基于冰内孔隙率的冰中声速经验公式的研究

冯常慧，刘 强，张 杰
(武汉第二船舶设计研究所，湖北武汉 430064)

摘要：冰介质中的声速特性受温度、盐度、密度等因素影响，是一个随时间和空间变化的不稳定值。研究了冰介质中温度、盐度、密度三个物理量在垂直方向上的变化特性，引入孔隙率作为冰中声速特性的表征因子，利用孔隙率与温度、盐度、密度已有的函数关系，通过大量天然冰的实验数据，得到淡水冰中声速关于温度、盐度和密度的经验公式。进行了河冰声速测量的外场试验，验证了淡水冰中声速的经验公式的有效性，并利用该声速经验公式研究了淡水冰垂直方向上的声速剖面。文中所做的相关研究可为以后研究利用冰介质中的声速特性提供借鉴，为以后利用声学方法，在极地或我国北方高纬度地区进行冰层厚度监测，了解寒地冰层的更替、演化以及气候变迁等工作奠定研究基础。

关键词：冰中声速经验公式；冰层孔隙率；垂直声速剖面
中图分类号：O427 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2017)-06-0509-07
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.06.002

Porosity based ice sound velocity model and its empirical formula

FENG Chang-hui, LIU Qiang, ZHANG Jie
(*Wuhan Second Ship Design and Research Institute*, *Wuhan* 430064, *Hubei*, *China*)

Abstract: The sound velocity of ice is affected by temperature, salinity and density, so it is a unstable value that varies with time and space. The three main factors affecting ice sound velocity are analyzed in this paper, and a practicable sound velocity modeling method is proposed as follows: taking porosity as the best characterization factor of ice sound velocity, analyzing a large amount of experimental data on natural ice to establish the mathematic model of the ice sound velocity about porosity first, then using the existed function relationship of porosity with temperature, salinity and density to put forward the ice sound velocity model expressed by temperature, salinity and density. Based on the proposed method, a complete sound velocity model of freshwater ice is established and a corresponding empirical formula is obtained. The river ice sound velocity experiment is conducted to verify the effectiveness of the freshwater ice's sound velocity model. And based on this model, the vertical velocity profile of freshwater ice is studied in this paper. What we have done in this paper would provide a theoretical basis for using acoustic techniques to monitor the thickness of ice and understand the evolution of cold ice layers and the climate change in the polar region and the high latitudes in northern China.

Key words: sound velocity model in ice medium; the ice porosity; vertical sound velocity profile

0 引 言

上世纪末国际上开始重视对极地海冰变化规律的研究[1-2]，利用仰视声呐监测海冰厚度、浮冰漂移、声反射系数等数据信息[3-6]。国外 20 世纪初开始研究海冰的声学特性。美国海军实验室、俄罗斯科学院等机构做过大量关于北极声学物理方面的研究。1958 年，Assur 给出了海冰的相成分表，并试验测量了海冰的密度、盐度和温度，得到了海冰的气泡体积分数[7]。1963 年，Schwerdtfeger 提出了直接计算海冰气泡体积分数的公式[8]。1967 年 Weeks 和 Assur 等人发现了海冰中的卤水体积分数是海冰特性的影响因素之一[9]，并先后发表了一系列关于海冰物理特性研究的文章[10]。20 世纪 80 年代，G. F. N. Cox 和 W. F. Weeks 提出了计算海冰孔隙率的简便算法[11-12]。美国伍兹霍尔海洋实验室的 Subramaniam D. Rajan 和 George V. Frisk 进行了海冰中纵波和横波的声速测定试验，并简要描述了海冰在垂直方向上的物理结构[13]。

国内李启虎院士等撰写了《北极水声学：一门引人关注的新型学科》一文，总结了北极声学的研究现状，为北极声学的发展指明了方向[14]。大连理工大学的李志军等建立了渤海海冰关键力学参数

收稿日期：2017-08-04；**修回日期**：2017-09-20
作者简介：冯常慧(1975－)，男，湖北武汉人，硕士，高级工程师，研究方向为声呐总体设计。
通讯作者：刘强，E-mail: liuqiang01@hrbeu.edu.cn

的预报模式[15]。郭纪捷[16]、李朝晖[17]等人利用相对法简单研究了渤海海冰分层声速和在厚度方向上的声速随频率的变化趋势。

本文研究了冰介质中的声速特性，得到了冰中声速的经验公式，对利用仰视声呐探测海冰厚度和以后极地冰层中的声学特性研究有借鉴意义。

1 冰介质中温度、盐度和密度的时空特性

影响冰中声速变化的主要因素是冰介质的温度、盐度及密度特性，首先研究了冰介质中温度、盐度和密度的时空特性。

1.1 温度特性

图 1、2 是 2015 年 12 月末黑龙江省松花江流域关于河冰的某一日冰温监测数据。

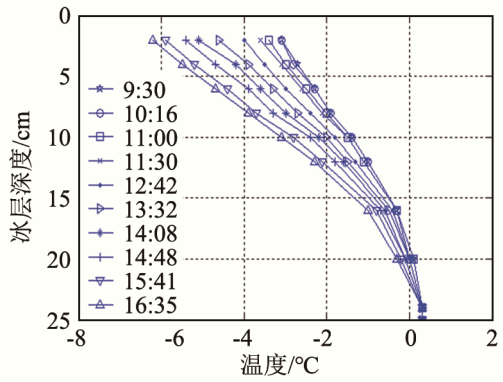


图 1 2015 年冬季有冰期松花江一日冰温监测图

Fig.1 A typical ice temperature monitoring chart for one day at Songhua River in winter 2015

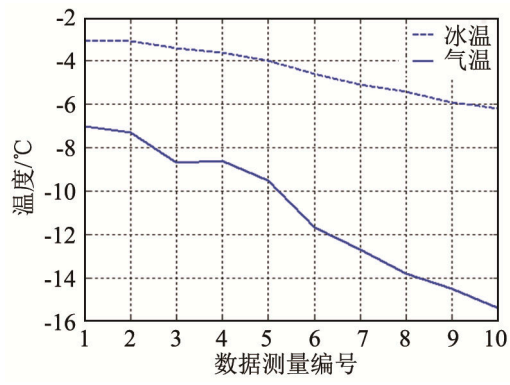


图 2 气温和冰温变化图

Fig.2 The vibration of air temperature and ice temperature

当日的气温监测值对应如下(由时间 9:30 至 16:35)：−7.0℃、−7.3℃、−8.7℃、−8.6℃、−9.5℃、−11.7℃、−12.7℃、−13.8℃、−14.5℃、−15.4℃, 即图 2 的数据 1 到数据 10。由图 1 和图 2 可见，当日气温骤降，冰层温度也随之降低，且由于冰层与空气界面的能量交换作用，冰层温度相较气温变化有所延迟，且冰层温度比气温变化平缓。冰介质的温度受上、下表面所处环境温度的双重影响，冰层上表面温度受气温影响变化剧烈，下表面温度则主要受水温影响。由于水温基本恒定，冰层下表面的温度变化缓慢。由于淡水冰盐度接近于 0，不受卤水“热库”调节能力的影响，所以天然淡水冰的温度垂直变化呈准线性分布。图 1 中 0℃以上的监测数据点是水温监测数据，为 0.3℃。

海冰的温度变化除受气温和水温的双重影响之外，还与海冰存在状态和含盐量多少有关。其影响表现在[15]：生长期的海冰，冰内存在准线性温度梯度；稳定期的海冰，冰内温度呈非线性分布，且由于卤水“热库”调节能力而出现“冷中间层”或“热中间层”的“C”型温度分布；融冰期的海冰，表面冰温因辐射而可能处于 0℃左右，有时甚至略高于气温。但此时的冰层底面温度却与水温相同，约为−1.4℃。该温度为盐度是 32 ppt(1ppt=1‰)所对应的冰点温度。处于融冰期的海冰的物理特性更为复杂，且没有确定的变化规律。

1.2 盐度特性

天然淡水冰的含盐量极少，接近于 0，因此盐度对淡水冰的声速变化影响较小。

与淡水冰相比，海冰的盐度分布复杂且具有明显的分层结构。在连续冻结的冰层内，海冰盐度呈“C”型分布，即冰层的表层及底层盐度偏高，且底层的盐度略高于表层[15]。这是因为初冰形成时，过冷海水迅速冻结，形成粒状冰，粒状冰晶粒小、晶粒间封闭了较多的细小卤水胞，导致表层冰的含盐量偏高。表层海冰形成之后，冰层的生长速度减慢，晶粒较大且有充足的生长时间，形成柱状冰。柱状冰内的卤水胞有充足的时间向下排泄，导致柱状冰层的盐度偏低。而底层海冰的骨架部分始终与海水联通，同时接收了部分柱状冰层的排泄卤水胞，使得底层海冰的含盐量也偏高。而且，冰龄越长、冰层越厚，柱状冰在整个冰层中所占的比重也就越大，整个冰层的盐度就越低。即整个冰层的平均盐度随冰厚度的增加而减小。

1.3 密度特性

冰层密度与冰层的温度、盐度以及气泡含量有关，还与冰的生长状态有关。历史测量资料表明[15]：冰层盐度越大，密度越大；冰层气泡含量越大，密度越小。处于生长期和稳定期的海冰密度较高，处于 0.868～0.923 之间，均值为 0.913 2；融化期的海

冰密度较低，处于 0.729～0.885，其均值为 0.816 9。

与海冰不同，天然淡水冰质地均匀，冰层密度在三个生长期内都近似于一个常量，约为 0.909。

研究结果表明：冰中的温度、盐度、密度是三个时变、空变的物理量，且彼此之间存在复杂的相互影响。因此本文引入冰内孔隙率这一物理量，以冰内孔隙率为桥梁，建立了冰中声速关于温度、盐度和密度的经验公式，并通过试验验证了声速经验公式的有效性。

2　冰介质中声速经验公式的研究

2.1　冰中声速经验公式的研究方法

冰内孔隙率是冰介质中的卤水体积分数和空气体积分数之和，被认为是冰介质物理特性的最佳表征因子[12]，孔隙率的计算过程如下：

$$v_b = d \cdot S_i / F_1(T) \tag{1}$$

$$v_a = 1 - \frac{d}{d_1} + (d \cdot S_i) \cdot \frac{F_2(T)}{F_1(T)} \tag{2}$$

$$F_1(T) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot T + \alpha_3 \cdot T^2 + \alpha_4 \cdot T^3 \tag{3}$$

$$F_2(T) = \beta_1 + \beta_2 \cdot T + \beta_3 \cdot T^2 + \beta_4 \cdot T^3 \tag{4}$$

$$d_1 = 0.917 - 1.403 \times 10^{-4} \cdot T \tag{5}$$

$$v = v_a + v_b \tag{6}$$

其中：v 就是冰内孔隙率；v_b 是冰的卤水体积分数；v_a 为冰的空气体积分数；d_1 为纯冰密度($\mathrm{mg/m^3}$)；S_i 是冰样盐度(‰)；T 是冰样温度(℃)；d 是冰样密度($\mathrm{mg/m^3}$)；$F_1(T)$ 和 $F_2(T)$ 是利用统计数据，通过最小二乘法估计的关于温度 T 的变化函数，$F_1(T)$ 和 $F_2(T)$ 关于 T 的变化系数见表 1、表 2 所示。

表 1　$F_1(T)$中系数的统计值

Table 1　Statistical values of coefficients in $F_1(T)$

T/℃	$F_1(T)$/($\mathrm{mg/m^3}$)				相关系数
	α_1	α_2	α_3	α_4	
−2≥T≥−22.9	−4.732	−2.245 ×10^1	−6.397 ×10^{-1}	−1.047 ×10^{-2}	0.9999
−22.9>T≥−30	9.899 ×10^3	1.309 ×10^3	5.527 ×10^1	7.160 ×10^{-1}	0.9999

表 2　$F_1(T)$中系数的统计值[12]

Table 2　Statistical values of coefficients in $F_2(t)$

T/℃	$F_2(T)$/($\mathrm{mg/m^3}$)				相关系数
	β_1	β_2	β_3	β_4	
−2≥T≥−22.9	8.093 ×10^{-2}	−1.763 ×10^{-2}	−5.330 ×10^{-4}	-8.801 ×10^{-4}	0.999 9
−22.9>T≥−30	8.547	1.89	4.518 ×10^{-2}	5.819 ×10^{-4}	0.999 9

冰内孔隙率是温度、盐度、密度的函数，其随温度、盐度、密度的变化情况见图 3 所示。

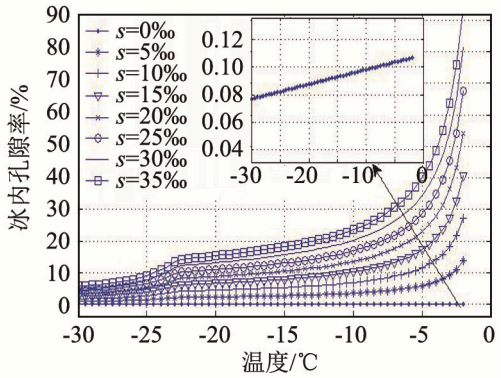


图 3　不同温度、盐度下的孔隙率变化规律

Fig.3　Porosity variations with temperature, salinity and density

图 3 中 s 是冰样的盐度，图 3 是利用孔隙率计算公式(1)～(6)仿真所得，对于相同类型的冰样，冰样的密度与温度和盐度有关，其变化情况受温度、盐度的影响，变化规律为：密度随着温度的升高而变小，随着盐度的增加而变大。为便于观察，图 3 中还给出了盐度 s=0 时孔隙率随温度变化的局部放大图。由图 3 可知：相同条件下，冰内孔隙率随温度的降低而减小，随盐度的增加而增大。需要注意的是在有关冰内孔隙率的计算公式中，每一次冰样的密度都是需要实测的。

设声速关于冰内孔隙率的函数关系为：$c = f(v) = a_0 + a_1 v + \cdots + a_i v^i + \cdots + a_n v^n$，实验所得数据为 $(v_i, c_i)(i = 1, 2 \cdots m)$，采用最小二乘数据拟合，即：

$$\phi_i = f(v_i) - c_i = a_0 + a_1 v_i + \cdots + a_n v_i^n - c_i \tag{7}$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{m} (\phi_i - c_i)^2}{\partial a_j} = 0, \quad j = 0, 1 \cdots n \tag{8}$$

式(7)中，ϕ_i 是拟合的残差，式(8)可化为：

$$\sum_{i=1}^{m} \left(a_0 + a_1 v_i + \cdots + a_n v_i^n - c_i\right) \cdot v_i^j = \sum_{i=1}^{m} c_i v_i^j \tag{9}$$

用矩阵形式表述为：

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^{m} v_i & \cdots & \sum_{i=1}^{m} v_i^n \\ \sum_{i=1}^{m} v_i & \sum_{i=1}^{m} v_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{m} v_i^{n+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{i=1}^{m} v_i^n & \sum_{i=1}^{m} v_i^{n+1} & \cdots & \sum_{i=1}^{m} v_i^{2n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{m} c_i \\ \sum_{i=1}^{m} v_i c_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{m} v_i^n c_i \end{bmatrix}$$

求解该方程组，可以得到冰中声速关于孔隙率的数学模型，式(1)～(6)代入，即可建立以温度、盐度、密度为变量的冰中声速的经验公式。其中拟合

公式中 n 取值过大会出现过拟合的问题，反而会导致拟合误差过大，反映不出真实的规律。n 取值在 1 和 2 之间较为合适，根据此次实验数据，n 取值为 1 时的拟合结果更优。

2.2 冰中声速测量实验及声速经验公式拟合

2.2.1 实验概况

实验中所用冰样为从松花江采集到的天然河冰，实验过程中，待测冰样被置于恒温箱中严格控制环境温度，在每次改变温度、测量声速前均放置较长时间制冷。实验中依次测得温度值为–2.8℃、–3.6℃、–6.0℃、–8.0℃、–10℃、–12.4℃、–13.6℃、–20.4℃下的声速值，测得天然冰的盐度接近于 0，0℃下的天然冰的密度为 0.916 g/cm^3，且实验中发现天然冰的密度随冰温的降低而变大，其变化规律约为 $\rho=0.916-1.5672\times10^{-4}T$，但是密度随温度的变化量十分小，在本实验的小温度变化范围内密度几乎不变。而且，需要说明的是，由于密度随温度的变化量极小，因此实验所得到的密度随温度的变化系数并不准确，仅能说明此变化规律。实验仪器连接如图 4 所示。

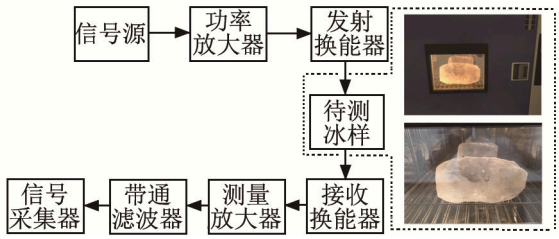


图 4 仪器连接图

Fig.4 The instrument connection diagram

冰中声速随温度变化情况如图 5 所示，冰中孔隙率与温度的关系如图 6 所示，冰中声速随孔隙率的变化情况如图 7 所示。

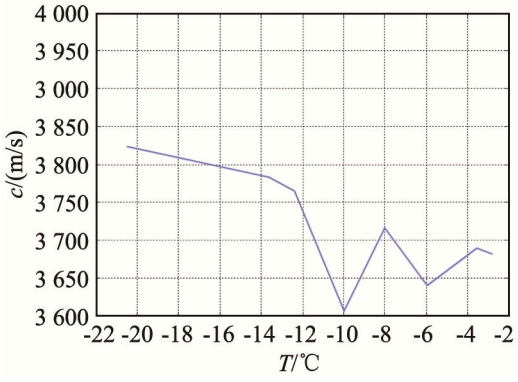


图 5 冰中声速-温度递变图

Fig.5 The relationship between sound velocity and temperature in ice

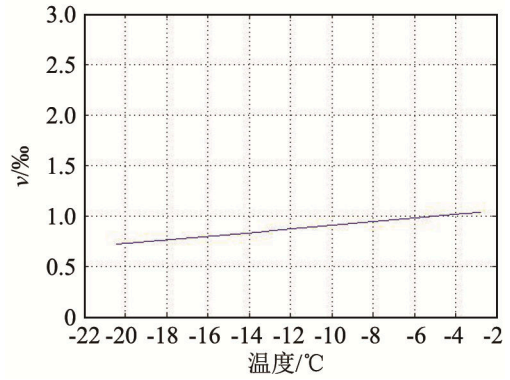


图 6 冰内孔隙率-温度递变图

Fig.6 The relationship between porosity and temperature in ice

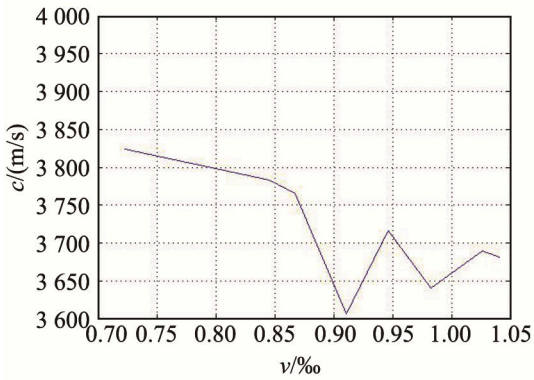


图 7 冰中声速-孔隙率递变图

Fig.7 The relationship between sound velocity and porosity in ice

图 5 实验结果较好地展现了冰内声速与温度的关系：冰温越低，声速越高，在–22℃～–2℃之间，冰温每降低 1℃，声速平均增加约 8 m/s，冰中声速始终在 3 600～3 900 m/s 范围内。图 6 是淡水冰的孔隙率随温度的变化情况，可知淡水冰的孔隙率随温度的升高而增大；图 7 是声速随孔隙率的变化情况，可知淡水冰声速随孔隙率的减小而增加。因此可以发现，冰介质的温度越低，冰介质的孔隙率越小，即冰介质的分子排列更加紧密，声波在介质中的振动传递的也越快，冰介质中的声速也增大。

2.2.2 冰中声速经验公式实验数据处理

工程上常用的拟合模型基函数有多项式、指数函数、三角函数等。选用拟合模型基函数为 $y=ax+b$、$y=ae^{bx}$，两种拟合函数结果见图 8。图 9 是冰中声速关于孔隙率的散点图，其中红色的数据点测量误差较大，已偏离了主要的函数轨迹，在做数据拟合的过程中应予以删除。

图 8 中蓝实线是真实测量数据，绿实线是一次多项式拟合结果，红虚线是指数型拟合结果。一次多项式模型的残差平方和略小于指数型的结果，且由于多项式模型所得经验公式更简单，计算量小，更具有工程应用优势。故选用一次多项式作为数学

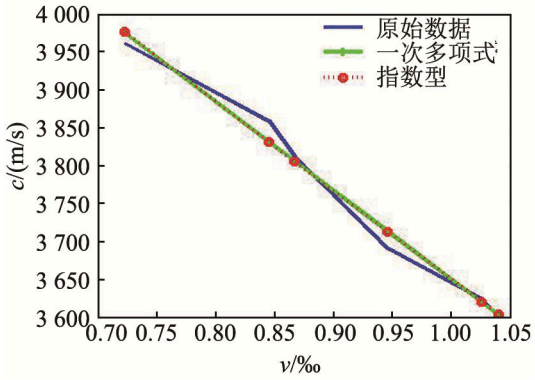


图 8　冰中声速关于孔隙率的拟合结果

Fig.8　The fitting result of sound velocity with porosity in ice

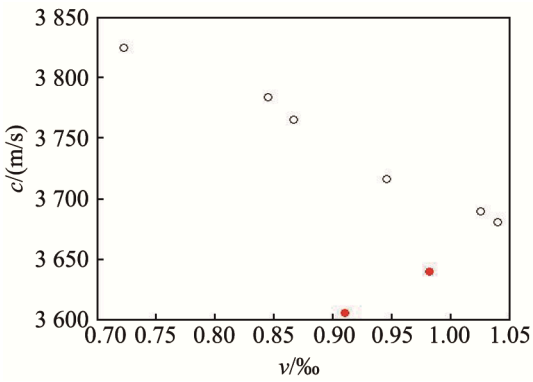


图 9　冰中声速关于孔隙率的散点图

Fig.9　The scatter diagram of sound velocity with porosity in ice

模型基函数，利用数据采用最小二乘拟合得到天然淡水冰的声速经验公式为：

$$c=4195.9-451.1v \tag{10}$$

式(10)中：c 表征冰中声速(m/s)；v 为冰内孔隙率(‰)。式(10)中 v 是密度、盐度、温度的函数，其计算方法参见式(1)～(6)。

3　外场反演验证及声速垂直剖面

3.1　外场试验概述

2016 年冬季在某江流域进行了河冰的声速经验公式反演验证试验，研究了天然淡水冰的声速垂直剖面。图 10 是试验区域卫星图，图 11 是试验装置图。

换能器距冰下表面 0.5 m，垂直于冰面向上发射信号。利用温度计阵列监测气温、冰层剖面温度及水温，每当冰温发生明显变化时(大于 0.5℃)测量一次声速值。测得冰密度为 0.909 g/cm^3，盐度近似为 0，冰厚为 24.2 cm。

3.2　外场声速反演及垂直声速剖面数据处理

回波信号如图 12 所示，图 12 中 1 是冰-水界面

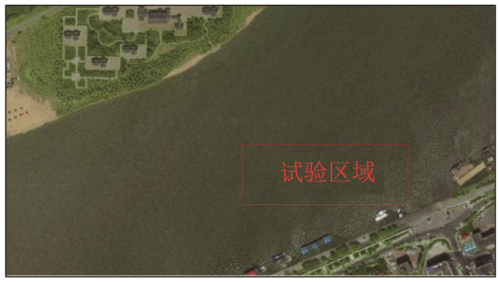


图 10　外场试验地点卫星云图

Fig.10　Layout of field experiment near Song Hua River

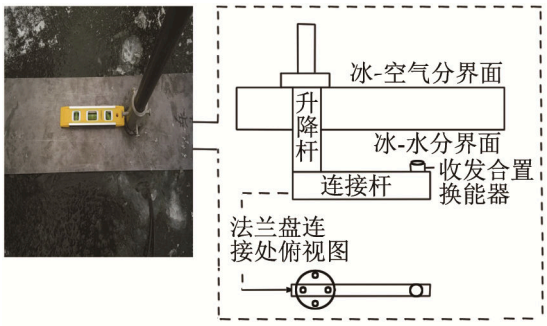


图 11　外场冰试验声速反演测定装置图

Fig.11　Measurement device of sound velocity inversion in the field experiment

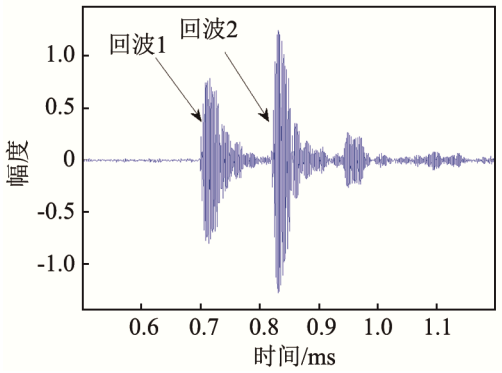


图 12　回波信号

Fig.12　The echo signals

回波信号，2 为冰-空气回波信号。信号 1、2 到达时刻差值的 1/2 就是声波在冰中的传播时间。

由于影响淡水冰声速的主要因素是温度，所以依据温度监测值把冰层分为 8 层，每一层的声速为 c_i (i=1, 2…8)，相应的设分层深度矩阵为

$$\boldsymbol{H}=[h_1\ \ h_2\ \ h_3\ \ h_4\ \ h_5\ \ h_6\ \ h_7\ \ h_8]^{\mathrm{T}}$$

试验测得声波在冰中的总传播时间矩阵

$$\boldsymbol{T}=[t_1\ \ t_2\ \ t_3\ \ t_4\ \ t_5\ \ t_6\ \ t_7\ \ t_8]^{\mathrm{T}}$$

则依据总传播时间相等，可以建立如下等式：

$$\sum_{j=1}^{8}\frac{2h_j}{c_{ij}}=t_i\ (i=1,2\cdots6) \tag{11}$$

$$c_{ij}=a+bv_{ij} \tag{12}$$

即

$$2\times\begin{bmatrix}\frac{1}{a+bv_{11}} & \frac{1}{a+bv_{12}} & \cdots & \frac{1}{a+bv_{18}}\\ \frac{1}{a+bv_{21}} & \frac{1}{a+bv_{22}} & \cdots & \frac{1}{a+bv_{28}}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ \frac{1}{a+bv_{61}} & \frac{1}{a+bv_{62}} & \cdots & \frac{1}{a+bv_{68}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}h_1\\h_2\\\vdots\\h_8\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}t_1\\t_2\\\vdots\\t_6\end{bmatrix}$$

式中：待定参数为 a 和 b，求此非线性方程组的最小二乘解得：a=4195.9，b=–451.1。此待定参数与上述 2.2.2 中所得到的经验公式一致，外场试验结果与实验室天然冰测量实验的结果可相互验证，验证了该声速经验公式的合理性。

由以上公式，代入各分层的温度、密度、盐度值，可得淡水冰的垂直声速剖面，结果如图 13 所示。

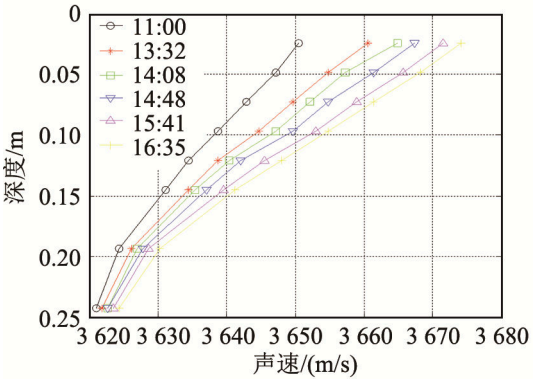


图 13 不同时刻的垂直声速剖面

Fig.13 The vertical profiles of sound velocity at different times

图 13 中有 5 条声速剖面曲线，分别对应当天不同时间的声速剖面，其结果说明冰中声速随气温、水温的变化而变化，而且冰中声速是一个时变和空变的不稳定值。淡水冰的盐度和密度为恒定值，冰中声速的主要影响因素是温度，又因为淡水冰不受卤水“热库效应”的影响，故内部冰温呈准线性变化，且表层冰温等于气温，底层冰温等于水温。孔隙率是冰温、盐度、密度和函数，所以在试验温度范围内孔隙率也呈准线性变化。而淡水冰中声速与孔隙率是线性关系，所以淡水冰中声速由上至下呈准线性变化关系。

4 结 论

冰中声速特性受众多因素影响，是一个时变、空变的不稳定值，本文总结分析了温度、盐度、密度这三个主要影响因素的变化规律。引入孔隙率作为冰声学特性的最佳表征因子，提出了一种冰中声速建模方法，并经淡水冰建模实验，验证了其有效性，通过天然冰实验得到了淡水冰的声速经验公式。

淡水冰盐度接近于 0，在小温度的变化范围内，淡水冰的密度变化很小、基本恒定，所以淡水冰声速的主要影响因素是冰温。其冰温变化规律为：表面温度受气温影响，底面温度受水温影响，且总体呈准线性连续变化。冰内孔隙率是温度、盐度、密度的函数，因此在实验温度范围内孔隙率也呈准线性变化。而淡水冰声速与孔隙率呈线性关系，所以淡水冰声速由上至下也呈准线性变化关系，声速关于孔隙率的经验公式为 c=4 195.9–451.1v，温度越低，冰内孔隙率越小，冰中声速越大。

通过得到的冰中声速的经验公式，某一地区冰层中的声速值可以通过查阅历史记录或实地测量的密度及盐度值、当日气温值，得到冰介质中的声速值，并可通过该经验公式分析垂直方向上的声速剖面。这对以后冰介质中的声速特性研究以及利用声学方法测量冰层厚度具有重要意义。

海冰声速的经验公式将是我们下一步研究的工作重点，现已初步获得了部分实验数据，但数据尚不完善，还需进一步研究，期望可以建立海冰声速的经验公式。

参 考 文 献

[1] Fissel D B, Marko J R, Ross E, et al. Upward looking sonar-based measurements of sea ice and waves[C]//OCEANS 2008. IEEE, 2008: 1-8.

[2] Strass V H. Measuring sea ice draft and coverage with moored upward looking sonars[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1998, **45**(4): 795-818.

[3] Ross E, Fissel D, Mudge T, et al. The sensitivity of ice keel statistics to upward looking sonar ice draft processing methods[C]//OTC Arctic Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2014.

[4] Galloway J L, Melling H. Tracking the motion of sea ice by correlation sonar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, **14**(3): 616-629.

[5] Melling H, Johnston P H, Riedel D A. Measurements of the underside topography of sea ice by moored subsea sonar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, **12**(3): 589-602.

[6] Jezek K C, Stanton T K, Gow A J, et al. Influence of environmental conditions on acoustical properties of sea ice[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1990, **88**(4): 1903-1912.

[7] Assur A. Composition of sea ice and its tensile strength[J]. Arctic Sea Ice, 1958, **598**: 106-138.

[8] Schwerdtfeger P. The thermal properties of sea ice[J]. Journal of Glaciology, 1963, **4**: 789-807.

[9] Weeks W F, Assur A. The mechanical properties of sea ice[R]. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover Nh, 1967.

[10] Schwarz J, Weeks W F. Engineering properties of sea ice[J]. Journal of Glaciology, 1977, **19**(81).

[11] Cox G F N, Weeks W F. Equations for determining the gas and

brine volumes in sea ice samples[R]. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover Nh, 1982.
[12] Cox G F, Weeks W F. Salinity variations in sea ice[R]. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover Nh, 1973.
[13] Rajan S D, Frisk G V, Doutt J A, et al. Determination of compressional wave and shear wave speed profiles in sea ice by crosshole tomography-Theory and experiment[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, **93**(2): 721-738.
[14] 李启虎, 王宁, 赵进平, 等. 北极水声学: 一门引人关注的新型学科 [J]. 应用声学, 2014, **33**(6): 471-483.
LI Qihu, WANG Ning, ZHAO Jinping, et al. Arctic underwater acoustics: an attractive new topic in ocean acoustics[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, **33**(6): 471-483.
[15] 李志军, 吴紫汪, 高树刚, 等. 渤海连续冰层关键力学参数预报模式[J]. 大连理工大学学报, 2003, **43**(2): 238-242.
LI Zhijun, WU Ziwang, GAO Shugang, et al. Forecast model for key mechanical parameters of level ice sheet in Bohai[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, **43**(2): 238-242.
[16] 郭纪捷. 应用 chirp 声呐探测海冰的试验研究[C]//2004 年全国水声学学术会议论文集. 2004.
GUO Jijie. Application of chirp sonar technique for sea ice monitoring[C]//2004 Proceedings of the National Conference on underwater acoustics, 2004..
[17] 李朝晖, 张金铎, 郭纪捷. 海冰中声速与声衰减的测量研究[C]//2005 年全国水声学学术会议论文集. 2005.
LI Zhaohui, ZHANG Jinduo, GUO Jijie. The measurement of the sound velocity and attenuation in the sea ice[C]//2005 Proceedings of the National Conference on underwater acoustics, 2005.

• 简 讯 •

中国科学院百人学者论坛
——“创新路上的前沿声学”专题研讨会在北京召开

由中国科学院人事局支持，中国科学院“百人学者论坛”理事会主办，中国科学院声学研究所与中国声学学会联合承办并由声学学会办公室与中国科学院声学研究所超声技术中心、人力资源部具体组织的中国科学院百人学者论坛——“创新路上的前沿声学”百人学者专题研讨会于 2017 年 11 月 30 日～12 月 1 日在北京市中国科学院文献情报中心院士厅隆重召开。中国科学院声学研究所所长王小民、党委书记张春华、中国科学院人事局综合处副处长高继承、中国科学院百人学者论坛理事长宋卫国、中国科学院声学研究所人力资源部主任刘宏伟、中国声学学会副秘书长蒋德军等出席了开幕式。来自全国各地的声学及交叉学科领域的 30 多位院士、“杰出青年”及中国科学院“百人计划”入选者等知名专家学者与会交流科研成果，探讨研究热点。

在 12 月 1 日上午大会开幕式上，中国声学学会理事长王小民首先致欢迎词，对出席本次专题研讨会的领导及专家学者表示热烈欢迎，强调作为一门老而弥新的学科，声学学科的发展，需要萃取相关学科发展之精华，需要相关领域专家学者的大力支持。广大声学科技工作者应当紧跟时代潮流，增强使命感、责任感，自觉把声学科学技术发展与国家经济社会发展和国家安全等需求更加地紧密结合起来，面向世界科技前沿、面向国家重大需求、面向国民经济主战场，努力创新声学科学技术，把论文写在祖国的大地上，借创新驱动发展的东风，壮发展之力，实现声学科学技术的可持续发展。

高继承副处长、宋卫国理事长也分别代表人事局与百人论坛理事会致词。开幕式由中国声学学会副理事长兼秘书长张春华主持。中国科学院声学研究所超声技术中心王秀明主任主持学术报告，超声技术中心王文研究员及中国科学院语言声学与内容理解重点实验室李军锋研究员主持专题研讨。

本次研讨会秉承广泛交流、加强合作、鼎力创新的宗旨，为与会者提供了跨学科、形式独特的交流机会，促进了声学和相关交叉领域最新研究成果的高层次交流，使各位专家进一步开放思想、深入探讨，在思想的交流和碰撞中发现新的合作契机，开辟新的研究领域和方向。会议不仅有声学领域的专家参加，更邀请到来自化学、物理、电子、材料等领域的专家学者参与。此外，另有来自中国科学院声学研究所各个研究单位的近 80 位老师与同学参与了此次研讨会。

大会邀请了 5 位声学领域著名学者作特邀报告，分别是中国科学院声学研究所汪承灏院士、中国科学院声学研究所颜永红研究员、复旦大学他得安教授、南京大学卢明辉教授和中国科学院深圳先进技术研究院郑海荣研究员，他们分别从超声检测、音频声学、医学超声以及微声学等不同方向分享了最新研究成果。

与会各位专家学者就声学前沿技术领域的研究热点和国家重大需求展开了热烈的讨论，共同探讨了我国在交叉融合中发展的声学前沿技术。与会专家纷纷表示，本次研讨会邀请专家领域广泛，交流机会宝贵，利于学科交叉融合和产学研融合，开阔视野，激发灵感，是一次十分有意义的研讨会，有助于推动声学这一古老学科在新时代焕发出新的活力。

中国声学学会