

混浊海水声吸收与温度、盐度、压强关系

刘永伟, 李琪, 商德江, 肖妍

(哈尔滨工程大学水声技术实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 混浊海水的声吸收和声散射特性对水声探测设备工作性能的影响较大。通过经验公式仿真分析了温度、盐度和压强对低频段、低悬浮泥沙颗粒浓度混浊海水声吸收的影响。结果表明: 温度和盐度对混浊海水声吸收的影响较大, 而压强对混浊海水声吸收的影响可以忽略。构建并研制了一套混浊海水声吸收特性测量系统, 实验研究了温度对混浊海水声吸收的影响, 声吸收系数随温度的变化规律与仿真结果吻合较好。此研究成果可对混浊海水中的声传播建模、声纳探测系统设计及声纳性能的评估等提供一定参考。

关键词: 混浊海水; 声吸收; 温度; 盐度; 压强

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-02-0156-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.008

The correlation of sound absorption in turbid seawater with temperature, salinity and pressure

LIU Yong-wei¹, LI Qi, SHANG De-jiang, XIAO Yan

(Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Haerbin 150001, China)

Abstract: The properties of sound absorption and sound scattering in turbid seawater have significant effect on the working performance of underwater acoustic detection equipment. The effects of temperature, salinity and pressure on sound absorption in turbid seawater for low frequency and low suspended sediment particle concentration are analyzed by empirical formula simulation. The results demonstrate that the temperature and salinity have much significant effect on sound absorption in turbid seawater the effect of pressure may be neglected. The system for measuring sound absorption in turbid seawater has been built up. The effect of temperature on sound absorption in turbid seawater is investigated, and the law that the coefficient of sound absorption changes with temperature coincides well with that from simulation. It is concluded that the results are useful for modeling sound propagation, designing sonar system and estimating sonar performance in turbid seawater.

Key words: turbid seawater; sound absorption; temperature; salinity; pressure

0 引言

由于水土流失及江河携带大量泥沙注入等原因, 近岸海域的海水中往往悬浮有大量的泥沙颗粒, 使得海水透明度很低, 这样的海水也称为混浊海水, 例如亚马逊河南大西洋海域、长江口以东海域、波斯湾等。海洋界曾对此类海水中悬浮泥沙颗粒的沉积和输运过程开展过研究, 而对其声吸收和声散射特性的研究相对较少。国内外声学界开展过混浊海水声吸收特性的研究(高频下悬浮颗粒物引起的声衰减^[1-4]、悬浮颗粒物海水声吸收的规律^[5]、声学混浊判据^[6]等), 而针对低频段、低悬浮泥沙颗

粒浓度混浊海水的声吸收特性实验研究相对较少。由于混浊水海域一般地处浅海, 其声学环境是复杂多变的。混浊海水的温度不仅随着季节变化, 也随着地域不同而变化。盐度的变化则更剧烈: 在江河入海口, 海水盐度为 0‰; 而离岸几百米处, 盐度可达 35‰。纯净海水(不含泥沙颗粒)的声吸收特性是随着温度、盐度和压强(由水深引起的海水压力变化)的变化而变化的, 并且可通过一系列公式进行仿真计算。纯水的声速、密度、粘滞率是随着温度、盐度、压强变化的, 海水中悬浮有泥沙颗粒(浓度一般小于 1 g/L), 并不影响海水的声速、密度、粘滞率等。所以, 混浊海水的声速、密度、粘滞率依旧是随着温度、盐度和压强的变化而变化的。因此, 如果能选取合适的声吸收计算公式就可以仿真分析温度、盐度和压强对低频段(60 kHz 以下)、低悬浮泥沙浓度(小于 1 g/L)混浊海水声吸收特性的影响。这对研究混浊水海域的声传播特性、沉底及悬浮目标

收稿日期: 2011-04-11; 修回日期: 2011-08-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (HEUCF100506)

作者简介: 刘永伟(1981—), 男, 山东临朐人, 讲师, 博士, 研究方向为水介质参数的测量等。

通讯作者: 刘永伟, E-mail: liuyongwei3000@hrbeu.edu.cn

探测、泥沙掩埋目标的回波特征等具有重要意义。

1 声吸收基本原理

当声波在海洋中传播时,如果没有海面、海底的影响,则海水引起的声波衰减系数等于海水声吸收系数和声散射系数之和。海水的声散射系数(数量级为 10^{-5})一般远小于其声吸收系数(数量级为 10^{-3}),并且可以忽略。混浊海水的声吸收系数等于纯净海水的声吸收系数加上悬浮泥沙颗粒引起的粘滞和散射声吸收系数^[1]。用公式可表示为

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_v + \alpha_s \quad (1)$$

式(1)中: α_w 为纯净海水的声吸收系数; α_v 为悬浮泥沙颗粒的粘滞声吸收系数; α_s 为悬浮泥沙颗粒的散射声吸收系数。

1.1 纯净海水声吸收

纯净海水的声吸收系数等于纯水的声吸收系数加上海水中电解质的弛豫过程而引起的声吸收系数。电解质的弛豫过程主要是硫酸镁(MgSO_4)和硼酸($\text{B}(\text{OH})_3$)的弛豫过程,其它电解质的弛豫过程对声吸收的贡献可以忽略。计算海水声吸收系数的公式很多,但是理论计算值跟实验数据较为符合的是 Francois 和 Garrison 的声吸收计算公式:

$$\alpha_w = 10^{-3} \left[\frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \right] \quad (2)$$

式(2)中: f 是频率; $f_i(i=1, 2, 3)$ 表示电解质的弛豫频率; $A_i(i=1, 2, 3)$ 表示温度和盐度对声吸收系数的影响; $P_i(i=1, 2, 3)$ 表示压强对声吸收系数的影响;角标($i=1, 2, 3$)分别表示硼酸的声吸收系数、硫酸镁的声吸收系数和纯水的声吸收系数^[1]。

1.2 悬浮泥沙颗粒声吸收

混浊海水中因悬浮有大量的泥沙颗粒,产生了另外两种不同于纯净海水的声吸收机理:粘滞声吸收和散射声吸收。因泥沙颗粒的质量大于水分子的质量,使得悬浮颗粒的惯性远高于周围水分子的惯性。当声波传播时,悬浮泥沙颗粒与水分子的运动速度不同步,两者间产生相对运动,导致在泥沙颗粒表面产生具有速度梯度的边界层。因粘滞性的存在,这种速度梯度将使声能转变为热能而引起声吸收,称其为粘滞声吸收。同时,水中悬浮的泥沙颗粒会向各个方向散射声波,这也产生声吸收,称其为散射声吸收^[5]。

1.2.1 粘滞声吸收

泥沙颗粒的粘滞声吸收公式为

$$\alpha_v = (10 \log e^2) \left(\frac{\varepsilon k (\sigma - 1)^2}{2} \left[\frac{\tau}{\tau^2 + (\sigma + \delta)^2} \right] \right) \quad (3)$$

式中: $\delta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{2\beta a} \right]$; $\tau = \frac{9}{4\beta a} \left[1 + \frac{1}{\beta a} \right]$; ε 是粒子的体积分数; $k = \omega/c$ 是波数; c 是声速; $\sigma = \rho'/\rho$ 是泥沙颗粒密度与水密度之比; a 是泥沙颗粒的半径; $\beta = \sqrt{\omega/2\nu}$ 是粘滞剪切波透入深度的倒数; ω 是圆频率; ν 是液体的动粘滞率^[1]。

1.2.2 散射声吸收

泥沙颗粒的散射声吸收公式为

$$\alpha_s = (10 \log e^2) \frac{\varepsilon K_\alpha x^4}{a(1 + \xi x^2 + \frac{4}{3} K_\alpha x^4)} \quad (4)$$

式中: $K_\alpha = \frac{1}{6} \left(\gamma_k^2 + \frac{\gamma_\rho^2}{3} \right)$; $x = ka$; ξ 是一个可调整的

常数($\xi \geq 1$); $\gamma_k = (k' - k)/k$; $\gamma_\rho = 3(\rho' - \rho)/(2\rho' + \rho)$ 是密度之比; k 是液体的体积压缩率; k' 是泥沙颗粒的体积压缩率; a 是泥沙颗粒的半径^[1]。

1.3 温度、盐度、压强对声吸收影响

式(2)清楚地揭示了温度、盐度和压强对纯净海水声吸收的影响。式(3)、(4)虽然没有明确揭示温度、盐度和压强对混浊海水声吸收的影响,但是式(3)、(4)中的声速、密度和粘滞率是随着温度、盐度和压强的变化而变化的。因此,选择合适的声速、密度和粘滞率公式就能揭示混浊海水声吸收随温度、盐度和压强之间的变化规律。

1.3.1 粘滞率

海水粘滞率随温度、盐度和压强的变化关系为

$$\eta(S, t, p) = 0.1 \left[\sum_i p^i \sum_j Q_{ij} t^j + S \sum_k R_k t^k \right] \quad (5)$$

式中, S 为盐度; t 为温度; p 为压强。定义 ν 为液体的动粘滞率,即 $\nu = \eta/\rho$

1.3.2 声速

在考虑海水的粘滞性之后,海水声速为

$$c = C_w(t, p) + A(t, p)S + B(t, p)S^{3/2} + D(p)S^2 \quad (6)$$

式中:

$$C_w(t, p) = \sum_i p^i \sum_j C_{ij} t^j; \quad A(t, p) = \sum_i p^i \sum_j A_{ij} t^j$$

$$B(t, p) = \sum_i p^i \sum_j B_{ij} t^j; \quad D(p) = \sum_i D_i p^i$$

1.3.3 密度

海水密度公式如下:

$$\rho(S, t, p) = \frac{\rho(S, t, 0)}{1 - p/K(S, t, p)} \quad (7)$$

式(7)中, $K(S, t, p)$ 为割线体积弹性模量。

在 $p=0$ 处,

$$\rho(S, t, 0) = \rho_w + S \sum_i b_i t^i + S^{3/2} \sum_j c_j t^j + d_0 S^2 \quad (8)$$

其中:

$$\rho_w = \sum_i a_i t^i; \quad K(S, t, p) = K(S, t, 0) + Ap + Bp^2;$$

$$K(S, t, 0) = K_w + S \sum_i f_i t^i + S^{3/2} \sum_j g_j t^j;$$

$$A = A_w + S \sum_i i_i t^i + j_0 S^{3/2}; \quad B = B_w + S \sum_i m_i t^i;$$

$$K_w = \sum_i e_i t^i; \quad A_w = \sum_i h_i t^i; \quad B_w = \sum_i k_i t^i;$$

$Q_{ij}, R_k, C_{ij}, A_{ij}, B_{ij}, D_i, a_i, b_i, c_i, d_i$ 及其它各值请参考文献[1], 篇幅所限, 不再赘述。

2 仿真分析

在海水中悬浮的泥沙颗粒形状是极其不规则的, 这使得几乎不可能直接用式(3)、(4)去计算悬浮泥沙颗粒的粘滞声吸收系数和散射声吸收系数, 因为(3)、(4)两式要求悬浮的泥沙颗粒必须为球形。在进行粒度分析时, 通常采用球体作为标准物质, 即把利用各种分析方法得到的泥沙颗粒的粒径用与球体等值的粒径来表示^[7]。因此, 如果能利用粒度分析方法获得混浊海水中悬浮泥沙颗粒的粒度信息, 则就可用式(3)、(4)计算悬浮泥沙颗粒的粘滞声吸收系数和散射声吸收系数。研究^[8]表明, 采用悬浮泥沙颗粒的中值粒径方法计算的混浊海水声吸收系数与实验测量值之间吻合较好。

图 1 为长江口外海域某站位悬浮泥沙颗粒的有效密度随深度的变化规律。在计算混浊海水的粘滞和散射声吸收系数时, 选取泥沙颗粒的密度为 $1.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。根据长江口外海域的水温、盐度分布、悬浮颗粒的浓度分布^[9]并结合海试数据分析, 将悬浮泥沙颗粒的中值粒径取为 5.48 \mu m 。在仿真时选取温度、盐度和压强范围为 $15^\circ\text{C} \leq t \leq 30^\circ\text{C}$ 、

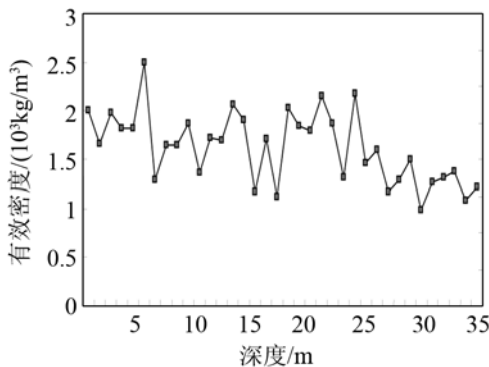


图 1 悬浮颗粒的有效密度随深度的变化
Fig.1 The effective density of suspended particles changes with the depth

$20\% \leq S \leq 35\%$ 、 $1 \text{ atm} \leq p \leq 10 \text{ atm}$ 。假定悬浮泥沙颗粒的浓度为 300 mg/L , 声波频率为 50 kHz , 图 2~6 分别给出了不同温度、盐度、压强下的声吸收系数仿真结果。

从图 2 中可看出, 当盐度为 35% 时, 温度从 15°C 变化到 30°C 时, 声吸收系数约减少 25% ; 而当温度为 30°C , 盐度从 20% 变化到 35% 时, 声吸收系数约增加 29% 。

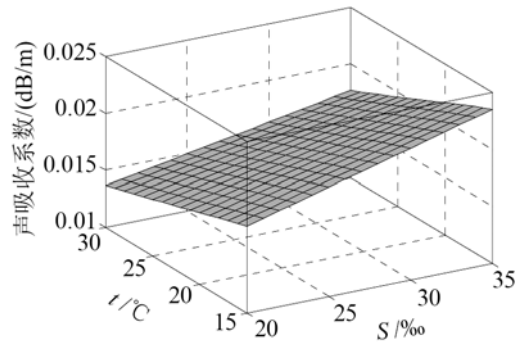


图 2 声吸收系数随盐度、温度的变化(压强为 1atm)
Fig.2 The coefficient of sound absorption changes with salinity and temperature, when the pressure is 1atm

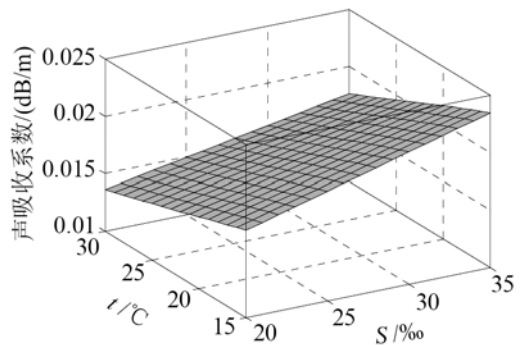


图 3 声吸收系数随盐度、温度的变化(压强为 10atm)
Fig.3 The coefficient of sound absorption changes with salinity and temperature, when the pressure is 10atm

将图 2 与图 3 进行比较就可以发现, 当压强从 1 atm (水深 10 m 时, 其压强约为 1 个大气压) 变化至 10 atm 时, 声吸收系数几乎不发生变化, 即压强变化引起的声吸收系数变化是非常小的。因此在研究浅海混浊水海域(水深一般不超过 100 m) 的声吸收特性时, 可忽略压强变化引起的声吸收系数变化。

虽然海水中含有大量的溶解盐, 但是常量元素的比例是恒定的^[10]。因此如果已知海水盐度, 便得到其中电解质成份的含量, 就可以通过声吸收计算公式, 定量描述其声吸收的大小。频率高于 10 kHz 时, 引起海水过量声吸收的电解质是 MgSO_4 。当 MgSO_4 浓度小于 0.2 mol/L 时(海水中 MgSO_4 浓度远小于该值), 其声吸收与浓度成正比, 所以同一温

度下的声吸收系数是随着盐度变化而线性变化的,如图 4 所示。

盐度恒定、温度升高时,海水介质的粘滞性会变小,而声吸收与介质的粘滞系数成正比,因此混浊海水的声吸收系数随温度升高而变小,如图 5、6 所示。

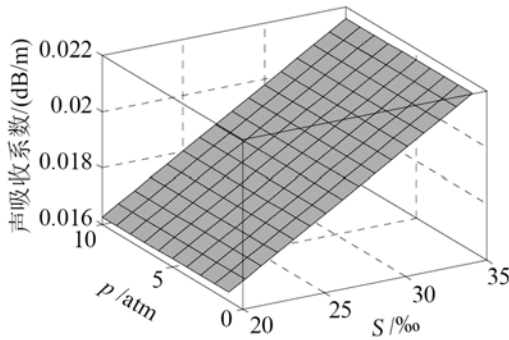


图 4 声吸收系数随压强、盐度的变化(温度为 20°C)
Fig.4 The coefficient of sound absorption changes with pressure and salinity, when the temperature is 20°C

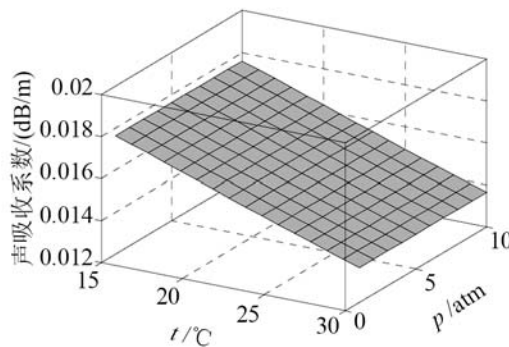


图 5 声吸收系数随压强、温度的变化(盐度为 20‰)
Fig.5 The coefficient of sound absorption changes with pressure and temperature, when the salinity is 20‰

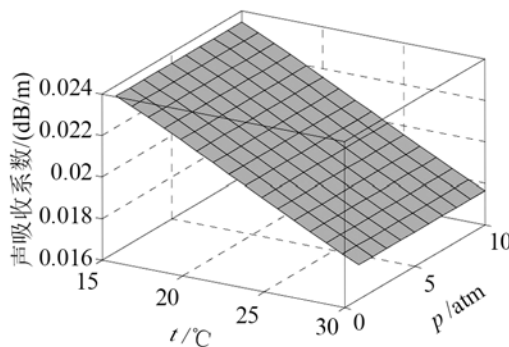


图 6 声吸收系数随压强、温度的变化(盐度为 35‰)
Fig.6 The coefficient of sound absorption changes with pressure and temperature, when the salinity is 35‰

3 实验设计

3.1 测量原理

本文是基于混响法测量混浊海水的声吸收系

数。原理如下:假设混响桶在充满纯水和混浊海水时,桶本身的声能损耗是相同的。如图 7 所示,当混响桶充以纯水时,由分析仪(PULSE)中的信号源发射白噪声信号,经过功率放大器,激励发射换能器在混响桶中建立稳态、均匀扩散声场。一段时间之后,发射换能器停止工作,由水听器监测其中声压级的衰减,并得到混响桶充以纯水时的混响时间。然后按上述过程测量混响桶盛满混浊海水时的混响时间,通过式(9)计算就可得到混浊海水的声吸收系数:

$$\alpha = (60/Tc - 60/T_0c_0) + \alpha_0 \tag{9}$$

式(9)中: α_0 是纯水的声吸收系数(手册上可查); T_0 是纯水的混响时间; α 是混浊海水的声吸收系数; T 是混浊海水的混响时间; c_0 是纯水的声速; c 是混浊海水的声速。这里假定泥沙颗粒的存在引起的混浊海水声速的变化是可以忽略的。

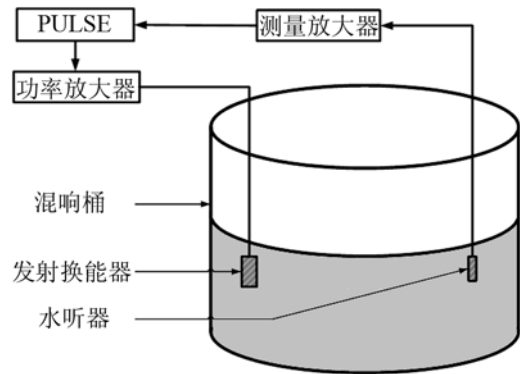


图 7 混响法测量声吸收系数示意图
Fig.7 The schematic diagram of the sound absorption coefficient measured by reverberation method

3.2 测量系统

利用混响法测量液体声吸收系数的原理是非常成熟的,但是实验测量时技术上有很多难点:(1)要求混响桶本身吸声系数要小(40 kHz 时,纯净海水的声吸收系数约为 0.0080 dB/m);(2)发射换能器和水听器的低吸声设计;(3)测量系统的隔声、隔振、保温、除气等设计,以使测量结果稳定可靠。

本文的混响桶为一圆柱形铝桶,没有焊缝,大大减少了桶本身的声吸收。铝桶共轴放置在一圆柱形钢桶内,并搁在楔形木块的斜面上,以减少声辐射等损耗。钢桶上带有真空除气、放气、观察窗、真空表等设备。钢桶外面包裹塑料泡沫,房间安置空调,以保持混浊海水的温度恒定。如图 8 所示。

3.3 测量误差校验

在混响桶里盛装了浓度为 0.0097 mol/L 的 $MgSO_4$ 溶液,利用该系统测量的声吸收系数与理论计算值的比较如图 9 所示。

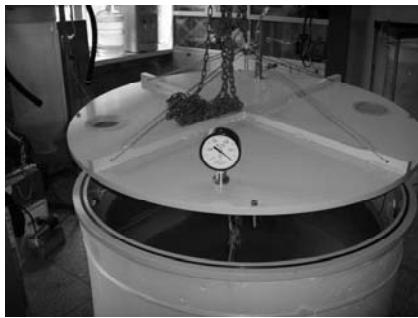


图 8 混响桶和钢桶实物图

Fig.8 The reverberation barrel and steel barrel for measurement

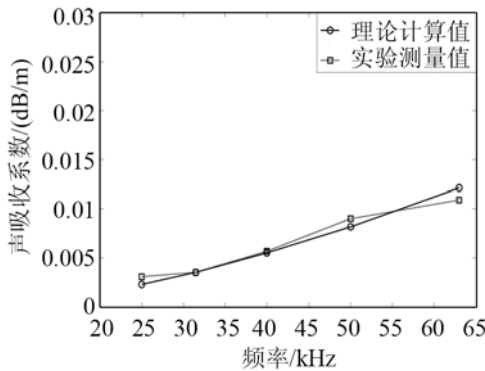


图 9 硫酸镁声吸收系数的测量值与计算值的比较

Fig.9 The comparison between the measured and the calculated sound absorption coefficient in sulfate magnesium solution of 0.0097mol/L

从图 9 中可看出，测量值和计算值之间是有差别的。在 50kHz 时，测量值与理论计算值的相对偏差约为 9.7%。

3.4 温度对声吸收的影响

由前面的仿真分析可知，温度、盐度对混浊海水声吸收系数的影响较为明显。本文采用在等同 35‰ 纯净海水声吸收系数的 $MgSO_4$ 溶液中掺入不同浓度的悬浮泥沙颗粒，以此得到不同浓度的混浊海水。由于除 $MgSO_4$ 外，其它电解质弛豫过程引起的声吸收可以忽略，所以上述方法是可行的，而且也减少了测量误差。

在实际实验过程中，改变混浊海水的温度要比改变其盐度容易得多。因此，这里重点考察温度对混浊海水声吸收的影响。

配制了悬浮泥沙颗粒浓度为 140 mg/L、320 mg/L、370mg/L 的混浊海水，密度分别为 $1.62 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.66 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。采用激光法对混浊海水中的悬浮泥沙颗粒进行粒度分析，泥沙颗粒的中值粒径利用矩法参数估计得到。其中值粒径分别为 5.18 Phi、5.79 Phi、6.73 Phi；分选系数为 1.35、1.55、1.98。图 10 示出了 320mg/L 混浊海水的悬浮泥沙的粒径分布。声吸收系数随温度变化的测量结果如图 11 所示，频率为 50kHz。

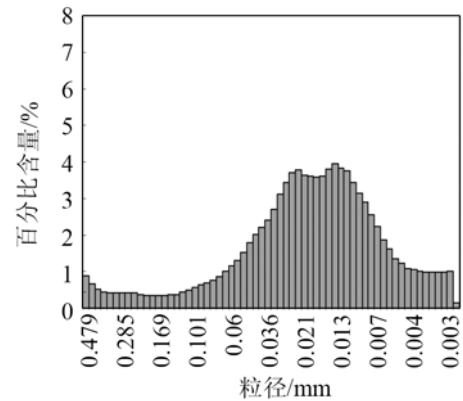


图 10 悬浮泥沙颗粒的粒径分布(320mg/L)

Fig.10 Particle diameter analysis of suspended sediment (the concentration is 320mg/L)

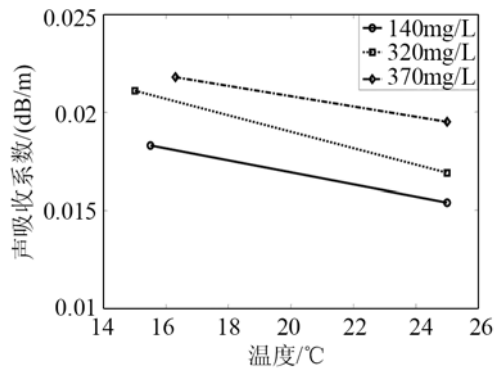


图 11 不同浓度不同温度下混浊海水声吸收系数的测量结果

Fig.11 The measurement results of the sound absorption coefficient in turbid seawater of different concentrations and different temperatures

3.5 测量结果分析

造成该声吸收系统测量误差的主要因素有：混浊海水体积测量的不准确性、混浊海水温度测量的不准确性、发射换能器和水听器位置不一致性、电子设备的电噪声引起的偏差等。图 9 所示的测量误差是上述所有过程引起的误差之和^[11]。而在研究温度对混浊海水声吸收特性的影响时，只采用空调对混浊海水进行温度控制。因此实验过程中，不会改变混浊海水的体积，也不会改变发射换能器和水听器的位置。所以当只考虑温度变化引起的声吸收系数变化时，该系统的测量误差一定小于 9.7%。由于采用的混响桶为圆柱形无焊缝铝桶，测量桶中水的深度，便可较为精确地求得混响桶中水的体积。钢桶隔绝了混响桶与实验环境之间的空气对流，可保证混响桶中的混浊海水长时间温度恒定。通过对同一浓度、不同温度的混浊海水实验数据进行处理，可估算得体积引起的测量误差约为 0.63%，温度引起的测量误差约为 0.30%。而在图 11 中，当温度升高 9.5℃(从 15.5℃变化到 25℃)时，140 mg/L 混浊海水声吸收系数约减少 16%；当温度升高 10℃(从

15℃变化到25℃)时,320 mg/L混浊海水的声吸收系数约减少19%;当温度升高8.7℃(从15℃变化到25℃)时,370 mg/L混浊海水的声吸收系数约减少11%。因此可肯定,上述声吸收系数的变化是因温度的变化而引起的,而不是系统的测量误差引起的。此外,实验中的声吸收系数随温度的变化规律与图2、图3中的仿真结果吻合较好,这也表明利用式(1)~(4)可以仿真分析低频段、低悬沙浓度混浊海水的声吸收特性随温度、盐度、压强的变化规律。

4 结论

本文通过纯净海水声吸收公式和悬浮泥沙颗粒的粘滞和散射声吸收公式,仿真分析了温度、盐度、压强对低频段(60kHz以下)、低悬沙浓度(小于1g/L)混浊海水声吸收的影响。发现:温度和盐度变化引起的混浊海水声吸收系数变化较为明显,而压强对混浊海水声吸收系数的影响可以忽略。构建并研制了一套测量误差较小的混浊海水声吸收测量系统。随后对低悬沙浓度混浊海水的声吸收系数随温度的变化规律进行了实验研究。实验结果表明:温度变化明显影响混浊海水的声吸收特性,混浊海水的声吸收系数随温度升高而减小。

上述研究成果对近岸浅海混浊水海域的声传播建模、探测沉底或悬浮目标的声纳系统设计、声纳性能的评估等提供了一定的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Simon D Richards. The effect of temperature, pressure, and salinity on sound attenuation in turbid seawater[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **103**(1): 205-211.
- [2] Simon D Richards, Timothy G Leighton, Niven R Brown. Sound absorption by suspensions of non-spherical particles: measurements compared with predictions using various particle sizing techniques[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, **114**(4): 1841-1850.
- [3] Simon Richards, Timothy Leighton. High frequency sonar performance predictions for littoral operations – the effects of suspended sediments and micro-bubbles[J]. *Journal of Defence Science*, 2002, **8**(1): 1-7.
- [4] Richards S D, Leighton T G, Brown N R. Visco-inertial absorption in dilute suspensions of irregular particles[J]. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 2003, **459**: 2153-2167.
- [5] 彭临慧, 王桂波. 悬浮颗粒物海水及其声吸收[J]. *声学技术*, 2008, **27**(2): 168-171.
PENG Linhui, WANG Guibo. Sound absorption of suspended particulate matter in seawater[J]. *Technical Acoustics*, 2008, **27**(2): 168-171.
- [6] 彭临慧, 王桂波. 中国近海悬浮颗粒物海水声波衰减[J]. *声学学报*, 2008, **33**(5): 389-395.
PENG Linhui, WANG Guibo. Sound attenuation in suspended particulate matter seawater of Chinese sea offshore[J]. *Acta Acustica*, 2008, **33**(5): 389-395.
- [7] 封光寅. 河流泥沙颗粒分析原理及方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008, 7-24.
FENG Guangyin. The analysis principle and method of sediment particles in the rivers[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008, 7-24.
- [8] 刘永伟, 李琪, 张超, 等. 混浊海水声吸收的计算与测量研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, **31**(11): 1472-1477.
LIU Yongwei, LI Qi, ZHANG Chao, et al. Research on calculating and measuring sound absorption in turbid seawater[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, **31**(11): 1472-1477.
- [9] 张怀静, 翟世奎, 范德江, 等. 三峡工程一期蓄水后长江口悬浮体形态及物质组成[J]. *海洋地质与第四纪*, 2007, **27**(2): 1-10.
ZHANG Huaijing, ZHAI Shikui, FAN Dejiang, et al. From characteristics and substance constituents of suspended matters in the Yangtze River estuary area after the first-stage storage of the Three Gorges project[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, **27**(2): 1-10.
- [10] 陈敏. 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009, 10-32.
CHEN Min. *Chemical Oceanography*[M]. Beijing: Ocean Press, 2009, 10-32.
- [11] 金泰义. 精度理论与应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005, 208-259.
JIN Taiyi. *The theory of precision and application*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005, 208-259.