doi:10.11857/j.issn.1674-5124.2017.01.006



聚焦换能器声强和声功率测量方法研究

于 群,王月兵,曹文旭,汤卓翰

(中国计量大学计量测试工程学院,浙江 杭州 310018)

摘 要:针对聚焦声场的特点,以及辐射力天平(RFB)只能获得单一功率指标的缺点,提出一种基于近场测量法的聚 焦换能器声强和声功率评价方法。通过声场测量系统对聚焦换能器预聚焦区域中两个平面上的声压扫描测量,运用 声强法得到聚焦换能器的声强分布以及辐射声功率。采用活塞换能器的远场测量法与近场测量法进行比对,两种方 法得到的声功率误差不超过 12%。比较预聚焦区域声功率值和焦点处声功率值,分析声功率评价方法的准确性。发现 聚焦声场中不同位置处的声功率值一致性误差<5%,同一位置处的声功率值重复性误差<2%。结果表明,近场测量法 适用于对聚焦换能器声强和声功率的评价,可有效避免直接测量对测量设备的损坏,同时还克服双水听器声强互谱 法频率上限低以及测量系统相位不匹配的缺点。

关键词:应用声学;声功率评价方法;声强法;聚焦换能器 文献标志码:A 文章编号:1674-5124(2017)01-0027-06

Study on sound intensity and sound power measurement of focused transducer

YU Qun, WANG Yuebing, CAO Wenxu, TANG Zhuohan

(College of Metrological Technology and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: According to the features of focused sound field and given that radiation force balance (RFB) can only obtain a single power indicator, the paper proposes a method for evaluating sound intensity and sound power of focused transducer based on near-field measurement method. Sound field measurement system is used to have scanning measurement of the sound pressure on two planes within pre-focus area of focused transducer. Sound intensity method is used to obtain the sound pressure distribution and radiant sound power of focused transducer. Comparing the near-field measurement method and far-field measurement method of piston transducer, it is found that the error rate of sound power of the two methods is less than 12%. By comparing the sound power of pre-focused area and the sound power at point of focus and analyzing the accuracy of sound power evaluating method, it is found that the sound power consistency error at different locations in focused sound field is less than 5% and the sound power repeatability of same location is less than 2%. Results show that the near-field measurement method is suitable for evaluating sound intensity and sound power of focused transducer as it avoids the damage of measured equipment caused by direct measurement effectively and also overcomes the disadvantages of the low upper limit of frequency in measuring the cross-spectrum density of sound pressure between two hydrophones and the unmatched phase in measurement system.

Keywords: applied acoustics; sound power evaluation method; sound intensity method; focused transducer

收稿日期:2016-06-18;收到修改稿日期:2016-08-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11474259)

作者简介:于 群(1990-),男,黑龙江五常市人,硕士研究生,专业方向为精密仪器及机械。

通信作者:王月兵(1963-),男,安徽滁州市人,教授,博士,研究方向为水声计量测试技术。

0 引 言

聚焦换能器有两种常用结构¹¹:单元换能器和多 元换能器阵列。单元换能器一般为球面自聚焦换能器。多元换能器阵列也被称为相控阵聚焦换能器。 声功率和声强的计算方法,国际上已有统一的标准 IEC 62127-1,其计算公式为

$$E = \frac{P^2}{\rho c} \times S \tag{1}$$

式中:P----计算面的声压;

ρ----液体介质的密度;

c——液体介质中声传播的速度;

S——计算面积。

聚焦换能器焦域内的声场可以进行平面波近 似,故适用上述声强和声功率计算公式。但焦域内的 声强极高,一般不低于1000 W/cm²,传感器在焦域内 开展测量工作时极易被损坏^[2]。同时焦域外的声场都 不满足平面波或球面波近似条件,上述公式不再适用。 因此式(1)在聚焦换能器声强和声功率检测中存在 极大的限制。辐射力天平法(RFB)出现最早,使用也 最广泛。国家也出台了相应的国家标准。但是利用辐 射力天平只能获得单一的功率指标,这对于判断医 用聚焦治疗头是否合格存在一定的局限性^[3]。

1995年张谷香¹⁴建立了一套基于双水听器声强 测量法的水声声强测量分析系统,该系统可以鉴别和 定位噪声源。但是间距过小的双水听器系统制造困 难,故此种方法存在测量频率上限。上限频率一般不 会大于 10kHz¹⁵。双水听器两通道的性能不完全一致 必然产生附加的相位差影响测量的准确度¹⁶,从而限 制了声强法测量的应用范围。

近场测量法作为一种对聚焦换能器聚焦测量的 方法可以与声强法结合来解决高强度聚焦超声声场 测量的难题。具体的实现方法是把测量区域移置预 聚焦区域,然后通过声强法进行计算得到声强分布 和聚焦换能器的辐射声功率。这种结合的方法避免 了对焦点处直接测量并保护测量设备。为了得到这 种方法对聚焦换能器声强和声功率评价的可靠性评 定,开展了基于近场测量法的聚焦超声换能器声强 和声功率评价技术及其测量系统的研究。

1 声强测量原理

声场中某点的声强四可表示为

$$I = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} p(t) u(t) dt$$
 (2)

式中: I——某点声强;

T——取平均的时间,一般为周期的整数倍;

p(*t*)——瞬时声压;

u(t)——质点瞬时振动速度。

直接根据式(2)测量声强存在困难。鉴于此,研 究者更倾向于质点振动速度的间接测量。1977年 F.J.Fahy[®]和 J.Y.Chung[®]分别提出由互谱函数的虚部 计算声强的方法,即双传声器声强测量法。



图 1 双传声器声强互谱测量法原理图

原理如图 1 所示,利用两个相距很近的传声器测量声压 p_1 和 p_2 的同时,用(p_1+p_2)/2 代替 m点的声压,用一阶有限差分(p_1-p_2)/ Δr 代替 m点的声压梯度,通过 EuLer 方程求出质点振动速度¹⁰¹,便可得到 m点声强与两路声压信号的互谱关系式¹¹¹:

$$I(\omega) = -\frac{I_{m}[G_{12}(\omega)]}{\rho\omega\Delta r}$$
(3)

式中: $I(\omega)$ ——声强谱密度;

Δr——两传声器之间的距离;

ω-----圆频率;

ρ----介质密度;

I_m——复数的虚部;

G₁₂(ω)——两路信号的单边互功率谱。

水声中的双水听器声强测量方法与空气中的双 传声器声强测量法类似。本质上是将空气中声强测 试技术发展到水声中。

2 近场测量法

近场测量方法如图 2 所示,在聚焦换能器预聚焦 区域中选取 2 个相距很近的平行的平面 1 和 2,首 先通过高精度三维扫描运动控制机构控制水听器扫 测平面 1 上的声压全息测量值数据,然后通过步进 电机精确控制水听器沿 Z 轴移动距离 Δr,重复在位 置 1 处的控制和采集过程,完成获取与测量平面 1 相 平行的另一测量平面 2 上的声压全息测量值数据。 得到平面 1 和平面 2 处测量的两组数据后,根据两 组声压信号的互谱运算可以得到位置 0 处平面上的 声强分布。计算时借助 LabVIEW 软件平台。

通过声强对面积的积分可以计算出声源的辐射 声功率^[12],即:



图 2 近场测量法示意图

$$P = \iint_{s} I_{n} \mathrm{d}s \tag{4}$$

式中:P——辐射声功率; s——测量面面积:

*I*_n——声强。

在实际测量中,将测量面 s 适当的分割成 N 个面 元 $\Delta S_i(i=1,2,3,4,\dots,N)$,声源辐射声功率可以近似 估算为

$$P \approx \sum_{i=1}^{N} I_{ni} \Delta S_i \tag{5}$$

式中 Ini 为第 i 块面元上的法向声强值。

利用上述方法便可以测得声强分布和换能器的 辐射声功率,由于采用近场测量法避免了对焦点处直 接进行测量,测量设备接收到的声压远小于焦点处 的声压。利用这种方法便可以测量高强度大声功率 声场的同时避免损坏测量设备。

3 近场测量与远场测量比较

国内外对声强互谱法测量准确性方面的研究报 道甚少。鉴于此,利用活塞换能器的远场测量方法对 本文提出的近场测量法进行验证。

平面活塞换能器的辐射声功率不是直接测量量,而是一个导出量。按定义,辐射声功率可通过测量发射换能器在远场距离为 d 的声轴上的声压及它的指向性因数而求得。声功率 W 的计算公式为

$$W = \frac{4\pi d^2}{R_a} \frac{p_d^2}{\rho c} \tag{6}$$

式中:*p_d*——离发射换能器有效中心 *d* 米处(远场)的 辐射声压, Pa;

R_a——发射换能器的指向性因数;

d----测试距离,m;

 ρ ——水的密度,kg/m³;

实验中选用的活塞换能器直径为 80mm,谐振频

率 40 kHz。换能器指向性一般要在 10 倍以上的远场 距离才会出现,因此距离 d 取 2.7 m。测量用水听器 为标准的小球水听器(灵敏度已校准)。

从图 3 可以求出此换能器的半波束宽度,计算出 指向性因数^[13]R_a为 33。



图 3 活塞换能器 40 kHz 指向性图

保持换能器的激励状态不变,利用近场测量法 在靠近活塞换能器表面 5 mm 处选取两平行平面完 成近场互谱测量。由于激励频率是 40 kHz,故两面间 隔 Δr 取 4 mm,扫描点间隔取 3 mm。两面的扫描范围 120 mm×120 mm。水听器选用 Onda 公司的仓式水听 器(灵敏度已标定)。所测得的声强分布如图 4 所示。



图 4 活塞换能器近场声强分布图

远场测量法辐射声功率由式(6)得 2.811 86 W, 近场测量法测出辐射声功率为 3.180 52 W。两种测 量方法的功率误差在 12%以内,产生误差的原因主 要是声传播过程中存在衰减,近场法测出的功率理 应高于远场法测出的功率。其次由于远场指向性测 量时水池较大实验用水未经除气处理。结果表明提 出的近场测量法测量辐射声功率是可靠的。

4 实验系统

测量系统如图 5 所示,主要包括信号源、功率 放大器、高精度三维扫描运动控制机构、水听器、前 置放大器、数字示波器、程控计算机等。信号源发射 的信号作为同步信号接入数字示波器,同时通过功 率放大器放大后激励换能器发射声波,在水池中形 成辐射声场。水听器安装在高精度三维扫描运动控 制机构上,水听器接收的信号经过前置放大器后,再 由数字示波器进行采集和显示。信号源同步信号接 至数字示波器外部触发输入,用于捕获声压波形和 计算时延。程控计算机控制水听器对声场扫描测量, 并通过串口对数字示波器采集的信号进行读取,得



图 5 声场测量系统示意图

到测量平面声压的全息测量值。

为了消除声波传播反射的影响以及避免在水池 中形成混响场,影响有效信号的提取。信号源发射猝 发正弦脉冲信号,它既有脉冲性质又有稳定状态,在 回波信号到来之前将声场内的有效信号提取出来。

5 实验结果与分析

5.1 声压与声强分布测量

实验选用的聚焦换能器,直径150mm,谐振频 率 1.2 MHz。首先通过声传播方向上移动水听器找到 声压焦点所在位置。选取焦点处、焦点前 10 mm 以及 焦点后 10mm 3 处共 6 个测量平面。测量时为包含大 部分能量区域同时兼顾测量效率,非焦点处选取测量 平面为 12 mm×12 mm, 扫描点间隔为 0.2 mm; 焦点处 选取测量平面为6mm×6mm,扫描点间隔为0.1mm。 两测量平面的距离 Δr 一般取所测信号波长的 1/10 左右¹⁴。本次实验中聚焦换能器的工作频率为1.2MHz, 故 Δr 取 0.1 mm。水听器选用 Onda 公司的仓式水听 器(灵敏度已标定),此水听器有较好的指向性以及 足够的带宽。为了保证测量的准确度,实验用水经过 除气处理。测出焦点处、焦点前 10 mm 和后 10 mm 处 的声压、相位和声强分布,由图6可以看出,在焦域 范围内的声波相位达到一致,表示在焦域内声波叠 加,幅值达到最大。





从图 7 和图 8 可以看出声强和声压存在平方关 系,分布特征较为理想。间接证明了声强测量的正确 性。其中焦点前 10 mm 处的声压分布和声强分布不 沿主声轴对称,主要原因是聚焦换能器制作过程中的 工艺问题使得换能器表面存在不对称的情况。由此 可以看出利用本文提出的方法可以评定聚焦换能器 的聚焦效果。克服了辐射力天平法只能单一获得功 率指标的缺点,用此方法可以更加全面地评价医用 治疗头的性能。

5.2 声功率计算

由图 8 中的声强分布和式(5)计算出功率值如 表 1 所示。用近场测量法测出焦点和焦点前后 10 mm 处的辐射声功率值一致性误差在 5%以内,同时符合 声波在传播过程中的衰减规律,表明近场测量法适 用于对聚焦换能器声功率的评价。一致性误差产生 的主要原因是机械运动的偏差。水听器的运动和定 位是通过声场测量系统中运动控制机构来实现的, 两个测量平面的间隔 Δr 就是由运动控制结构来确 定的。当确定的 Δr 存在精度上的偏差,由式(3)可看 出声强会随之出现较大误差,进而影响到声功率。所 以本方法对声场测量系统中运动控制机构的精度有 较高要求。

表 1 焦点处和焦点前后各 10 mm 处的功率测量结果

位置	扫描间隔/mm	扫描范围/mm	功率/W
焦点前 10 mm	0.2	12×12	0.211
焦点处	0.1	6×6	0.203
焦点后 10 mm	0.2	12×12	0.196

为了验证本系统中运功控制机构的精度是否符 合要求,进行了声功率测量重复性实验。在聚焦换能 器的预聚焦区域同一位置处进行6次声功率测量重 复性实验。碍于篇幅在此仅给出测量的声功率值而 不给出测得的声强分布。6次测出的声功率值如表2 所示。

表 2 声功率重复性实验结果

实验次数	扫描间隔/mm	扫描范围/mm	功率/W
第1次	0.2	12×12	0.1136
第2次	0.2	12×12	0.1121
第3次	0.2	12×12	0.1144
第4次	0.2	12×12	0.1154
第5次	0.2	12×12	0.1151
第6次	0.2	12×12	0.1139

由表可以发现这 6 次实验的重复性误差在 2% 以内,表明此方法具有较好的重复性,同时声场测量 系统的运动控制机构的精度符合要求。

综合上述可以看出本文提出的方法虽然类似于 双水听器声强互谱法。但是本方法只用到一个水听 器,消除了双水听器测量系统相位不匹配的影响,提 高了声强测量的精度。双水听器的间隔过小制作困 难,因此双水听器声强互谱法存在频率上限低的缺点, 而本方法中两测量平面的间隔是由运动控制机构来 确定的,只要运动控制机构的精度够高,其频率上限 可以得到极大提高。

6 结束语

本文通过声场测量系统对聚焦换能器的辐射声 场进行测量。利用近场测量法对声场中预聚焦面和 焦平面的辐射声功率进行评价并得到了理想的声强 分布特征,验证了近场测量法可以很好地应用于对 聚焦换能器声场的声强和声功率的测量与分析。应 用近场测量法对聚焦换能器声场进行测量,提高效率 的同时保护了测量设备。现阶段的实验结果是在低 驱动下得到的。高强度聚焦超声(HIFU)的声强和声 功率测量实验结果的及具体实现过程将另文介绍。 双水听器声强法中两水听器的间距不会太小,故此 种方法的频率上限一般不会超过 10 kHz,而本文提 出的近场测量方法提高了测量的频率上限,可达兆 赫兹级别,同时克服了双水听器系统相位不匹配的 缺点。用远场测量法对近场测量法的可靠性进行验 证以及进行了声功率测量的重复性实验,证明这种近场测量法的准确性,同时也为日后近场测量提供一定的理论与实验基础。

参考文献

- [1] 许阳. 相控阵聚焦换能器的非线性声场研究[D]. 南京: 南京大学,2013.
- [2] 李全义,李发琪,寿文德.高强度聚焦超声(HIFU)的声场 检测[J].世界科技研究与发展,2007,29(6):56-60.
- [3] 谢露. 相控聚焦超声声场分析及测量实验研究[D]. 上海: 上海交通大学,2008.
- [4] 张谷香,王怀应.水声声强测量分析系统及其在水下噪 声鉴别中的应用[J].应用声学,1996(4):33-37.
- [5] 原春晖,张国良,张维衡,等. 声强法测声功率的工程应 用研究[J]. 噪声与振动控制,2001,21(3):17-22.
- [6] 张林,杨德森.声强测量系统用双水听器的校准方法研 究[J].哈尔滨工程大学学报,2002,23(4):1-4.
- [7] 谢荣基,万字鹏,姚小兵.基于声强测量的卷接机组噪声 源识别[J]. 中国测试,2014,40(5):29-31.
- [8] FAHY F J, PIERRI R. Application of cross-spectral density to a measurement of vibration power flow between connected plates[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(5):1297-1298.

- [9] CHUNG J Y. Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1978,64(6):1613-1616.
- [10] 罗晓松,陆燕芳.声强测量及其应用[J].电声技术,1989(6): 25-31.
- [11] CHUNG J Y, POPE J. Practical measurement of acoustic intensity–The two–microphone cross–spectral method[C]// INTER–NOISE and NOISE–CON Congress and Conference Proceedings, 1978:893–900.
- [12] 刘星,时胜国,战国辰,等.水下声强测量技术在近场测量中的应用研究[J].哈尔滨工程大学学报,2002,23(1):95-98.
- [13] 郑士杰,袁文俊,缪荣兴,等.水声计量测试技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1995:410-424.
- [14] 何祚镛,何元安,商德江. 双水听器水声声强测量系统的 误差分析和校准[J]. 声学学报,2000(3):235.

(编辑:刘杨)

(上接第16页)

细丝的直径小于 50 μm, 经纬仪对准细丝中心 的不确定度小于 $\sigma_{d}=10$ μm,则可得 $\sigma'_{\Delta x_1}=\sqrt{12^2+10^2}=$ 16 μm, $\sigma'_{\Delta z_1}=\sqrt{20^2+10^2}=22$ μm, $\sigma'_{\Delta z_0}=\sqrt{16^2+10^2}=19$ μm, 故可得所测试的相交度结果为 $\Delta x_1=(-263\pm48)$ μm, $\Delta z_1=(4.89\pm66)$ μm, $\Delta z_0=(-41\pm57)$ μm。

6 结束语

本文针对三轴转台中环轴轴端没有通光孔的情况,设计了三轴相交度的测试方法。利用齐次变换法 推导了内环轴上三轴交汇中心附近靶标位置在三轴 角位置变化时的表达式,给出了三轴相交度的误差 分离公式,且对三轴转台相交度进行了实测和误差 分析,证明了该方法的有效性,该方法无需拟合多点 来构造三条回转轴线,也不需要用到激光跟踪仪等高 成本设备,更具有普遍性。

参考文献

[1] 任顺清,曾庆双,杨齐慧. 细丝法测量三轴转台的轴线相 交度[J]. 中国机械工程,2002,13(15):56-59.

- [2] 任顺清,陈世家,李玉华.用打表法测量三轴转台的轴线 相交度[J].工具技术,2003,37(2):49-51.
- [3] 王玉田. 打表法测量卧式三轴转台相交度的方法[J]. 机械 研究与应用,2013,26(6):185-186.
- [4] 王明元. 三轴相交度的一种测量方法[J]. 航空计测技术, 2002,22(6):8-10.
- [5] 王明元,杨连春,余海盛,等.三轴相交度的一种测量方法[J]. 宇航计测技术,2012,32(2):15-17.
- [6] REN S Q, MA G C, WANG C H. Axis intersection measurement of three-axis turntable with two crosshair targets[J]. Journal of Harbin Institute of Technology(New Series), 2005, 12(3): 250-254.
- [7] 王振亚,张庆春. 基于 CCD 的三轴转台轴线相交度测量[J]. 制造业自动化,2011,33(7):97-100.
- [8] 于之靖,孙海龙,陶洪伟,等. 三轴转台轴系相交度和垂直 度的新测量方法[J]. 机床与液压,2015,43(17):24-28.
- [9] 郭益德.两种用准直望远镜测量三轴转台的轴线相交度 测量方法的比较[C]//中国惯性技术学会测试专业委员 会第八次学术交流会论文集.北京:中国惯性技术学会测 试专业委员会,2003:77-81.

(编辑:李妮)