文章编号: 1000-3630(2003) 01-0011-03

HIFU 聚焦探头声场功率测量的凹锥面反射靶设计分析

霍彦明, 吴 敏, 宋文章, 叶兆雄, 王智彪
(重庆医科大学医学超声工程研究所, 重庆 400016)

摘 要: 在 HIFU 聚焦探头声功率测量中, 常用吸收靶来进行声功率测量。锥面反射靶是辐射压力法测量大功率超声功率常用的反射靶面, 本文分析了凹锥面反射靶的设计参数与 HIFU 聚焦探头参数之间的关系, 为这种靶面参数设计提供了理论依据。本文分析中未计及靶材及厚度对测量结果的影响。

关键词: 高强度聚焦超声; 声功率; 凹锥面反射靶
中图分类号: TB559 文献标识码: A

Design of concave cone reflector for HIFU ultrasonic transducer power measurement

HUO Yan-ming, WU Min, SONG Wen-zhang, YE Zhao-xiong, WANG Zhi-biao
(The Institute of Ultrasonic Engineering in Medicine of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

Abstract: In measuring ultrasonic power of HIFU transducers, absorbing targets are often used. Cone reflectors are generally employed in measurements of high ultrasonic power using radiation pressure methods. This paper presents the relationship between parameters of the cone reflector and a focused transducer. It is the bases of the target design. In this discussion, effects of the reflector material and its thickness on the measurements are not taken into account.

Key words: Aight Intensity Focused Ultrasound; ultrasonic power; concave cone reflector

1 引 言

高强度聚焦超声(HIFU)技术在医学临床上的应用日益重要[1~4]。辐射压力法作为超声功率测量的一种基本方法[4], 早已为国际所公认。在 HIFU 治疗系统中, 从换能器发出的超声波被聚焦在一个椭球状的微小区域内。HIFU 探头发出的超声波束不是平行波束, 所以测量其声功率用的接受靶或反射靶的设计必须认真考虑。文献[5] 对聚焦声场中吸收锥面靶的设计做了分析计算, 因而在此不再对吸收凹锥面靶进行分析。

本文应用几何声学原理对常用的凹锥面反射靶进行分析, 讨论了它的设计参数与 HIFU 球面聚焦源参数的关系, 为设计 HIFU 聚焦声场声功率测量的凹锥面反射靶参数设计提供了设计依据。

收稿日期: 2001-04-05; 修回日期: 2001-09-12
基金项目: 本研究由国家 九五 科技攻关项目(96-905-02-01) 和国家自然科学基金委重点项目(39630340) 资助
作者简介: 霍彦明(1971-), 男, 重庆市荣昌县人, 高级工程师, 研究方向: 生物医学工程。

2 HIFU 聚焦声场特点及靶面设计基本要求

HIFU 聚焦超声换能器一般采用自聚焦、透镜聚焦或阵列聚焦等方式。无论那种聚焦方式, 其作用都是将声源发出的超声波聚焦在一个椭球形的微小焦域内。如图 1 所示, 由聚焦换能器产生的声场可以分为两部分: 区域 1(包含椭球形聚焦区域, 见图 1) 和区域 2, 由换能器的聚焦特性决定了超声能量主要分布在区域 1 中, 在区域 2 中存在一些强度远低于区域 1 中的超声束, 因其能量远低于区域 1 中的超声能量, 因此超声功率计的靶面设计主要针

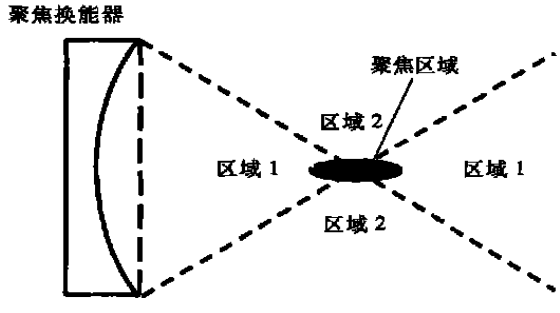

图 1 聚焦声场示意图

对区域 1 进行。

根据聚焦声场的声束特性,其靶面设计必须考虑以下几方面的问题:

(1) 靶的形状及参数;

(2) 靶的尺寸;

(3) 靶的位置;

(4) 换能器探头的聚焦角、聚焦半径;

(5) 靶的材料与厚度的影响。

凹锥面反射靶如图 2 所示。从理论上来讲,反射靶尺寸越大越好,但是选择无限大反射靶面是不切实际的,通常选取的反射靶面大于聚焦源尺寸,即包含聚焦源发出声束的主要部分。若将反射靶面置于聚焦点附近进行测量,其尺寸可以适当减小,但是置于焦点附近测量将产生非常强烈的反射,严重影响测量装置的稳定性,进而大大影响测量结果。

图 2　凹锥面反射靶示意图

3　理论分析

图 3 是聚焦换能器和凹锥面反射靶的示意图,图 3 中, = AOB 是超声波束的聚焦角; f = OO 是换能器聚焦半径; = MCN 是靶的顶角。凹锥面反射靶的设计必须考虑两方面:

(1) 避免入射声束在靶面之间的多次反射;

(2) 避免入射声束被反射回换能器;

下面针对上述两个方面分别讨论。

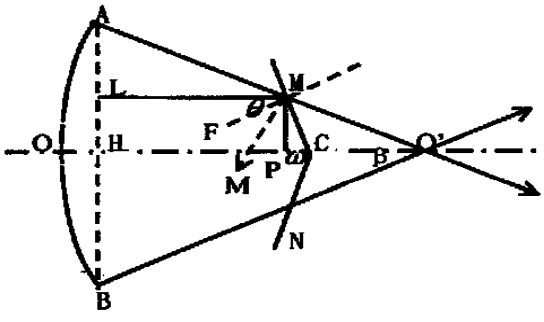

图 3　聚焦换能器和凹锥面反射靶的一般示意图

3.1　靶面之间的多次反射

如图 3 所示,考虑边缘声束 AO 入射到靶面 M 点。从几何声学角度来看,边缘声束 AO 在 M 点的入射角是最大的,故而只要保证声束 AO 经过靶面反射后平行于 CN 射出,即可使入射到靶面的所有声束不会被靶面进行多次反射。假定声束 AO 在 M 点入射后的反射声束 MM 平行于 CN 射出,我们称此时的靶面顶角 * 为临界角,而此时的入射角设为 *,则有下面的式子成立,即:

$$^{*} = \ /2 - \ ^{*}/2 + \ /2 \qquad (1)$$

$$^{*} = \frac{}{2} + \ ^{*} \qquad (2)$$

由几何学知,当实际的靶面顶角 必须不小于 *,即

$$^{*} \qquad (3)$$

时,所有的声束均不被靶进行二次反射。联立式(1)~式(3)得:

$$3 - \ 2 \qquad (4)$$

3.2　靶面与换能器表面的多次反射

要使所有声束不在靶面与换能器之间来回反射,必须满足两个条件:(1) 入射到 M 点的声束 AM 被反射后不会回到换能器表面;(2) 入射到 C 点的声束 OC 被反射后不会回到换能器表面。下面来分析如何使这两个条件得到满足。

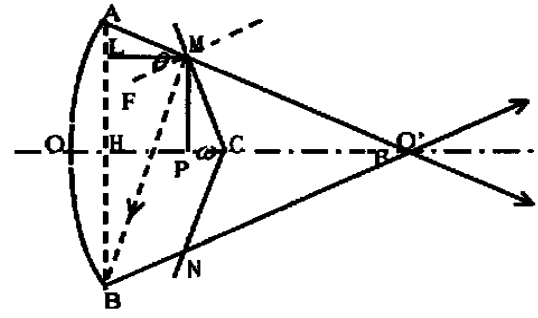

图 4　聚焦换能器和凹锥面靶的临界示意图

首先看如何使入射到 M 点的声束 AM 被反射后不会回到换能器表面。假定图 4 中的锥面靶处于如图所示位置时,声束 AM 入射到靶面 M 点被反射后,正好沿换能器边缘 B 点射出,不妨称此时换能器顶点 O 和反射靶面顶点 C 之间的距离为临界距离 1,记为 OC_1^{*}。如图 4 所示,根据几何关系,以下等式成立:

$$= \frac{}{2} - \frac{}{2} + \frac{}{2} \qquad (5)$$

$$AM = \frac{2f\sin\frac{}{2}}{\sin(\ - \ )}\sin\left(\ - \frac{}{2} - \frac{}{2}\right) \qquad (6)$$

$$ML = AM * \sin\left(\frac{-}{2}\right) \qquad (7)$$

$$OH = f\left(1 - \cos\frac{}{2}\right) \qquad (8)$$

$$MP = f\sin\frac{}{2} - AM * \sin\frac{}{2} \qquad (9)$$

$$PC = MP * \mathrm{ctg}\frac{}{2}$$

$$= \left[f \sin \frac{}{2} - AM^* \sin \frac{}{2} \right] * \operatorname{ctg} \frac{}{2} \quad (10)$$

联立式(5)~式(10)可得:

$$OC_1^* = PC + OH + ML$$

$$= f \left[1 - \cos \frac{}{2} + \sin \frac{}{2} \operatorname{ctg} \frac{}{2} + \frac{2 \sin \frac{}{2} \cos \left(- \frac{}{2} \right)}{\sin(-)} \left(\sin \frac{}{2} \operatorname{ctg} \frac{}{2} - \cos \frac{}{2} \right) \right] \quad (11)$$

因此只要使靶面顶点 C 与换能器顶点 O 之间的距离满足 $OC \quad OC_1^*$,即可保证入射到 M 点的声束 AM 被反射后不会回到换能器表面。

再看如何使入射到 C 点的声束 OC 被反射后不会回到换能器表面。假设声束 OC 入射到靶面 C 点后被反射,反射声束沿换能器边缘 A 或 B 点射出,称此时换能器顶点 O 和反射靶面顶点 C 之间的距离为临界距离 2,记为 OC_2^*。根据几何关系,同上面推导类似可得:

$$OC_2^* = f \left[1 - \cos \frac{}{2} + \cos \operatorname{ctg} \right] \quad (12)$$

因此只要使靶面顶点 C 与换能器顶点 O 之间的距离 OC 满足 $OC \quad OC_2^*$,即可保证入射到 N 点的声束 OC 被反射后不会回到换能器表面。

要想同时满足条件 1 和条件 2,靶面顶点 C 与换能器顶点 O 之间的距离 OC 需满足: $OC \quad OC_1^*$,且 $OC \quad OC_2^*$ 即

$$OC \quad \max(OC_1^*, OC_2^*) \quad (13)$$

综上所述,由式(4)、式(13)可知倒锥形反射靶的设计应满足式(14):

4 结 论

本文对聚焦超声探头声功率测量中锥面靶设计的限制条件进行讨论。在本文讨论中对两方面进行理想化处理:一是聚焦换能器为理想的球面聚焦换能器;另一个是只将聚焦换能器发出超声束的主要部分列入讨论范围。

事实上,聚焦换能器可能不是一个理想的球面,也可能根本不是球面(如阵列换能器等),这些并不重要,因为本文的讨论主要集中在换能器发出的超声束上,而非聚焦换能器本身。无论是何种聚焦曲面,只要换能器和其振动方式是轴对称的,本文的分析方法依然适用。即使是换能器本身不是轴对称的,只要其聚焦声束具有一定的面对称性,仍然可以采用本文的分析方法对靶面设计参数进行讨论。

文中没有对靶材、厚度等参数对测量结果的影响进行讨论,实际上这些参数对测量结果有较大的影响。理想的靶材应选择不易变形、声吸收系数小的材料(如不锈钢等),靶的厚度应当尽量薄,这样才能尽可能减少多次反射带来的声能损失。如果要使测量结果更精确,必须建立声场的非线性传播模型,且必须考虑超声在介质中的空化效应对测量结果的影响。

参考文献:

[1] Cheng SQ, Zhou XD, Tang ZY, etc. High-intensity focused ultrasound in the treatment of experimental liver tumor[J]. J. Cancer Res. Clin. Oncol., 1997, 12(3): 219-223.

[2] Cheng SQ, Zhou XD, Tang ZY, etc. Iodized oil enhances the thermal effect of high-intensity focused ultrasound on ablating experimental liver cancer[J]. J. Cancer. Res. Clin. Oncol., 1997, 12(1): 11-12.

[3] Chen L, Rivens I, ter Haar GR, etc. Histological changes in rat liver tumors treated with HIFU[J]. Ultrasound Med. Biol., 1993, 19(1): 67-74.

[4] 邹建中,王芷龙,刘川等.高强度聚焦超声定位损伤小型香猪肝脏组织的影像学检查[J].中国超声医学杂志, 1999, 15(8): 401-403.

[5] 寿文德,叶方伟等.聚焦超声的辐射力计算与高强度聚焦超声功率测量实验[J].声学技术, 1998, 17(4): 145-147.

$$\begin{cases} OC \quad \max \begin{cases} f \left[1 - \cos \frac{}{2} + \sin \frac{}{2} \operatorname{ctg} \frac{}{2} + \frac{2 \sin \frac{}{2} \cos \left(- \frac{}{2} \right)}{\sin(-)} \left(\sin \frac{}{2} \operatorname{ctg} \frac{}{2} - \cos \frac{}{2} \right) \right] \\ f \left[1 - \cos \frac{}{2} + \cos \operatorname{ctg} \right] \end{cases} \\ 3 \quad - \quad > 2 \end{cases} \quad (14)$$