

# 基于 MATLAB 分析热液羽状流探测数据的实践教学探索

陈升,包程康,周东辉,秦华伟

(杭州电子科技大学 机械工程学院海洋技术与装备研究中心,浙江 杭州 310018)

**摘要:**热液探测是现今我国大洋资源调查的主要内容之一。在海洋工程实践教学中,针对其特点,结合 MATLAB 软件,对数据处理方法进行程序设计,学生通过实践探索,一方面能深刻认识热液羽状流分布扩散特点,掌握热液探测数据的处理方法。另一方面激发学生的学习兴趣 and 积极性,培养学生的算法设计和编程能力,提高学生解决实际热液调查及相关海洋工程问题的能力,从而提升实践教学效果。

**关键词:**热液羽状流;matlab;数据处理;实践教学

**中图分类号:**G420

**文献标志码:**A

**文章编号:**1674-5884(2020)03-0068-06

MATLAB 是一款在工程实践和高校科研实验中得到广泛应用的软件,以数据处理和出图见长,主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中,为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案,并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言(如 C, FORTRAN)的编辑模式,代表了当今国际科学计算软件的先进水平<sup>[1,2]</sup>。

在海洋工程学科的课堂教学实践中,相关理论和技术较为抽象,主要表现在两个方面:一是海洋工程的真实环境距离学生较远,学生对于海洋及海洋工程的相关概念比较模糊,仅靠文字、图片和视频是难以形成完整的海洋工程学的知识体系。二是海洋工程涉及面广,涉及海洋科学、海洋技术、数学计算、机械、控制、材料等多学科的融合<sup>[3]</sup>。基于此,单一的理论讲解模式教学难以达

到课堂实践教学的目的,而且教学效果较差。如果能通过一些编程实验环节对实践教学进行有效的补充,将会对学生较好地掌握海洋工程相关知识体系具有非常大的帮助,并产生良好的课堂教学效果。

本文以“海洋探测技术与信息处理”课程中的“热液探测技术及数据处理”教学内容为例,结合 MATLAB 软件,对热液羽状流探测数据的处理方法进行探讨和程序设计。

## 1 热液探测及热液羽状流

海底热液活动是发源于活动板块边界和板块内部的在岩石圈层面的能量和物质交换过程,对认识整个地球内部岩浆活动、火山活动和构造运动都具有指示性意义,在当前深海科学研究中已占据重要地位<sup>[4-6]</sup>。海底热液活动引起的热液成矿作用促使海底成为一个待开发的矿产资源宝库,并逐步成为当前深海科学领域的研究热点。近年来,中国大洋协会在全球洋中脊开展了一系

收稿日期:20190504

基金项目:浙江省自然科学基金项目资助(LQ19D060008);杭州电子科技大学 2019 年研究生教育教学改革研究项目(JXGG2019YB003);国家海洋局海底科学重点实验室开放基金(20171122)

作者简介:陈升(1988-),女,浙江武义人,讲师,博士,主要从事海洋地球物理、热液探测研究。

列的硫化物勘探活动,并于2011年率先与国际海底管理局正式签署了《国际海底多金属硫化物矿区勘探合同》,获得了1万km<sup>2</sup>的勘探区域,使我国在海底多金属硫化物勘探走在了世界前列。此后,俄罗斯、韩国、法国、日本、德国、印度、波兰等国家先后申请并获得了硫化物矿区。

热液羽状流是洋中脊多金属硫化物的找矿标志之一,其分布范围往往比海底多金属硫化物广,且更易于探测,能有效定位海底热液喷口,从而找到海底多金属硫化物<sup>[7]</sup>。探测热液羽状流常用的调查方法有:(1)水文示踪<sup>[8]</sup>;(2)化学示踪<sup>[9]</sup>;(3)光学示踪<sup>[10]</sup>;(4)声学示踪<sup>[11]</sup>。

## 2 热液羽状流探测数据的特点

当前对海底热液活动研究的主要方法是采用探测海水温度、浊度、氧化还原电位、硫化氢、pH、甲烷、铁锰金属元素异常等手段,来实现对热液流体的定位和分布研究,从而锁定热液喷口。近年来我国在热液调查上的投入力度越来越大,发现了一系列的海底热液区。但在现场海洋调查中,在水文示踪和光学示踪方面,最常见的调查手段是通过 MAPR (Miniature Autonomous Plume Recorder) 传感器(加挂在深海拖体上)来探测热液羽状流的浊度和温度数据,进而分析水体异常特征。温度和浊度作为洋中脊热液羽状流在洋流底部活动的主要检测数据,也是寻找其所在位置的重要依据。

MAPR 在拖曳过程中受到波浪、海流、拖体位置等因素的影响,结合我国大洋调查的实际情况,影响 MAPR 数据质量的主要因素有如下几个方面:

1) 传感器与拖体、母船之间的位置偏差。拖体作业过程中,由于母船具有一定航行速度,搭载仪器的拖体太轻,加上风、海流等共同作用,位于母船后方的拖体无法垂直到达海底,会被远远地甩在船后,因此船舶位置与拖体、MAPR 的位置并不相同,船载 GPS 测量的位置无法代表拖体的实时位置。

2) 噪声点的影响。海水中的微小颗粒或者生物体等会造成 MAPR 数据异常,即噪声点, Baker、朱健、王婷婷<sup>[11,12]</sup>认为利用滑动平均方法,可以对该数据噪声点进行滤波处理。但是,实际调查工作中发现,CTD 站位中获得的 MAPR 浊度数据具有

较少的随机噪声点,利用滑动平均处理可以达到较好的去噪效果;而加载在深海拖体上的 MAPR 浊度数据,相比 CTD 的探测过程复杂,除了垂直下放和离底回收过程外,还具有复杂的近底拖曳过程,因此除了会产生随机噪声,还会产生高频出现且波动较大的点,即高频噪声点,该噪声点在拖曳过程中与水体性质密切相关,同时受系统稳定性、海水悬浮体、海况、拖曳环境及近底扰动等因素的影响,只有清除随机噪声点和高频噪声点的影响,才能获得真正的热液羽状流浊度异常信息。

3) 系统偏差。拖体作业过程中一般需要加挂3~5个 MAPR,由于 MAPR 本身性能的问题,即使在假定海水浊度值为定值的海水环境中作业,不同 MAPR 记录到的浊度数据也存在差异,我们把这种差异称为仪器之间的系统偏差。

4) 背景海水的影响。不同海区海水的成分和性质存在差别,即使在没有热液羽状流存在的海水深度范围内,所有的 MAPR 仍然记录到一个较小的浊度值,这个值即为当地海水的背景值。因此 MAPR 记录的羽状流浊度数据应该扣除海水本身浊度的影响。

## 3 基于 MATLAB 的热液探测数据处理的程序设计

基于深海拖曳技术的 MAPR 探测热液羽状流的工作原理,通过分析影响 MAPR 数据质量的主要因素,从位置偏差、数据噪声点、系统误差和海水背景值影响等方面进行了校正,建立了 MAPR 数据处理的流程,形成了一套基于深海拖曳技术的 MAPR 探测热液羽状流的数据处理方法,实现对原始数据的有效处理。浊度数据处理的流程图(图1)如下:

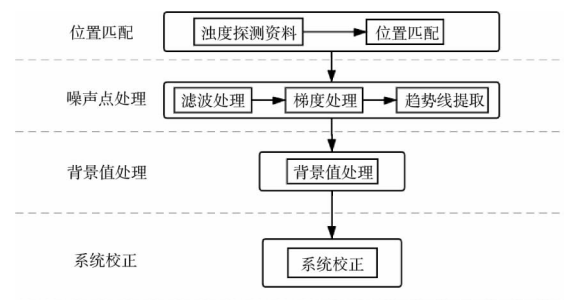


图1 浊度数据处理流程

### 3.1 定位数据准备工作

在定位数据准备工作中(图2),首先需要整

理 GPS 定位数据,采样周期为 1 秒,有时间、经度、纬度三列数据。时间序列是多参数探测数据进行融合的唯一标准,因此在数据准备阶段,通过 MATLAB 软件的 datenum 函数将字符串的时间序

列转换成具体的日期值。其次,整理超短基线定位系统(USBL)数据,USBL 的采样周期不固定,通常在 9~11 秒之间浮动,利用 GPS 数据将 USBL 数据加密处理。

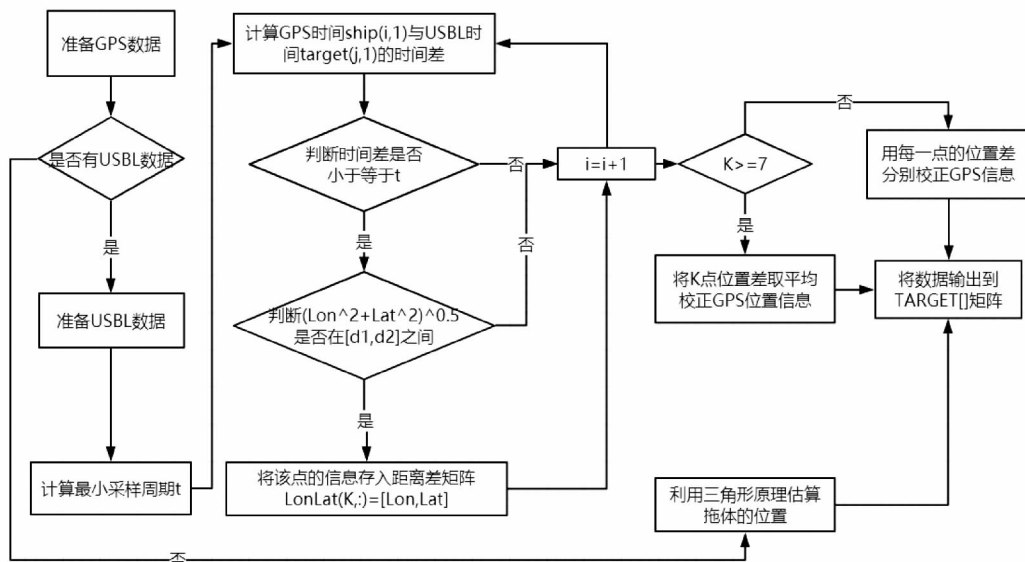


图2 定位数据准备工作的流程( $d_1$  的取值一般为  $0.005^\circ$ ,  $d_2$  的取值一般为  $0.02^\circ$ ; K 用来计数)

### 3.2 匹配浊度传感器探测资料的位置信息

读取浊度传感器探测所得的信息  $MAPR(x, y)$  (包含探测时间、深度、浊度和温度四列数据)和加密后的超短基线定位系统信息  $TARGET(k, l)$ 。遍历加密后的超短基线定位系统时间序列  $TARGET(k, 1)$ , 计算每个  $TARGET(k, 1)$  与所有浊度传感器探测数据  $MAPR(x, 1)$  的时间差值, 如图 3, 若时间差的绝对值小于探测数据的采样周期  $c_1$ , 且  $TARGET(k, 1)$  时刻对应的  $k$  在  $c_1/2 + 1$  至  $n - c_1/2$  范围内, 则将  $TARGET(k, 1)$  时刻前半采样周期取整后的时刻至  $TARGET(k, 1)$  时刻后半采样周期取整后的时刻时间范围内的位置信息取平均, 作为该时刻的位置信息  $Loc$ , 将位置信息与浊度传感器探测数据一并存入矩阵  $MAPR1(x_1, y_1)$ 。

若在同一条测线上有  $n_1 (n_1 \geq 2)$  个层位的浊度传感器分别测得探测数据, 则取第  $q (2 \leq q \leq n_1)$  个层位的传感器循环上述步骤, 且将循环后的  $MAPR1(x_1, y_1)$  导出并保存至第  $q$  个数据文档中。

### 3.3 噪声点处理

选取深度大于 1 000 米的温度和浊度探测

值, 分别依次进行滤波圆滑、梯度判断和趋势线提取。

滤波圆滑中, 滤波窗口大小  $m$  设置为 12, 因为在实际近底拖曳探测过程中, 假定小范围 (30 m) 内羽状流的温度和浊度变化较小, 船速一般控制在 1 节左右, 因此滤波窗口大小  $m$  设置为 12 比较合适。滤波处理过程具体为: 通过 MATLAB 软件的 nanstd 函数计算每一个滤波窗口的标准偏差  $std$ , 通过 nanmean 函数计算每一个滤波窗口的平均值  $var$ ; 若某一点探测值与对应滤波窗口的平均值  $var$  之差是标准偏差  $std$  的三倍以上, 则认定为噪声点, 用平均值  $var$  替换该点数值, 将计算结果存入矩阵  $MAPR2(x_2, y_2)$ 。

梯度判断具体如下: 根据矩阵  $MAPR2(x_2, y_2)$  数据计算纬度方向 (假定测线呈南北走向) 和深度方向的变化梯度, 分别记为  $G_1$  和  $G_2$ , 即:

$$G_1(x_2) = (NTU(x_2) - NTU(x_2 - 1)) / (Lat2(x_2) - Lat2(x_2 - 1));$$

$$G_2(x_2) = (NTU(x_2) - NTU(x_2 - 1)) / (Depth(x_2) - Depth(x_2 - 1));$$

其中, 进行温度探测值梯度判断时,  $NTU(x_2) = MAPR2(x_2, 6)$ ;

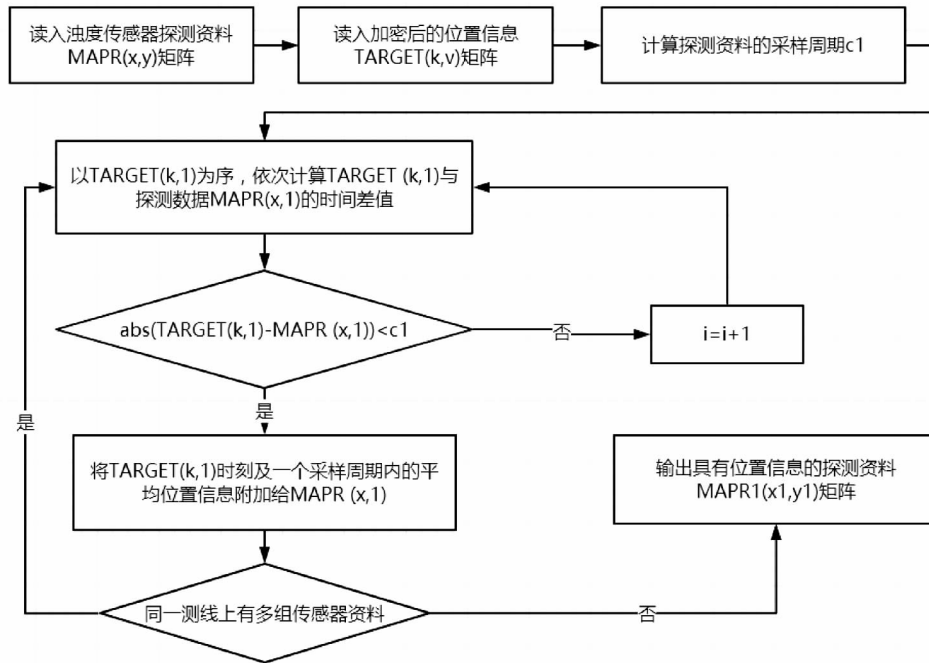


图 3 匹配浊度传感器探测资料的位置信息

进行浊度探测值梯度判断时,  $NTU(x_2) = MAPR2(x_2, 5)$ ;  $Lat2(x_2) = MAPR2(x_2, 3)$ ;  $Depth(x_2) = MAPR2(x_2, 4)$ 。

根据变化梯度的整体分布情况设定阈值  $t_1$  和  $t_2$ , 对变化梯度进行判断。若  $G1(x_2) < t_1$  且  $G2(x_2) < t_2$ , 则保留  $NTU(x_2)$  原始数据; 若  $G1(x_2) > t_1$  或  $G2(x_2) > t_2$ , 则视为噪声点去除, 得到梯度判断后的探测数据矩阵  $MAPR3(x_3, y_3)$ 。

趋势线提取具体如下: 对  $MAPR1(x_1, y_1)$  数据每 5 个点取一个平均值, 连接各个平均值得到最大数据密度包络线, 对最大数据密度包络线进行线性插值, 获得与  $MAPR1(x_1, y_1)$  数据个数相同的探测值趋势线; 将探测值趋势线与梯度处理后的数据进行对比, 选取在探测值趋势线上下浮动幅度为  $M$  的数据点作为该测线的浊度值或温度值, 得到趋势线处理后的数据矩阵  $MAPR4(x_4, y_4)$ , 当探测值为浊度时,  $M \leq 0.02NTU$ ; 当探测值为温度时,  $M \leq 0.05^\circ C$ 。

### 3.4 海水背景值处理

一般取深度 1 000-1 200 m 处海水的浊度平均值作为该区域的浊度背景值。将浊度传感器探测得到的热液羽状流浊度数据扣除海水本身的浊度背景值, 得到背景海水处理后的数据矩阵  $MAPR5(x_5, y_5)$ 。

### 3.5 系统偏差校正

由于浊度传感器本身性能的问题, 即使在假定海水浊度值为定值的海水环境中(深度 1 000-1 200 m)作业, 不同型号的浊度传感器记录到的浊度探测数据也存在差异, 即海水背景值  $nb$  的探测结果不同, 因此需要对浊度传感器进行系统偏差校正。若在同一条测线上有多个层位的浊度传感器分别测得探测数据, 则循环步骤 (3.1)、(3.2)、(3.3) 和 (3.4), 且将循环后的  $MAPR5(x_5, y_5)$  导出并保存至数据文档中;

在同一条测线上, 分别对  $n_1$  个浊度传感器计算海水取背景值, 选取最小的海水背景值作为该条测线的海水背景值标准, 用  $nb\_min$  表示; 第  $n_1$  层的浊度传感器的系统偏差校正值为:  $\delta(n_1) = nb(n_1) - nb\_min$ ;

其中,  $nb(n_1)$  表示第  $n_1$  层浊度传感器在同一条测线上测得的海水背景值,  $\delta(n_1)$  表示第  $n_1$  层浊度传感器的海水背景值与该条测线的海水背景值之间的差值。系统偏差校正后的数据存入数据矩阵  $MAPR6(x_6, y_6)$  中。

### 3.6 成图

通过 MATLAB 软件对浊度传感器探测数据绘制浊度-深度剖面图、温度-深度剖面图, 以及浊度、温度异常综合分布图。根据异常出现的水深位置和平面位置, 对比分析热液流体的异常分

布情况。

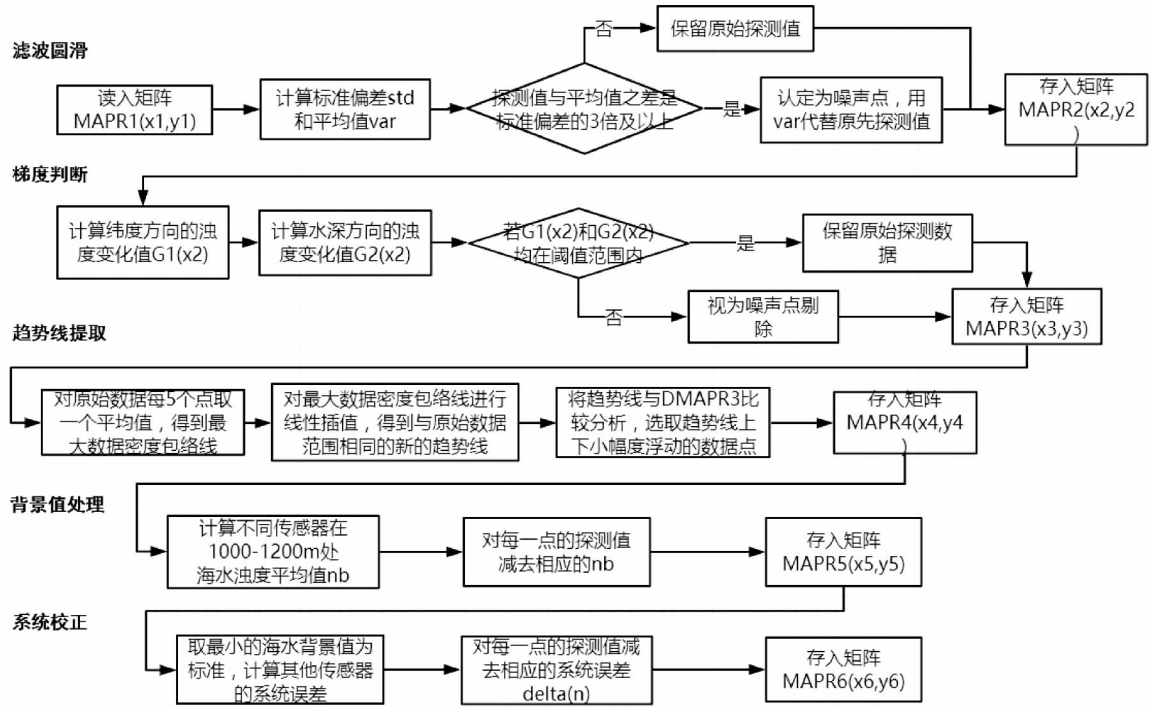


图4 浊度数据处理流程

## 4 总结

本文以“海洋探测技术与信息处理”课程中“热液探测技术及数据处理”教学内容为例,首先对热液探测和热液羽状流的理论知识进行了梳理,并根据热液调查的机理探讨了热液羽状流探测数据的影响因素,并提出了热液羽状流探测数据的处理方法,在此基础上,结合 MATLAB 软件,进行程序设计。学生通过实践探索,一方面能深刻地认识到热液羽状流分布扩散的特点,掌握热液探测数据的处理方法,另一方面有助于激发学生的学习兴趣 and 积极性,培养学生的算法设计和编程能力,提高学生解决实际热液调查及相关海洋工程问题的能力,从而提升实践教学效果。

## 参考文献:

- [1] 白育堃. Matlab 程序设计教改实践[J]. 新校园:上旬刊, 2016(10): 86-87.
- [2] 史大涛, 史美艳. 基于 MATLAB 软件的数值分析教改实践[J]. 考试周刊, 2013(A1): 9-10.
- [3] 郭龙川, 杨子赫, 王嘉祎, 等. 水下阀门仿真试验技术在海洋装备教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2018(4): 94-96+249.
- [4] Edmond J M, Von Damm K L, McDuff R E, et al.

Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal [J]. NATURE, 1982 (5863): 187-191.

- [5] Baker E T, German C R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields[C]// 1st InterRidge Theoretical Institute on Thermal Regime of Ocean Ridges and Dynamics of Hydrothermal Circulation. German CR, Lin J and Parson LM. Mid-ocean ridges: Hydrothermal interactions between the lithosphere and oceans. USA: American Geophysical Union, 2004.
- [6] Tao C, Lin J, Guo S, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center; Southwest Indian Ridge[J]. Geology, 2011(1): 47-50.
- [7] Tao C H, Li H M, Jin X B, et al. Seafloor hydrothermal activity and polymetallic sulfide exploration on the southwest Indian ridge[J]. Chinese Science Bulletin, 2014 (59): 2266-2276.
- [8] 王晓媛. 东太平洋海隆 13°N 和大西洋 Logatchev 热液区附近热液柱的研究[D]. 北京: 中国科学院海洋研究所, 2008.
- [9] 陈升, 陶春辉, 周建平, 等. 洋中脊热液羽状流的分布特征及其在多金属硫化物找矿中的指示作用[J]. 海洋学报, 2019(8): 1-12.
- [10] Rona P A, Bemis K G, Silver D, et al. Acoustic imaging,

- visualization, and quantification of buoyant hydrothermal plumes in the Ocean[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2002(23): 147-168.
- [11] Baker E T, Tennant D A, Feely R A, et al. Field and laboratory studies on the effect of particle size and composition on optical backscattering measurements in hydrothermal plumes[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2001(2): 593-604.
- [12] 朱健. 大洋中脊热液系统研究[D]. 北京:北京大学, 2008.

## Exploration of Practical Teaching of Analyzing Detection Data of Hydrothermal Plume Based on MATLAB Software

CHEN Sheng, BAO Chengkang, ZHOU Donghui, QIN Huawei  
(HDU Ocean Technology and Equipment Research Center, School of Mechanical Engineering,  
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Detecting hydrothermal plume is one of the main contents in marine resources survey in China. In the practice teaching of ocean engineering, based on the dispersion characteristics of hydrothermal plume, the data processing method is programmed by MATLAB software. And a large amount of hydrothermal detection data can be processed rapidly. On the one hand, students can, by practicing, deeply realize the dispersion characteristics of the distribution of hydrothermal plume, and grasp the method of hydrothermal detecting data processing. On the other hand, it is helpful to stimulate students' interests and enthusiasm in learning, cultivate students' ability of algorithm design and programming, and improve students' ability to solve practical hydrothermal investigation and related marine engineering problems, so as to improve the effect of practical teaching.

**Key words:** hydrothermal plume; MATLAB; data processing; practical teaching

(责任校对 钟丽)