

◇ 研究报告 ◇

# 渔业声学回波散射测量系统的宽频带换能器<sup>\*</sup>

童剑锋<sup>1,2†</sup> 笹仓豊喜<sup>3</sup>

(1 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306)

(2 上海海洋大学博士后科研流动站 上海 201306)

(3 日本 Fusion 有限责任公司 东京 108-8477)

**摘要** 针对目前渔业声学宽频带回波散射测量系统采用多个不同频带的换能器合成、结构复杂且不方便携带的缺点,本文提出一种使用低机械品质因数、高谐振频率的积层压电致动器作为核心压电元件的“朗之万”型宽带水声换能器。测试结果表明,该换能器适用的频率范围为 20 kHz~150 kHz,在三个渔业声学常用频率 38 kHz、70 kHz、120 kHz 下的 -3 dB 波束宽度分别为 20.0°、11.5°、5.0°,可以满足对常见渔业资源种类的宽带声学回波散射特征的测量要求。

**关键词** 换能器,宽频带,积层压电致动器,朗之万型结构

中图分类号: TB565+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)06-0521-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.06.007

## A wideband transducer for fisheries acoustics backscattering measurement system

TONG Jianfeng<sup>1,2</sup> SASAKURA Toyoki<sup>3</sup>

(1 College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

(2 Post-doctoral Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

(3 Fusion Incorporation, Tokyo 108-8477, Japan)

**Abstract** Wideband acoustic backscattering measurement systems used in fisheries acoustics usually combine several transducers with different frequency bands, which makes the systems complex and not portable. In this paper, a Langevin type wideband transducer which uses multilayer piezoelectric actuators with low mechanical quality factor and high resonance frequency as the transducer elements is proposed. Measurement of the transducer show that the operating frequencies of the transducer range from 20 kHz to 150 kHz, and the -3 dB beam angle at frequency 38 kHz, 70 kHz and 120 kHz, at which most existing scientific echo sounder uses, are 20.0°, 11.5° and 5.0° respectively. Thus, this transducer can meet the requirements for wideband backscattering characteristics measurement of common fishery resources species.

**Key words** Transducers, Wideband, Multilayer piezoelectric actuators, Langevin structure

2017-03-13 收稿; 2017-07-21 定稿

<sup>\*</sup>上海市浦江人才计划项目(16PJ1403900), 国家自然科学基金青年科学基金项目(41606210), 中国博士后科学基金项目(2015M581586), 上海海洋大学科技发展专项基金项目(A2020300100215), 上海海洋大学博士科研启动基金项目(A2020300100331)  
作者简介: 童剑锋(1983-), 男, 福建沙县人, 博士, 研究方向: 渔业水声学、水下应用信息系统工学。

<sup>†</sup>通讯作者 E-mail: jftong@shou.edu.cn

## 1 引言

近年来,在渔业水声学领域,宽频带回声探测计量系统(宽频带科学鱼探仪)已成为一个研究热点,特别是用于水生动物目标的判别,个体大小及生物量的估算中<sup>[1-2]</sup>。使用宽频技术,可以得到整个频率带范围内的回波特征,即可以得到目标回波散射的频率谱,极大地增加了信息量,特别是有利于提高目标的判别精度。宽频技术的应用甚至可模拟海豚的发声以提高声学探测的精度<sup>[3]</sup>。

宽频带回声探测计量系统的关键技术在于水声换能器的宽频带化。拓宽水声换能器频率宽度的方法有多种,包括使用 Tonpilz 型换能器附加匹配层<sup>[4]</sup>,调整 Tonpilz 型换能器前后盖板等各部分的几何尺寸<sup>[5]</sup>,使用 1-3 型压电复合材料<sup>[6]</sup>,复合材料结合匹配层产生两个谐振峰<sup>[7-8]</sup>,以及在换能器的辐射面上钻孔降低其特性阻抗以增加频带宽度<sup>[9]</sup>等方法。Mortensen 等<sup>[10]</sup>制作了一套用于测量鱼类和浮游动物宽带回波散射特性的宽带声学测量系统,其工作频率范围为 25 kHz~3200 kHz,是目前所有文献报道中带宽最广的水声生物回波散射测量系统。该系统由 7 个独立换能器组成,其中低频换能器部分采用了 Tonpilz 型换能器构造,中高频部分采用了 1-3 型压电复合材料,结合前盖板匹配层和后盖板等一系列设计完成。然而,该设计过程及换能器结构比较复杂,不易于实现,换能器的数量也比较多,不方便携带以及在小型渔船上进行实验。Miyamoto 等<sup>[11]</sup>采用工业设备精确定位以及数码

相机自动聚焦用的积层式压电致动器代替常用的压电陶瓷片研制了朗之万型结构的声脉冲发射器,用来发射 M 序列声学信号,其使用的积层压电致动器自身的谐振频率为 261 kHz,而制成朗之万型的声脉冲发射器能够产生 30 kHz 的谐振频率且有效工作频率范围为 30 kHz~50 kHz 的宽频带声超声信号。虽然这个带宽范围不能完全满足渔业声学调查的需要,但该研究表明了使用积层压电致动器结合朗之万型结构来快速开发宽带水声换能器的可行性。常见的渔业声学调查用的科学鱼探仪使用的频率有 18 kHz、38 kHz、70 kHz、120 kHz 等,开发 20 kHz~150 kHz 附近频率段的宽带水声换能器,可满足对大多数海洋鱼类和浮游动物的宽带回波散射特征的测量需求。因此,本研究选取适合谐振频率的积层压电致动器,利用单个积层压电元件的高频谐振特性以及多个压电元件和前后盖板组成的朗之万型换能器结构的低频谐振特性,研制了一个针对海洋鱼类和浮游动物宽带回波散射特征测量用的水声换能器,为进一步开发新一代高精度渔业资源计量探测系统奠定基础。

## 2 换能器宽带化原理

传统的鱼探仪超声波换能器使用特定频率下谐振的压电元件。例如,200 kHz 的鱼探仪水声换能器一般使用图 1(a) 所示结构的 PZT 压电陶瓷。而 50 kHz 的鱼探仪水声换能器采用朗之万型结构(图 2(a)),即 PZT 压电陶瓷加上金属盖板。图 1(b)、

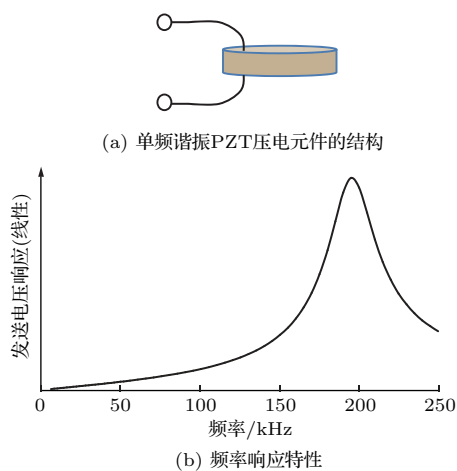


图1 单频谐振 PZT 及其频率响应特性

Fig. 1 Single frequency resonant PZT and its frequency response

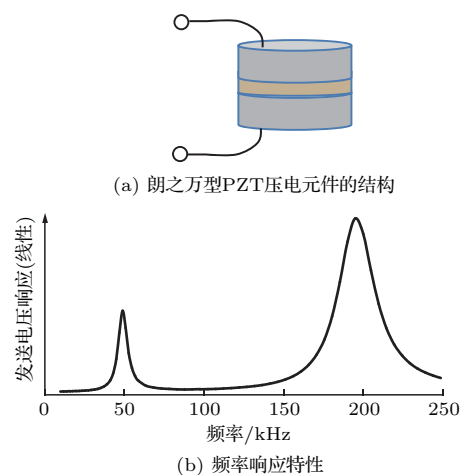


图2 朗之万型 PZT 及其频率响应特性

Fig. 2 Langevin type PZT and its frequency response

图2(b)分别为压电元件和换能器谐振特性的机械品质因数 $Q$ 均设为10时两种结构所计算的频率响应特性。如图所示,单频水声换能器在其谐振频率以外的灵敏度低下,而在谐振频率下形成尖锐的峰值。朗之万型结构换能器除了压电元件本身的谐振频率之外,在前后盖板的作用下还形成一个低频谐振频率。通常,朗之万型结构所产生的低频谐振频率的灵敏度比压电元件本身的高频谐振频率灵敏度要低。而图2(b)所示的 $Q = 10$ 时,虽然换能器能形成两个谐振频率,但是宽频带范围内整体的灵敏度起伏落差较大,无法作为宽频化换能器使用。

朗之万型换能器包含两个谐振频率,分别是压电元件本身的谐振频率 $f_{r1}$ 以及前后夹板形成的谐振频率 $f_{r2}$ ,将两个谐振频率下的发送电压响应等效考虑为电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 的功率消耗,可用图3所示的等效电路表示。

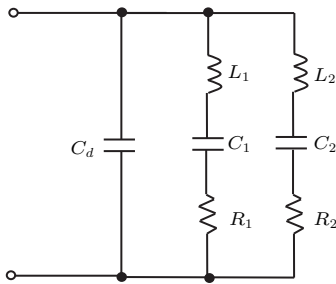


图3 朗之万型换能器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of Langevin type transducer

因此,朗之万型换能器整体的发送电压响应 $S_{TX}$ 可用公式(1)表示,

$$S_{TX} = \eta_1 P_{TX1} + \eta_2 P_{TX2}, \quad (1)$$

其中, $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 为电声转换效率, $P_{TX1}$ 、 $P_{TX2}$ 为发送电压响应,可用公式(2)表示,

$$P_{TXi} = v_{TX}^2 / [Z_i], \quad (2)$$

其中, $v_{TX}$ 为发射电压,等价电路的阻抗 $Z_i$ 为

$$Z_i = R_i + j(\omega L_i - 1/\omega C_i), \quad (3)$$

电路的品质因数 $Q_i$ 为

$$Q_i = 1/\omega C_d R_i, \quad (4)$$

其中, $\omega$ 为角频率, $C_d$ 为阻尼电容。通过以上公式可以计算得出,当压电元件的谐振频率和朗之万结构的谐振频率接近,且各自的品质因数 $Q$ 比较小

时,两个谐振频率之间可以维持一定的发送电压响应。如图4所示,当压电元件的谐振频率为120 kHz, $Q = 5$ ,朗之万结构的谐振频率为30 kHz, $Q = 2$ 时,两个谐振频率峰值之间的灵敏度降低10 dB左右,可以实现换能器的宽频化。因此,理论上可以使用低品质因数的压电元件结合朗之万型结构来实现宽频换能器。

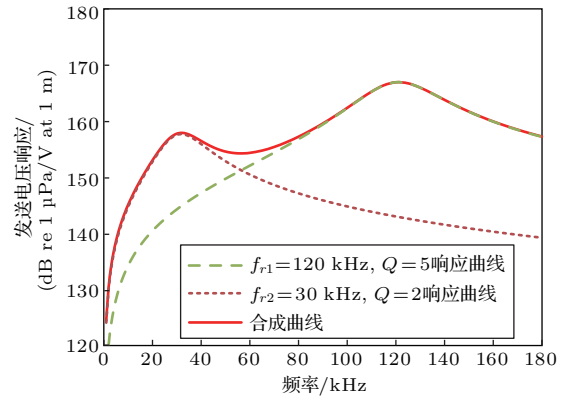


图4 双谐振频率(30 kHz/ $Q = 2$ 和120 kHz/ $Q = 5$ )的发送电压响应

Fig. 4 Transmitting voltage response of double resonant frequency (30 kHz/ $Q = 2$ , 120 kHz/ $Q = 5$ )

### 3 宽带换能器的设计与实现

根据以上换能器宽带化原理,为了得到20 kHz~150 kHz频带范围内较好的发送接收灵敏度,需同时考虑朗之万型结构的低频谐振特性和压电元件本身的高频谐振特性。下文分别叙述高频压电元件和低频朗之万结构的谐振特性。

#### 3.1 高频谐振压电元件

本研究中使用的超声波振子为日本NEC公司生产的积层压电致动器,每个压电致动器由多层锆酸铅钡材料的压电陶瓷所组成,每层压电陶瓷的厚度约为110 μm,长宽各为10 mm。多层压电陶瓷积层化组成高为10 mm的压电致动器,以获得较大的位变量。产品参数说明谐振频率为152 kHz,但Amakasu等<sup>[12]</sup>在水中实验测的谐振频率为134 kHz和161 kHz。从Amakasu等测量的结果(图5)可知,该型号积层压电致动器的 $Q$ 因数较小,在80 kHz频率以上可获得较好的发送电压响应,然而低频部分的发送电压响应偏低,为此,我们考虑使用朗之万结构形成的低频谐振特征来增强低频部分的发送电压响应。

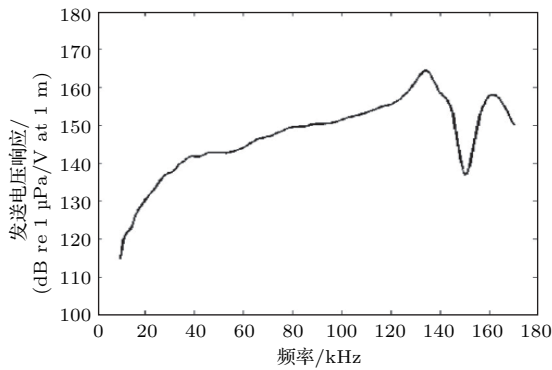


图5 10 mm厚度的积层压电致动器发送电压响应<sup>[12]</sup>  
Fig. 5 Measured transmitting voltage response of a 10 mm long multilayer piezoelectric actuator<sup>[12]</sup>

### 3.2 低频谐振朗之万结构特征

低频谐振的频率与朗之万结构前后盖板夹紧压电元件后的厚度有关。为了确认换能器的厚度与低频谐振频率的关系,本研究使用上述积层压电致动器制作了一系列不同厚度的朗之万结构测试件。测试件结构如图6所示,10 mm×10 mm×10 mm的积层压电元件前后加上厚度为 $t$ 的亚克力圆板固定在外径为24 mm的亚克力圆管中,前后盖板加上压电元件本身的厚度之和 $L$ 为谐振层厚。选择亚克力材料的原因在于:(1)便于加工;(2)声速在亚克力材料上相比金属材料上要慢,相同谐振频率下,亚克力材料的谐振层厚更小。

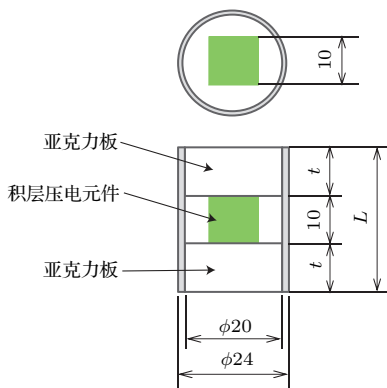


图6 朗之万型测试件结构示意图  
Fig. 6 Structure of Langevin type test piece

图7为谐振层厚 $L$ 分别为60 mm、50 mm、40 mm和36 mm时,测试件的发送响应的频率特性。四个测试件的测量结果:谐振频率分别为20 kHz、30 kHz、40 kHz和46 kHz, $Q$ 因数分别为6.6、6.7、5.5和3.7,均比较低。根据前述的换能器宽

带化原理,为了获得较宽的频率发射响应灵敏度,选择 $Q$ 值较小的36 mm谐振层厚。

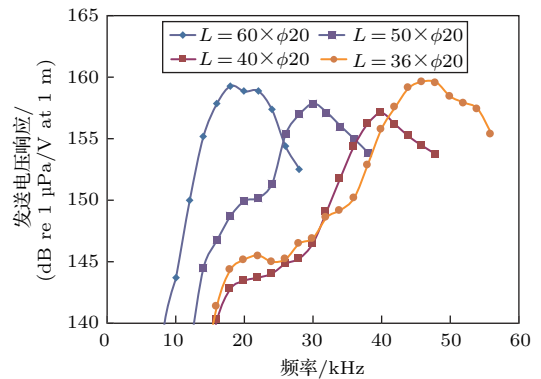


图7 谐振层厚分别为60 mm、50 mm、40 mm和36 mm时的发送响应频率特征  
Fig. 7 Characteristic of transmitting voltage response while the resonance layer thickness is 60 mm, 50 mm, 40 mm and 36 mm

### 3.3 宽带换能器结构

换能器的结构如图8所示,为了抑制旁瓣和使发射波形对称,换能器采用52个积层压电元件均匀分布于四个象限,换能器前后盖板直径为110 mm的圆形面板,形成朗之万型结构的厚度为36 mm。图9为换能器装进防水仓后的实物图。

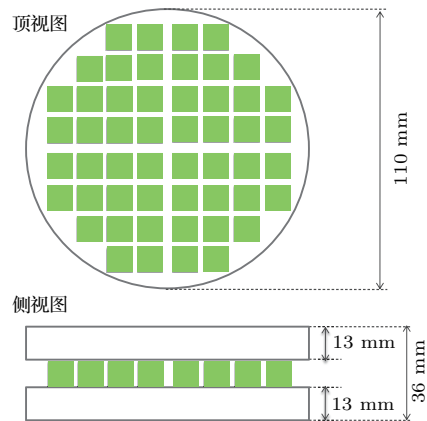


图8 换能器结构示意图  
Fig. 8 Structure of the developed transducer

假设换能器为直径110 mm的理想圆形活塞声源,根据圆形活塞声源指向性函数式(5)计算可得渔业声学常用频率38 kHz、70 kHz、120 kHz的-3 dB波束角分别为20.8°、11.3°、6.6°,各个频率的波束角均达到渔业声学的应用要求。

$$D(\theta) = \frac{2J_1(k\alpha\sin\theta)}{k\alpha\sin\theta}, \quad (5)$$

其中,  $J_1$  为一阶贝塞尔函数,  $k$  为波数,  $\alpha$  为换能器半径。

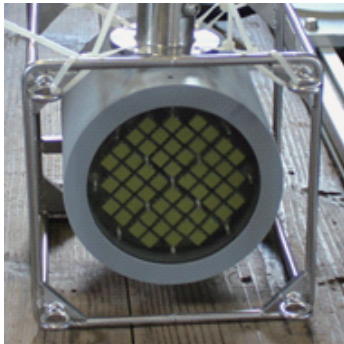


图9 研制的换能器实物图  
Fig. 9 Photo of the developed transducer

#### 4 换能器测量结果与讨论

渔业声学调查中选择换能器参数主要考虑其使用频率下的发送电压响应、接收灵敏度及指向性特征。因此, 本研究重点测量换能器的发送电压响应、接收灵敏度及其指向性特征。

##### 4.1 发送电压响应及接收声压灵敏度

对换能器 20 kHz~150 kHz 频率范围内的发送电压响应及接收声压灵敏度测量实验, 其中 20 kHz~100 kHz 每 2 kHz 间隔测量, 100 kHz~150 kHz 每 5 kHz 间隔测量。实验时, 各频率的发射声源级如图 10 所示, 其中渔业声学测量常用的三个频率 38 kHz, 70 kHz 及 120 kHz 的声源级分别为 173.0 dB, 179.8 dB, 180.4 dB。换能器灵敏度测量结果如图 11(a) 所示。发送电压响应曲线中有两个谐振频率, 分别为低频段的 47 kHz 和高频段的 135 kHz, 低频段谐振频率与图 6 中所示 36 mm 层厚的朗之万结构产生的谐振频率一致, 高频段谐振与 Amakasu 等<sup>[12]</sup> 测得的积层压电元件自身的谐振频率一致。60 kHz 处的响应出现低峰值, 是低频谐振的反谐振频率。接收声压灵敏度与发送电压响应的频率响应特征总体趋势一致, 作为收发合置换能器, 其相对脉冲回波灵敏度如图 11(b) 所示, 虽然 20 kHz~30 kHz 左右的灵敏度较低, 47 kHz、69 kHz、112 kHz 和 135 kHz 出现了峰值, 但是整体灵敏度比较平稳, 展现了良好的宽频特性, 能够满足渔业声学调查和水下目标宽带回波散射特征测量的需要。为补偿发送电压响应曲线中个别频率响应

过低的问题, 可开发专用的功率放大器对来耦合发射声源级。

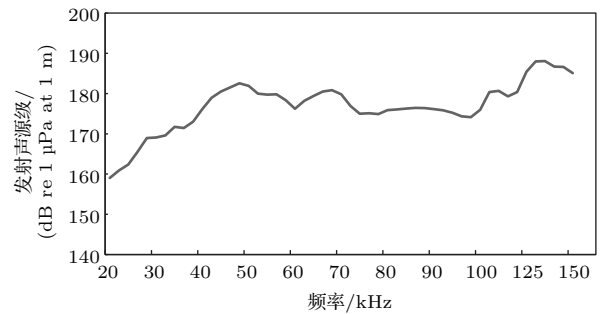
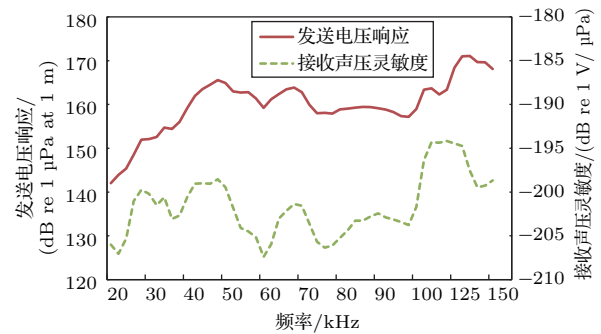
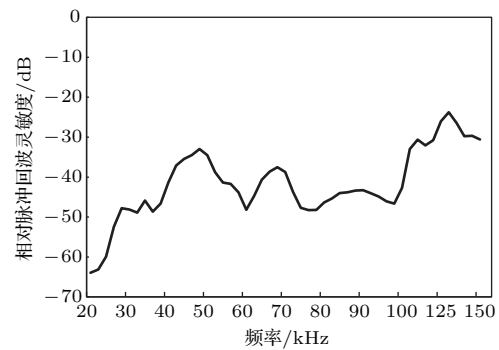


图10 换能器的发射声源级频率曲线

Fig. 10 Transmitting sound source level of the transducer to frequency



(a) 发送电压响应、接收声压灵敏度的频率特征



(b) 相对脉冲回波灵敏度频率特征

图11 换能器性能参数的频率特征

Fig. 11 Performance parameters of the transducer to frequency

##### 4.2 换能器的指向性

本文测量了换能器在 38 kHz、70 kHz、120 kHz 三个频率的指向性。如图 12 所示, 实线为根据公式 (5) 所计算的直径为 110 mm 的理想圆形活塞换能器指向性理论值, 菱形点为实际测量结果, -3 dB 的波束宽度分别为 20.0°、11.5°、5.0°。从图 12 中可以看出, 实测的换能器三个频率指向性的主瓣宽度

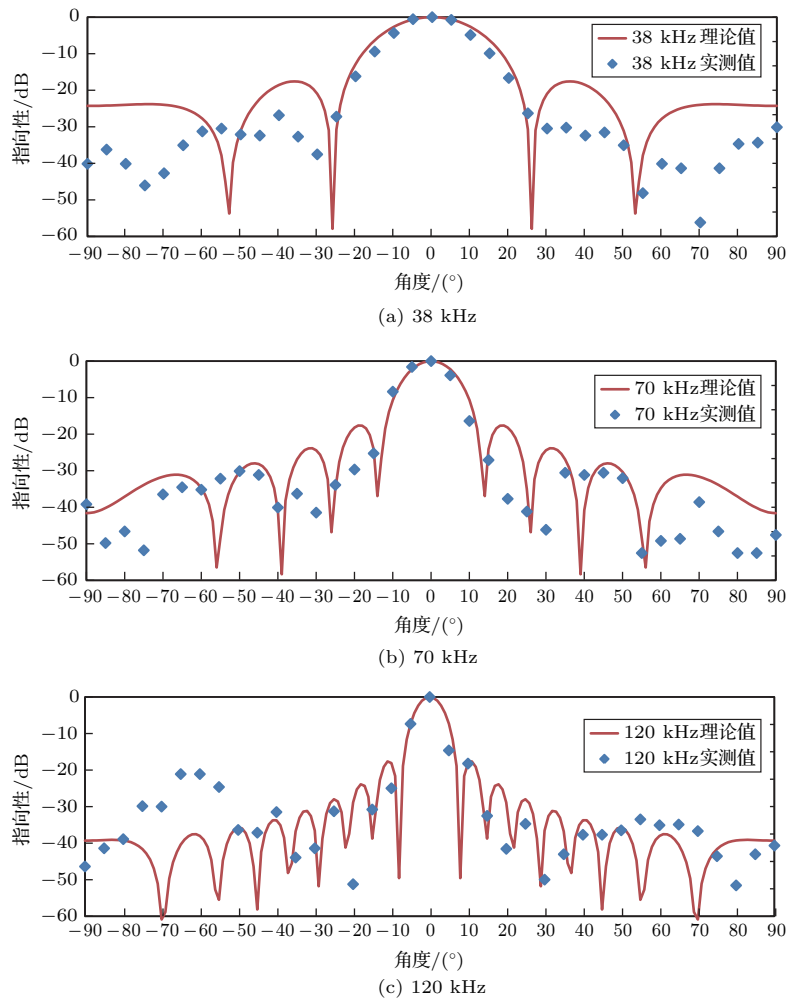


图12 不同频率下换能器指向性

Fig. 12 Beam patterns of the transducer at different frequency

与理论计算值一致。一般科学鱼探仪使用回声积分法<sup>[13]</sup>对探测水柱中的鱼类及浮游动物等回波进行计量分析,要求波束角比较小或者能够定位探测目标在波束中的位置。该换能器高频部分的波束角可以满足要求,但低频部分波束角较大,这是换能器前辐射面的半径所决定,可以通过增大换能器前盖板的直径来减小波束角度,或者将换能器进行四个象限的分裂波束处理,通过回波信号到达四个象限的时间差来判断反射目标在波束中的水平位置。

## 5 结论

本文提出了一种使用低机械品质因数的积层压电致动器作为压电元件,配以前后盖板的朗之万夹心结构形成低频谐振的特性,从而拓宽响应频率的朗之万型结构宽频带换能器。根据换能器宽带化的理论以及对测试件的验证,试制了一个宽带

水声换能器。通过实验测量,该换能器的可用频率范围为20 kHz~150 kHz,达到近3个倍频的宽频响应。通过换能器在三个渔业声学常用频率38 kHz、70 kHz、120 kHz下的发送电压响应、接收灵敏度和指向性的测试结果,验证了理论分析的正确性。本文研究的宽带换能器可满足渔业声学调查的需要,也为同类型的水下声源技术研究提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] STANTON T K, CHU D, JECH J M, et al. New broadband methods for resonance classification and high-resolution imagery of fish with swimbladders using a modified commercial broadband echosounder[J]. ICES J. Mar. Sci., 2010, 67(2): 365-378.
- [2] LAVERY A C, CHU D, MOUM J N. Measurements of acoustic scattering from zooplankton and oceanic mi-

- crostructure using a broadband echosounder[J]. ICES J. Mar. Sci., 2010, 67(2): 379–394.
- [3] MISHIMA Y, MIYAMOTO Y, SASAKURA T. Application of the broadband speaker[C]. The 24th Ocean Engineering Symposium, March 13–14. 2014: OES24-026.
- [4] 陈航, 张允孟, 李志舜. 具有阻抗匹配层的宽带纵向振动压电换能器设计[J]. 应用声学, 2001, 20(2): 31–34, 22.  
CHEN Hang, ZHANG Yunmeng, LI Zhishun. Design of wide-band longitudinal mode piezoelectric transducers with impedance matching layers[J]. Applied Acoustics, 2001, 20(2): 31–34, 22.
- [5] 滕舵, 陈航, 张允孟. 宽带纵振 Tonpiz 型水声换能器的优化设计[J]. 声学技术, 2005, 24(1): 58–60.  
TENG Duo, CHEN Hang, ZHANG Yunmeng. Optimization design of broadband longitudinal tonpiz underwater acoustic transducers[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(1): 58–60.
- [6] 张凯, 蓝宇, 李琪. 1-3 型压电复合材料宽带水声换能器研究[J]. 声学学报, 2011, 36(6): 631–637.  
ZHANG Kai, LAN Yu, LI Qi. Research on 1-3 piezocomposite broad-band underwater transducers[J]. Acta Acustica, 2011, 36(6): 631–637.
- [7] COCHRAN S, PARKER M, FRANCH P M. Ultrabroad-band single crystal composite transducers for underwater ultrasound[C]. Ultrasonics Symposium, 2005 IEEE, Netherlands, 2005: 231–234.
- [8] ELMASH I C, KOYMEN H. A wideband and a wide-beamwidth acoustic transducer design for underwater acoustic communications[C]. OCEANS 2006 -Asia Pacific, Singapore, 2007: 1–5.
- [9] 中国科学院物理研究所超声处理组. 宽频带夹芯式压电换能器[J]. 物理学报, 1976, 25(1): 85–87.  
Ultrasonic Processing Research Group, Institute of Physics, Academia Sinica. A broadband piezoelectric sandwich transducer[J]. Acta Physica Sinica, 1976, 25(1): 85–87.
- [10] MORTENSEN T, LARSEN M T, ERIKSEN P K, et al. Octave bandwidth transducers for ultra-bandwidth echosounding system[J]. Proc. I.O.A., 1999, 21(1): 27–41.
- [11] MIYAMOTO Y, UCHIDA K, TAKAO Y, et al. Development of a new ultrasonic biotelemetry system using a maximum length sequence signal[J]. J. Marine Acoust. Soc. Jpn., 2011, 38(3): 119–127.
- [12] AMAKASU K, MISHIMA Y, SASAKURA T, et al. Application of multilayer piezoelectric actuators to broadband backscattering measurements of aquatic animals[J]. J. Marine Acoust. Soc. Jpn., 2013, 40(3): 126–137.
- [13] SIMMONDS J, MACLENNAN D. Fisheries acoustics: Theory and practice[M]. Second Edition. UK: Blackwell Science, 2005.