

海底沉积物声学测量中频谱分析方法应用研究

邹大鹏¹, 吴百海¹, 卢博², 曾洁莹¹, 陈飞燕¹

(1. 广东工业大学机电工程学院, 广州 510090; 2. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510301)

摘要: 海底沉积物声学测量数据中包含着的频谱特征和信息, 是区分和判别沉积物类型的重要依据。应用频谱分析方法, 研究海底沉积物声学测量的频谱特征, 分析声波探测仪器的性能, 判断沉积物测量异常数据, 研究温度变化下频漂现象, 探寻到沉积物内在特征的一些规律性现象。并通过对两类沉积物的频谱分析结果比较, 进一步论证区分沉积物的可行性。实测结果表明, 频谱分析能够为声波探测仪器的性能测试及海底沉积物声学物理性质研究提供技术手段和分析方法。

关键词: 海底沉积物; 频谱分析; 声学; 测量

中图分类号: P733.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0001-05

Research on application of spectrum analysis in acoustic measurement of seabed sediments

ZOU Da-peng¹, WU Bai-hai¹, LU Bo², ZENG Jie-ying¹, CHEN Fei-yan¹

(1. Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090; 2. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: Spectrum character in acoustic measurement datum of seabed sediments is a significant criterion for distinguishing and classifying seabed sediment types. The acoustic measuring spectrum characteristics of seabed sediments are discussed including the analysis of acoustic instrument performance, the judgment of unwanted data, the frequency shift driven by temperature variation, and the regularity of characteristics of seabed sediments are discovered. The feasibility of distinguishing sediment types is demonstrated by comparing the spectrum analysis of two kinds of sediments. Measurement results prove that the spectrum analysis could provide a technical means and analytic method for the performance test of acoustic instrument and the study of acoustic-physical attributes of seabed sediments.

Key words: seabed sediments; spectrum analyses; acoustics; measurement

1 引言

海底沉积物作为海底矿产资源的载体和水声传播的重要边界, 是海洋声学研究的热点和重点之一。目前, 海底沉积物的声学物理研究仍以采集样品在实验室里进行声学测量为主, 获取声波图, 通过读取声波图上的初至波起振点、首波波峰、波形形状等, 计算和研究沉积物的声速和声衰减等, 以此分析、区别、反演沉积物的物理力学性质。

然而, 在海底沉积物声学测量数据里还包含着重要的频谱信息, 对其研究却开展得并不广泛^[1]。频谱分析技术作为数据处理一种重要的方法, 是将时域中的声波图进行频域变换, 得出频谱图, 分析

其频率特征, 从而得到时域分析中无法细分的特征, 获取沉积物本质的信息。在国外, 辨别和分类沉积物的研究中运用了频谱分析技术, 如 Stevenson^[2]、Schock^[3]等。在我国, 卢博^[4]曾经利用频谱分析技术判断沉积物的均匀性, 李光泉等^[5]研究了多孔介质, 得出水位升高时其声波频谱强度发生较大衰减的结论。

本文将频谱分析方法推广, 应用于海底沉积物声学测量研究中诸多方面: 分析声波探测仪器的性能; 判断沉积物测量中的异常数据; 研究温度变化时的频移; 并通过对几种沉积物的频谱分析结果比较, 进一步论证区分沉积物的可行性。

2 频谱分析方法的理论

声波信号 $x(t)$ 通常以周期性成份为主, 具有连续性和有限性, 满足狄利克莱(Dirichlet)条件, 可以展开为傅里叶级数。基于计算机处理测量数据, 采用的都是离散傅里叶变换, 其变换过程包括时域采

收稿日期: 2008-01-09; 修回日期: 2008-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40476020、40676040), 中国科学院边缘海地质重点实验室资助项目(MSG108-17)

作者简介: 邹大鹏(1977-), 男, 黑龙江德都人, 博士, 研究方向为海洋工程、机电液工程。

通讯作者: 邹大鹏, E-mail: anthonyzou@126.com

样、时域截断和频域采样,结果表达式如下:

以间隔时间为 T_s 的脉冲序列 $\delta(t-nT_s)$ 进行采样得到时域采样信号:

$$x_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)\delta(t-nT_s) \quad (1)$$

以包含样本 N 点的矩形函数 $u(t)$ 截断采样信号得到时域截断信号:

$$x_s(t)u(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s)\delta(t-nT_s) \quad (2)$$

傅里叶变换后得到一个周期内的频域采样信号为:

$$X(kf_0) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s)e^{-j2\pi kn/N}, k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

通过离散傅里叶变换,将 N 个时域采样点与 N 个频域采样点联系起来。对连续信号进行合理的截取,仅仅涉及到处理区间($0 \leq n \leq N-1$; $0 \leq k \leq N-1$)的 N 个 $x(n)$ 和 N 个 $x(k)$ 值,使得频谱分析方法的应用变得方便可行。

3 声波仪的性能测试

声波仪是海底沉积物声学参数测量的关键设备,声学换能器内部元件老化以及长期接触含有盐分的海底沉积物发生腐蚀损坏等,降低了测量精度甚至发生较大的误差。因此,每次测量前都需要测试及校正。声速校正通常采用测量标准样块声速进行判别,但是采用主频特征的测量方法鲜有报道。Hamilton^[6]、Stoll^[7]等许多研究者发现海底沉积物的声衰减与声波探测频率存在明显的相关关系,陶春辉等^[8]研究表明在20kHz~100kHz频率段测量存在频散现象,因此测量沉积物声学参数时,必须确定声学测量仪器的主频。

基于频谱分析技术,采用以下两个步骤对声学换能器进行检测:

(1)将发射和接收换能器耦合对接在一起,测出声波图,进行频谱分析,得出其主频和频宽,与参考主频和频宽进行比较,判断主频性能;

(2)将发射和接收换能器在空气中相距0.05m,测出声波图,进行频谱分析,得出其主频和频宽以及幅值,与参考主频和频宽的幅值进行比较,判断主频幅值性能。

对湘潭天鸿电子研究所研制的DB4型声波仪测量数据进行了频谱分析如下:按步骤(1)进行测量,2007年6月12日测得的数据主要能量集中在35.156kHz主频(图1中实线)、34.307kHz~37.791kHz的-3dB频带内,频带与参考频带(2006年8月18日测量)基本相同,判断频率特征基本良好。

按步骤(2)进行测量,幅值出现差异(如图2),2007年6月12日测得的主频能量比2006年8月18日的减少很多。结合对接测试时幅值降低现象,判断有必要对声波仪进行检修,经检修发现是声学换能器接线存在松弛现象。

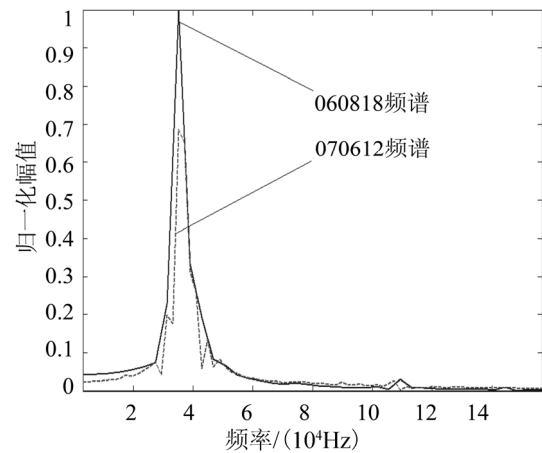


图1 声学换能器对接性能测试频谱

Fig.1 Spectrum of acoustic beacon with receiver and emitter together

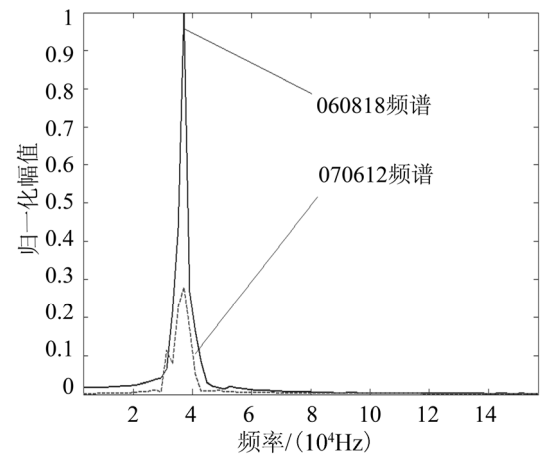


图2 声学换能器间隔0.05m性能测试频谱

Fig.2 Spectrum of acoustic beacon with receiver and emitter 0.05m apart

4 温度变化时频漂现象研究

海底浅层沉积物温度变化范围从 -2°C ~ 30°C 不等,虽然温度不高、变化范围不大,但会引起海底沉积物结构发生改变,在不同温度时表现出不同的声学性质,因此研究温度对沉积物声学特性的影响具有重要的意义。

沉积物温度变化时声学测量实验的结构见图3。绝大多数海底沉积物样品的声衰减量都随温度升高而增大,且出现了温度导致的频漂现象,即随着温度的变化主频发生漂移。图4为南海海域采集的原状样测量温度变化过程中主频变化趋势,低温时主频是35.156kHz,随着温度的升高,主频开始

衰减, 8℃以前衰减缓慢, 其后迅速衰减, 12℃时 37.109kHz 频率突出并且变为新的主频, 此主频也随着温度衰减。海底沉积物是海水和固体颗粒的混合物, 温度升高引起海水黏度有所减小, 吸收损失降低, 但是热运动引起的散射增强, 尤其在某个温度(图示测量样品是 8℃), 散射引起的衰减超过黏度降低减少的吸收损失, 此外, 沉积物与换能器接触面耦合损失增大, 从而出现了衰减下降增快。而对于频漂现象, 需要从微观结构运动机理入手, 研究热运动引起沉积物结构振动的模态变化。

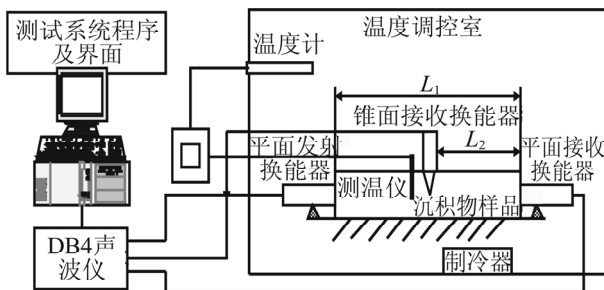


图 3 沉积物温度变化下声学测量实验结构图
Fig.3 Experimental layout for acoustic measurement of sediments with temperature variation

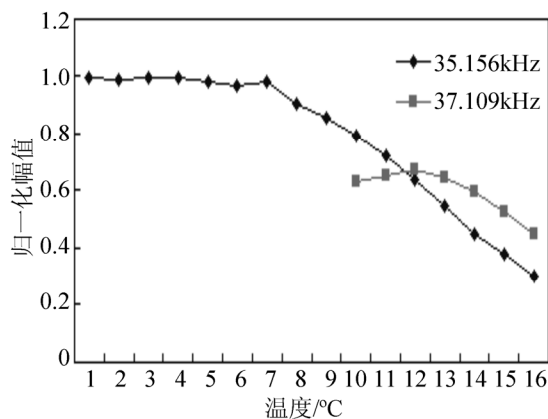


图 4 温度变化下海底沉积物频谱图
Fig.4 Spectrum of seabed sediment at different temperatures

5 沉积物声学测量异常数据的判断

沉积物声学测量过程中, 由于环境因素、耦合状态等变化时会产生测量数据的较大变化, 这种变化因素作用于被测沉积物内部, 无法直观地检测到, 频谱分析方法为此提供了一种科学判断依据。

声衰减系数(测试原理见图 3)是沉积物具有的特有参数, 其随温度变化而变化^[9], 图 5 为温度连续变化过程中沉积物声衰减系数的变化修正前后的对比图, 其中虚线星点是测量得到的数据结果, 显得杂乱无章, 无法确定实验结果的准确性和规律性。对测量的声波数据进行频谱分析, 结果如图 6,

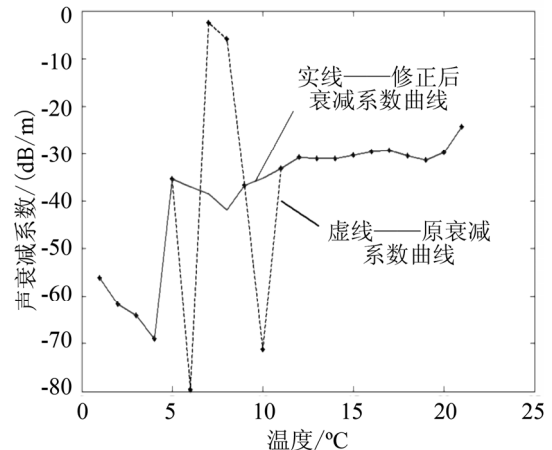


图 5 温度变化下声衰减系数实测图
Fig.5 Attenuation coefficients at different temperatures

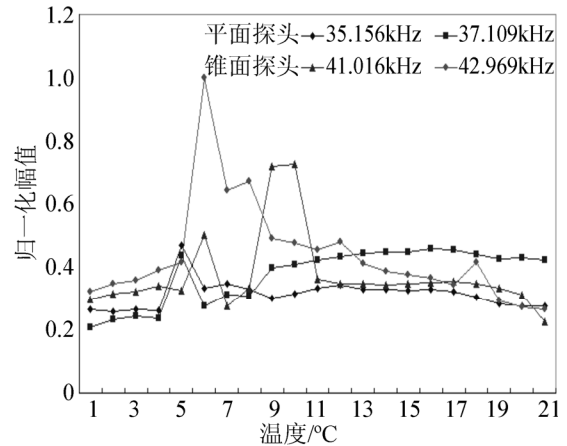


图 6 声衰减系数测量频谱分析图
Fig.6 Spectrum analysis of attenuation coefficient measurements at different temperatures

其中 35.156kHz 和 37.109kHz 为平面换能器的两个主频率, 41.016kHz 和 42.969kHz 为锥面换能器的两个主频率。从图 6 中可以看出 5℃~10℃一段发生了很大的变化, 存在异常数据。经检查发现 5℃、6℃存在扰动变化, 9℃、10℃时仪器的衰减系数发生过调整, 7℃、8℃数据属于计算错误。修正 6℃时数据, 改正 7℃、8℃、9℃、10℃的数据(见图 5 实线), 可以得出沉积物在 5℃发生了扰动, 衰减系数分为两段, 前一段衰减系数呈下降趋势, 后一段的衰减系数先下降后上升; 两者的梯度不同, 下降梯度变化较为剧烈, 上升梯度缓和。这种扰动情况在海底沉积物采样、运输、测试等过程中都会存在, 既是影响沉积物测量精度的一个重要因素, 也是不可避免的一个随机因素, 频谱分析可以提供一种检测手段。

6 沉积物类型的区分

利用声学手段判别沉积物是海洋声学两大问题中的反演问题^[10], 诸多研究者(如 Hamilton^[6]、

Pace^[11]、卢博^[12,13]等)通过实验和理论分析找寻声速或者声衰减与沉积物物理性质的关系,以此判别及区分沉积物。对于物质成分不同、物理性质各异的沉积物,其存在固有频谱特征,当声波产生的机械振动通过沉积物时,引起沉积物对声波选择性的滤波,因此必然产生独特的频谱特征。沉积物在温度变化时发生的频移现象就是一个例证。

制备原状样品与人工样品^[12],原状样品是南海海域采集的浅表层沉积物分装样品,人工样品是原状样的重塑样品。人工样品和原状样品相比,存在着高频特征区(如图7所示),在温度升高过程中,原状样 35.156kHz 主频幅值起初大于 37.109kHz,后来以 37.109kHz 为主,而人工样 37.109kHz 一直占主要频率,又出现了 39.105kHz 主频。图8为粉砂质黏土和砂两类沉积物的频谱特征,砂存在高低两个频谱特征区,粉砂质黏土的高频特征不明显。在低频区,粉砂质黏土的频带宽且存在两个主频,砂的频带窄而且只有一个主频。两类沉积物相比,砂颗粒大,颗粒尺寸分布范围宽,粘性小于粉砂质

黏土,声波绕射和散射大,能量损失大,高频振动突出。

7 结论与探讨

海底沉积物基于不同的沉积历史和外部环境条件产生了复杂的状态特征^[14](温度、压力变化等),而且在颗粒形态上主要是以黏土、粉砂和砂存在,混合比例不同而形成了海底沉积物类型的多样性,因此对海底沉积物进行分类,以声速和声衰减量为参量,增加幅频特征,能够更为准确、更为有效地区分和辨别沉积物类型。以上研究表明,频谱分析技术可以应用在海底沉积物声学测量的全过程中:检验声学测量仪器性能、判断测量数据的准确性、分析温度频漂特性和区分沉积物类型等。

频谱分析中发现的许多规律性现象需要从物质微观结构上开展理论研究去说明并证明,这一点还有待于深入的研究^[15]。压力变化对沉积物频谱的影响研究也是一个有待于展开的方面。

参 考 文 献

- [1] 王润田. 海底声学探测与底质识别技术的新进展[J]. 声学技术, 2002, 21(1): 96-98.
WANG Runtian. Progress in detecting the geological formations and sediment properties by sound[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(1): 96-98.
- [2] Stevenson I R, McCann C, Runciman P B. An attenuation-based sediment classification technique using Chirp sub-bottom profiler data and laboratory acoustic analysis[J]. Marine Geophysical Researches, 2002, 23(4): 277-298.
- [3] Steven G. Schock. Remote estimates of physical and acoustic sediment properties in the South China Sea using chirp sonar data and the biot model[J]. Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1218-1230.
- [4] 卢博. 频谱分析技术在沉积声学研究中的应用[J]. 海洋技术, 1993, 12(2): 13-18.
LU Bo. Application of frequency spectrum analysis technique to the sediment acoustic research[J]. Ocean Technology, 1993, 12(2): 13-18.
- [5] 李光泉, 李伟东, 叶林. 多孔介质中水位变化对波形、波速和波谱影响的实验研究[J]. 地震研究, 2001, 24(1): 56-72.
LI Guangquan, LI Weidong, YE Lin. A laboratory study of influence of variation in water level on velocity, waveform and spectrum in porous medium[J]. Journal of Seismological Research, 2001, 24(1): 56-72.
- [6] Hamilton E L. Compressional-wave attenuation in marine sediments[J]. Geophysics, 1972, 37(4): 620-646.
- [7] Stoll R D, Bryan G M. Wave attenuation in saturated sediments[J]. The Journal of the Acoustic Society of America, 1970, 47(5): 1440-1447.
- [8] 陶春辉, BAFFI S, WILKENS R H. Biot 反演在夏威夷钙质沉积物原位测量声速和衰减中的应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(3): 80-84
TAO Chunhui, BAFFI S, WILKENS R H, et al. Biot inversion for in-situ velocity and attenuation data, A case study in Hawaii, USA[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2005, 27(3): 80-84.

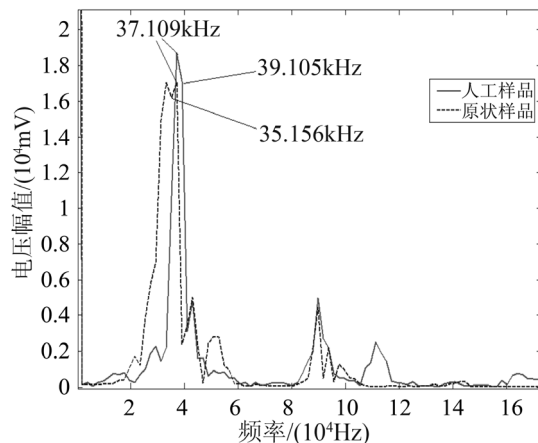


图7 13℃时人工样品与原状样品的频谱特征
Fig.7 Spectrum characteristics of artificial and original samples at 13℃

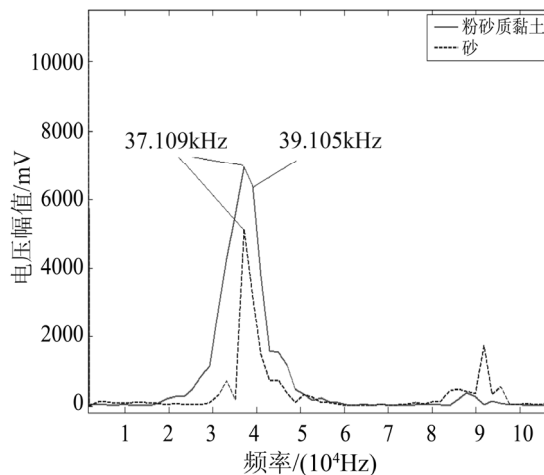


图8 粉砂质黏土和砂的频谱特征
Fig.8 Spectrum characteristics of sand and silty clay

- [9] Rafael Carbó, Adriana C. Molero. The effect of temperature on sound wave absorption in a sediment layer[J]. The Journal of the Acoustic Society, 2000, **108**(4): 1545-1547.
- [10] 张仁和. 中国海洋声学研究进展[J]. 物理, 1994, **23**(9): 513-518.
ZHANG Renhe. Development of acoustic oceanographic research in China[J]. Physics, 1994, **23**(9): 513-518.
- [11] Pace N G, Gao H. Swathe. Seabed classification[J]. IEEE J. Ocean. Eng., 1988, **13**(13): 83-90.
- [12] 卢博, 黄韶健, 李赶先, 等. 在不同沉积物类型中的声速测量实验研究[J]. 海洋技术, 2004, **23**(1): 66-70.
LU Bo, HUANG Shaojian, LI Ganxian, et al. Experiment research on sound velocity measurement in different types of sediments[J]. Ocean Technology, 2004, **23**(1): 66-70.
- [13] 卢博, 李赶先, 黄韶健. 用声学三参数判别海底沉积物性质[J]. 声学技术, 2007, **26**(1): 6-14.
LU Bo, LI Ganxian, HUANG Shaojian. Discrimination of seafloor sediment properties from sound velocity waveform and amplitude[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(1): 6-14.
- [14] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物声速实验室测量结果校正研究[J]. 热带海洋学报, 2008, **27**(1): 77-81.
ZOU Dapeng, WU Baihai, LU Bo. A method on correction of acoustic velocity of seafloor sediments with measurement in laboratory environment[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, **27**(1): 77-81.
- [15] 邹大鹏, 吴百海, 卢博, 等. 频谱分析在海底沉积物声学测量中的应用[J]. 声学技术, 2007, **26**(5, Pt.2): 222-224.
ZOU Dapeng, WU Baihai, LU Bo, et al. Application of spectrum analyses in acoustics measurement of seabed sediments[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(5, Pt.2): 222-224.