水声无源材料回声降低测量时反聚焦方法

李建龙^{1,3} 何志光^{1,3} 闫孝伟²

(1 浙江大学信息与电子工程学系 杭州 310027)(2 中国船舶工业系统工程研究院 北京 100094)

(3 浙江省综合信息网技术重点实验室 杭州 310027)

2013 年 7 月 28 日收到

2014年1月17日定稿

摘要 提出了利用时间反转(时反)聚焦技术的水声无源材料回声降低测量方法。首先实现有界水声环境下有、无试样接收信号的时反聚焦,然后利用聚焦信号测量试样反射系数,最后通过标准试样对反射系数进行修正,从而得到试样的回声降低测量值。在小型水池中进行了铝板试样和钢板试样回声降低的测量,铝板试样的尺寸为 1.1 m×1.0 m×0.005 m,测量频率范围为 3~20 kHz,钢板试样尺寸与铝板试样相同,测量频率范围为 0.5~20 kHz,测量结果经修正后与平面波理论计算值基本一致,和理论计算值的相对误差小于 10%,扩展不确定度小于 1.5 dB。本方法采用时反原理实现了接收信号的空时聚焦,提高了测量信混比,因此适用于非自由场环境下无源材料回声降低的测量试验,尤其适用于低频的回声降低测量。 PACS 数: 43.85, 43.30

Measurement of the echo reduction for underwater acoustic

passive materials with a time reversal technique

LI Jianlong^{1,3} HE Zhiguang^{1,3} YAN Xiaowei²

(1 Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University Hangzhou 310027)

(2 Institute of System Engineering Research Beijing 100094)

(3 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Network Technology Hangzhou 310027)

Received Jul. 18, 2013

Revised Jan. 17, 2014

Abstract A method of measuring the echo reduction of passive materials with the time reversal (TR) technique is presented. To measure the echo reduction with this approach, the received signals are firstly focused according to the TR theory with a sample. Then, the sample is removed and the TR processing is again employed to realize the focus of the received signal. Finally, the echo reduction of the sample is evaluated with these focusing signals. Besides, to calibrate the echo reduction measured via the TR technique, a standard sample is employed to measure a constant coefficient that only depends on the measurement environment. An aluminum plate sample and a steel plate sample with the same size of $1.1 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 0.005 \text{ m}$ are tested in a wave guide tank. The experimental results show that the calibrated values are well consistent with theoretical results of the free field for the measured frequency range of $0.5 \sim 20 \text{ kHz}$. The relative errors of all the measured values are less than 10% and the values of the expanded uncertainty are less than 1.5 dB. The TR processing focuses the energy in spatial domain and temporal domain, so it can be used to measure the echo reduction of passive materials in the environments with reflections induced by boundaries or low frequency sources.

引言

水声无源材料是实现水下系统隐身的关键部

件^[1]。近年来,随着材料科学的进步,黏弹性高分子 材料等高性能吸声材料在隔声减振、吸声降噪等水 声工程领域的应用日益广泛。因而,对该类材料在水 声环境中的声学性能研究和声学参数测量是迫切需 要解决的问题。

水声无源材料声学性能参数包括插入损失(透射 系数)、回声降低(反射系数)、吸声系数等^[2]。目前水 声无源材料的声学性能测量已经取得了重要进展, 尤其对中高频声学性能的测量,无论在小样品测量 还是在大样品测量方面均已发展了多种较成熟的测 量方法。目前常用的测量方法有基于声管的小样品 测试法,包括脉冲管法、驻波管法、行波管法等^[2-5], 以及基于大型消声水池的大样测试方法,包括压缩脉 冲叠加法、参量源法、声全息法等^[2,6-7]。

声管小样品测量方法经过几十年的探索和研究,技术发展得已相对成熟,相关的测量标准和规范也已形成。该类测量方法具有众多的优点,如待测样品尺寸比较小;制作方便且成本相对较低;易于多次重复验证测试;温度和压力等影响因素容易调控等。然而其也同时存在较多的局限性,由于脉冲声管本身长度和待测试样尺寸的限制,脉冲声管法的测量频率下限通常在几千赫兹以上。对于具有一定内部结构的非均匀材料来说,由于样品尺寸有限,测量结果不能充分地反映样品结构的整体吸声效果,同时,样品背衬的选择对测量结果影响也较大^[8]。

消声水池中的大样品测量方法可避免声管小样 品测量方法的大部分缺点。但也存在着不少制约因 素,如由于测试环境对低频声波的吸声性能有限,声 波的多径效应明显,产生的混响导致低频测量误差 较大^[9]。

针对消声水池大样测量中存在的问题,本文提 出了一种基于时间反转聚焦技术的水声无源材料反 射系数/回声降低测量方法。时反聚焦技术可对测试 环境界面造成的多径声波进行补偿,减小混响对测量 结果的影响,可适用于材料低频声学性能的测量,同 时,由于时反的聚焦特点,此测量方法亦适用于在水 池和湖上等具有波导效应的环境下开展材料声学性 能的测量。

1 时反聚焦原理

由于本文的回声降低测量中使用了时反聚焦技术,为使论文具有完整性,本节简要介绍时反聚焦原理^[10-11]。时反方法基于声波动方程的空间互易性和时间反转不变性原理,该方法已在多个领域得到应用^[10-13]。如图1所示,时反系统主要包括两部分,即作为导引源的探查源 (Probing Source, PS)部分,以及发射-接收阵 (Source Receiver Array, SRA)系统。根据声互易性原理,时反聚焦可通过如下四个步骤实现:

(1) PS 发射声信号 *e*(ω)(频域表示), 设其波形如图 1(a) 右侧所示。

(2)根据射线模型,发射信号经水底反射 s₁、水体传播 s₂及水面反射 s₃后,被 SRA 接收,设某一阵元接收信号为三条路径传播信号的叠加 (如图 1(a) 左侧所示),相应的时延 (即传播路程除以声速)分别为 τ₁, τ₂及 τ₃,根据示意图 1(a),三者的关系为 τ₁ > τ₃ > τ₂,即 s₁最慢, s₂最快,其他多次弹跳路径亦可进行类似定义。SRA 接收信号可用公式表示为:

$$\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)e(\omega),\tag{1}$$

式中 $H(\omega)$ 是PS与SRA之间的信道传输函数。

(3) 将接收到的信号时间反转 (如图 1(b) 左侧
 所示) 后发射 (即先到后发,后到先发),发射信号为
 S*(ω)(时域反转等价于频域共轭)。

(4) 则最后到达的 s_1 最先发射 (比 s_2 早 $\tau_1 - \tau_2$, 比 s_3 早 $\tau_1 - \tau_3$),若本次测量期间环境时不变,则 s_1 的时反信号按原路径返回到 PS 处,所需时间为 τ_1 ; s_3 延时 $\tau_1 - \tau_3$ 后发出, s_3 的时反信号到达 PS 时所 需时间为 ($\tau_1 - \tau_3$) + τ_3 (以 s_1 发射时间点为参考起始 点);同理 s_2 的时反信号到达时间为 ($\tau_1 - \tau_2$) + τ_2 . 由互易性原理,三条路径的时反信号按原路径返回 到 PS 处 (空间聚焦),且同时到达 (二次发射时三条 路径到达 PS 处所需的时间均为 τ_1),使信号同相位 叠加 (幅度增强,时域聚焦),由于进行了时间反转, 因此聚焦信号为原 PS 发射信号的时间反转形式,如 图 1(b) 右侧所示。利用公式可表示为:

$$P(\omega) = \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(\omega)\boldsymbol{S}^{*}(\omega) = \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(\omega)\boldsymbol{H}^{*}(\omega)\boldsymbol{e}^{*}(\omega) =$$
$$\|\boldsymbol{H}(\omega)\|^{2}\boldsymbol{e}^{*}(\omega),$$
(2)

式中 $H^{T}(\omega)$ 为 $H(\omega)$ 的转置,表示 SRA 到 PS 处的 信道传输函数。从上式同样可知,若信道传输函数幅 度在发射信号频带内不变, PS 处的聚焦信号即为原 PS 发射信号的时间反转形式。

SRA 其它阵元接收信号的聚焦过程也可通过上述步骤进行解释。有关时反空 - 时聚焦详细的数学推导过程,可参考文献 10。若在自由场条件,由于聚焦信号只有直达波 (如图中的 s₂ 路径),而没有边界多路径入射,则时反聚焦效果与常规的平面波波束形成方法等效 (对于近场,与球面波波束形成等效)。

时反技术的时间域聚焦特性使多途接收信号压 缩成原发射信号的时间反转形式,把本属于混响的 干扰,通过互易性原理异步发射,从而在 PS 处同相 位叠加于直达入射波,提高了信混比,尤其在中低频 无源材料回声降低的水池或水湖测量中,时反聚焦 技术可有效抑制现有水池回声降低测量技术面临的



(b)发射-接收阵接收信号经时间反转后发射,探查声源处信号空-时聚焦示意图 图 1 时反聚焦原理示意图

强混响干扰。此外,由于时反聚焦原理在非均匀介质 环境下同样成立,因此,可消除测试环境水体内部结 构对测量的影响。

2 测量系统

时反聚焦的测量系统如图 2 所示。该测量系统 由干端和湿端两部分组成。干端主要由计算机、通 道独立控制信号发生器、功率放大器、前置放大器、 滤波器及数据采集器组成。湿端主要由发射换能器 阵、接收水听器阵及待测试样组成。计算机主要用 于发射波形的设计和实验数据的处理,并对信号发 生器及数据采集器进行控制,为实现时反聚焦,信号 发生器每一通道需具有独立控制功能,以实现不同 换能器可发射不同波形的功能。发射换能器阵包括



图 2 时反聚焦测量系统框图

两套系统,一套为三元阵,在深度方向均匀分布,谐 振频率为2kHz;另一套为16元垂直阵,谐振频率为 12kHz。发射换能器阵与试样距离L为8m。接收 阵为五元十字阵,按照试样表面形状均匀分布,与试 样距离为d。波导水池长12m,宽1.5m,深1.5m,底 部铺有0.25m厚的细沙,水池四面贴有吸声材料, 其3kHz以上吸声系数高于98%。

3 测量过程

根据时反原理以及早期的时反实现技术,图2中 的水听器相当于具有收发功能的PS,而发射换能器 阵亦需具有收发合置功能,这类时反系统功能复杂, 构建硬件系统的代价也较高。随着时反技术的发展, 人们逐渐利用收发互易性原理简化时反系统,在静态 环境条件下,经简化后的系统可达到与原时反系统一 样的效果。利用简化的时反技术进行试样回声降低测 量的系统布放如图3所示,利用发射阵及水听器阵 即可实现在相应水听器处的时反聚焦。具体的时反聚 焦实现过程以及相应的回声降低测量过程如下:

(1)时反发射信号生成。首先,按照图 2 布放测量硬件系统。然后,根据所需测量的频率范围,由计算机生成发射信号,如宽带线性调频信号或窄带的脉冲余弦信号。发射换能器阵经多通道模拟发射系统控制,各阵元对应通道依次独立地发射信号,同时,欲聚焦处的水听器依次记录经测试环境传播的各阵元发射信号。

(2) 有试样时聚焦信号的采集。利用计算机对水 听器接收信号进行幅度归一化、功率控制及时间反 转,并由发射换能器阵进行发射,根据声互易性原理 及时反原理,时反信号经测量环境再次传播后可在 对应的水听器处实现空时聚焦,该聚焦信号为原发 射信号的时间反转形式,此时水听器记录有测试样 品时的聚焦信号 *p*_{r+i+ri+rir},设界面两次及以上弹跳 信号微弱,可忽略,则聚焦信号包含了直达信号 *p*_i 及界面反射信号的 *p*_{ri}(两者相加为无试样时聚焦信 号*p*_{i+ri})、试样法向反射信号 *p*_r 以及界面反射波再 经试样反射后回波 *p*_{rir},如图 3 所示。

(3) 无试样时聚焦信号采集。将试样从测试环 境中取出,如图 4 所示,再次由发射换能器阵发射 步骤 (2) 中的时反信号,则信号仍会在水听器处实现 空时聚焦,此时,由于试样取出,该聚焦信号不包括 样品反射信号,设该聚焦信号为 *p*_{*i*+*ri*}。

(4) 时反聚焦测量方法回声降低的计算。通过以 上三个步骤可将测量数据采集完毕,从步骤(2)及(3) 中可知,两次采集数据的差异是有无包含试样反射回 波。利用反射系数的计算公式可得试样反射系数为:

$$r_p = \frac{p_{r+i+ri+rir} - p_{i+ri}}{p_{i+ri}},\tag{3}$$

通过反射系数与回声降低的关系,可得:

$$E_r = -20\log 10|r_p|.$$
 (4)

(5)回声降低测量值的修正。如式(3)所示,虽然 时反聚焦抑制了界面混响,然而反射系数测量结果中 分子部分含有界面和试样反射后的信号,分母部分含 有界面反射信号,因此与常规意义上的自由场测量结 果不一致,需对时反聚焦测量结果进行修正。如图 3 所示,有试样时的反射聚焦信号 *p*_{r+i+ri+rir} 包含直 达信号 *p*_i 及界面反射信号的 *p*_{ri} (两者叠加为无试样 时聚焦信号 *p*_{i+ri})、试样反射信号 *p*_r 以及界面反射 波再经试样反射后回波聚焦信号 *p*_{rir}。根据自由场反 射系数计算公式,试样反射信号 *p*_r 也可以表示为:

$$p_r = a_1 r_p^s p_i, \tag{5}$$

其中 r_p^s 为自由场条件下有限试样反射系数, a_1 为试 样与聚焦点处双程传播损失导致的幅度衰减因子; p_{rir} 可表示为:

$$p_{rir} = a_2 r_p^{\prime s} r_q p_s, \tag{6}$$

其中 $r_p^{\prime s}$ 为试样小角度 (设法向入射为零度) 情况下 试样自由场反射系数, r_q 为界面反射系数, p_s 为发 射信号, a_2 为 p_{rir} 信号从发射源到接收点由于传播 距离导致的幅度衰减因子;则由测量数据计算所得 的反射系数式 (4) 可表示为:

$$r_{p} = \frac{p_{r+i+rir} - p_{i+ri}}{p_{i+ri}} = \frac{\left[p_{i} + p_{ri} + a_{1}r_{p}^{s}p_{i} + a_{2}r_{p}^{\prime s}r_{q}p_{s}\right] - \left[p_{i} + p_{ri}\right]}{p_{i} + p_{ri}}.$$
(7)

设水池为狭长形且试样与发射阵距离远大于水深,则小角度入射情况下的反射系数 $r_p^{\prime s}$ 近似等于法向反射系数 $r_p^{s} \approx r_p^{\prime s}$,则

$$r_p \approx r_p^s \frac{a_1 p_i + a_2 r_q p_s}{p_i + p_{ri}} = \frac{1}{q} r_p^s,$$
 (8)

其中:

$$q = \frac{p_i + p_{ri}}{a_1 p_i + a_2 r_q p_s}.$$
(9)

从式(8)可知,利用时反聚焦法测量所得的反射系数 r_p与自由场条件测量所得的试样反射系数 r^s_p相差一



图 3 有试样情况下时反聚焦信号采集示意图



图 4 无试样情况下时反聚焦信号采集示意图

个因子 q。由式 (9) 可知,因子 q 只与发射信号源 级、测量系统布放 (即传播损失导致的信号衰减因子 $a_1 \ \pi \ a_2$) 及测试环境边界反射系数 r_q 有关,而与试 样特性没有关系,因此在测量系统及环境不变的情 况下, q 为一常量。

为对时反聚焦测量结果进行修正,可考虑用标 准试样获取 q 因子。首先,利用标准试样进行试验, 获取实验测量值 r_p,因为自由场情况下标准试样的 理论值 r^s_p可由理论公式计算得到,因此通过式(8) 可得到与试样属性无关的修正因子 q,然后利用该因 子修正待测试样的实验测量值 r_p,即

$$r_p^s = qr_p,\tag{10}$$

最后根据反射系数与回声降低的关系,推得修正后 的回声降低为:

 $E_r^s = -20\log 10 |r_p| - 20\log 10 |q| = E_r - 20\log 10 |q|, \tag{11}$

其中 Er 由步骤 (4) 通过试验数据计算得到。

4 测量结果

为验证时反聚焦测量方法在无源材料回声降低 测量中的有效性,利用上述测量系统和测量步骤,开 展了水池实验。分别对铝板试样和钢板试样进行了 回声降低的测量,这些试样的回声降低同时可通过 理论计算获取,易于验证时反聚焦测量方法的有效 性。铝板试样几何尺寸为1.1 m×1.0 m×0.005 m,密度 2.97×10³ kg/m³,声速 5380 m/s。钢板试样几何尺寸 与铝板相同,密度 7.84×10³ kg/m³,声速 5470 m/s。 另有一块长度和宽度相同,厚度为 3 mm 的钢板作 为参考标准试样以获取修正因子 q。

首先开展了时反发射与常规发射(所有阵元同相 位发射)的对比分析实验,其主要目的是验证时反技 术的空时聚焦效果,显示其抑制混响的能力。十字接 收阵5个阵元信号分别接入16通道数据采集系统的 5,7,9,15 和 16 通道,时反发射实验时分别对各水听 器位置进行聚焦。图 5 为时反发射与全阵同相发射 时接收阵空间能量分布及时间波形对比图,其中时 反聚焦点位于第9通道对应的水听器位置,信号频 率 5 kHz, 脉宽 5 ms。由图 5 空间能量分布可知, 时 反发射在接收阵处空间能量集中到拟聚焦的位置, 即第9通道对应的水听器位置处,见图5(b);而常规 发射能量分散,没有在第9通道对应的水听器位置 处形成焦点,见图 5(a)。同时,由 (c)和 (d)从时域 波形对比可知,时反聚焦波形恢复好、混响低且信号 幅度大,多径消除明显,而全阵同相发射由于水面及 水底的反射, 直达信号不可分辨, 且信号幅度低, 混 响高,难以截取直达波信号用于试样回声降低的计 算。图 6 显示的是不同频率发射信号的接收信号对 比图,信号频率为 1.5 kHz,脉宽不变,对比图中的 (a)、(c)和(b)、(d),同样可知利用时反技术可实现 空时聚焦,而常规的同相位发射技术空时均不能有 效聚焦。此外,比较图 5 和图 6 可知,对于较低频率 的发射信号,由于水池侧边吸声材料在低频区域的 吸声性能下降,导致接收阵处的空间能量分布更分 散,时域多径的持续时间更长。

由于需对无试样及有试样情况下做聚焦,且需 用标准试样获取不同频点的修正因子,因此数据采 集时间较长,为检验测试环境的时反聚焦稳定性,本 次试验进行了同一时反发射信号(即图 1(b)的发射 信号)间隔 24 小时重复发射的聚焦对比实验,两次

0

-2



图 5 发射信号频率为 5 kHz, 脉宽 5 ms 时,时反发射 (第 9 通道对应的水听器处聚焦)与常规发射空间能量分布及时间波形对比图



图 6 发射信号频率为 1.5 kHz, 脉宽 5 ms 时,时反发射 (第 9 通道对应的水听器处聚焦)与常规发射空间能量分布及时间波形对比图

聚焦结果如图 7 所示,其中发射波形为 5 ms,频率为 5 kHz 的 PCW 信号,由图可知,同样的时反发射信号在间隔 24 小时后,除最大幅值处由于数字信号采样间隔的因素略有不同,聚焦波形基本重叠,显示水池测试环境具有较高的时间稳定性,可用于时反聚 焦实验的测量。





为获取修正因子 q, 开展了基于时反聚焦的标准 试样回声降低测量工作, 图 8 显示的是不同频率对应 的 q 值, 由图可知, 随着频率的上升, q 值也增加, 这与式 (9) q 的表达式是一致的, 由该式可知, 随着 频率的增加, 分母中水池四周的边界反射能力降低 (水池四侧吸声材料对于较高频率信号的吸声效果较 好), 即反射系数 r_q 减小, 传播损失增加, 衰减量大, 即因子 a₁ 和 a₂ 减小, 从而导致分母减小, 因此 q 值 增大。

利用图 8 的参考试样修正因子,进而开展了铝 板试样和不同的钢板试样的测量验证工作。图 9 显 示的是 5 mm 铝板试样回声降低理论值及时反聚焦 5 次测量平均值的比较图,由于试样低频段处回波趋近 于 0 dB, 因此测量频率范围为 3~20 kHz, 由图可知, 在多径较严重 (水面水底反射,见图 5(c)和图 6(c)) 的水池波导环境下,基于时反聚焦的试样回声降低 测量方法所得的测量结果基本与平面波理论计算值 相一致,各频点对应的测量平均值与真实理论计算值 的相对误差小于 10%。

图 10 显示的是 5 mm 钢板试样回声降低理论 计算值及实验测量值的比较图,增加了低频段 (0.5~ 3 kHz)回声降低的测量,由图可知,时反聚焦法测量







图 9 铝板试样回声降低理论计算值及实验测量平均值对比图

结果与自由场理论计算值同样具有较好的一致性。

为研究回声降低的测量不确定度,分别对两个试 样进行了 5 次实验测量,利用下式开展了不确定度 A 类评定法的计算,即

$$U = \left[\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n} (E_i - \overline{E})^2\right]^{1/2}, \qquad (12)$$

其中n为测量次数, E_i 为第i个测量数据, \overline{E} 为n个数据的算术平均。由式 (12)得到不确定度 A 类评定结果后进而计算扩展不确定度,如图 11 所示,图中显示铝板试样和钢板试样的扩展不确定度均小于 1.5 dB,且低频区域的不确定度大于高频区域。



图 11 铝板试样及钢板试样回声降低测量扩展不确定度图

5 结论

本文提出了利用时反聚焦技术的水声无源材料 回声降低测量方法,通过水池实验,验证了在多径 效应较严重的波导环境,回声降低时反聚焦测量方 法可实现接收信号的空时聚焦,有效降低混响,其所 得的测量结果经标准试样修正后基本与自由场理论 计算值相一致,各测量频点对应结果的相对误差均 小于 10%,测量不确定度小于 1.5 dB。由于时反的 聚焦原理不依赖于频率而成立,因此本文提出的方 法尤其适用于中低频段材料声学性能的测量。同时 需要指出的是,本方法的主要不足之处在于需在一 次测量期间保持测量环境的声学时不变特性,这是 时反聚焦成立的条件,所以在一次测量期间各次数 据采集过程中,需保持发射阵和接收阵位置保持不 变,若频率越高,则阵空间位置变化对聚焦效果的影 响越敏感,进而影响测量的准确性。同时,为使测量 结果与自由场回声降低定义的测量结果具有可比性 (即不是相对结果的比较,而是绝对值的比较),时反 聚焦方法首先需用标准试样获得修正因子,这增加 了测量的时间和复杂度。

参考文献

- 王荣光,游蕾. 潜艇隐身衣 消声瓦. 现代舰船, 2001; 5: 24—25
- 2 郑士杰,袁文俊,缪荣兴等.水声计量测试技术.哈尔滨:哈尔 滨工程大学出版社,1995:410-424
- 3 PAN Yaozong, MO Xiping, LIU Yongping, CUI Zheng, ZHANG Tonggen. A wideband combined transducer for measuring system in sound tube. *Chinese Journal of Acoustics*, 2012; **31**(2): 144—152
- 4 李水, 沈建新, 唐海清, 张晓岚. 水声材料低频声性能的驻波管
 测量. 计量学报, 2003; 24(3): 221—224
- 5 李水,罗马奇,范进良,沈建新.水声材料低频声性能的行波管
 测量.声学学报,2007;32(4):349—355
- 6 李水, 缪荣兴. 水声材料性能的自由场宽带压缩脉冲叠加法测量. 声学学报, 2000; 5(3): 248—253
- 7 何元安,李锐,何柞铺.一种任意入射角反射系数反演技术.声 学学报,1996;21(6):928—934
- 8 王曼. 水声吸声覆盖层理论与实验研究. 哈尔滨工程大学博士学 位论文, 2004
- Bobber R J, 郑士杰译.水下电声测量.北京:国防工业出版
 社, 1977: 311—324
- 10 Fink M, Derode A, Cassereau D. Time-reversed acoustics. Rep. Prog. Phys, 2000; 63: 1933—1995
- 11 闫丽明,李建龙,潘翔,赵航芳,祝恒年.时间反转处理用于掩 埋目标检测.声学学报,2008; 33(6): 542—547
- 12 LI Zhuang, QIAO Gang, Muhammad Asim Ismail. Integration of time-reversal mirror technique in short baseline positioning. *Chinese Journal of Acoustics*, 2013; **32**(3): 222-232
- 13 YAN Xiaowei, LI Jianlong, KONG Xiangdong. Measurement of insertion loss for underwater acousticpassive materials with the time reversal technique. *Chinese Journal* of Acoustics, 2014; **33**(2): 109—120