

# 声学法深海热液速度场测量重建算法研究

白燕<sup>1</sup>, 毛洁<sup>1</sup>, 樊炜<sup>1</sup>, 潘华辰<sup>1</sup>, 刘云峰<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学 机械电子工程研究所, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032)

**摘要:** 介绍了利用声学法测量深海热液速度场的基本原理。利用往返飞渡时间差与流场速度的关系, 应用反问题求解技术重建测量区域的速度场。应用最小二乘法对两种典型的热液口速度场模型进行了仿真重建, 分析了换能器数量、实验测量误差以及换能器的布放对重建结果的影响, 并对重建结果进行了流量分析。仿真重建的绝对误差、相对误差以及流量分析结果表明, 最小二乘法具有较高重建精度, 增加声学换能器及细化网格可提高重建精度, 换能器对称分布时具有最优重建结果。最后对声学法深海热液速度场测量系统进行了介绍和说明。深海热液速度场的测量重建可为热液热通量的测量奠定基础。

**关键词:** 热液; 速度场; 声波; 重建算法; 最小二乘法

中图分类号: TB52 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2011)03-0042-08

深海热液口热通量的测量对海洋科学研究有重要意义。对热液流量集中的热液口热通量的测量成为研究洋壳散热量、建立大洋环流模型、研究它对临近海域海洋物理特性影响等科学问题的一个重要的组成部分。热液的速度分布或流量是对热液口热通量测量的一部分, 因此, 热液速度场的测量是海洋科学研究的一项重要内容<sup>[1-2]</sup>。

传统的热液流速测量方法有叶片式流量计、涡轮式流量计, 但在长期测量中易被污染; 亦有对热液中粒子和漩涡的摄像跟踪测试法, 但难以实现自主长期测量<sup>[3]</sup>。而声学法不仅能对温度场和速度场同时测量得到深海热液口的热通量, 而且具有非接触、原位监测等优势, 在深海热液研究中具有广阔的前景。目前市场上已有一些成熟的产品可用于测量海流, 如声学多普勒流速剖面仪(ADCP)<sup>[4]</sup>, 但其只能测量到某个面的速度, 而不能同时实现整个温度场和速度场的长期测量。热液口速度场声学探测仪相对于上述产品而言, 可以实现同时对温度场和速度场的测量从而应用到热液口热通量的测量。

声波在流体介质中的传播, 会受到介质温度场和流速的影响, 介质温度越高, 声传播速度越大, 介质温度分布不均将导致其对声传播折射率的变化, 从而引起声波传播路径的弯曲; 介质自身的流速将直接叠加在声波的传播速度上, 使其发生相应的变化。声波法测量一定流动场内介质的温度和速度场

正是应用了这一声学特性。

利用声波的特性测量容器内流体的流动速度场和温度场, 国际上早在 20 世纪 70 年代开始开展这方面的研究工作。美国 Mayo 医学院(现 Mayo foundation 大学)的 Johnson 等<sup>[5]</sup>讨论了通过声波发射测量获得三维流体温度场和速度场的方法。Braun<sup>[6]</sup>比较详细地讨论了一种计算机层析法(CT 法)重建矢量场的方法。Green<sup>[7]</sup>对用声波法测量炉膛内的二维速度场进行了初步的研究。国内的李言钦、周怀春<sup>[8-10]</sup>等研究了声波法测量炉膛二维速度场, 取得了良好的效果。

本文利用声学法对深海热液速度场进行测量以及用最小二乘法重建速度场。通过多条路径的声波发射、接收器获得声波在测量区域的飞渡时间, 再利用飞渡时间差与流场速度的关系应用反问题求解技术重建测量区域的速度场。文中给出了重建速度场的三维显示图和等速线图, 并对结果进行流量分析与比较。

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-12-31

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA09Z213); 浙江省科技计划钱江人才计划项目(2008R10020); 国家自然科学基金重点项目(40637037); 杭州电子科技大学浙江省重中之重学科“海洋机电装备技术”开放基金

作者简介: 白燕(1985-), 女, 山西吕梁人, 杭州电子科技大学机械工程学院硕士研究生, 电话: 13515719289, E-mail: by-swallow@163.com; 毛洁, 通信作者, 电话: 13858040011, E-mail: maojie@gmail.com

# 1 速度场声学法测量原理<sup>[11]</sup>

设声波发射点  $A$  到接受点  $B$  距离为  $L$ , 则在静止水中声波飞渡时间  $\Delta t_{AB}$  为

$$\Delta t_{AB} = \frac{L}{c_{AB}} \quad (1)$$

其中  $c_{AB}$  是传播路径  $AB$  上的平均声速。如果有传播方向的流体速度分量存在,

$$\Delta t_{AB} = \frac{L}{c_{AB} + v_{AB}} \quad (2)$$

其中  $v_{AB}$  为沿路径  $AB$  的流体速度分量。

当声波发射接收点调换时, 从  $B$  点到  $A$  点的飞渡时间为

$$\Delta t_{BA} = \frac{L}{c_{AB} - v_{AB}} \quad (3)$$

如果将两飞渡时间相减:

$$\Delta t_{AB} - \Delta t_{BA} = \frac{L}{c_{AB} + v_{AB}} - \frac{L}{c_{AB} - v_{AB}} = \frac{-2Lv_{AB}}{c_{AB}^2 - v_{AB}^2} \quad (4)$$

由于测量对象  $v_{AB}$  比  $c$  小 3 个数量级以上<sup>[12-14]</sup>, 分母中  $v_{AB}^2$  项可忽略, 可得出:

$$\Delta t_{\text{正反差}} = \Delta t_{AB} - \Delta t_{BA} = \frac{-2Lv_{AB}}{c_{AB}^2} \quad (5)$$

设热液口垂直向上坐标为  $z$ , 温度测量控制面取  $xy$  横截面。由于热液流动主要是由密度差形成的浮力流, 可以假设流动基本上是  $z$  向的。如果在  $z$  向设立两层以上的温度测量控制面, 并在相邻两层的传感器之间收发声波, 测出其飞渡时间。设跨层声波飞渡路径与  $z$  向夹角为  $\theta$ , 同时流动方向基本为  $z$  向, 则有

$$w = v / \cos \theta \quad (6)$$

其中,  $w$  为流向速度,  $v$  为沿声波飞渡路径方向速度。其示意图如图 1

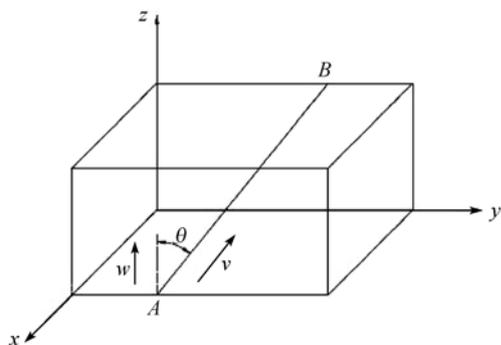


图 1 测量流速原理

Fig. 1 Principle of the measurement of velocity

由公式(5)可得

$$\Delta t_{\text{正反差}} = \Delta t_{AB} - \Delta t_{BA} = \frac{-2Lw_{AB} \cos \theta}{c_{AB}^2} \quad (7)$$

其中  $w_{AB}$  为飞渡路径  $AB$  上的平均垂向速度。利用合适的层析数据还原技术, 就可以得出两个温度测量控制面之间的 2 维平均垂向速度场。由此可以得出流体流量。

# 2 基于最小二乘法的速度场重建及其模型

## 2.1 重建原理

对于三维速度分布的测量, 将测量的平面区域划分为  $n$  个网格, 各个网格中热液的平均速度分别为  $W_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。在测量区上下两层边界分别布置多个声波发射和接收装置。对于距形测量区考虑同侧上声波只在网格外围边界传递, 因此去除同侧声波路径, 设最后形成  $m$  条声波传播路径。一种声学测量路径及测量区域网格划分如图 2 所示, 虚线为划分的网格, 测量区域中的实线为声学测量路径, 图 3 中  $n=16, m=18$ 。

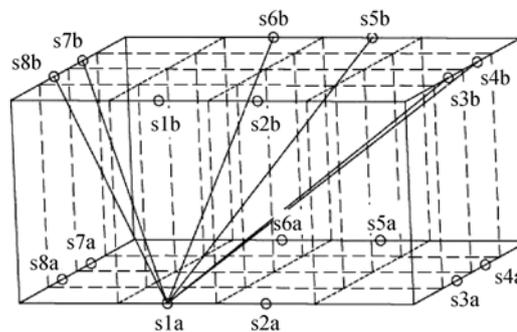


图 2 声学测量路径及测量区域网格划分

Fig. 2 Acoustic measurement paths and mesh

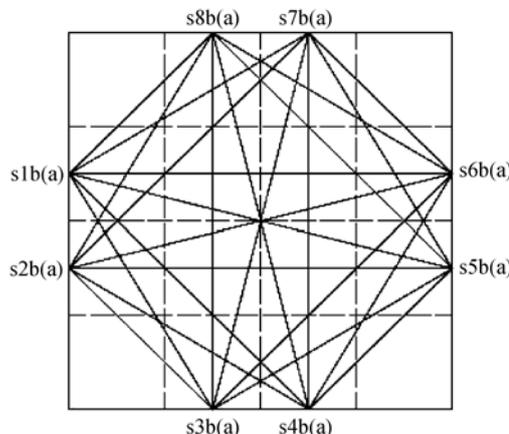


图 3 声学测量路径及测量区域网格划分的俯视图

Fig. 3 Top view of acoustic measurement paths and mesh

为了便于观察和计算, 本文给出声学测量路径及测量区域网格划分的俯视图, 如图 3。

用  $L_{ki}$  表示第  $k$  条路径通过第  $i$  个网格的长度,  $w_i$  表示第  $i$  个网格内声波平均垂向速度, 由方程(7), 声波沿第  $k(k=1, 2, \dots, m)$  条路径的飞渡时间差  $\Delta t$  可表示为:

$$\Delta t_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} w_i \quad (8)$$

$\Delta t_k$  与声波传播时间的实测值  $\Delta \tau_k$  之差为:

$$\varepsilon_k = \Delta \tau_k - \Delta t_k = \Delta \tau_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} w_i \quad (9)$$

最小二乘法是令方程式(9)的平方和最小, 令

$$\frac{\partial}{\partial w_i} \sum_{k=1}^m \left( \Delta \tau_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} w_i \right)^2 = 0, \text{ 可得到方程:}$$

$$A^T \cdot A \cdot W = A^T \cdot t \quad (10)$$

其中  $W = (w_1, \dots, w_n)^T$ ,  $t = (\Delta t_1, \dots, \Delta t_m)^T$ ,  $A$  为  $m \times n$  矩阵,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中,  $a_{ki} = -\frac{2 \cos \theta_{ki}}{c^2} L_{ki}$ ,  $\theta_{ki}$  为第  $i$  个网格内第  $k$  条路径与  $z$  方向的夹角,  $c$  为声速。  $\Delta t_n = \int -\frac{2w \cos \theta}{c^2} dl$ ,  $w$  为声波飞渡路径上垂向速度,  $dl$  为声波传播路径的微分。

为保证方程(10)有解, 应保证  $m \geq n$ , 即声波路径数必须大于或等于空间划分的网格数。同时, 任意两条路径经过的网格至少有一个不同, 每一个网格至少有一条路径经过, 以确保每个网格的速度信息在方程组中至少出现一次。

方程(10)的解为:

$$W = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot t \quad (12)$$

这样, 便求出了每一网格的空间特性, 即声波在该网格内传播时的垂向速度, 并作为该区域几何中心点的速度, 再利用插值算法即可得到整个速度场。

## 2.2 流量分析

本文中流量定义为:

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i A_i \quad (13)$$

其中,  $w_i$  表示第  $i$  个网格内声波平均垂向速度;  $A_i$  表示第  $i$  个网格的面积;  $n$  表示划分的网格数。绝对误差为重建速度场流量与模型速度场流量之差的绝对值; 相对误差为重建速度场流量与模型速度场流量之差与模型速度场流量的比值。

## 3 速度场重建仿真

根据文献, 已知声波在深海中的传播速度与静压力、温度、盐度的公式<sup>[15]</sup>如下:

$$C(D, S, t) = C(0, S, t) + (16.23 + 0.253t)D + (0.213 - 0.1)D^2 + [0.016 + 0.0002(S - 35)](S - 35)tD \quad (14)$$

其中

$$C(0, S, t) = 1449.05 + 45.7t - 5.21t^2 + 0.23t^3 + (1.333 - 0.216t + 0.009t^2)(S - 35) \quad (15)$$

$C$  是声波在某种海水介质中的速度, 单位为  $m/s$ ;  $D$  为被测平面的深度, 单位为  $km$ ;  $t = T/10$ , 其中  $T$  为温度, 单位为  $^{\circ}C$ ;  $S$  为含盐量。

假定测量区在水下 1 000 m 处, 即深度  $D = 1 km$ ,  $S = 45$ , 则

$$C = 0.23t^3 - 5.12t^2 + 44.54t + 1498.397 \quad (16)$$

取  $t = 20^{\circ}C$ 。取截面为  $2 m \times 2 m$  的矩形区域作为测量区域。

根据文献[12-14], 热液喷口速度最小值为  $0.01 m/s$ , 最大值为  $4 m/s$ , 且其喷射状态为射流。为了更好地研究与讨论影响速度场重建的因素, 本文中分别对速度梯度较小、较大两种速度场模型进行仿真重建, 同时对增加声学换能器和细化网格的情形进行讨论分析, 其中, 特别针对速度梯度较小的模型进行了加以时间误差和换能器不均匀布放的讨论。具体分析过程如下。

### 3.1 速度梯度较小的速度场模型

假定有速度梯度较小的速度场模型, 其速度场分布函数为:

$$w = 4 \sin(0.5\pi x) \sin(0.5\pi y) \quad (17)$$

重建速度场采用如图 2 所示的每边 2 个声学换能器, 共 16 个声学测量点对称分布, 48 条测量路径的声学测量模型。测量区域均分为  $4 \times 4$  共 16 个网格。模型速度场三维图和等速线图分别如图 4a 和图 5a 所示, 重建速度场的三维图和等速线图分别如图 4b 和图 5b 所示。由图 4, 5 可见, 重建速度场与模型速度场形状

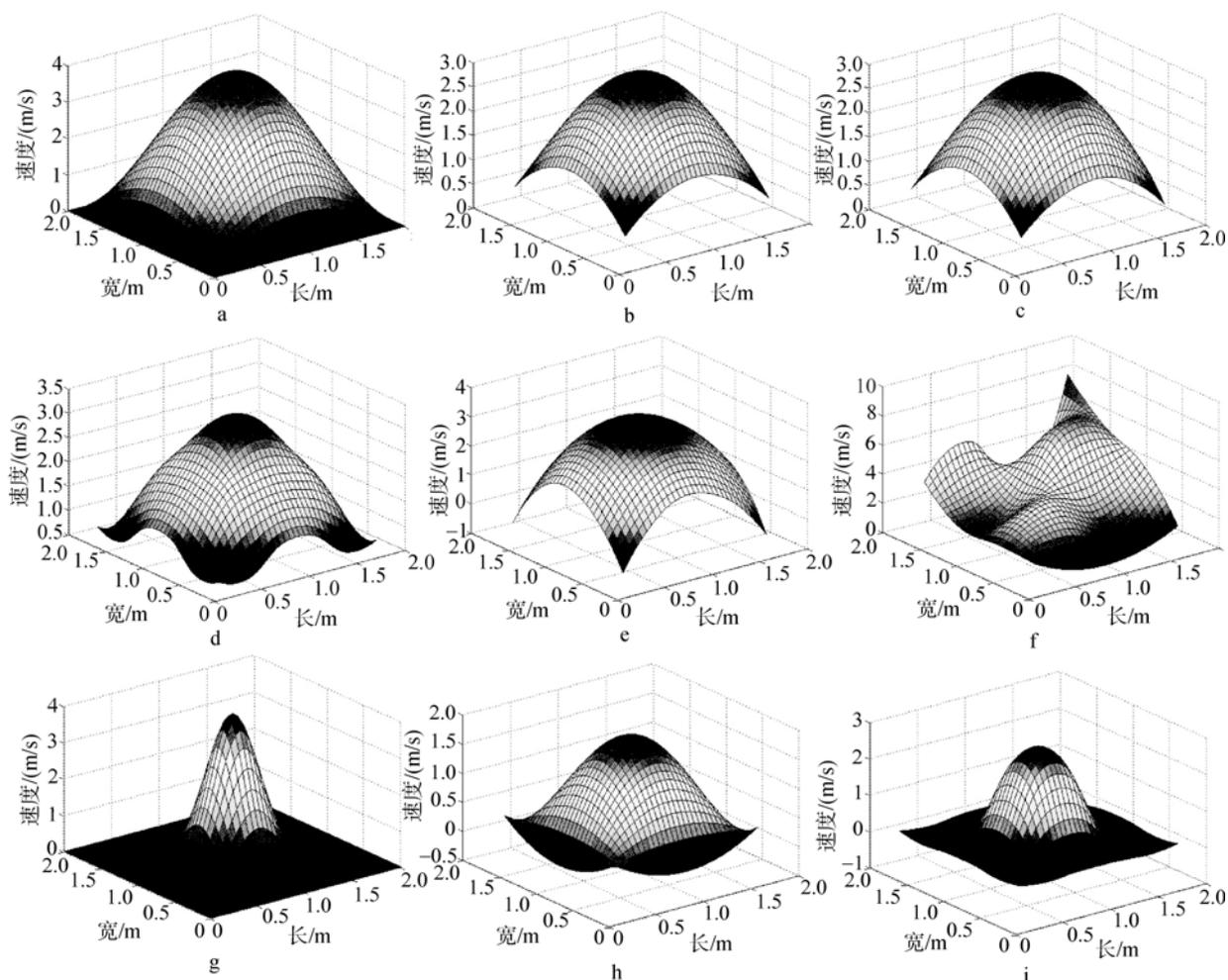


图 4 速度场三维显示图

Fig. 4 Three-dimensional display of velocity fields

保持不变, 从定性分析的角度来说, 其结果良好, 说明重建结果能够基本反映热液速度场状况。模型速度场流量为  $6.4851 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 重建速度场流量为  $5.5013 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 绝对误差为  $0.9833 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差为  $15.17\%$ 。定量分析角度来看, 重建精度欠佳。

在实际测量中, 所测数据与真实的声波传递时间数据总是有一定误差的, 所以随机给飞渡时间差  $\Delta t$  加上  $\pm 2\%$  的误差时, 基于 48 路径 16 网格的还原结果的三维图和等速线图分别如图 4c 和图 5c 所示。可以看出, 结果与无误差之时的重建速度场基本一致, 可见存在一定测量误差的重建速度场也能够大致反映出速度场的情况。重建速度场流量为  $5.4815 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 绝对误差为  $1.0036 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差为  $15.48\%$ 。

为了得到更多的测量数据, 以便研究换能器数量对速度场重建精度的影响, 我们加密声学换能器至每边 4 个, 共 32 个声学测量点对称分布, 共形成

192 条声学测量路径, 测量区域分为  $6 \times 6$  共 36 个网格。重建速度场三维图和等速线图分别如图 4d 和图 5d 所示。由图 4, 5 可见, 重建速度场形状进一步趋于模型速度场, 重建精度提高。模型速度场流量为  $6.4851 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 重建速度场流量为  $5.8237 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 绝对误差为  $0.6614 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差为  $10.20\%$ 。从定量方面亦可见增加换能器细化网格能提高重建精度。

为了研究换能器布放位置对重建精度的影响, 以优化换能器位置, 采取对上下两个平面的声学换能器采取不均匀分布, 每边 2 个, 共 16 个声学测量点不均匀分布, 如图 6a 所示。换能器坐标为:  $(0.25, 0, 0)$ ,  $(0.75, 0, 0)$ ,  $(2, 0.25, 0)$ ,  $(2, 0.75, 0)$ ,  $(1.75, 2, 0)$ ,  $(1.25, 2, 0)$ ,  $(0, 1.75, 0)$ ,  $(0, 1.25, 0)$ ,  $(0.25, 0, 1)$ ,  $(0.75, 0, 1)$ ,  $(2, 0.25, 1)$ ,  $(2, 0.75, 1)$ ,  $(1.75, 2, 1)$ ,  $(1.25, 2, 1)$ ,  $(0, 1.75, 1)$ ,  $(0, 1.25, 1)$ 。共形成 48 条测量路径, 测量区域仍划分为  $4 \times 4$  共 16 个网格。其重建速度场的三维图和等速线图分别如图 4e 和图 5e 所示。由图 4, 5

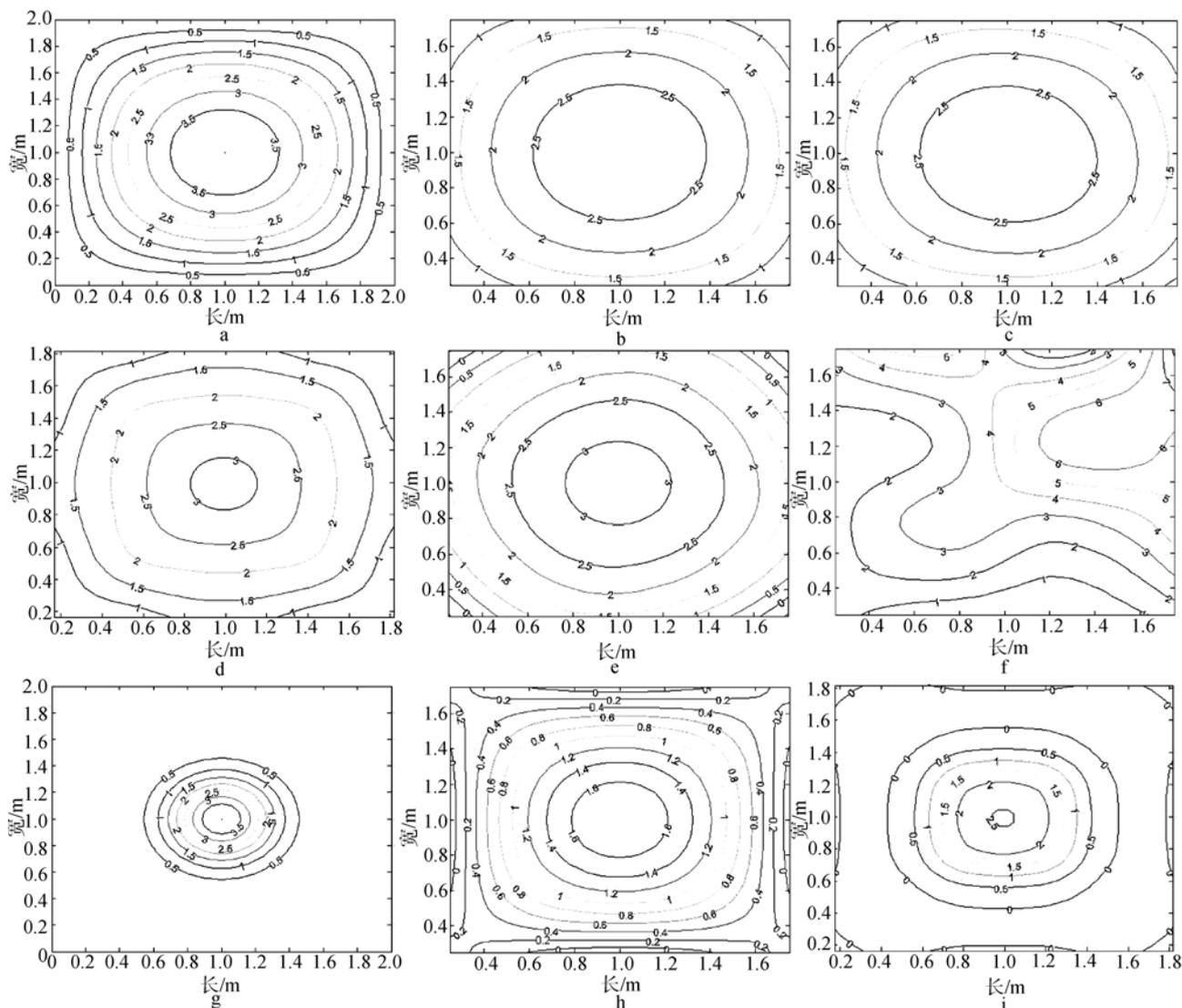


图5 速度场等速线(m/s)图  
Fig. 5 Contour display (m/s) of velocity fields

可见,重建速度场形状虽然与模型速度场形状大致一致,但精度较差。重建速度场流量为  $4.6974 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 绝对误差为  $1.7876 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差为 27.57%。可见此种布放在定量角度精度较差。

当下平面的换能器采取均匀分布,上平面采取大尺度的不均匀分布,每边 2 个,共 16 个声学测量点不均匀分布,如图 6b 所示。换能器坐标为: (0.25, 0, 0), (0.75, 0, 0), (2, 0.25, 0), (2, 0.75, 0), (1.75, 2, 0), (1.25, 2, 0), (0, 1.75, 0), (0, 1.25, 0), (1.35, 0, 1), (1.8, 0, 1), (2, 0.15, 1), (2, 1.4, 1), (1.7, 2, 1), (0.3, 2, 1), (0, 0.6, 1), (0, 0.3, 1)。共形成 48 条测量路径,测量区域仍划分为  $4 \times 4$  共 16 个网格。其重建速度场的三维图和等速线图分别如图 4f 和图 5f 所示。由图 4, 5 可见,重建速度场形状与模型速度场形状大相径庭,

精度极差。重建速度场流量为  $12.4395 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 绝对误差为  $5.9544 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差为 91.82%。可见此种布放在定性及定量角度皆很差。

### 3.2 速度梯度较大的速度场模型

假定另有一速度梯度较大的速度场模型,其速度场分布函数为:

$$w = 4e^{-\frac{(x-1)^2+(y-1)^2}{0.1}} \quad (18)$$

重建速度场采用如图 2 所示的每边 2 个声学换能器,共 16 个声学测量点对称分布,48 条测量路径的声学测量模型。测量区域均分为  $4 \times 4$  共 16 个网格。模型速度场三维图和等速线图分别如图 4g 和图 5g 所示,重建速度场的三维图和等速线图分别如图 4h 和

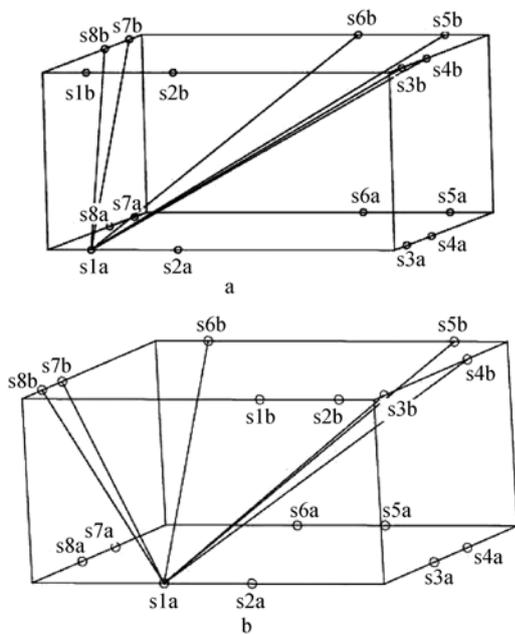


图 6 声波发射和接收装置不均匀布置

Fig. 6 Nonuniform arrangement of acoustic transmitters and receivers

图 5h 所示。由图 4, 5 可见, 重建速度场与模型速度场相比形状欠佳, 边界现象有些明显, 但精度良好。模型速度场流量为  $1.2566 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 重建速度场流量为  $1.4873 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 绝对误差为  $0.2307 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差为 18.36%。定量分析, 绝对误差减小, 精度依然欠佳。

为了研究此模型下换能器数量对速度场重建精度的影响, 我们加密声学换能器至每边 4 个, 共 32 个声学测量点对称分布, 共形成 192 条声学测量路径, 测量区域分为  $6 \times 6$  共 36 个网格。重建速度场三维图和等速线图分别如图 4i 和图 5i 所示。由图 4, 5 可见, 重建速度场形状已趋于模型速度场形状, 边界现象已经有所减缓, 且精度更高。模型速度场流量为  $1.2566 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 重建速度场流量为  $1.0375 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 绝对误差为  $0.2191 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差为 17.44%。增加换能器和细化网格在此种模型下的定量精度也提高。

## 4 实验系统

实验中使用了美国国家仪器的 PXI-5402 任意函数信号发射卡驱动水声换能器发声, 信号的采集是用美国国家仪器的 PXI-6133 八通道同步采样数据采集卡, 然后对采集到的数据进行存储并进行互相关时间延时计算。发射端和接收端的水声换能器都是采用 RHS-30 标准水听器。

系统主要包括水声换能器、机架、接水密件、

换能电缆、密封圈、驱动与前置放大腔、信号采集腔等。系统的基本工作原理为: 首先由主机上的声学测速软件系统控制信号发射卡发送出电信号, 此信号连接到切换电路板上。与此同时, 主机上的声学测速软件系统向同步数据采集卡、切换电路板输出高电平。此高电平分别用来驱动同步数据采集卡开始采集数据, 并启动切换电路板上的一个继电器将发射卡的发射信号与水声换能器连通, 驱动水声换能器发出声波信号。其他的水声换能器将接收到的声波信号转换为电信号, 经过滤波调理被数据采集卡同步采集, 再把采集到的数据通过声学测速软件系统的存储模块储存在采集系统的硬盘上, 最后经过声波飞渡时间计算和速度场重建算法还原出速度场分布并且输出可视化图像。实验台架如图 7 所示。



图 7 实验台架

Fig. 7 Experimental platform

由于课题进度以及条件限制, 速度场测量实验还未进行, 但温度场测量实验进展顺利<sup>[16]</sup>, 证明此套实验系统对速度场测量的可行性, 以及广阔应用前景。

## 5 结论

本文采用最小二乘法对深海热液口的速度场进行重建仿真。根据已有的文献数据, 假设了在热液口可能出现的速度场模型, 并对之进行不同声学测量路径和网格划分的仿真重建。仿真结果表明, 增加声学换能器及细化网格可提高重建精度; 当测量时间存在 2% 的误差时, 对重建结果无明显影响; 当上下两层声学换能器均呈不均匀分布时, 对重建结果的影响比较小; 当下层的声学换能器采取均匀分布, 上层声学换能器采取大尺度的不均匀分布时, 对重

建结果影响较大。当模型函数为速度梯度较大的函数时,重建结果误差较小。根据对现代海底活动热液喷口的观测,热液喷口处的平均喷口直径为 $0.1\text{m}^{[17-18]}$ ,因此速度梯度较大的模型函数更具有实际意义。

不同研究者采用不同的经验公式和估算方法得到了热液流速、热通量等参数,但差别较大,甚至达到一至两个数量级,其主要原因在于对热液流运动的物理机制了解不够,尤其是热液流中气相、固相和液相之间的影响机制<sup>[17]</sup>。应用声学法测量深海热液速度场,可实现长期、非接触、原位速度场监测,仍然具有研究的意义与可观的前景。接下来的工作将致力于如何减小误差以实现更精确的重建。

#### 参考文献:

- [1] Stein C A, Stein S. A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age[J]. *Nature*, 1992, 359: 123-129.
- [2] 奕锡武, 赵一阳, 秦蕴珊, 等. 热液系统输向大洋的热通量估算[J]. *海洋学报*, 2002, 24(6):59-66.
- [3] Sarrazin J, Rodier P, Tivey M K, et al. A dual sensor device to estimate fluid flow velocity at diffuse hydrothermal vents[J]. *Deep-Sea Research I*, 2009, 56: 2 605-2 074.
- [4] 宋志宏, 田淳. 声学多普勒流速剖面仪在长江口的应用[J]. *水文*, 1997, 6: 31-34.
- [5] Johnson S A, Greenleaf J F, Tanaka M, et al. Reconstructing three-dimensional temperature and fluid velocity vector fields from acoustic transmission measurements[J]. *ISA-Tran*, 1977, 16(3): 3-15.
- [6] Braun H, Hauck A. Tomographic Reconstruction of Vector Fields[J]. *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, 1991, 39(2): 464-471.
- [7] Green S F. Acoustic temperature & velocity measurement in combustion gases[C]//Tien C L, Carey V P, Ferrel J K. *Proceedings of the Eighth International Heat Transfer Conference*. San Francisco, California USA: Hemisphere Pub Corp, 1986: 555-560.
- [8] 李言钦, 周怀春, 何其伟. 采用声波法监测四角切圆流场二维分布特性的模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(11): 215-219.
- [9] 李言钦, 周怀春, 周红新. 声波法监测炉内二维速度场冷模实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(13): 117-122.
- [10] 李言钦, 周怀春. 声波法监测锅炉炉膛二维复杂空气动力场的模拟研究[J]. *动力工程*, 2004, 24(6): 836-844.
- [11] Sielschot H. Measurement of horizontal flow in a large scale furnace using acoustic vector tomography[J]. *Flow Meas Instrum*, 1997, 8(3/4): 191-197.
- [12] Marc B B, Kerszberg M, Gaill F, et al. A modeling approach of the influence of local hydrodynamic conditions on larval dispersal at hydrothermal vents[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2008, 255: 320-331.
- [13] Converse D R, Holland H D, Edmond J M. Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise(21°N): implications for the heat budget and the formation of massive sulfide deposits[J]. *Earth and Planet Science Letters*, 1984, 69: 187-191.
- [14] Fouquet Y, Auclai G, Cambon P, et al. Geological settings and mineralogical and geochemical investigations on sulfide deposits near 13°N on the East Pacific Rise[J]. *Marine Geology*, 1988, 84: 145-178.
- [15] Coppen A B. Simple equation for the speed of sound in Neptunian waters[J]. *Acoust Soc Am*, 1981, 69(3): 862-863.
- [16] 吴民忠, 樊炜, 毛洁, 等. 深海热液声学原位测温仪中的声源选择研究[J]. *自动化仪表*, 2010, 31(4): 5-7.
- [17] 夏建新, 韩凝, 任华堂. 深海热液活动环境场参数及模型分析[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6):48-54.
- [18] Butterfield D A, Seyfried W E J, Lilley M D. Composition and evolution of hydrothermal fluid[M]. Berlin: Dahlam University Press, 2003: 123-162.

# Reconstruction algorithm for acoustic measurement of velocity field of deep-sea hydrothermal vents

BAI Yan<sup>1</sup>, MAO Jie<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>1</sup>, PAN Hua-chen<sup>1</sup>, LIU Yun-feng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**Received:** Mar., 15, 2010

**Key words:** hydrothermal vents; velocity field; acoustic; reconstruction algorithm; least square method

**Abstract:** The basic theory of acoustic velocity field measurement in deep-sea hydrothermal vents was introduced. The time of flight (TOF) of acoustic signals through hydrothermal vents was dependent on temperature and velocity. The velocity field was reconstructed by inverse problem solving techniques based on the relationship between the round-trip TOF difference and velocity of flow. The reconstruction of velocity field using the least square method was presented. At the same time, flow flux of reconstruction results was analyzed. The results show that the least square method has good accuracy. Increase of the number of acoustic transducers and mesh density can improve the reconstruction accuracy effectively.

(本文编辑: 刘珊珊)

(上接第 22 页)

# Genetic diversity analyses of wild and cultured *Pseudobagrus ussuriensis* populations

XU Han-fu, HUANG He-zhong, FAN Wan-su, HE Hua-min, JIA Yi-he

(School of Medicine and Life Sciences, Medical College of Soochow University, Fisheries Research Institute of Soochow University, Suzhou 215123, China)

**Received:** Jun., 26, 2009

**Key words:** *Pseudobagrus ussuriensis*; wild population; cultured population; genetic diversity; SRAP

**Abstract:** The sequence-related amplified polymorphism (SRAP) molecular marker technique was used to compare genetic structures of three populations (one wild and two cultured) of *Pseudobagrus ussuriensis*. Samples of wild population were collected from Jiangsu Hongze Lake and the two cultured populations from Fisheries Research Institute of Huaian (F2 generation) and Suzhou Dongshan Aquatic Breeding Plants (F3 generation). Twelve pairs of SRAP primers were selected from 100 primer combinations. Two hundred and two amplified loci were obtained from the three populations, among which 130 were polymorphic. The percentage of polymorphic loci in the Hongze Lake (HL) population, Huaian populations (HA), Suzhou Dongshan populations (SZ) was 63.13%, 56.54% or 54.88%, respectively. The results indicated that genetic polymorphism decreased in two cultured populations. The Nei's gene diversity of three populations was 0.2641, 0.2546 or 0.2469, respectively; the Shannon's Information index of three populations was 0.4118, 0.4050 or 0.3861, respectively. The genetic distance between wild population and two cultured ones were 0.1730 and 0.1104, while the genetic distance between two cultured ones was 0.1087. The noticeable decrease in the number of rare loci and the increase in the number of homozygous recessive loci in the cultured population suggested a considerable loss of low frequency alleles in the cultured populations, which might have resulted from small effective population sizes during artificial seed production. In the future *P. ussuriensis* artificial propagation should be chosen to large sufficiently and representative parent groups to maintain the good traits to retain maximum genetic diversity.

(本文编辑: 梁德海)