

# 应用于龟山岛热液喷口探寻的散射光式水下浊度仪研制\*

秦华伟<sup>1</sup>, 周红伟<sup>1</sup>, 叶瑛<sup>2</sup>, 潘依雯<sup>2</sup>, 杨厉昆<sup>1</sup>

1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 海洋科学与工程学系, 浙江 杭州 310028

**摘要:** 位于台湾岛东北部的龟山岛热液区属浅水型海底热液活动区, 已探明有超过 30 处的热液喷口分布在约 10—30m 的水深范围内。通过机械封装、硬件电路以及配套软件的设计和加工, 自制了散射光式水下浊度仪; 2011 年 5 月 25—30 日, 使用该浊度仪, 对龟山岛附近海域进行了拖航作业, 在此次作业的东北方向发现一处新的热液喷口(24°50′09″N、121°58′08″E); 海试结果表明, 该水下浊度仪对于浊度较大海域有探测能力, 对浊度较小海域的探测精度不高, 还有待进一步改进。

**关键词:** 龟山岛; 热液喷口; 散射光式; 浊度仪

中图分类号: P716+.42; TP216 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2013)01-0076-05

## Research and development of scattering turbidimeter in the use of hydrotherm seeking in Kueishan Tao area

QIN Hua-wei<sup>1</sup>, ZHOU Hong-wei<sup>1</sup>, YE Ying<sup>2</sup>, PAN Yi-wen<sup>2</sup>, YANG Li-kun<sup>1</sup>

1. The Department of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. The Department of Marine Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China

**Abstract:** The Kueishan hydrotherm area in the northeast of Taiwan Island has shallow water hydrothermal activities on the seafloor. So far, we have found more than 30 hydrothermal vents from 10 to 30m depth in the area. This article mainly introduces the mechanism encapsulation, hardware circuit and software design of our own scattering underwater turbidimeter. We used the scattering underwater turbidimeter to do towing operations in Kueishan Tao area from May 25 to May 30 in 2011. During this sea trial, we found a new hydrothermal vent (24°50′09″N, 121°58′08″E) in the northeast of the area. The results of the sea trial show that the scattering underwater turbidimeter is able to detect large changes in turbidity, and that the measurement accuracy of small changes in turbidity is not high. We will make some improvements in the turbidimeter in the near future.

**Key words:** Kueishan Tao; hydrothermal vent; scattering; turbidimeter

近期, 分布在火山岛翼部和海底火山顶部的浅水海底热液区引起了人们的重视<sup>[1-3]</sup>, 这主要是因为它们与陆上的浅成热液矿床相似, 对其进行研究有助于深入了解元素循环和热液蚀变机理, 以及海底热液系统及其多金属硫化物资源的成因<sup>[4]</sup>。

位于台湾岛东北部的龟山岛热液区(24°50′09″N、121°58′08″E)属浅水型海底热液活动区, 面积约

0.5km<sup>2</sup>, 在约 10—30m 的水深范围内分布有超过 30 处的热液喷口。这些热液喷口流体温度最高达 116℃, pH(25℃时)最低达 1.52, 高温喷口的流量高达 158t·h<sup>-1</sup>, 喷口喷出的硫化物热液浓度高, 附近的海水浊度较大。

以往已发现的龟山岛海域热液喷口, 一般先在海面观察, 看是否有气泡或乳白色热液涌出, 再由

收稿日期: 2012-04-24; 修订日期: 2012-09-15。林强编辑

基金项目: 浙江省科技计划项目(2011C13025)

作者简介: 秦华伟(1976—), 男, 山西省长治市人, 副教授, 主要从事海洋机电装备技术研究。E-mail: qinhw@hdu.edu.cn

\*感谢“2011 年浙大-杭电-中大台湾龟山岛海底热液研究活动”全体参与人员的工作。感谢台湾中山大学、台湾大学、台湾探海公司有关同仁的大力支持与协助。

潜水员下潜确认。对于水深较深的浅水热液喷口,一方面由于潜水员的下潜深度有限;另一方面,如其喷涌流量较小,在海面没有明显迹象变化或被其他热液喷口喷涌迹象掩盖的话,则该类热液喷口将很难被发现。

鉴于上述缘由,台湾中山大学、浙江大学和杭州电子科技大学一起发起了“台湾龟山岛热液区海试计划”,2011年5月25—30日,三校联合对龟山岛进行科学考察,此次科学考察的主要目的有两个:1)对已发现热液喷口进行热液采样和长期化学探测;2)期望发现新的热液喷口。在该计划的支持下,使用自制的水下浊度仪,对龟山岛附近海域进行了拖航作业,以期发现新的热液喷口。

国外浊度仪发展起步早,技术也比较成熟,特别是进入20世纪90年代以后,国外的许多仪器仪表公司都推出了技术先进、性能优良的浊度仪,目前已占据了我国主要市场。2008年,美国HACH公司又推出了为中国市场量身定做的1900C型经济便携式浊度仪,沿用HACH在浊度仪领域的专利Ratio光学技术与微处理技术,大大提高了仪器的精确度、灵敏度和可靠性。该仪器量程灵活可选,自动量程选择时,测量范围为0—1000NTU,或者手动选择范围0—9.99、0—99.99和0—1000NTU,线性误差1%,分辨率低至0.01NTU,可在1分钟内完成测量过程。

国内浊度仪的研究起步较晚,20世纪70、80年代,工业浊度在线式测量仪在我国几乎还处于空白状态。尽管后来也研制出了一些浊度仪,但都是指针式仪表,体积较大,只能进行流通式测量,可靠性和稳定性都很差。20世纪90年代以来,国产浊度仪得到大力发展,已形成一定规模。2006年武汉沃特公司研制的WT-RCOT系列在线浊度仪,以近红外单色光为光源,依据光散射的浊度测量技术,借助光纤实现光的传输和检测,极大地消除了光路中的干扰,其测量范围为10—2000NTU,精度为3%,可用于管道流通式或插入式安装,有螺纹式和法兰式两种安装方式,特别适用于管道、水箱、水槽等多种容器和液流场合作安装式浊度测量。WT-RCOT采样的是后向散射光信号,所以其测量下限受到限制(不符合ISO7027标准),没有测量悬浮固体的功能,其测量精度和分辨率低于国外同类仪器。

综上所述,国产浊度仪的发展取得了一定的成绩,但与国际知名品牌相比,我国浊度仪的整体水平具有明显的劣势。除了测量精度不高、品种单一、外观不美之外,最致命的差距表现在产品的

测量精度、可靠性和稳定性方面。

## 1 水下浊度仪基本原理

散射光式水下浊度仪采用水下散射光测量法,通过测定液体中悬浮粒子的散射光强度来确定液体的浊度,测量原理如图1所示<sup>[5]</sup>。

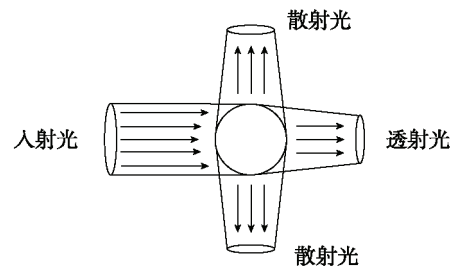


图1 水下散射光测量法原理<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Measuring principle of underwater scattering method

根据物理光学,当一束光通过被测水样时,其90°方向上的散射光强度 $I_R$ 可表示为<sup>[6]</sup>:

$$I_R = \frac{KNV^2}{\lambda^4} I_0 \quad (1)$$

式中, $I_0$ 为入射光的强度, $N$ 为单位容积内的微粒数; $V$ 为微粒的总体积; $\lambda$ 为入射光波长; $K$ 为系数。

在一定条件下,可假设 $\lambda$ 和 $V$ 为常数,则 $\frac{KNV^2}{\lambda^4}$ 与单位容积内微粒的总数或总体积成正比,也就是与浊度成正比,即:

$$I_R = K'TI_0 \quad (2)$$

式中, $T$ 为水的浊度, $K'$ 为另一个系数。因此,在 $I_0$ 不变的情况下,散射光强度 $I_R$ 与浊度成正比,浊度的测量就转换为散射光强度的测量。

## 2 浊度仪的集成封装

由于所设计的浊度仪工作在浅海热液环境中,受到极端工作环境的限制,要求浊度仪的机械封装具有耐压、耐腐蚀等特点。浊度仪的机械封装如图2所示。浊度仪采用两侧开盖的耐压圆筒设计,满足浅海200m的压力设计要求。耐压圆筒里面布置了电路板、电池等部分。

在设计浊度仪光学测量封头时,考虑到龟山岛热液浊度较大,以及光学测量封头尺寸较小的原因,采用了红外发光二极管通过有机玻璃平面镜片直接向外发射光线,光敏二极管通过有机玻璃镜片接收海水散射光的设计。浊度仪传感器探头如图3所示。

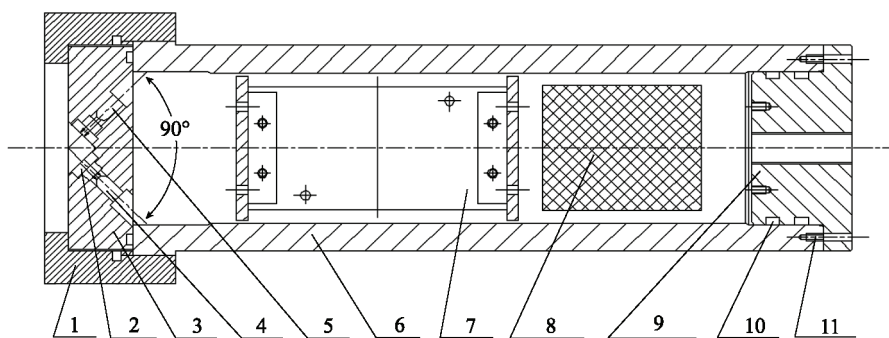


图2 浊度仪的机械封装

1. 压盖; 2. 有机玻璃镜片; 3. 光学测量封头; 4. 光敏二极管; 5. 红外发光二极管; 6. 耐压壳体; 7. 电路板支架; 8. 电池; 9. 后端封头; 10. O 形圈; 11. 螺钉

Fig.2 Mechanism encapsulation of turbidimeter

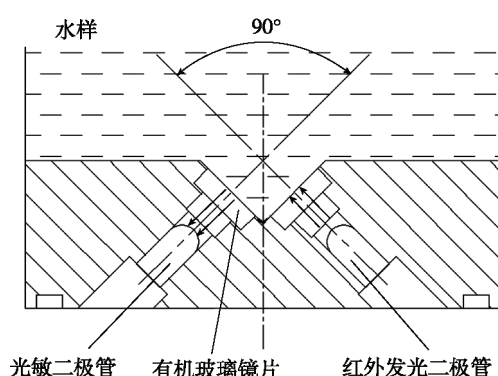


图3 浊度仪传感器探头

Fig.3 Schematic diagram of the turbidimeter probe

该设计有两个好处: 1)在光路设计中简化了透镜; 2)通过对有机玻璃镜片的径向密封实现 200m 耐压密封。龟山岛热液活动区水深 10—20m<sup>[1]</sup>, 有机玻璃的拉伸强度可达到 50—77MPa 水平, 弯曲强度可达到 90—130MPa, 虽然有机玻璃的耐热性并不高, 热变形温度约为 96℃ (1.18MPa), 耐寒性也较差, 脆化温度约 9.2℃, 龟山热液区热液喷口中心流体温度最高达 116℃, 龟山岛海域的常年水温在 19℃以上<sup>[7]</sup>, 在水深 0—30 米处, 海水温度日变化很小, 浊度仪进行测量工作时离热液喷口中心较远, 镜片处的温度和附近海水的温度近似, 有机玻璃镜片的直径为 14mm, 透光孔直径为 5mm, 因此沉头孔能承受住大部分海水对镜片的压力, 加上有机玻璃对二氧化硫等气体有良好的抵抗能力, 综合各方面的考虑在水深 10—20m 的热液活动区使用有机玻璃镜片完全能满足浊度仪正常工作的要求。

### 3 水下浊度仪的系统硬件结构

水下浊度仪的系统结构如图 4 所示。系统以

MSP430F169 单片机为核心, 由浊度测量模块、电源与控制模块、滤波与放大模块、单片机处理模块、数据存储模块、串口通行模块等组成。系统使用单片机自带的 12 位 A/D 模块。为能及时分析所采集数据, 采集器可通过 RS232 接口与上位机进行通讯。

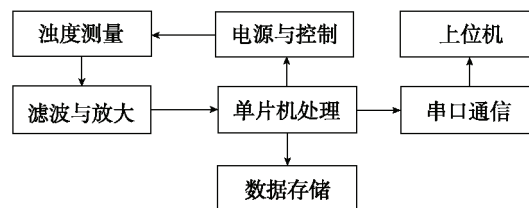


图4 系统结构框图

Fig.4 Flow chart of the system

#### 3.1 浊度仪光源的选择

浊度仪光源的质量和稳定性直接关系到浊度测量的准确性。本文选用 OSRAM 公司生产的红外发光二极管 SFH4550 作为发射端, 光敏二极管 SFH203 作为接收端, 来进行水下浊度的测量。考虑到龟山岛热液活动区水深 10—20m, 自然光的影响较大, 选择红外发光二极管 SFH4550 作为发射端的原因有三: 1)该二极管发射的 850nm 红外光能有效避免自然光的干扰; 2)红外发光二极管发射光的有序性和高指向性, 在光路设计中可简化透镜的作用, 从而减少光路设计的复杂度; 3)红外发光二极管寿命长, 发光强度稳定<sup>[8]</sup>。接收端光敏二极管 SFH203 接收光的波长范围为 400—1100nm, 其中接收最敏感的光波波长为 850nm, 与发光二极管 SFH4550 相匹配, 以减少其他色度的干扰。

#### 3.2 浊度测量电路的设计

浊度测量电路包括发射电路和接收电路。浊度仪的发射电路如图 5 所示, 编制程序使 MSP430F169

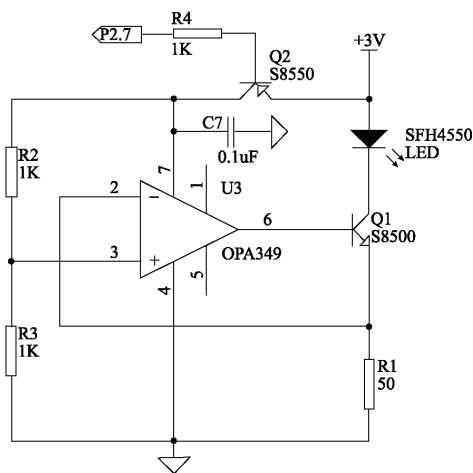


图 5 浊度仪的发射电路

Fig.5 Transmission circuit of the turbidimeter

的一个 I/O 口产生矩形波, 矩形波通过控制三极管的导通来控制发光二极管 SFH4550 的工作状态。当输出的矩形波为低电平时, 三极管导通, 发光二极管发光; 当输出的矩形波为高电平时, 三极管截止, 发光二极管熄灭。

在浊度仪的接收电路(图 6)中, 当发光二极管熄

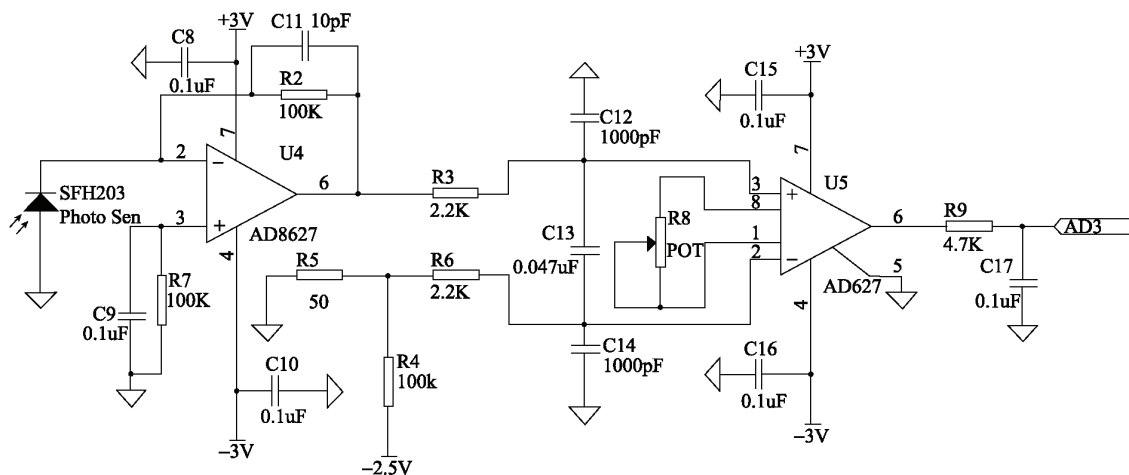


图 6 浊度仪的接收电路

Fig.6 Receiving circuit of the turbidimeter

根据标定测量数据, 绘制标定曲线 (图 7)。从图中可知, 自制浊度仪的线性度为 0.993, 测量精度是 0.1NTU。使用该自制水下浊度仪, 对于探寻新的热液喷口理论上是可行的。

#### 4.2 台湾龟山岛热液喷口探寻

2011 年 5 月 25 日—30 日, 使用自制的水下浊度仪, 对龟山岛附近海域进行了拖航作业, 获得了龟山岛海域的浊度信号。对浊度信号进行整理, 绘制出了该海域的浊度分布图(图 8)。

灭时, 光敏二极管接收到的光来自自然光, 当发光二极管发光时, 光敏二极管接收到的光来自发光二极管和自然光。光敏二极管始终处于工作状态, 其产生的微弱电流信号通过第一级运算放大器转换为电压信号, 第二级运算放大器进一步放大该电压信号, 然后进行 A/D 转换, 电流信号经过接收电路的两级放大, 各电容的反馈与滤波, 最终实现微弱电流信号的电压转换, 将浊度信号转换为电压信号。最后经过 CPU 对发光二极管的两种工作状态进行处理可有效地减少自然光与接收器件暗电流的影响。

## 4 试验结果与讨论

### 4.1 实验室系统标定

本文采用上海昕瑞仪器仪表有限公司生产的 WGZ-3 型浊度仪对自制浊度仪进行了标定, WGZ-3 浊度仪的测量范围为 0—1000NTU, 误差为 2.5%。

在实验室进行系统标定时, 用高岭土配置出 10 种不同浊度的标准液, 用 WGZ-3 浊度仪和自制浊度仪分别进行浊度测量。

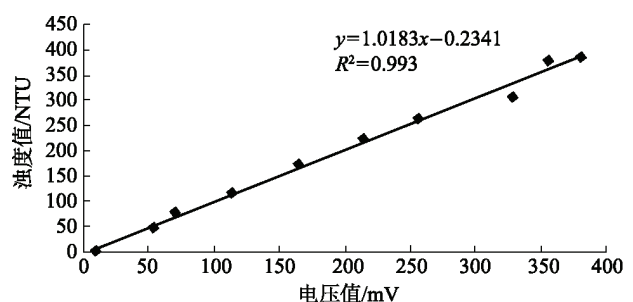


图 7 浊度仪标定曲线

Fig.7 Calibration curve of the turbidimeter



本次拖航作业在  $24^{\circ}50'06''\text{N}$ 、 $121^{\circ}57'54''\text{E}$  附近发现有浊度异常信号。后经潜水员多次下潜搜索,发现了一处白色热泉,经由温度计测得该热泉温度为

$60^{\circ}\text{C}$ , 热泉外貌为石头裂缝中冒出气泡及热液,热泉附近有许多小气泡冒出。经 GPS 定位,此处新发现的白色热泉坐标为  $24^{\circ}50'09''\text{N}$ 、 $121^{\circ}58'08''\text{E}$ 。

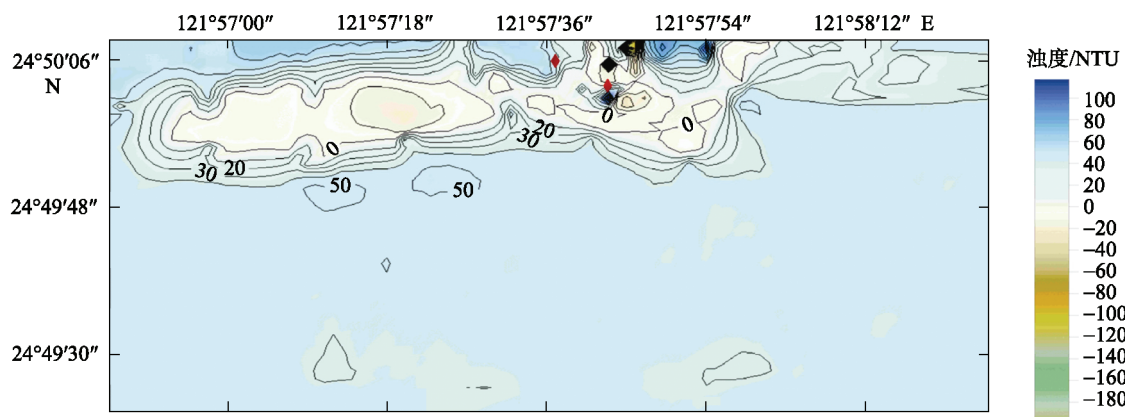


图 8 龟山岛附近海域的浊度分布图

菱形黑点处为已知热液喷口位置,在该处放置有长期化学探测系统

Fig. 8 Turbidity of Kueishan Tao area

#### 4.3 浊度仪有待改进之处

在此次海试过程中,发现有两个问题还有待改进: 1)如前文浊度仪的集成封装所述,在设计浊度仪光学测量封头时,考虑到龟山岛热液浊度较大,及浊度仪光学测量封头尺寸较小的原因,在发射二极管和接受二极管与平面有机玻璃镜片之间没有增加透镜,导致光线发散,不能很好聚集; 2)在接收电路中,电路放大倍数固定,不能根据浊度仪舱外浊度大小自动调节放大倍数。这就导致: 1)本浊度仪只能对大浊度海域进行探测,对小浊度海域不敏感; 2)探测精度不够。这些问

题有待进一步完善。

## 5 结论

本文通过对浊度仪机械封装、硬件电路和配套软件设计和加工,自制了水下散射光式浊度仪。并于 2011 年 5 月 25 日—30 日,使用该浊度仪,对龟山岛附近海域进行了拖航作业,在此次探测的东北方向发现一处新的热液喷口 ( $24^{\circ}50'09''\text{N}$ 、 $121^{\circ}58'08''\text{E}$ )。此次海试结果表明,该水下浊度仪对于浊度较大海域有探测能力,对浊度较小海域的探测精度不高,还有待进一步改进。

## 参考文献

- [1] 刘长华,汪小妹,曾志刚. 龟山岛附近海域热液活动流体的来源[J]. 海洋科学, 2010, 34(3): 61–68.
- [2] 刘长华,殷学博. 关于现代浅海型海底热液活动的研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 918–924.
- [3] 刘长华,汪小妹,殷学博. 浊度计在现代海底热液活动调查中的应用[J]. 海洋科学, 2008, 32(1): 70–73.
- [4] 刘长华,曾志刚,殷学博. 台湾岛东北部龟山岛附近海域自然硫烟固体的基本特征研究[J]. 台湾海峡, 2006, 25(3): 309–317.
- [5] 王东. 散射式浊度仪的设计与实现[D]. 山西: 太原理工大学, 2007: 22–25.
- [6] 高平. 水下散射式在线浊度测量仪[J]. 实用测试技术, 2001, (5): 14–32.
- [7] 蒋小平,钟中. 环台湾岛海域冬季海况的模拟研究[C]. 江苏: 中国气象学会 2005 年年会论文集, 2005: 1586–1593.
- [8] 孙墨杰,莫宗宝,赵彦蕾. 在线间歇式浊度仪的研究[J]. 仪表技术, 2005, (2): 37–38.