

一种非侵入式检测聚焦超声场的方法及装置

陈韵琳 谢梓岚 袁添文 毛冠文

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510006)

(收稿日期:2017-04-25)

摘 要:介绍了一种用激光通过声光折射法对聚焦超声场进行非侵入式测量的方法及装置. 该方法采用一束直径小于声波长的平行激光束垂直入射于聚焦焦点,通过建立焦点声压与光线最大偏转距离间的关系模型,即可计算出某点的声压. 通过将激光沿声轴线方向进行微小位置调节,利用光束在聚焦超声场中由于介质折射率不同导致的光线折射,即可测得焦域范围的声压分布以及焦斑宽度. 所得实验测量结果与理论仿真结果对比相差不大,证明此方法是可行的.

关键词:声光折射 焦点声场分布 焦斑宽度 超声波聚焦

随着医疗技术的发展,21 世纪的外科手术由微创进入无创的时代,高强度聚焦超声(HIFU)作为一种新兴的无创肿瘤治疗技术已经在国内外广泛开展,并取得了显著临床效果,尤其是近年来在子宫肌瘤的治疗取得了较好的临床效果. HIFU 声场具有焦点声压大、声强高等特点^[1],容易损坏传感器并降低其灵敏度,若声波达到有限振幅波的范围时,传播过程中易滋生非线性谐波并出现声饱和等现象^[2],给聚焦声场的测量带来了很大的困难. 目前,测量超声波聚焦声场的方法主要有辐射压力法^[3,4]、水听

器测量法、光纤检测和光学检测等. 辐射压力法虽然操作简单且适用范围广,但其空间分辨率较低,对实验环境要求高;水听器测量法的频率响应范围宽、动态范围大,有极好的线性,但其分辨率低,受水中气泡影响大,灵敏度依赖于温度;光纤检测法的空间分辨率高,响应速度快,其声光衍射法可获得光声交叉区域声场完整的分布图,但此方法对信号处理要求较高,且电路复杂,声光衍射法只适用于较弱的声光相互作用. 故本文提出了一种基于声光折射对超声波聚焦焦点声压进行非侵入式检测的方法. 此光

Experimental Exploration on Measuring the Air Refractive Index Using the Michelson Interferometer Under C language

Zhang Zhitao Li Xuemei

(College of Mathematics Physics and Information, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316000)

Abstract: Air refractive index at different pressure can be determined with the number change of interference fringes appearing or disappearing in the screen of the Michelson interferometer, in which many physical parameters are measured. Also the data process by hands is trivial with high error probability. Therefore, the data is processed with C language. The air refractive index of different pressure can be obtained quickly and precisely with low percentage difference. Particularly, the experiment data is processed with least-square method so that the change curve of air refractive index at different pressure can be obtained.

Key words: Michelson interferometer; air refractive index; pressure; interference fringes; C language

学方法在测量时对声压分布不产生干扰,且由于激光束可聚焦到微米量级^[5],因此使用激光进行测量可达到相当高的空间分辨力.通过对激光束进行扫描控制,将能得到十分精细的超声聚焦声场声压空间分布.当一束直径小于声波长的平行光束直接穿过聚焦超声焦点时,光线偏转距离将发生变化,通过研究光线偏转距离与焦点声压变化的关系,建立相应的理论模型,即可计算出焦点的峰值声压,进而得出声轴线的声压分布.

1 测量原理

1.1 声光折射法

声光折射法的本质是声光偏转效应,即窄光束(光束宽度小于超声波波长)穿过超声场时,在声场的作用下,介质的折射率将会随时间发生周期性的变化,光束便会偏离原来的传播方向^[6].该现象首先由 Lucas 等观察到并证实.我们基于该效应建立声场测量方法,采用一束直径小于声波长的平行激光束射入聚焦声场,由于介质中的声场光线发生折射,可根据光线的偏转轨迹计算光线的偏移量,建立其与声压的关系.该方法的最大特点是对光线最大偏转量的峰值测量精确度高.在聚焦超声情况下,由于焦点处的声压远大于旁瓣处的声压,光线在垂直穿过焦点前后的区域内,旁瓣引起的介质折射率梯度的方向相反,光线穿过旁瓣时的偏转近似抵消,因此偏转只与焦点处峰值声压有关,便于测量,变化的参量与声压的关系较简单.

1.2 焦点声压与光线偏转距离的关系

本文采用 $4f$ 铝声透镜来聚焦超声波.声透镜聚焦是常用的声聚焦方式之一,其原理是利用声波在弯曲界面上的折射来达到会聚声波的目的^[7].超声波发射器发射超声波,通过声透镜会聚于一点(焦点),形成聚焦声场,如图 1 所示,假设焦点位于原点 O 处,设声波沿 y 轴正向传播,光束沿 z 轴正向入射.

聚焦声场中声轴线方向的声压分布函数^[1]为

$$p(y) = p_0 \frac{a^2 y}{2(y+b)\lambda_s b} \sin c \quad (1)$$

式中, $\sin c = \frac{\sin \pi y}{\pi y}$, p_0 为焦点峰值声压, a 为声透镜的孔径半径, $a = 16 \text{ mm}$, b 为声透镜的曲率半径, $b = 3.9 \text{ cm}$, λ_s 为声波波长, $\lambda_s = 3.625 \text{ cm}$.

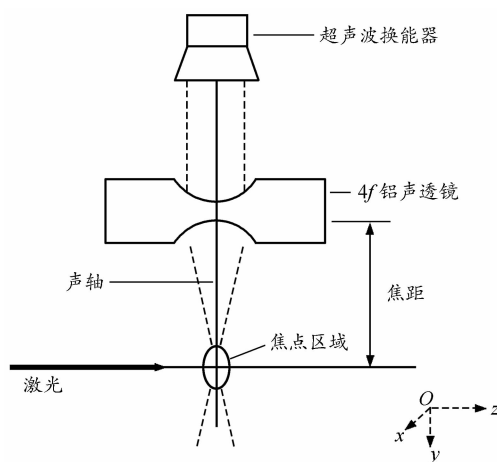


图1 聚焦声场分布图

焦平面上的声压服从 Bessel 函数分布,如图 2 所示^[1],记为

$$p(z) = p_0 \frac{2J_1\left(\frac{k_s a z}{b}\right)}{\frac{k_s a z}{b}} \quad (2)$$

式中 $J_1(y)$ 为一阶 Bessel 函数分布, k_s 为声波波数.

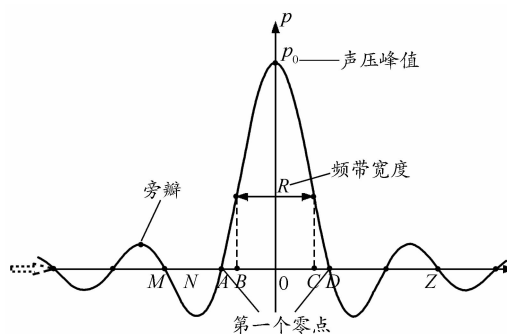


图2 焦平面上的声压分布图

如图 2 所示,在焦平面上,激光束在垂直穿过焦点前后区域的过程中,当光束依次经过 MN 和 NA 两段介质时,由于这两段内的旁瓣引起的介质折射率梯度方向相反,此时光线穿过旁瓣时的偏转近似抵消,故可只考虑焦点附近的情况.把焦点附近的声压近似成抛物线分布,即

$$p(z) = -2.7 p_0 \frac{a^2}{b^2 \lambda_s^2} z^2 + p_0 \quad (3)$$

式中

$$-0.61 \frac{b \lambda_s}{a} \leq y \leq 0.61 \frac{b \lambda_s}{a}$$

因此,该模型可简化为

$$p(y, z) = p(y) p(z) \quad (4)$$

由于焦点附近声压是随时间变化的,由式(4)可得

$$p(y, z, t) = p(y, z) \sin(\omega_s t - k_s y) \quad (5)$$

式中 ω_s 为声波角频率. 由于声压梯度在 y 轴方向, 焦点处声压梯度为

$$\nabla p(y, z, t)_{y \rightarrow 0, z \rightarrow 0} = \frac{\partial p}{\partial y} = -p_0 k_s \cos \omega_s t \quad (6)$$

由式(6)可知, 某时刻焦点处的声压梯度可取得最大值

$$\nabla p_{\max} = p_0 k_s \quad (7)$$

根据 Lorentz-Lorenz 定律可知声压梯度与介质折射率梯度成正比关系. 若光线恰好垂直穿过焦点, 设 α 为光线在声场中穿过 L 距离后的偏转角(通常偏转角 α 较小), 此时光束在离焦点距离 s 处的屏幕上将产生一个最大偏转距离 $d_{\max}$, 且 $s \gg L$, 所以有

$$d_{\max} = \frac{sL}{n} k \nabla p_{\max} \quad (8)$$

式中 L 为有效声场宽度, n 为介质折射率, k 为声压梯度与介质折射率的正比系数. 在聚焦声场中, 声压下降 6 dB 时的焦域直径 R 为 $0.71 \frac{b\lambda_s}{a}$, 故实际的有效声场宽度 L 为

$$L = \frac{1}{p_0} \int_{-0.355 \frac{b\lambda_s}{a}}^{0.355 \frac{b\lambda_s}{a}} p(z) dz = 0.63 \frac{b\lambda_s}{a} \quad (9)$$

综上所述, 由式(7)~(9)即可得出焦点的峰值声压为^[9]

$$p_0 = \frac{nad_{\max}}{1.26\pi ksb} \quad (10)$$

其中, n 为介质折射率, $n=0.1335$, k 为声压梯度与介质折射率的正比系数, $k=1.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.

当光束垂直穿过焦点时, 光线偏转距离随不同时期声压的变化而变化, 光束以每秒 f_0 (声波频率) 次的频率在屏幕上上下下摆动, 由于超声波频率很高, 人眼或者照相机观察不到光束的瞬间位置, 而只能观察到一幅时间平均的图像, 即展宽为 $2d_{\max}$ 的椭圆状光斑^[5].

故实验实际测得的光束最大偏转距离, 即为光线穿过焦点时引起的最大偏转距离, 进而计算焦点峰值声压. 根据上述测量原理, 通过位移装置, 将光束沿 y 轴方向移动得出声压分布, 同理, 将光束沿 x 轴方向移动, 在聚焦的一段位移内光束都将有最大偏转, 从而找出焦斑的宽度.

2 测量装置

实验系统如图 3 所示, 经驱动电路板驱动的超

声波发生器发出的超声波通过 $4f$ 铝声透镜进行聚焦, 其频率为 40 kHz, 声透镜的孔径半径 $a=16 \text{ mm}$, 曲率半径 $b=3.9 \text{ cm}$, 焦距为 4 cm. 将声透镜对准超声波发生器的中心, 并置于装满纯净水的 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 透明的长方体亚克力板水箱中, 水箱底部铺有一层尖劈状 (厚度约为 50 mm) 的吸声棉. 为了消除杂光对整个实验的影响, 在水箱的四周贴满黑玻璃纸, 只在光束的传播路径上开两个小孔, 不影响光束的传播. 将氦氖激光器发出的光束调成平行光束, 使光束的传播方向与声波的传播方向垂直. 根据声透镜的几何焦距, 大致调节激光的位置, 使得激光光束通过聚焦声场. 在离声透镜焦点 3 m 处用线性 CCD 摄像头对通过焦点后的光束进行采集. 线性 CCD 共有 128 个竖直排列的像素采集点, 每个采集点接收的光强对应一个电压值. 开启声源后, 光束经过聚焦声场折射, 将展宽为椭圆状, 此时光束在线性 CCD 所占的像素采集点增加, 在电脑中表现为电压曲线的展宽. 展宽的大小即为光束的偏转距离. 偏转距离最大处即为超声波焦点.

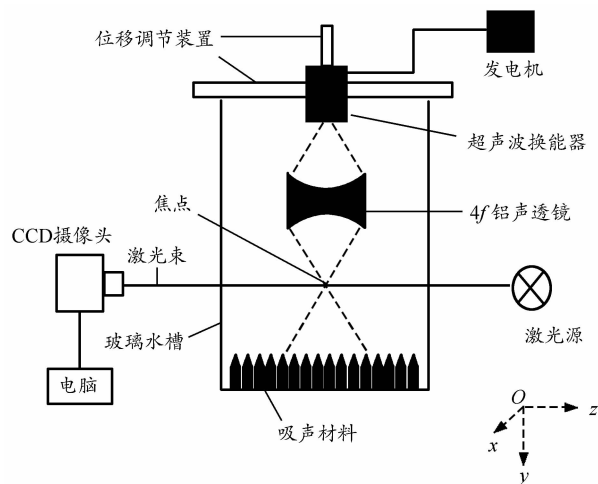


图3 实验平台搭建图

3 测量结果分析

使用上述测量方法和装置, 我们对超声波通过 $4f$ 铝声透镜产生的聚焦声场分布进行了测量, 得出了焦点声轴线方向的声压分布曲线. 为了验证测量结果的正确性, 我们根据式(2)对上述聚焦声场的声压分布进行了理论计算, 得出了如图 4 所示的测量结果与理论值的比较图, 可见, 测量值与理论计算

值比较吻合.

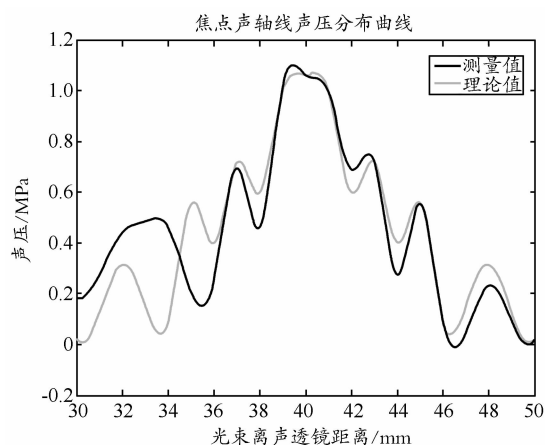


图4 聚焦声场声轴线声压分布曲线

4 结论

本文提出了一种基于声光折射对聚焦超声焦点范围内的声压进行非侵入式的量检测,得出了聚焦声场中声轴线方向的声压分布曲线,与理论模型较接近.通过使光束沿焦域短轴方向移动,测得焦斑宽度为 5.0 mm.

声光折射法具有干扰小、分辨率高的特点,这种方法能有效避免光线因发生衍射而产生的测量影

响,并且由于旁瓣引起的介质折射率梯度的方向相反,光线穿过旁瓣时的偏转能近似抵消,因此偏转只与焦点处峰值声压有关,更便于测量.现有的超声聚焦技术已在医疗方面得到了广泛和成功的应用,而声透镜形成的声聚焦效果更好、效率更高,且基于声光折射法对焦斑参数的测量方法能更准确地反映聚焦声场的分布,将对超声聚焦技术的发展起到巨大的作用.

参考文献

- 1 周慧婷,吕朋,廖长义,等.基于声光折射的聚焦超声焦点声压检测.光学学报,2012,32(9):67~74
- 2 李全义,李发琪,寿文德.高强度聚焦超声(HIFU)的声场检测.世界科技研究与发展,2007,29(6):56~60
- 3 黄小唯,寿文德.聚焦换能器离散发射阵列的辐射力计算.声学技术,2004,23(3):189~192
- 4 寿文德,王一抗,钱德初,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.声学技术,1998,17(4):145~147
- 5 王月兵,平自红.高频聚焦换能器声场的激光测量法.应用声学,2003,22(1):12~15
- 6 吕朋,周圆,宋珂,等.基于声光偏转效应的液体临界剧烈空化声压的检测.中国激光,2013,40(4):165~170
- 7 付丽媛,李发琪.高强度聚焦超声换能器.生物医学工程学杂志,2009,26(3):667~670

A Method and Device of Non-invasive Measuring Focused Ultrasound Field

Chen Yunlin Xie Zilan Yuan Tianwen Mao Guanwen

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006)

Abstract: This paper introduces a non-invasive method and device of measuring the focused ultrasound field by laser based on acousto-optical refraction. With a beam of parallel laser whose diameter is shorter than that of the ultrasound wave irradiating into the focused field, the method builds a simple relational model between the sound pressure of the focus and the maximal deflection distance, to calculate the sound pressure in a certain point. Then, by slightly moving the laser, the method finds the critical point of focusing with the light refraction caused by different medium refractivity in the focused field, to measure the distribution of sound pressure in the focused field and the focal width. The slight difference between the experimental result and theoretical result shows the viability of this method.

Key words: acousto-optical refraction; focused sound field distribution; focal width; focused ultrasound wave