。

2 理论计算

假设有一球台形曲面聚焦超声换能器, 其内外孔径分别为 $2b$ 和 $2a$, 且 $ka > kb > 10$, 具有理想的聚焦声场, 满足几何声学假设: 换能器表面声强均为 I ; 聚焦的焦斑直径为零; 超声波能量在传播过程中无损耗; 在经过焦点的立体角内声能流恒等。换能器曲率半径或焦距为 R , 球台两个端面孔径的聚焦半开角分别为: $\alpha_1 = \sin^{-1}(b/R)$; $\alpha_2 = \sin^{-1}(a/R)$, 如图 1 所示。

设在超声场内某一点 Q 处有一个垂直于超声线的面积元 ds ; 由焦点 O 与 ds 构成的立体角向声源延伸, 投射到球台面上对应的辐射面的面积元为 ds_0 。则有:

$$I ds = I_0 ds_0 \quad (1)$$

式中 I 为 Q 点处的声强, 单位为 W/m^2 。

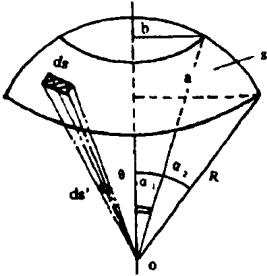


图 1 球台形超声换能器的聚焦声场

根据 Langiven 辐射压力原理, 声平面波的冲量流密度即辐射压力 P_r 表示为:

$$P_r = I/c \quad (2)$$

式中 I 为平面波声强, 单位为 W/m^2 ; c 为介质中的声速, 单位为 m/s ;

假定在上述超声场的声轴上安置一凹圆

锥形的测试靶, 其尺寸足够大能截断全部超声能量。锥面倾斜角为 θ , 声压反射系数 r , 其对称轴与声源球台对称轴(或声轴)重合, 如图 2 所示, 若在经声轴的一个平面内, 设有一条声强为 I 的声线入射到测试靶上的 Q 点, 我们把这条声线看成是极细的平面波束, 它与声轴的夹角为 α , 则入射角为 $(\alpha + \theta)$ 。

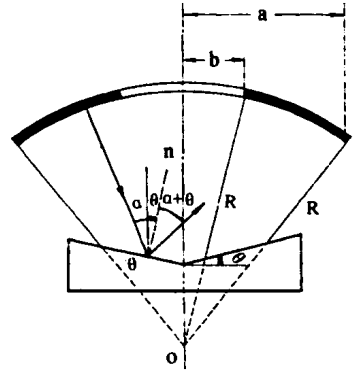


图 2 球台形换能器的聚焦声场作用于凹圆锥面测试靶时的辐射压力示意图

Q 点处入射声冲量流密度在声轴方向上的分量为 $I \cos \alpha/c$, 反射声冲量流密度在声轴方向上的分量为 $r^2 I \cos(\alpha + 2\theta)/c$ 。根据冲量守恒定律, 反射靶所受的冲量流在声轴方向的分量为:

$$P_r = (I/c) [\cos \alpha + r^2 \cos(\alpha + 2\theta)] \quad (3)$$

整个聚焦声束由无数条声束线所代表的细声束组成, 设某条声束在反射靶入射点 Q 处的横截面积为 ds 并把它看成平面波, 则反射靶上的所受该声束的辐射力在声轴方向上的分量为:

$$dF = (I/c) [\cos \alpha + r^2 \cos(\alpha + 2\theta)] ds \quad (4)$$

设入射点 Q 处有一垂直于声入射线的面积元 ds , 与其处于同一会聚的立体角内的换能器辐射面的面积元为 ds_0 。根据式(1), Q 点所受的辐射力在声轴上的分量为:

$$dF = (I/c) [\cos \alpha + r^2 \cos(\alpha + 2\theta)] ds_0 \quad (5)$$

整个反射靶所受辐射力等于 dF 对 ds_0 或 ds 的面积分。即 $F = \int_{s_0} dF = \int_s dF$

整个测试靶所受的辐射力在与声轴相垂

直方向上的分量, 因球面与靶面的轴对称性而抵销, 总和为零。靶面所受的声轴方向的辐射力的总和即总辐射力, 在球坐标系中用下式计算:

$$F = 2 R^2 \frac{I_0}{c} \int_0^{\pi} [\cos \theta + \cos(\theta + 2\alpha)] \sin \theta d\theta$$

考虑到声源的声功率 $P = 2 R^2 I_0 (\cos \alpha - \cos 2\alpha)$, 上式积分值为:

$$F = [(1 + r^2 \cos 2\alpha)(\cos 2\alpha - \cos 2\beta) + r^2 \sin 2\alpha (2\alpha - \sin 2\alpha - 2\beta + \sin 2\beta)] P / [4c(\cos \alpha - \cos 2\alpha)] \text{ 或}$$

$$P = 4Fc(\cos \alpha - \cos 2\alpha) / [(1 + r^2 \cos 2\alpha)(\cos 2\alpha - \cos 2\beta) + r^2 \sin 2\alpha (2\alpha - \sin 2\alpha - 2\beta + \sin 2\beta)] \quad (6)$$

对全反射靶, 将 $r = 1$ 代入式(6)得:

$$P = 4Fc(\cos \alpha - \cos 2\alpha) / [(1 + \cos 2\alpha)(\cos 2\alpha - \cos 2\beta) + (2\alpha - \sin 2\alpha - 2\beta + \sin 2\beta)\sin 2\alpha] \quad (7)$$

换能器为球冠形($\alpha = 0$), 全反射靶($r = 1$), 由式(6)得:

$$P = Fc(1 - \cos 2\beta) / [\cos^2 \beta \sin^2 2\alpha + (\sin 2\alpha \cos 2\beta - 2\beta)\sin 2\alpha] \quad (8)$$

换能器为平面活塞形($\alpha = \beta = 0$), 全反射靶($r = 1$), 由式(7)得:

收靶测量声功率时用式(10)计算, 得 $P = 1.139Fc$ 。测得声功率为 154.4W。此结果与该研究所和南京大学声学研究所合作采用量热法测得的声功率值 159W 很接近, 偏差小于 3%, 说明上面推导的计算公式, 在估算高频高强度聚焦超声场的声功率参数时还是相当有效的。在使用高频大孔径聚焦换能器(ka, kb)时比较准确。

$$P = Fc/2\cos^2 \beta \quad (9)$$

若使用全吸收靶($r = 0$), 对球台形超声换能器, 由式(6)得:

$$P = 2Fc / (\cos \alpha + \cos 2\alpha) \quad (10)$$

换能器为球冠形($\alpha = 0$), 全吸收靶($r = 0$), 由式(10)得:

$$P = 2Fc / (1 + \cos 2\alpha) \quad (11)$$

这个结果与 K. Beissner 的结果^[5]完全相同。换能器为平面活塞形($\alpha = \beta = 0$), 全吸收靶($r = 0$), 由式(10)得:

$$P = Fc \quad (12)$$

3 实验验证

作者所在的上海交大学生命科学技术学院生物医学工程系与重庆医科大学医学超声工程研究所合作, 对该所研制的高强度聚焦超声波中止早孕治疗系统-2型机 1.6MHz 超声功率进行测量。该机的超声聚焦换能器的声场为等效球台形超声聚焦声场, 其内外半聚焦角分别为 14.81 和 37.84°, ka, kb 分别达 896 和 167。采用全吸

参考文献

- 1 C. E. Tschiegg, M. Greenspan and D. G. Eitzen. Ultrasonic continuous wave beam power measurements: international intercomparison. J. Res. Nat. Bur. Stand, 1983; 88: 91
- 2 K. Beissner. Ultraschall-Leistungsmessung mit Hilfe der Schallstrahlungskraft. Acoustica, 1985; 58: 17
- 3 IEC 150: 1963 Testing and calibration of ultrasonic therapeutic equipment
- 4 IEC 1161: 1992 Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0.5MHz to 25MHz
- 5 K. Beissner, Radiation force calculation. Acoustica, 1987; 62: 255