

考虑声波折射补偿的海底热液口声学原位测温方法

蔡勇¹ 樊伟² 潘红文¹ 陈磊¹ 周艳²

(1. 浙江大学舟山海洋研究中心 舟山 316021;

2. 浙江大学 杭州 310027)

摘要:介绍了海底热液口温度场原位声学测量方法,进行了海底非均匀温度场中声波折射传播路径研究,并建立了声波传播路径的数学模型,利用 COMSOL Multiphysics 软件进行了声波传播路径的数值求解。在云南省龙陵县境内的茄子上水库的湖底热泉进行了实验研究,准确地还原出温度场。考虑了声波折射补偿,提高了声波飞渡时间估计精度,并对声路径弯曲补偿前后重建出的温度场进行最大绝对误差、最大相对误差和均方根误差分析。实验表明:对声波信号传播路径由曲线变直线进行补偿,可提高温度场原位测量的精确性。

关键词:海底;热液口;声学测温;声波折射;路径弯曲补偿

中图分类号: TN929.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 570.5099

Study on the acoustic in-situ measurement techniques for determining temperature field around seafloor hydrothermal vents taking into account the refraction compensation of sound waves

Cai Yong¹ Fan Wei² Pan Hongwen¹ Chen Lei¹ Zhou Yan²

(1. Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper presents the basis of acoustic method used for temperature field measurement of seafloor hydrothermal vents. Study on the refracted propagation path of sonic waves in seafloor non-uniform temperature field with Fermat's theory and by variational calculation, and is numerically calculated in the model's temperature field. Experimental research is performed to exactly rebuild the temperature fields around hot springs on floor of Lake Qiezishan, Yunnan. The accuracy of time of flight estimation has been improved based on the technique of bending compensation of propagation paths of acoustic signal. At the same time, by comparison with two temperature fields, the max absolute error, the max relative error and the root mean square error are given. It shows that the bending compensation of propagation paths of acoustic signal technique can be applied to temperature field measurement detector around seafloor hydrothermal vents. It also has a good accuracy.

Keywords: seafloor; hydrothermal vents; acoustic temperature method; refraction of sonic waves; path curvature compensation

0 引言

科学家们越来越重视对海底热液活动的调查和研究。海底热液区周围生存着各式各样的生物种群,究竟是怎么样的生存环境,滋养着这些生物独特的生活习性和形态差别,研究人员非常关注。研究发现这些生物种群所处的生存环境与其周围的温度分布状况有关,因此准确的测量海底热液口的温度参数,对相关科学研究具有指导作用^[1-3]。

在海底热液口复杂的声环境下,原位声学测温是否准

确和有效,取决于声波时延估计的精度。以往在海底热液口温度场声学重建时,声波信号都是按照直线传播分析处理的^[1,4-10],但由于海底热液口的实际温度场是非均匀分布的,声波信号在该温度场中实际传播不再是直线路径,而是会发生折射^[11-14]。此时进行海底热液口温度场重建时,仍按照声波信号直线传播来处理分析,会带来较大的测量误差,在一定程度上限制了海底热液口原位声学测温的准确性。为此,本文将从考虑声波信号在海底非均匀温度场中的折射问题,对声波信号传播路径由曲线变直线进行补偿,

提高海底热液口温度场原位测量的精确性和有效性。

1 海底热液口声学测温方法

声波信号在海水中的传播速度关系式^[6]为:

$$c(T, S, z) = A + BT + CT^2 + DT^3 + E(S - 35) + Fz + Gz^2 + HT(S - 35) + JTz^3 \quad (1)$$

式中: $c(T, S, z)$ 是声波信号的传播速度, 与海水介质的温度 T 、盐度 S 和被测平面的深度 z 有关; A, B, C, D, E, F, G, H 和 J 是声速公式中计算系数, 其值文献^[10]已列出。

在实际海底热液口原位声学测温中, 测温装置所在的海域平面, 海水的盐度 S 与测量平面的深度 z 均可直接测量得到, 此时海水温度直接影响着声波信号传播速度^[7]。式(1)可以简化为:

$$C(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (2)$$

海底热液口温度场原位声学测量方法: 在图 1 所示的海底热液口被测平面上, 四周均匀布置 $T1, T2, T3, \dots, T16$

水声换能器(能独立地发送和接收声信号)。当 $T1$ 发射声波信号时, 其余水声换能器 ($T2, T3, \dots, T16$) 接收声波信号, 数据采集系统采集与处理所有的声信号, 并进行互相关时间延迟估算。声源自动切换电路^[15]切换至 $T2$ 发射声波信号, $T1$ 与 $T3, T4, \dots, T16$ 水声换能器接收声信号, 重复上述过程, 直至 16 个水声换能器都发射过声波信号。计算出被测平面上每条声传播路径上的声波速度, 再利用式(2)中温度与声速的关系, 反演拟合出海底热液口被测平面的二维温度场分布^[1, 6-7], 实现海底热液口温度场原位声学测量。

2 海底非均匀温度场中声波传播路径研究

发送水声换能器 a 发出的声波信号沿着一定的声波传播路径(长度设为 L)到达接收水声换能器 b , 其微分可表示为:

$$dL = \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{1/2} dx \quad (3)$$

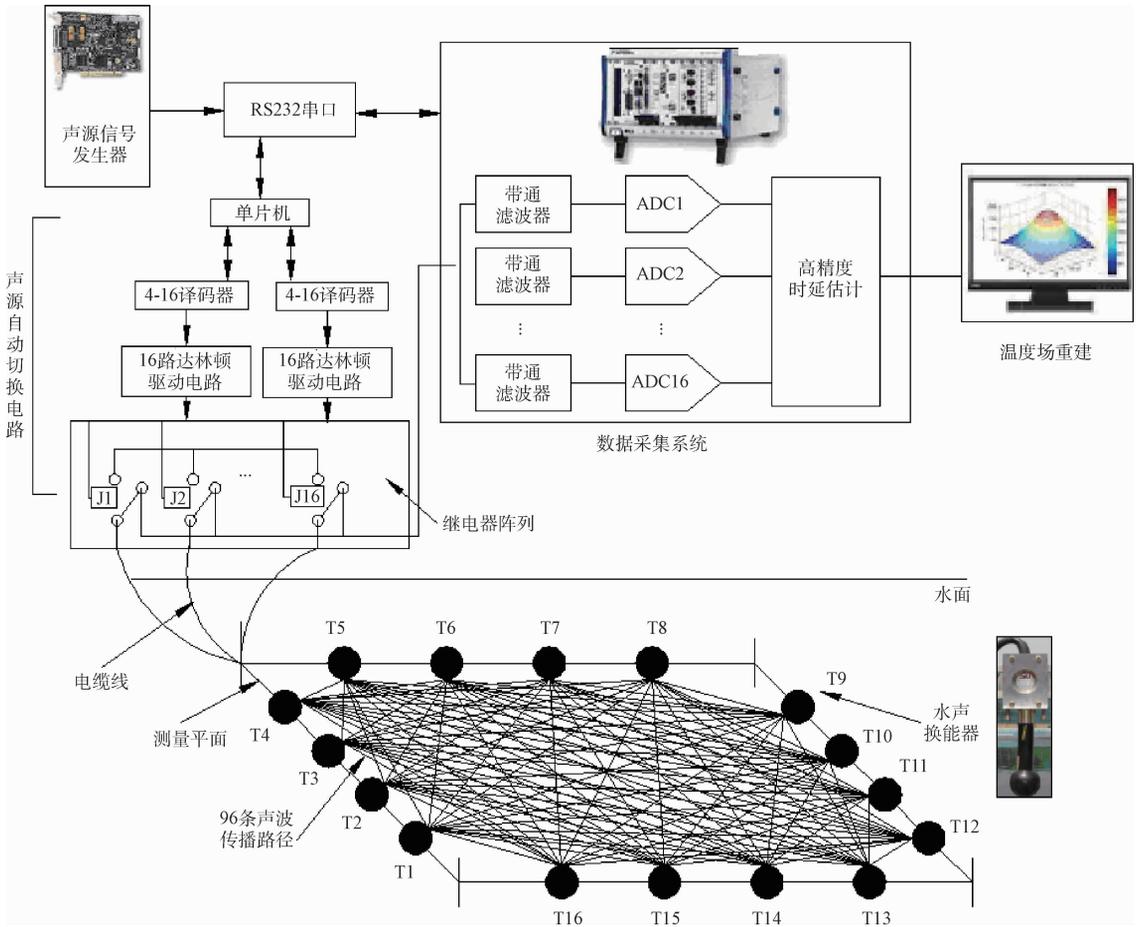


图 1 海底热液口原位声学测温示意图

在热液口二维非均匀温度场中, 声波信号由点 a 到达点 b 的传播时间为:

$$t = \int_a^b \frac{dL}{dc} = \int_a^b \frac{\sqrt{1 + y'^2}}{a + bT + cT^2 + dT^3} dx \quad (4)$$

由 Fermat 原理可知,声波信号传播路径 $y = y(x)$ 的泛函积分为^[6]:

$$t[y(x)] = \int_a^b F(x, y, y') dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{a+bT(x,y)+cT(x,y)^2+dT(x,y)^3} dx \quad (5)$$

利用广义数学变分法使泛函 $t[y(x)]$ 取极值,有:

$$\int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y'} \right) \eta dx = 0 \quad (6)$$

式(6)对于任意函数 $\eta(x)$ 都成立,则有欧拉-拉格朗日方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) = 0 \quad (7)$$

将 $F(x, y, y')$ 代入式(7),得到海底热液口非均匀二维温度场中声波路径满足的微分方程为^[11]:

$$y'' = \frac{(1+y'^2)(b+2cT+3dT^2)}{a+bT+cT^2+dT^3}$$

$$\left[y' \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right] \quad (8)$$

式中: $y' = dy/dx, y'' = d^2y/dx^2$ 。

由于声波信号的起点和终点已知,方程的边界条件可设为^[6]:

$$\begin{cases} y_a = y(x) | x = x_a \\ y_b = y(x) | x = x_b \end{cases} \quad (9)$$

4 声波传播路径仿真研究

假设海底热液口的温度场是单峰对称温度分布,其数学函数表达式为:

$$T(x, y) = 19 + 21e^{-5[(x-0.75)^2 + (y-0.75)^2]} \quad (10)$$

该温度场的温度分布图和等温图分别如图 2 和 3 所示。

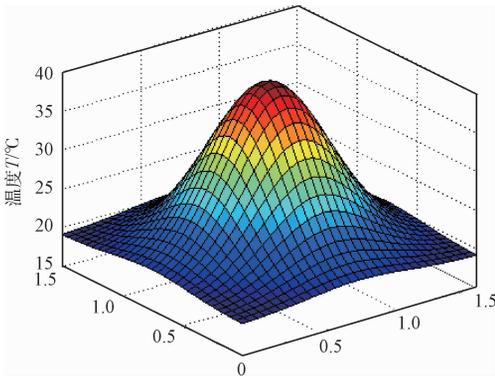


图 2 单峰对称温度场分布

为了模拟声波信号受温度场影响的具体传播路径,选用 COMSOL Multiphysics 软件计算,模式为泛用型—稳态分析。则选择的微分方程的一般格式为:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = F \quad (11)$$

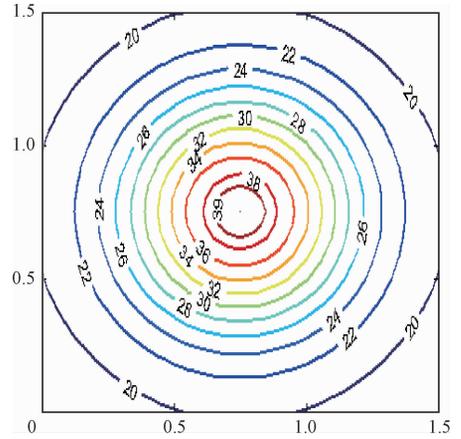


图 3 单峰对称温度场等温线

式中: u 为因变量, t 为自变量, e_a 为质量系数, d_a 为阻尼/质量系数, Γ 为通量向量, F 为源项。

将二维温度场 $T(x, y)$ 的表达式(10)代入式(8),并进一步简化并转换成式(11)格式,利用 COMSOL Multiphysics 软件进行声波传播路径的数值求解,16 个发射水声换能器发出的声波路径如图 4 所示。

由图 4 可知,声源信号到达和单峰温度场对称的接收点之间的声波信号传播路径为直线。在该直线路径两侧,声波路径由高温区向低温区弯曲,弯曲程度随着声波出射方向和直线路径间夹角的增大而增加,成对称发散状。

在海底实际温度场重建时,只能通过水声换能器测量得到各条声波传播路径的时间值,而实际的温度场是待求的,并不已知。本文可采用以下迭代方法逐渐逼近得到精确的实际温度场。

- 1) 假设声波信号沿直线传播,利用总体最小二乘法确定最初的近似温度场;
- 2) 在步骤 1) 中近似温度场中,求解出声波传播路径;
- 3) 用步骤 2) 中所得结果,进行声波路径弯曲补偿计算,再利用总体最小二乘法确定新的近似温度场。
- 4) 步骤 2) 和 3) 重复进行,直到重建出的温度场达到事先设定的精度。

5 实验研究

本文在云南省龙陵县境内的茄子山水库进行了相关实验,该水库有天然湖底热泉。实验小组采用如图 5 所示的装置,测量平面范围是 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,四周均匀布置 16 个水声换能器,采用美国国家仪器公司(NI)的 PXI-5402 任意函数信号发射卡驱动水声换能器发声,用 PXI-6133 十六通道同步采样数据采集卡采集信号,采样频率是 500 kHz、每通道的采样点数是 500 K、信号的起始频率是 18 kHz、终止频率是 23 kHz、扫频周期是 0.1 s。将实际测量的 8 组数据运用互相关分析得出声波飞渡时间(TOF)值。

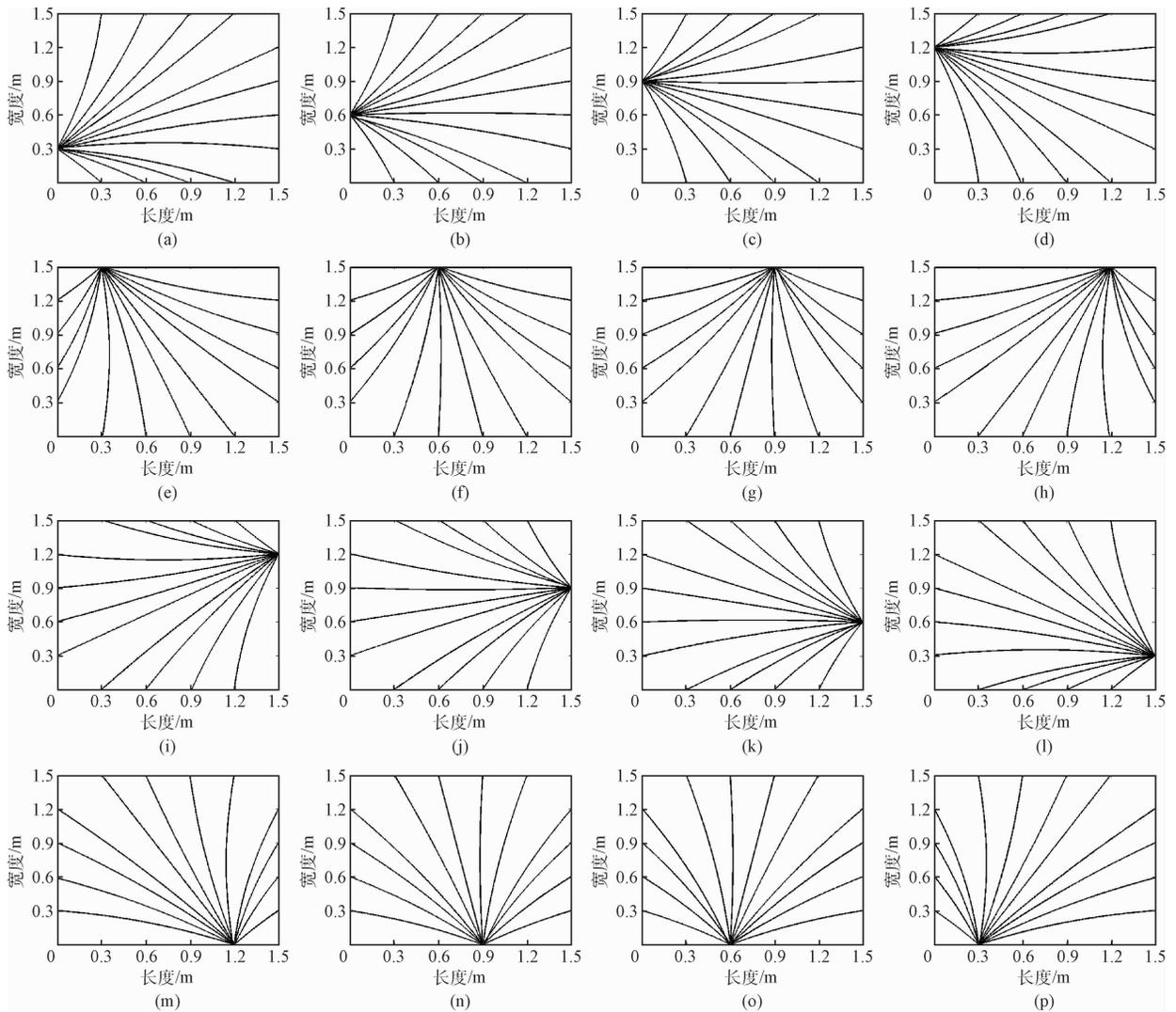


图 4 非均匀模型温度场中声波折射传播路径

为方便下文表述,则将方法 A 记为直接基于总体最小二乘法重建温度场(声波路径按直线处理);方法 B 记为考虑声波折射补偿后,再利用总体最小二乘法重建温度场。

重建温度场时随机的选用了第 7 组 TOF 值,分别采用方法 A 和方法 B 进行温度场重建。拟合出的温度场分布和等温线图分别如图 6 和 7 所示。

6 结果分析

从图 6(a)和图 7(a)可得出,运用方法 A 重建出的温度场最低温度为 17 °C,最高温度为 43.6 °C,呈单峰形状,整个温度场分布不平滑,四周边界重建出的温度分布抖动较大,四角区域的温度有畸变;从图 6(b)和图 7(b)可得出,运用方法 B 重建出的温度场单峰效果明显,最低温度为 18.1 °C,最高温度为 44.0 °C,四周边界温度分布较平滑,虽然四角区域的温度有畸变,但比方法 A 的畸变程度要小。

为了进一步验证水下声学测温的精确性,将水声换能

器测量平面划分成 8×8 共 64 个网格,如图 8 所示。在实验时,用热电偶阵列实际测得了(图 8)第 3、8、18、29、33、39、44、57 和 63 个网格的温度值,将其与 4 种方法分别重建出的温度进行比较,结果如表 1 所示。利用 A、B 两种方法重建出的温度场,3 种误差结果如表 2 所示。

表 1 网格温度值比较 (°C)

网格编号	热电偶测量值	方法 A	方法 B
3	20	25.0	16.8
8	20	36.2	18.8
18	25	27.0	25.3
29	20	23.1	20.9
33	20	22.6	19.0
39	45	43.6	44.0
44	20	23.3	20.6
57	20	18.5	21.1
63	20	45.0	25.0

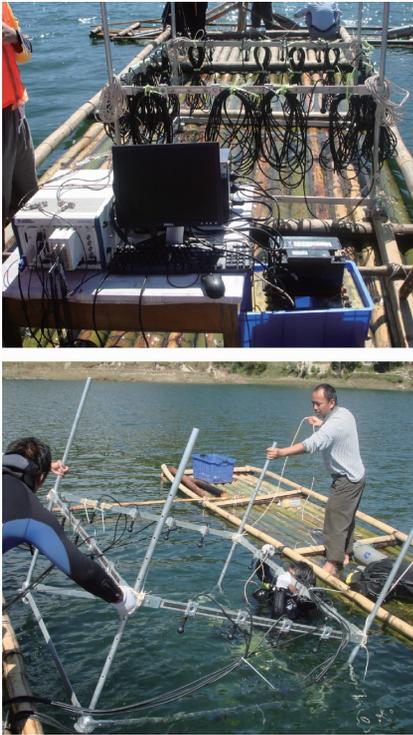


图5 声学原位测温试验装置

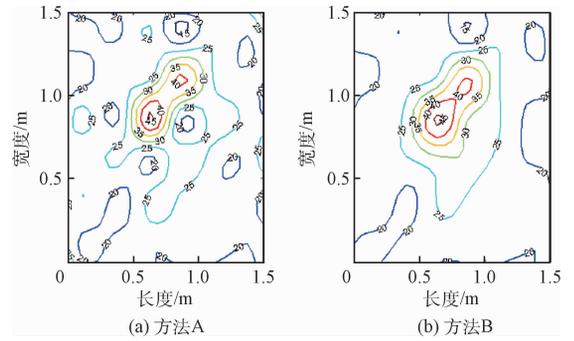


图7 重建出的温度场等温线

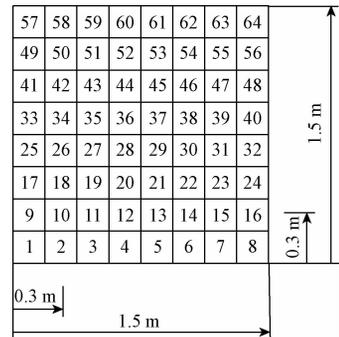


图8 测量平面划分成8×8共64个网格

表2 误差分析表

重建方法	最大绝对 误差/°C	最大相对 误差/%	均方根 误差/%
方法A	30.0	2.1	1.45
方法B	2.5	0.76	0.45

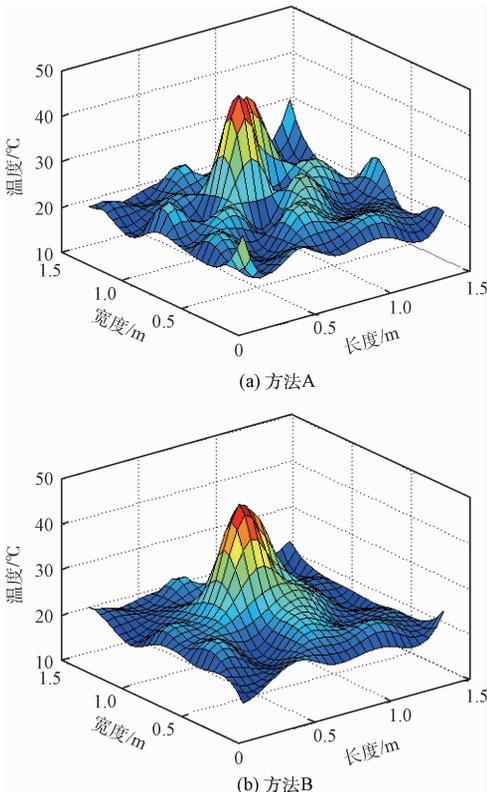


图6 重建出的温度场分布

7 结 论

在云南省龙陵县境内的茄子山水库的湖底热泉温度场重建试验中,本文成功的还原出了声波路径弯曲补偿前后的湖底热泉口二维温度场分布,并进行了最大绝对误差、最大相对误差和均方根误差分析,结果表明声波路径弯曲补偿后重建出的温度值,与实验中采用热电偶测得的温度值相吻合。因此,进行声波路径弯曲补偿,可提高海底热液口温度场声学测量的精确性。

参考文献

- [1] 蔡勇,方辉,金涛,等. 湖底热泉声学测温控制系统的研究[J]. 机电工程, 2014(2):28-32.
- [2] 李怀明,翟世奎,于增慧,等. 海底热液硫化物矿体内部流体混合过程的数值模拟:以大西洋TAG热液活动区为例[J]. 海洋学报:中文版, 2009, 30(5): 52-61.
- [3] 曾湘,邵宗泽. 深海热液区微生物矿化过程的功能

- 群和分子机制[J]. 微生物学通报, 2017, 44(4): 890-901.
- [4] FAN W, CHEN Y, PAN H C, et al. Experimental study on underwater acoustic imaging of 2-D temperature distribution around hot springs on floor of Lake Qiezishan, China[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, doi: 10. 1016/j. expthermflusci. 2010. 06. 005.
- [5] PAN H C, CHEN Y, MAO J, et al. Progress in developing a device for measuring heat flux from the hydrothermal vent in deep ocean using acoustic method [C]. Proceedings of the Oceans MTS/IEEE Quebec Conference & Exhibition, 2008.
- [6] 樊炜. 海底热液口温度场声学测量技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [7] 蔡勇, 潘宏, 周艳, 等. 海底热液口温度场高精度声学测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 649-654.
- [8] 毛洁, 吴友凤, 樊炜, 等. 声学法深海热液温度场测量及重建算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2339-2344.
- [9] 吴友凤, 毛洁, 樊炜, 等. 深海热液温度场测量重建算法比较[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2010, 40(8): 136-140.
- [10] 张祝军, 潘宏, 蔡勇, 等. 海底热液温度场声学测量系统的初步研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 1031-1037.
- [11] 安连锁, 宋志强, 姜根山, 等. 考虑声波折射的声学锅炉温度场测量技术的研究[J]. 动力工程, 2009, 25(3): 378-381.
- [12] 颜华, 何爱娜, 王晓宁, 等. 三维温度梯度场中本征声线轨迹的求取[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(2): 185-189.
- [13] 李志勇, 沈国清. 声学测温技术在电站锅炉中的应用研究[J]. 电力安全技术, 2017, 19(4): 35-38.
- [14] 杜富瑞, 张民, 施旭东, 等. 基于声波传播路径模拟的温度场重建算法研究[J]. 计算机与现代化, 2011(9): 22-25.
- [15] 李探元, 张效民, 杨勃锋, 等. 基于 MSP430 的水声值更引信的设计[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(7): 72-74.

作者简介

蔡勇, 1985 年出生, 工学硕士, 工程师, 主要从事海洋机电装备的研究。

E-mail: caiyong888@163.com