

# 多频海底声学原位测试系统在海水中的声源响应及子波分析

李红星<sup>1,2</sup>, 王英<sup>3</sup>, 陶春辉<sup>2</sup>, 邓显明<sup>2</sup>, 刘财<sup>1</sup>, 周建平<sup>2</sup>,  
张金辉<sup>2</sup>, 顾春华<sup>2</sup>, 何拥华<sup>2</sup>

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012; 3. 浙江理工大学, 杭州 310012)

**摘要:** 多频海底声学原位测试系统是国家海洋局第二海洋研究所自行研制的海底声学原位测试系统。利用声源换能器的等效电路, 分析了声源换能器输入终端输入脉冲与输出接收脉冲之间的关系。将系统的低频声源等效为一定半径的球形声源, 确定了系统在 15kHz 时在试验海域海水中的声源换能器的角频率响应和输出回路品质因子。计算了系统理论接收脉冲, 结果表明输出接收脉冲并非输入脉冲的简单复制。并与实测接收脉冲进行了比对, 理论接收脉冲与实测脉冲在细节上达到了很好的匹配, 说明本文确定的各响应参数很好的代表了本系统在海水中的声源响应。

**关键词:** 声学原位测试; 声源响应; 换能器; 脉冲; 子波

中图分类号: P744.3

文献表示码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0010-04

## The source resonance and wavelet analysis of the multi-frequency in situ sediment seabed acoustic measurement system in seawater

LI Hong-xing<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>3</sup>, TAO Chun-hui<sup>2</sup>, DENG Xian-ming<sup>2</sup>, LIU Cai<sup>1</sup>, ZHOU Jian-ping<sup>2</sup>,  
ZHANG Jin-hui<sup>2</sup>, GU Chun-hua<sup>2</sup>, HE Yong-hua<sup>2</sup>

(1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 3. Zhejiang Science and Technology University, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Multi-frequency in situ sediment seabed acoustic measurement system is produced by Second Institute of Oceanography, SOA. Utilizing the equivalent circuit of source transducer, analyze the relation between the input pulse and the out pulse of the source transducer. Equal the low frequency source to spherical source with some radius and confirm the resonance angular frequency and the quality factor of the output circus of the transducer with 15 kHz frequency in seawater. Calculate the theoretical received output pulse and the result indicate that the output pulse is not a replica of the input pulse. And compare the theoretical pulse and the practical pulse and find they match perfect in detail. And this indicates that the parameters of the source resonance the paper ensured represent the source resonance of the system very well.

**Key words:** situ acoustic measurement; source resonance; transducer; pulse; wavelet

## 1 引言

海底沉积物的声学特性是沉积物声学中的一个重要的研究项目。目前直接测量海底沉积物的声学特性方法可以分为原位测量与取样测量两种<sup>[1]</sup>。原位测量的结果包容了周边环境的所有因素所引起的效应, 同时, 还可避免在沉积物取样和样品运输过程中对样品的扰动而导致的测量误差, 而这种

误差很难预估。

我国的海底声学原位测试系统的研制落后西方国家<sup>[2-4]</sup>, 国家海洋局第二海洋研究所自行研制的多频海底声学原位测试系统很好地改变了我国在声学原位测量的落后局面<sup>[5]</sup>。由于原位测试技术不是通过取样直接对沉积物的声速等参数进行测量, 所以能否通过原位测试技术获取的原始资料得到准确可靠的海底沉积物声学特征, 后续的处理、反演技术是十分重要的。而对测试系统的声源响应和子波的分析更是后续数据分析处理的基础, 对于海底声学原位测试后处理尤其是声速提取和衰减的研究具有重要的意义。

本文利用声源换能器的等效电路, 分析了声源换能器输入终端输入脉冲与输出接收脉冲之间的

**收稿日期:** 2007-08-23; **修回日期:** 2007-11-14

**基金项目:** 国家“863”计划资助项目(2005AA615040); 国家海洋局青年基金资助项目(20073111); 海洋公益性行业科研专项经费项目(200805005)

**作者简介:** 李红星(1981-), 男, 山西省翼城县人, 博士研究生, 研究方向为海底声学探测。

**通讯作者:** 李红星, E-mail: redstar\_li@sina.com

关系。将系统的低频声源等效为一定半径的球形声源,确定了系统当频率为 15kHz 时在试验海域海水中声源换能器的角频率响应和输出回路品质因子。进一步计算了系统理论接收脉冲,结果表明输出接收脉冲并非输入脉冲的简单复制,而是加入换能器电子机械响应与周围介质响应。并与实测接收脉冲进行了比对,理论接收脉冲与实测脉冲在细节上达到了很好地匹配,说明本文确定的各响应参数很好地代表了本系统在海水中的声源响应。并且理论接收脉冲的时间起跳点和不失真脉冲的起始点是一致的,这是因为在海水中可认为是没有频散的。当在沉积物中时,这一情况将会变化。这将直接影响到对于实测脉冲的时间分析,因此本文的分析对于海底声学原位测试后处理尤其是声速的提取具有重要的意义。

## 2 多频海底声学原位测试系统有限带通声源分析

### 2.1 系统的基本工作原理

本系统用来测量沉积物-海水界面以下数米的纵波声速剖面,利用插入沉积物的水听器阵列接收的声波时间差和振幅差异来得到海底沉积物原位声速和声衰减数据<sup>[6]</sup>。由信号发生器产生电信号,经过功放后,由换能器转化为声波输出。声信号穿透沉积层而被埋置在沉积物中良好耦合的水听器阵列接收。

### 2.2 有限带通声源分析

图 1 是换能器声源的等价电路图<sup>[7]</sup>。 $M$  为互感系数,代表了输入终端和输出终端的电路和机械耦合程度。在输入终端,  $R_0$  和  $C_0$  分别代表了换能器的电路损耗和固定电容。在输出终端,  $L_m$ 、 $C_m$  和  $R_m$  的串联代表了换能器的机械响应。 $L_x$  和  $R_x$  代表了介质加入的影响。很明显,机械响应和介质加入的总体影响可以表示为  $L$ - $C$ - $R$  回路,感应系数为

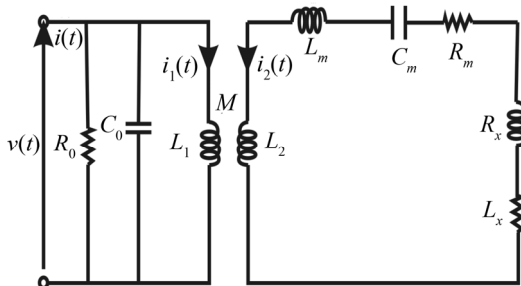


图 1 原位测试系统响应等价电路图  
Fig.1 The equivalent circuit of source transducer

$L=L_m+L_x$ , 电容为  $C=C_m$ 。理想情况下,加在换能器输入终端上的电压波形  $v(t)$  会产生与  $v(t)$  形态一致的放射性的声脉冲输出  $S_b(t)$ 。然而实际情况并非如此。由于机械响应和介质的加入,换能器只有有限的带通宽度,其影响就相当于一个转换因子: $H(j\omega)$ 。这样在频率域,输入脉冲和输出径向脉冲(被等效为球形声源)之间的关系<sup>[8]</sup>可以写为:

$$S_b(j\omega)=H(j\omega)S_m(j\omega) \quad (1)$$

$$H(j\omega)=\frac{H_0}{1+jQ(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega})} \quad (2)$$

大写字母表示短时傅立叶变换。 $H_0$  为一实数比例因子,  $\omega_0$  为角频率响应,  $Q$  为换能器输出回路的品质因子。当  $Q=0$  时,声源换能器具有无限带通宽度,这样在输入脉冲和输出脉冲之间将不会出现失真现象。但这种情况实际中是不会出现的<sup>[9]</sup>。此外  $H_0$ 、 $\omega_0$ 、 $Q$  的值由声源换能器的等效电路决定,因此在不同介质中的声源系统响应是不同的。

## 3 声源换能器输入和输出脉冲

多频海底声学原位测试系统换能器输入终端的输入脉冲波形为整数周期的正弦波,可以表示为式(3)的形式:

$$S_m(t)=S_0[u(t)-u(t-\tau_m)]\sin\omega_s t \quad (3)$$

其中,  $S_0$  为输入脉冲的振幅,  $\omega_s$  为正弦波的角频率,  $t$  为时间,  $u(\cdot)$  为海维赛德(Heaviside)单位阶梯函数,脉冲持续时间长度为:

$$\tau_m=\frac{2\pi m}{\omega_s} \quad (4)$$

其中,  $m$  为输入正弦波的整数周期数。图 2 是由式(3)计算所得的频率为 15kHz、四个周期的正弦脉冲。多频海底声学原位测试系统的信号发生器具有很低的内部阻抗,可以忽略不计,所以换能器输入终端的输入脉冲没有发生失真。输入脉冲的短时

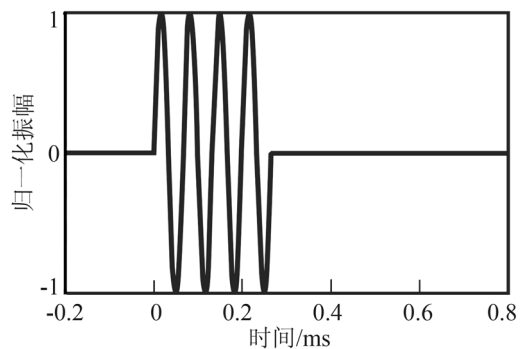


图 2 换能器输入终端输入脉冲  
Fig.2 The input pulse of the transducer

傅立叶变换为:

$$S_{in}(j\omega) = \frac{S_0 \omega_s}{\omega^2 - \omega_s^2} (e^{-j\omega\tau_m} - 1) \quad (5)$$

由式(1)、(2)、(5)得换能器输出脉冲的傅立叶变换为:

$$S_b(j\omega) = S_0 \omega_s \frac{(e^{-j\omega\tau_m} - 1)}{\omega^2 - \omega_s^2} H_0 \left[ 1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

由式(6)可知,对于实数 $Q$ ,输出脉冲明显不是输入正弦脉冲的“复制本”。可认为振荡声源在周围介质中产生了球对称的压力波。一般情况下,介质是耗散介质,压力波将在其中呈现出衰减和频散现象,这些都可以通过一个复数速度 $c$ 表示。球形声源产生的放射性的压力波的傅立叶变换应为:

$$P(j\omega) = \frac{j\omega\rho c_0^2 b^2 S_b}{c^2 r} \left( 1 + j\frac{\omega}{c} b \right)^{-1} \times \exp \left[ -j\frac{\omega}{c} (r-b) \right] \quad r \geq b \quad (7)$$

其中, $r$ 表示距离声源中心的径向距离, $\rho$ 为介质的容积密度, $c_0$ 为介质中声波速度的低频极限值, $b$ 为等效声源半径。

对式(7)取逆傅立叶变换,传播到介质中的压力波脉冲可以表示为:

$$p(t,r) = \frac{j\rho c_0^2 b^2}{2\pi r} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega S_b}{c^2} \left( 1 + j\frac{\omega b}{c} \right)^{-1} \exp \left\{ j\omega \left[ t - \frac{(r-b)}{c} \right] \right\} d\omega \quad (8)$$

## 4 海水中的输出脉冲

下面我们讨论系统在海水中的输出脉冲。由于频散和衰减在海水对于多频海底声学原位测量系统所使用的频率范围而言是可以忽略不计的。海水中的声波速度是不依赖于频率的实数 $c_w$ 。在这种情况下,式(8)可以简化为:

$$p(t,r) = \frac{j\rho_w b^2}{2\pi r} \times \int_{-\infty}^{\infty} \omega S_b \left( 1 + j\frac{\omega b}{c_w} \right)^{-1} \exp \left\{ j\omega \left[ t - \frac{(r-b)}{c_w} \right] \right\} d\omega \quad (9)$$

其中 $\rho_w$ 是海水的密度。式(9)的积分可以利用围道积分法计算。被积函数包含5个奇点并且没有其他奇点。由式(2)可知对称分布在第一、第二象限的两个奇点为:

$$\omega_{1,2} = \pm \omega_{0w} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_w^2} + \frac{j\omega_{0w}}{2Q_w}} \quad (10)$$

其中 $\omega_{0w}$ 、 $Q_w$ 分别为海水中的角频率响应和换能器输出回路的品质因子。由式(9)可知第三个奇点为:

$$\omega_3 = \frac{j c_w}{b} \quad (11)$$

由输入脉冲的傅立叶变换(式(5))可以知道其它两个奇点为: $\pm \omega_s$ 。

通过对上半平面进行积分并经过代数运算后,水中压力脉冲的解为:

$$p(t,r) = -p_0 \frac{b}{r} \left\{ \begin{aligned} &u(t-\tau)F(t-\tau) \\ &-u(t-\tau-\tau_m)F(t-\tau-\tau_m) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中(\*表示复数的共轭):

$$p_0 = \frac{\rho_w H_0 S_0 \omega_{0w} c_w}{Q \omega_s} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{r-b}{c_w} \quad (14)$$

$$F(x) = \omega_s^2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{2\omega_s^2 \exp(j\omega_s x)}{(\omega_1 + \omega_1^*)(\omega_1 - \omega_3)(\omega_1^2 - \omega_s^2)} \right\} + \omega_s^3 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\exp(j\omega_s x)}{(\omega_s - \omega_1)(\omega_s + \omega_1^*)(\omega_s - \omega_3)} \right\} - \frac{|\omega_s \omega_3|^2 \exp(-|\omega_3| x)}{|\omega_3 - \omega_1|^2 (|\omega_3|^2 + \omega_s^2)} \quad (15)$$

## 5 海水中的系统声源响应与子波分析

很明显,式(12)表示的水中接收到的压力脉冲满足了波传播的一般规律:在 $t=\tau$ 之前没有波到达。此外式(12)并没有表示出正弦声脉冲群,说明了输出脉冲并非输入正弦脉冲的简单复制品。

图3(a)为多频海底声学原位测试系统在某地海水中所接收到的实际波形。其中水听器距离换能器中心的距离为1.317m。海水的密度为 $1024\text{kg/m}^3$ ,输入脉冲为15kHz的4个周期的正弦波。下面我们利用上述方法计算理论波形,根据式(12)~(15),要得到系统在水中所接收的波形的理论值 $p(t)/p_0$ ,需要确定 $b$ 、 $c_w$ 、 $\omega_{0w}$ 、 $Q_w$ 四个参数,其他参数与实测参数一致。也即确定了这四个参数就确定了本系统在海水中的声源响应,就可以得到本系统在水中所接收声波的理论波形。多频海底声学原位测试系统的15kHz频段所用换能器可以等效为半径为55.5mm的球形声源,也即 $b=55.5\text{mm}$ 。通过对测量站位的海水水文参数(温度、盐度、深度、水压)并利用威尔逊经验公式计算可以得到海水的声速值,经计算测量站位海水的声速值为1519.2m/s。

在上述参数确定的情况下,选择合适的 $\omega_{0w}$ 、

$Q_w$ ,使得理论压力脉冲与实际所测量的压力脉冲达到最佳的一致性。在 15kHz 情况下,取  $\omega_{0w}=12.5\text{kHz}$ 、 $Q_w=4$ 。在此参数下的接收的理论波形如图 3(b)所示。

对比图 2(a)和图 3(b)可以发现输入脉冲与理论接收到的输出脉冲之间几处明显的差别:由于声源换能器的回响,接收到的脉冲具有延长的延续时间;输入脉冲振幅一致,而接收到的脉冲振幅不一致;接收脉冲的零相交点比输入脉冲更加密集些,说明脉冲发生了相移。所有这些都是由于声源换能器的响应性质引起的。对比图 3(a)和图 3(b),理论脉冲与实测脉冲的到达时也基本一致,细微的差别是由于在换能器与水听器之间实际的声传播路径不是精确的 1.317m。理论接收脉冲与实测脉冲之间的高度一致性表明  $Q_w=4$ 、 $\omega_{0w}/2\pi=12.5\text{kHz}$  的  $L-C-R$  回路精确代表了本系统在海水中的声源响应。此外需要说明的是对于多频海底原位声学测试系统,其声源脉冲可以有多种频率、多个周期选择,因此对于每个频率不同周期数的发射声源,其系统声源响应也是不同的。同时声源响应也随介质的不同而不同。对理论接收波形进行分析,可以发现在海水中声波的初始起跳点和无失真波形的起始位置是一致的。这是因为在海水中声波基本不存在频散,水声速度为实数所致。因此对于多频海底声学原位测试系统在实际测量过程中对于水听器与声源距离的精确定位可以通过确定海水中确定声波的

起跳点来获取。

## 6 结 论

利用声源换能器的等效电路,确定声源换能器的角频率响应和输出回路品质因子,进行理论接收波形模拟分析,可以看出由于系统声源与声波传播介质对系统接收声波的影响,接收声波会发生相移,且起跳时间与声波的频散有关。而这两者会影响声波速度与衰减的计算。在海水中声波基本不存在频散,声波的初始起跳点和无失真波形的起始位置一致,因此实际测量过程中对于水听器与声源距离的精确定位可以通过确定海水中确定声波的起跳点来获取。但在沉积物中存在频散,初始起跳点和无失真波形的起始位置将不再一致,因此将不能以声波起始时间作为速度计算的时间标示。

本文受到国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JT0802)资助和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学,北京)开放课题项目(GDL0802)资助,特此感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 周建平,吕文正,陶春辉. 海底柱状沉积物超声测量[J]. 东海海洋, 2003, 21(4): 26-33.  
ZHOU Jianping, LU Wenzheng, TAO Chunhui. Ultrasonic measurement of seafloor sediment cores[J]. Donghai Marine Science, 2003, 21(4): 26-33.
- [2] Barbagelata A, Richardson M D, Miaschi B, ET AL. An in situ sediment acoustic measurement system[A]. in: Shear Waves In Marine Sediments[C]. Net herlands: Kluwer Academic Publishers, 1991, 305-312.
- [3] Buckingham M J, Richardson M D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 429-453.
- [4] FU Shungsheng, TAO Chunhui, Manika Prasad, et al. Acoustic properties of coral sands, Waikiki, Hawaii[J]. Acoust Soc Am, 2004, 115(5): 2013-2020.
- [5] 陶春辉,金肖兵,金翔龙,等. 多频海底声学原位测试系统研制和试用[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 1-5.  
TAO Chunhui, JIN Xiaobing, JIN Xianglong, et al. The producing and probation of multi-frequency in situ sediment seabed Acoustic measurement system[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(2): 1-5.
- [6] TAO Chunhui, JIN Xianglong, R H Wilkens, et al. Multi-frequency in situ sediment geoaoustic lance[M]. Katlenburg-Lindau: European Geosciences Society, EGU, 2004.
- [7] Michael J, Buckingham, Michael D. Richardson. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 429-453.
- [8] Burdic W S. Underwater acoustic system analysis, Second edition [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [9] 唐秋华,吴永亭,等. 超短基线声学定位系统的校准技术研究[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 281-287.  
TANG Qiuhua, WU Yongting, et al. Calibration of ultra-short baseline acoustic positioning system[J]. Acoustics Technology, 2006, 25(4): 281-287.

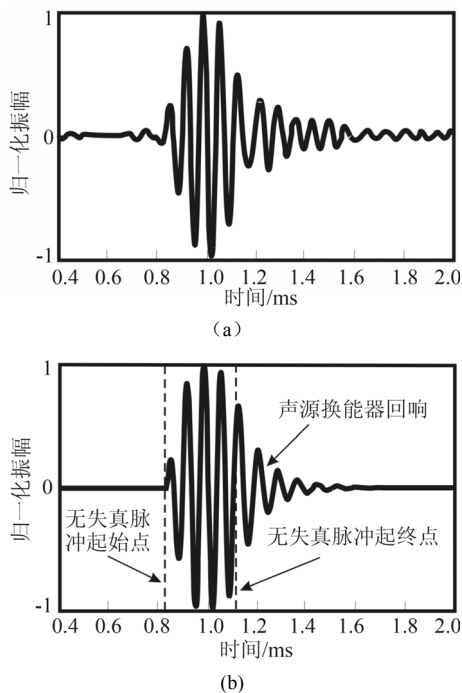


图 3 理论接收波形与实测接收波形对比

(a) 实测接收脉冲; (b) 理论接收脉冲

Fig.3 The contrast of theoretical pulse and practical pulse  
(a) Practical pulse; (b) Theoretical pulse