

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020092702

新型深海地温梯度测量设备(FY2)研发

李佳伟¹, 陈洁², 徐行¹, 潘飞儒², 罗贤虎¹, 俞欣沁¹, 罗新恒²

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

2. 珠海市泰德企业有限公司, 珠海 519082

摘要: 随着海底地热学研究的不断深入, 对海底地热测量仪器的技术指标提出了更高要求。基于前期自主研发的 FY1 自容式微型温度测量记录仪, 经过大量实践数据与经验积累, 研制出新型的 FY2 自容式微型温度测量记录仪。为验证 FY2 的性能, 在实验室恒温水槽和南海北部陆坡深水海域对 FY1 和 FY2 进行了仪器校验和比测, 结果显示 FY2 的测量分辨率优于 0.0001 °C, 测量准确度优于 ±0.0015 °C, 比测点的海底热流值为 78 mW/m²。实验结果证实 FY2 探针不仅具有高分辨率、高精度、性能稳定的特点, 而且测量效率高, 可为海底热流探测与研究提供新一代可靠的技术支持。

关键词: 地温梯度; 深海沉积物; 海底热流; 温度计

中图分类号: P738.6 文献标识码: A

A new equipment for deep-sea geothermal gradient measurement (FY2)

LI Jiawei¹, CHEN Jie², XU Xing¹, PAN Feiru², LUO Xianhu¹, YU Xinqin¹, LUO Xinheng²

1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 51076, China

2. Zhuhai Taide Enterprise Co.Ltd., Zhuhai 519082, China

Abstract: The seabed geothermal research has become a common component of integrated marine geological survey nowadays and high requirements are raised to the technical performance of instruments for seabed measurement. Based on the FY1, the self-contained miniature temperature measurement recorder independently developed by Guangzhou Marine Geological Survey, a new type of self-contained miniature temperature measurement recorder, FY2 in abbreviation, was developed after summarization of previous practice data and survey experiences. In order to verify the performance of the FY2, efforts have been devoted to the instrument calibration and the comparison of the FY2 to the FY1 in laboratories under a constant temperature flume as well as in the deep water area on the northern slope of the South China Sea. Results show that the resolution of the FY2 is higher than 0.0001 °C, and the precision is higher than ±0.0015 °C. The seabed geothermal flow value of the measuring point is 78 mW/m²; indicating an excellent performance of the new equipment. The new equipment also has high efficiency, and may provide strong technical support for the research of seabed geothermal flow.

Key words: geothermal gradient; deep sea sediments; seabed geothermal flow; temperature data logger

海底热流是海盆及其陆缘热状态最直接的体现, 是研究不同尺度地质构造热演化, 评价海域天然气水合物和油气资源的重要约束^[1]。海洋地热学中涉及的参数主要为两类: 一是海底温度、地温梯度和地热流等海底原位测量信息; 二是沉积物热导率和生热率等岩石热物性测定信息^[1-3]。

海底热流探测亟需高精度的温度测量技术。为解决海洋天然气水合物勘探海底热流探测中的关键技术问题, 中国地质调查局广州海洋地质调查

局(简称广海局)自 2005 年以来一直从事海底热流探测技术的研发, 并率先在国内独立开展海底热流探测工作^[3-5]。在过去的 15 年间, 广海局采用自制的 Ewing 型海底热流探针, 完成了包括南极高寒环境在内的全球海域 1 200 多个测站的海底热流探测, 其中温度传感器为自制的飞鱼 1 型自容式微型温度测量记录仪(简称 FY1 探针)。随着计算机技术飞速发展, FY1 探针与新型计算机之间的通讯接口存在着技术匹配问题, 导致数据读取和参数设置

资助项目: 2018 年广东省级促进经济发展专项资金(海洋经济发展用途)专项“天然气水合物先导区建设与资源区块优选项目”(GDME-2018D001); 广东省珠海市泰德企业有限公司海洋技术领域院士工作站

作者简介: 李佳伟(1994—), 助理工程师, 从事海洋地质及地球物理勘探技术方法研究, E-mail: upcljw@163.com

通讯作者: 徐行(1963—), 教授级高级工程师, 从事海洋地质-地球物理勘探技术方法研究, E-mail: gz_xuxing@163.com

收稿日期: 2020-09-27; 改回日期: 2021-03-31. 蔡秋蓉编辑

过程中的故障率较高,影响了野外资料采集的进度。为了解决以上问题,对FY1探针的技术缺陷进行了技术升级、改造,升级后的探针定名为飞鱼2型自容式微型温度测量记录仪(简称FY2探针)。

本文先系统对比FY1和FY2的技术设计和适用性等,然后在国家海洋计量站广州分站实验室恒温水槽和南海北部陆坡深水海域做的两个实验比测的基础上,重点分析FY2的技术特点,为进一步推广使用提供科学依据。

1 热流探测技术

海底热流探测始于20世纪50年代初。在北大西洋海域科考时,英国科学家用一根无缝钢管和温度传感器制作了温度探针,率先实现海底沉积物原位的地温梯度探测^[6]。根据Herzen和Maxwell提出的热导率测量方法^[7],Sclater等发展了海底沉积物原位热导率测量技术^[8],并采用热脉冲技术对其进行改良,实现了真正意义上的海底热流原位测量^[9-10],该类型探针被称为Lister型探针。另一类型海底热流探测设备是Ewing型探针,在重力柱状取样器的取样管(或钢矛)外壁的不同位置,外挂多个自容式微型温度测量记录仪,从而构建地温梯度探针系统。

Lister型和Ewing型两类海底热流探针是现今海底热流探测的主流技术。用Lister型探针,每个

测站定点测量时间需22~25 min,除采集海底温度、海底沉积物地温梯度,还可获得原位沉积物热导率测量信息。这对调查船舶具有较高的要求,适合于具有动力定位功能的调查船。而用Ewing型探针,每个测站定点测量时间仅需5~8 min,但只能采集海底温度和地温梯度,其相应站位的沉积物热导率信息需通过在室内测量沉积物实物样品后获取。相比而言,Ewing型探针技术具有测量时间短、操作便捷和运维成本低等优点^[4,11-12],因而更容易被推广使用。

中国海底热流探测工作始于20世纪80年代。在南海地学研究中,广海局(原地质部南海地质调查指挥部)和美国哥伦比亚大学拉蒙特地质研究所曾二度合作,利用美国热流探测设备开展测量工作,在南海陆缘及深海盆中获取了一批宝贵的海底地热流资料^[13-18]。在国家863计划海洋技术领域的项目资助下,中国地质调查局、国家海洋局和中国科学院以及高校涉海研究团队的联合攻关,在海底热流探测技术研发中相继获得了一批国家专利授权和包括FY1探针在内的技术成果(图1a、b),国内有十多家科研团队使用该技术^[19]。与全球同类产品相比,FY1探针的技术指标可媲美德国的MTL^[11]和中国台湾的“小型自容式温度计”^[12],而且在运维方面更为便捷和低成本。

广海局自主研发的Ewing型海底热流探针(图1c),由6支FY1探针和1支倾斜仪安装在一个

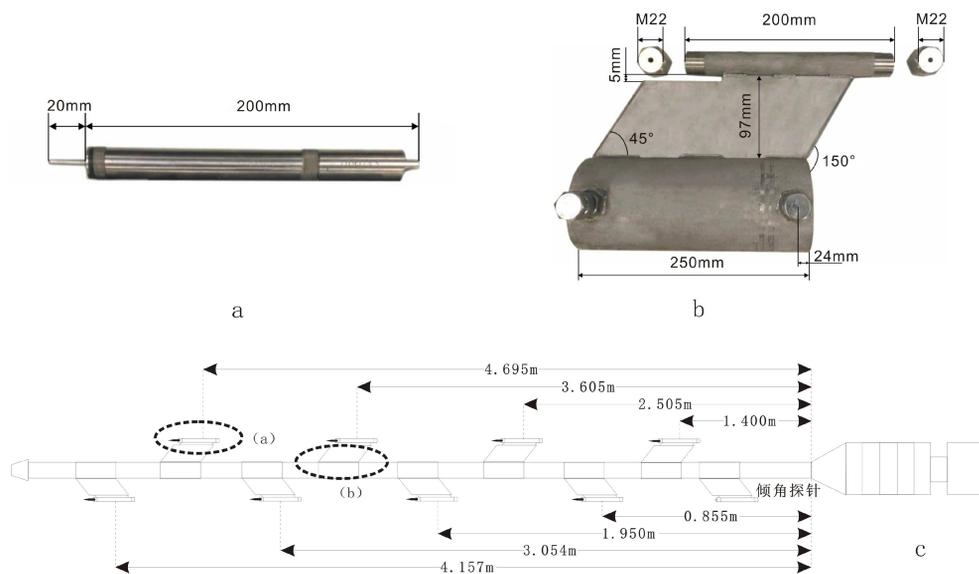


图1 FY2型探针安装说明图

a. 飞鱼探针照片, b. 固定翼照片, c. 飞鱼探针安装在重力柱状取样器上的示意图。

Fig.1 Installation instruction diagram for FY2 probe

a. photo of flying fish probe, b. photo of fixed wing, c. schematic diagram of flying fish probe installed on gravity cylinder sampler.

800 kg 的重力柱状取样器的取样管上构建而成。总体上, 采用 Ewing 型探针的作业方法与海底沉积物柱状取样近似, 但前者在取样器贯入到海底沉积物之后, 还需要在海底沉积物中停留一段时间进行温度测量。海底热流测量具体的步骤为: ①利用调查船的地质绞车将海底热流探针吊放到距离海底近 100 m 高度, 停顿片刻来稳定设备在水体中的姿态; ②快速启动绞车, 将探针贯入到海底沉积物之中; ③探针在沉积物中停留 5~8 min 或更久一些, 同时记录 FY1 在沉积物中达到一个与外界温度近似平衡的过程信息; ④将探针整体拔出海底沉积物, 离开海底; ⑤启动地质绞车将设备回收到调查船甲板上。最后, 从 FY1 和倾斜仪中下载温度测量和姿态测量数据, 整理保存。在作业前的自容式微型温度测量仪参数设置中, 重要时段的温度测量采样率通常为 1 s 或 2 s。

在海底热流测量工作前后, 需要在甲板上测量各个 FY1 探针之间的相对距离。当探针贯入到海底沉积物之后, 安装在不同位置上的 FY1 探针记录相应位置的温度随时间变化信息, 而倾斜仪主要是用于检测贯入装置的姿态, 为原位测量提供倾斜改正信息。海底温度是指最底部的温度探针插入海底之前的温度测量值; 地温梯度由不同位置的温度测量值的斜率求算出来, 直接计算出来的为“视地

温梯度”, 经过倾斜改正后获得真实地温梯度。

2 FY2 的新特点

温度测量技术是海底热流探测中的核心技术。FY1 型探针采用了 16 位低功耗单片机、16 位 A/D 转换器、非易失存储器 and 实时时钟^[20]。在 FY2 探针的技术升级过程中, 重点改造了数据采集部分; 在总体设计方面, FY2 探针的设计继承了原电路中传感器和信号调理电路等的技术方案(图 2)。FY1 探针和 FY2 探针的技术性能和指标对比见表 1。

在技术改造中, FY2 探针用 24 位低功耗 Σ - Δ 型 A/D 转换器替代了原来的 16 位低功耗 A/D 转换器, 使信号分辨率得以提高, 将原来的以 5 °C 为基准估算, 信号分辨率 40 μ V, 等效理论温度分辨率 1.33 mK 等技术指标提高到以 5 °C 为基准估算, 信号分辨率 0.3 μ V, 等效理论温度分辨率 0.01 mK, 大幅度提高了信号处理水平。用 32 位低功耗 ARM 单片机取代了原来的 16 位低功耗 DSP 器件, 增强了信号处理能力, 降低了功耗。

除此之外, FY2 探针优化了原数据存储和通讯接口的设计, 使改进后的自容式微型温度测量记录仪的存储容量增大、传输速率提高、功耗降低。在整体设计方面, FY2 探针还做了其他方面改进。例

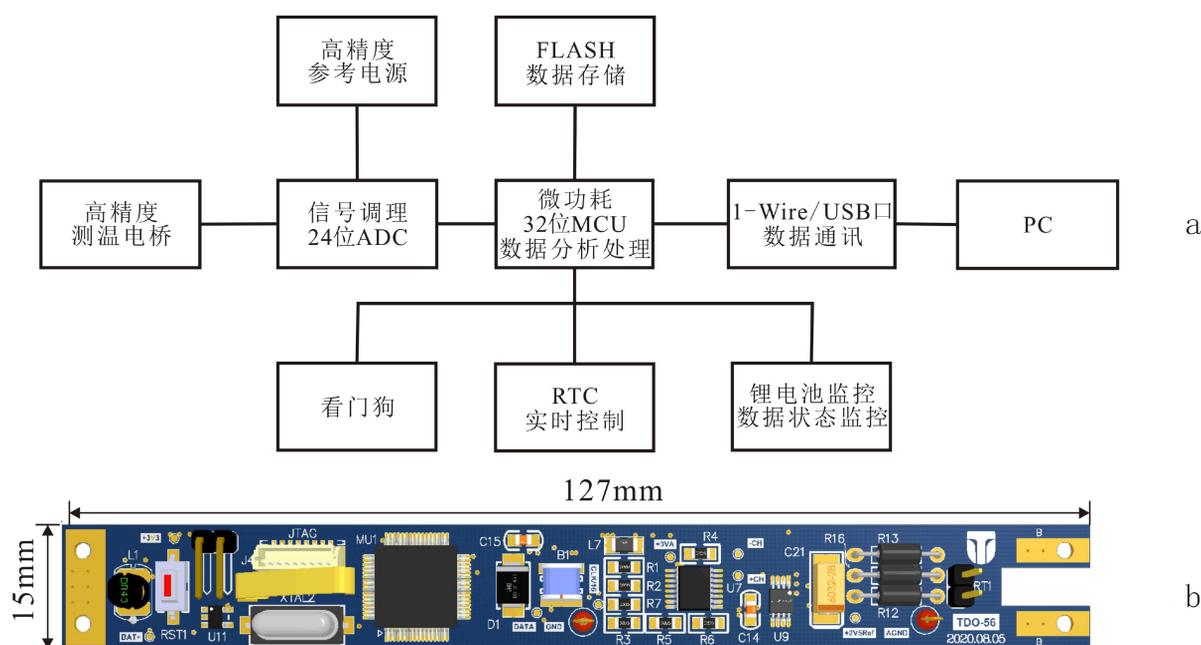


图 2 FY2 型探针电子电路框图和 PCB 板图

a.FY2 型探针电子电路框图, b.FY2 型探针的 PCB 板图片。

Fig.2 Electronic circuit block diagram & PCB board picture for FY2 probe

a. FY2 probe electronic circuit block diagram, b. FY2 probe PCB board picture.

表1 升级前后探针技术性能对照表
Table 1 Comparison table of Probe technical performance before and after upgrade

参数	FY1	FY2 (新型飞鱼探针)
测量范围/°C	-7~52	-7~52
分辨率/°C	0.001	0.0001
精度/°C	±0.003 (0~25)	±0.0015 (0~25)
电源	标准小型3 V锂电池	标准小型3 V锂电池
最大工作深度/m	6 000	6 000
处理器	16位低功耗DSP器件 功耗: 200 μ A/MHz	32位低功耗ARM芯片 功耗: 112 μ A/MHz
ADC (模数转换器)	16位低功耗 Σ - Δ 型ADC, 单极性采样; 信号分辨率40 μ V; 等效理论温度分辨率: 以5 °C为基准估算, 相当于1.33 mK	24位低功耗 Σ - Δ 型ADC, 双极性采样, 信号分辨率0.3 μ V; 等效理论温度分辨率: 以5 °C为基准估算, 相当于0.01 mK
数据存储	256 K, 铁电存储器	1.5 M, Flash EEPROM存储器
通信接口	RS485	基于USB的单线串行通讯技术

如: ①内置稳压电路, 提高系统测量准确度及稳定性; ②内置硬件看门狗, 提高了可靠性; ③采用最新信号处理技术, 提高测量信号的信噪比和抗干扰能力; ④采用了人性化操作软件(可升级), 操作更为便捷。这些设计方案均使得 FY2 探针的各项技术性能和指标得到大幅优化。

3 实验测试

为了分析对比自容式微型温度测量记录仪在技术升级前后的性能差异, 研究团队对 FY1 探针和 FY2 探针分别做了实验室恒温水槽环境中的测温对比和野外海底沉积物测温对比的两个实验。

3.1 恒温水槽内的测温对比

为统一 FY1 探针和 FY2 探针的温度测量参考点, 同时对比测试同一标准温度下两套设备的技术性能差异。研究团队在国家海洋计量站广州分站对 2 支 FY1 探针和 7 支 FY2 探针进行了实验室恒温水槽内的测温对比实验。该恒温水槽的主要技术指标: 控温波动性不大于 0.002 °C, 均匀性不大于 0.002 °C; 测温电桥相对不确定度为 0.3×10^{-6} ; 一等标准铂电阻温度计的不确定度为 0.001 °C。

实验过程: ①同步 FY1 探针和 FY2 探针的时钟, 将所有探针采样间隔设置为 10 s。②将 FY1 探针和 FY2 探针捆绑在一起后置入实验室恒温水槽中, 调整水槽温度, 使被测水体温度分别保持在 24.9953、20.0028、15.0038、10.0040、5.0028、0.0020 °C 标准温度点至少 5~8 min(图 3)。③取出探针, 读取 FY1 和 FY2 探针的测温数据。④对 FY1 和 FY2

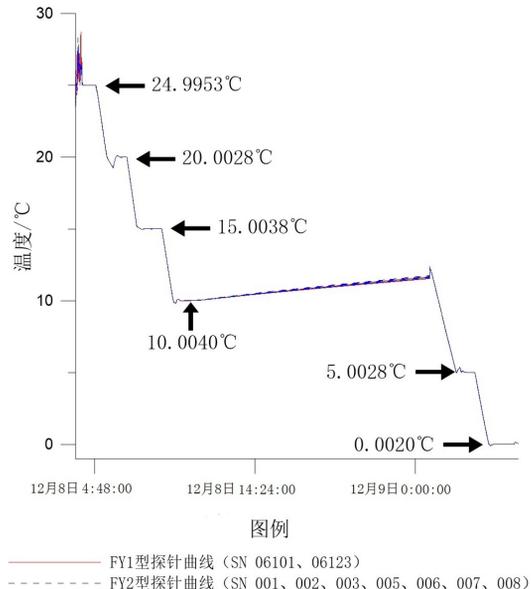


图3 实验室各标准温度点下 FY1 探针和 FY2 探针示值变化情况

Fig.3 Changes of the indications for FY1 and FY2 probes at each standard temperature point in laboratories

探针进行温度校验, 具体过程为: 读取每只探针在各采样时刻的热敏电阻阻值, 结合恒温水槽标准温度建立新的、更为准确的探针温度—阻值关系。由于已记录的热敏电阻的数值是始终不变的, 可依据新的温度—电阻关系对测试探针的数据作数据处理, 进而得到校验后的测温数据。⑤分析讨论经过校验的 FY1 探针和 FY2 探针在同一标准温度下的测温性能差异。

其中, 温度校验利用了 STEINHART 和 HART 方程(或 R (所测量的热敏电阻阻值)— T (计算出的温度值)方程)^[20], 即:

$$T = f(R) = \frac{1}{A + B \ln R + C \ln R^3} - 273.15 \quad (1)$$

式中, T 为从国家海洋计量站广州分站恒温槽内的标准铂电阻中获取的温度值, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$); R 是每支 FY1 或 FY2 探针求取出来的平均实测电阻值, 单位为欧姆(Ω); A 、 B 、 C 为计算系数, 该系数由给定的若干组 R - T 值代入公式解得。温度校验的

实质是利用实验室标准温度 T 和探针在该温度热敏电阻阻值 R 求解系数, 拟合出更贴近实际情况的 STEINHART 和 HART 方程, 确保校验后探针在一段时间内测温的准确性。

通过对比校验后的 FY1 探针和 FY2 探针对实验室恒温水槽标准温度的实测数据(表 2), 可以进一步分析新、旧两型探针在各方面技术性能上的差异。

表 2 校准后 FY1 探针和 FY2 探针在各标准温度点的测温误差

Table 2 Temperature measurement errors for FY1 and FY2 probes at each standard temperature point after calibration

序号	标准温度/ $^{\circ}\text{C}$	FY1 (系列号)		FY2 (系列号)						
		06101	06123	0001	0002	0003	0005	0006	0007	0008
1	0.0051	0.0020	0.0030	0.000629	0.001469	0.000982	0.000842	0.001246	0.000640	0.000970
2	5.0028	0.0024	0.0026	-0.001144	-0.000822	-0.000820	0.000163	-0.000538	-0.001117	-0.000537
3	10.0040	0.0026	0.0019	-0.000470	0.000550	0.000666	-0.000332	-0.000564	-0.000185	-0.000203
4	15.0038	0.0023	0.0029	-0.000115	0.000402	0.000416	0.000464	-0.000210	0.000320	0.000125
5	20.0028	-0.0017	0.0014	-0.000064	-0.000001	-0.000030	0.000406	0.000087	-0.000008	0.000174
6	24.9953	0.0029	0.0018	0.000202	0.000821	0.000685	0.000544	0.000005	0.000455	0.000464

3.2 沉积物测温对比

2020 年 5 月, 搭载广海局“海洋地质四号”调查船, 在中国南海北部陆坡深水海域开展了 FY1 探针和 FY2 探针间的技术性能比测, 实验区概位见图 4。参试设备有: FY1 探针 4 支、FY2 探针 4 支、倾斜仪 1 支、作为贯入装置的重力柱状取样器 1 套, 水下定位系统信标 1 套。

实验过程: 调查船抵达位于南海北部陆坡区水

深为 1 445 m 的试验点 S(19.928 $^{\circ}\text{N}$ 、115.914 $^{\circ}\text{E}$), 先将探针采样间隔设为 1 s, 再将 FY1 探针和 FY2 探针各 4 支相间紧固在重力柱状取样器的取样管上, 再测量探针之间的相对距离, 最后加挂水下定位信标。安装有两套不同版本的自容式微型温度测量记录仪的海底地热流探测工作方式参见其他文献^[3-4]。设备回收后, 下载数据, 绘制测量数据(温度和姿态)-时间变化曲线, 见图 5 所示。图 5 中的绿色曲线代表倾斜仪测量记录曲线, 3 次海底地热流测量

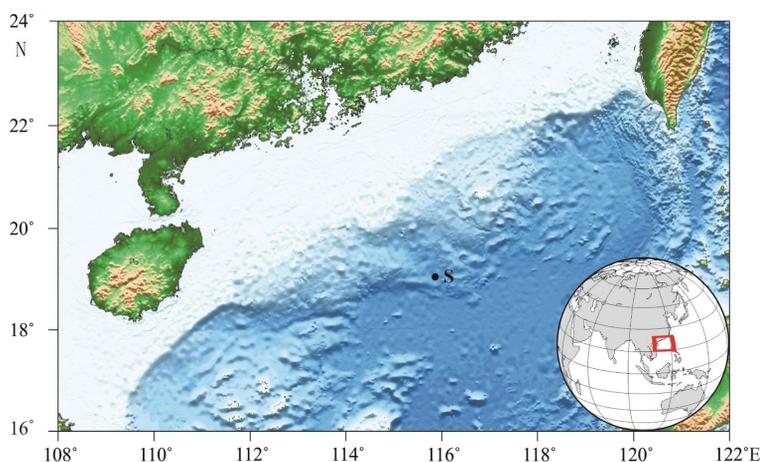


图 4 试验区的位置示意图

S 为设备比测点。

Fig.4 Schematic location map of the testing area

S shows the location of equipment comparison point.

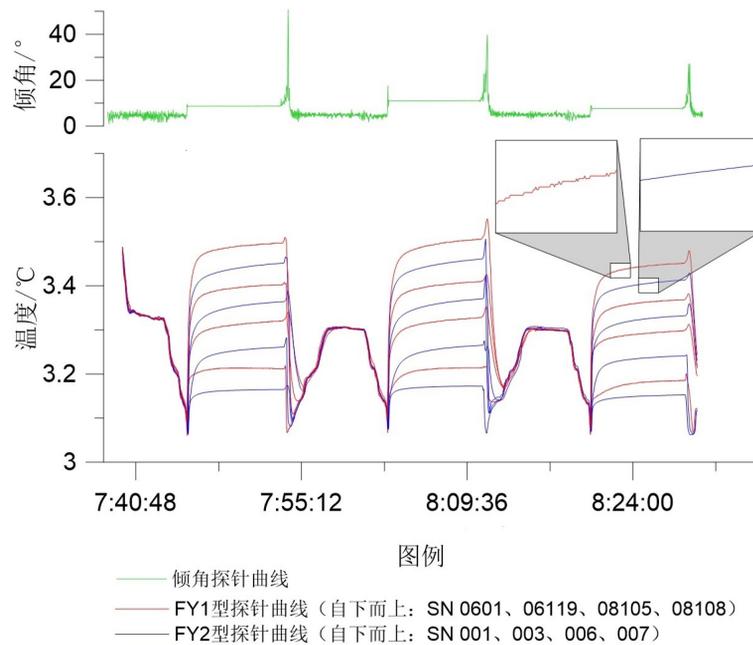


图5 FY1探针与FY2探针3次插入海底沉积物过程中的温度—时间变化曲线图

图中红色曲线为FY1探针采集的数据,蓝色曲线为FY2探针采集的数据,绿色代表倾斜仪的采集数据。

Fig.5 The temperature-time curve of the FY1 probe and FY2 probe inserted into the seabed sediment for three times

The red curve in the figure is the data collected by the FY1 probe, the blue curve is that by the FY2 probe, and the green represents inclinometer acquisition data.

过程中的倾斜角均不足 11° ,说明本次实验热流探针3次贯入到海底沉积物中的设备姿态均近似于垂直。红色曲线为4支FY1探针的记录曲线,蓝色曲线为4支FY2探针的记录曲线。这些温度曲线很好地记录了探针在水中停留、贯入海底、海底测量和从海底起拔等过程的温度变化特征。

在“恒温水槽内的测温对比”和“沉积物测温对比”的两个实验中,FY1探针和FY2探针均处在良好的工作状态下,设备完好率达100%,数据有效率为100%,数据质量可靠。

4 实验数据和技术性能的对比如

本文以在“恒温水槽内的测温对比”和“沉积物测温对比”两个实验结果为依据,重点对温度测量的分辨率、精度和稳定度等方面进行分析对比,系统讨论了微型温度测量记录仪在技术升级改正前后的技术性能和特征。

4.1 测量分辨率的对比分析

测量分辨率通常指的是仪器能够检测和显示的被测值的最小变化量。对于本文中的微型温度记录仪而言,测量分辨率即指记录仪器量值能够检测

到温度的最小变化量,等同于测量分辨率(σ)是测量温度(T)对记录仪器量值(δ)的微分,即:

$$\sigma = \frac{dT}{d\delta} = \frac{dT}{dR} \times \frac{dR}{dU} \times \frac{dU}{d\delta} \quad (2)$$

式中,温度 T (单位: $^\circ\text{C}$)是测温电阻 R (单位: Ω)的函数,并遵循公式(1)。在公式(1)中,由于 C 远远小于 B ,在公式(2)中的第一项可简化计算得到:

$$\frac{dT}{dR} \cong -\frac{B}{(A+B\ln R)^2 R} \cong -\frac{B(T+273.15)^2}{R} \quad (3)$$

测温电阻 R 与测量电压 U (单位: V)的关系决定于电路,其函数关系见以下公式:

$$R = g(U) = \frac{0.9547 + U}{1.5453 - U} \times 1.1 \times 10^5 \quad (4)$$

因此,从公式2中的第二项可计算得到:

$$\frac{dR}{dU} = \frac{2.65 \times 10^5}{(1.5453 - U)^2} \quad (5)$$

测量电压 U 与记录仪器量值 δ (单位: Ct)的关系是由记录仪电路和内置高精度ADC器件性能决定的,呈线性关系,本文中的微型记录仪采用高精度24位ADC,存在:

$$U = h(\delta) = \frac{5}{224} \delta = 2.98 \times 10^{-7} \delta \quad (6)$$

所以,从公式2中的第3项可计算得到:

$$\frac{dU}{d\delta} = 2.98 \times 10^{-7} \quad (7)$$

最后,从公式 3、5 和 7 的联立方程计算得到测量分辨率:

$$\sigma = \frac{dT}{d\delta} = 8.192 \times 10^{-2} \times \frac{B(T+273.15)^2}{R(1.5453-U)^2} \quad (8)$$

根据自推导的公式 8, $B \approx 1.8693 \times 10^{-4}$ 。再设深海海底温度 0、2.5 和 5 °C 来进行估算,相应的等效测温电阻分别为 9.4453×10^4 、 8.3512×10^4 和 $7.3966 \times 10^4 \Omega$, 对应的等效测量电压分别为 0.3903、0.4664 和 0.5401 V, 最终计算得到等效分辨率分别为 9.0682×10^{-6} 、 1.1969×10^{-5} 和 $1.5854 \times 10^{-5} \text{ °C/Ct}$ 。当 FY2 微型记录仪的量值噪声在 1 Ct 左右,可认为理论上其温度测量分辨率可达到 $1.0 \times 10^{-5} \text{ °C}$ 。

在恒温水槽内的测温和深海海底沉积物测温两个对比实验中,在 10 s 采样间隔,或仪器允许的最小 1 s 采样间隔下,不同位置处 FY1 探针和 FY2 探针的温度示值表明(表 3),FY1 探针温度示值在百分位上保持稳定,在千分位上以 $\pm 0.001 \text{ °C}$ 发生变化,表明其分辨率为 0.001 °C ;而 FY2 探针温度示值则在千分位上保持稳定,在万分位上以 $\pm 0.0001 \text{ °C}$ 发生变化,表明其分辨率优于 0.0001 °C 。在图 5 中,相同 1 s 采样间隔下,放大后 FY2 探针曲线比 FY1 探针对比显得连续和光滑,而 FY1 探针出现了一些不规则台阶,再次表明 FY2 探针具有更高的测量分辨率。

4.2 测量准确度的对比分析

测量准确度反映了测量结果与真值接近程度

的量。它与误差的大小相对应,因此,可用误差大小来表示精度的高低,误差小则精度高,误差大则精度低。本文中的微型温度记录仪精度的高低可用温度示值与温度真值之间的误差大小来描述。从表 2 可知, FY1 探针在各标准温度点下的测量误差均小于等于 $\pm 0.003 \text{ °C}$, 与早期的结果一致^[9];而 FY2 探针的测量误差在 $\pm 0.0015 \text{ °C}$ 范围之内,说明 FY2 探针具有更高的测量准确度。

4.3 测量稳定性的对比分析

测量稳定性是指测量仪器保持其计量特性随时间恒定的能力。在实验中,自容式微型温度测量记录仪的测量稳定性,实质为在一定时间内经校准后的探针在相同温度环境下其测量温度示值的稳定性。在恒温水槽内测温对比实验中,在各标准温度点恒温水槽环境下的 5~8 min 稳定时段里, FY1 探针的温度示值在百分位保持稳定,在千分位以 $\pm 0.001 \text{ °C}$ 变化,而 FY2 探针则在千分位保持稳定,在万分位上以 $\pm 0.0001 \text{ °C}$ 变化(表 3),说明了 FY2 探针具有更好的稳定性。在沉积物测温对比实验中(图 6),FY2 探针组的温度—深度间距关系的拟合公式 R^2 值为 0.9995,而 FY1 探针组的为 0.9983;表 4 所列的 3 次插入结果也佐证了两者对比中的 FY2 探针组具有更好的稳定性。本文中的 3 次地温梯度测量结果存在稍微差异,地温梯度值分别为 88.8、92.7 和 89.5 °C/km,其测量值离散的原因是这些测试站位受海底流体活跃影响所致。这种在一个很小范围内海底地热流数据比较离散的现象,在南海北部陆坡的水合物勘探区比较普遍。该站位

表 3 实验中 FY1 与 FY2 探针温度示值变化对比

Table 3 Comparison of temperature indication changes of FY1 and FY2 probes in the experiment

水槽测温对比实验 (10 s 采样间隔)				沉积物测温对比实验 (1 s 采样间隔)			
FY1 探针 (系列号 06123)		FY2 探针 (系列号 0005)		FY1 探针 (系列号 08105)		FY2 探针 (系列号 0003)	
03 : 31 : 44	5.0048	03 : 31 : 44	5.0036	07 : 49 : 01	3.3913	07 : 49 : 01	3.3669
03 : 31 : 54	5.0042	03 : 31 : 54	5.0035	07 : 49 : 02	3.3911	07 : 49 : 02	3.3669
03 : 32 : 04	5.0042	03 : 32 : 04	5.0034	07 : 49 : 03	3.3919	07 : 49 : 03	3.3670
03 : 32 : 14	5.0055	03 : 32 : 14	5.0034	07 : 49 : 04	3.3915	07 : 49 : 04	3.3671
03 : 32 : 24	5.0047	03 : 32 : 24	5.0033	07 : 49 : 05	3.3911	07 : 49 : 05	3.3671
03 : 32 : 34	5.0044	03 : 32 : 34	5.0034	07 : 49 : 06	3.3918	07 : 49 : 06	3.3672
03 : 32 : 44	5.0049	03 : 32 : 44	5.0035	07 : 49 : 07	3.3913	07 : 49 : 07	3.3672
03 : 32 : 54	5.0051	03 : 32 : 54	5.0036	07 : 49 : 08	3.3915	07 : 49 : 08	3.3672
03 : 33 : 04	5.0057	03 : 33 : 04	5.0036	07 : 49 : 09	3.3916	07 : 49 : 09	3.3673
03 : 33 : 14	5.0049	03 : 33 : 14	5.0035	07 : 49 : 10	3.3914	07 : 49 : 10	3.3672

注: 红色数字代表稳定数字。

表4 3次插入过程中,海底地温梯度的线性拟合对比

Table 4 The formula and data table for calculating the temperature gradient by linear fitting temperature-distance when inserting for three times

	FY1+FY2	FY1	FY2	备注
拟合公式	$Y=0.0878x+3.2294$	$Y=0.086x+3.2302$	$Y=0.0907x+3.2276$	
R^2	0.9975	0.9983	0.9995	第1次插入倾斜度8.7°
视地温梯度°C/m	87.8	86.0	90.7	
真地温梯度°C/m	88.8	87.0	91.8	
拟合公式	$Y=0.091x+3.2329$	$Y=0.0901x+3.2329$	$Y=0.0919x+3.2323$	
R^2	0.9971	0.9957	0.9993	第2次插入倾斜度11.0°
视地温梯度°C/m	91.0	90.1	91.9	
真地温梯度°C/m	92.7	91.8	93.6	
拟合公式	$Y=0.0887x+3.2146$	$Y=0.0881x+3.2126$	$Y=0.0884x+3.2155$	
R^2	0.9978	0.9963	0.9999	第3次插入, 倾斜度7.7°
视地温梯度°C/m	88.7	88.1	88.4	
真地温梯度°C/m	89.5	88.9	89.2	

的平均地温梯度为 90.3 ± 2.1 °C/km, 相邻海域的沉积物热导率为 $0.86 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ [4], 海底地热流值为 $78 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。

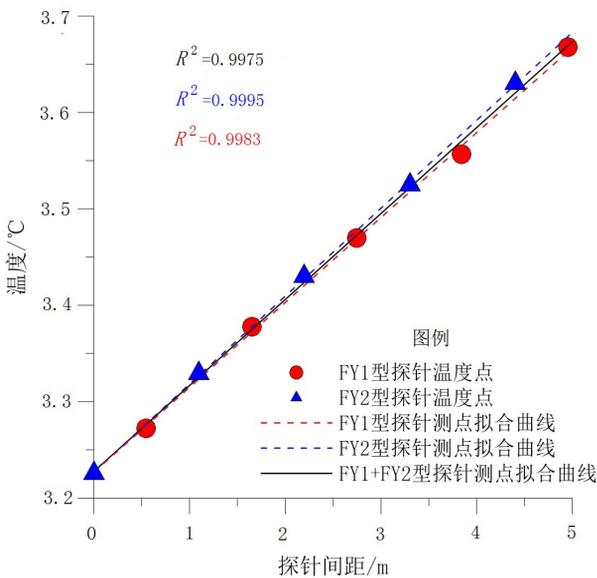


图6 第1次插入海底并计算地温梯度过程中, FY1 探针和FY2 探针各自测得温度点, 温度—探针间距线性拟合关系图

Fig.6 In the process of inserting into the seabed for the first time and calculating the geothermal gradient, the temperature points measured by the FY1 probe and the FY2 probe respectively, and the linear fitting relationship between temperature and probe distance

4.4 接口技术

接口技术主要是指计算机和温度测量设备之

间的数据传输技术。这涉及参数设置命令和数据读取的准确性和速度。数据读取试验结果显示, 当两组探针均以 1 s 采样间隔采集 5 000 个温度数据时, FY1 探针组读取数据平均用时 104.59 s, 而 FY2 探针组读取相同数量的平均用时仅为 7.92 s, 后者的读取速度比前者有显著的提升。

基于深海仪器可靠性设计考虑, FY1、FY2 的通讯均采用无接头单线异步半双工通讯技术。这种设计的优势在 FY1 多年来海上工作和 FY2 试验中均得到了充分证明。然而, 在 FY1 探针研发和使用初期, 探针主要是通过计算机的串口与设备单端接地的非标 RS485 接口实现单线通讯, 在野外数据读取时, 非标接口降低了读写速度, 还可能增加误码率。而技术升级后的 FY2 探针采用了标准单线串口传输技术, 随着计算机的更新换代, 主流计算机基本采用较高速的 USB 虚拟串口, FY1 探针的非标设计造成通讯不稳定性越来越明显, 而 FY2 明显通讯稳定可靠, 与计算机之间的通讯更为顺畅。

“恒温水槽测温对比”和“沉积物测温对比”两个实验结果表明, 改进后的 FY2 探针较 FY1 探针在温度测量分辨率、测量准确度和稳定性等技术性能上都有了显著的提升接口技术的改进, 使得 FY2 探针数据读取速度更快, 误码率降低。

5 结论

基于前期自主研发的 FY1 探针的技术开发积累, 对相关技术进行了升级改造, 研发出了新型的

FY2 探针。在实验室恒温水槽和南海北部陆坡深水海域,分别对 FY1 和 FY2 两组探针做了“恒温水槽测温对比”和“沉积物测温对比”两个实验。实验结果显示,①与 FY1 探针相比, FY2 探针在温度测量分辨率、精度、工作效率等技术指标更具优势,采集系统运行更加稳定;②FY2 探针的通讯接口方面与现今主流计算机技术融合度更佳,数据传输的速度更快,准确度更高;③FY2 探针技术性能全面超越技术升级改造前的 FY1 探针;④FY2 的测量分辨率优于 $0.0001\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量准确度优于 $\pm 0.0015\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比测点 S (19.928°N , 115.914°E) 的海底热流值为 $78\text{ mW}/\text{m}^2$ 。实验结果表明新设备具有高分辨率、高精度以及高效的测量能力的特点,将为未来的海底热流探测与研究领域提供新的助力。

致谢: 感谢中国地质调查局广州海洋地质调查局、珠海市泰德企业有限公司、国家海洋计量站广州分站和“海洋地质四号”船的全体调查人员,是他们的关心支持和辛勤劳动使得 FY2 探针的海上试验得以顺利完成! 王先庆和李雨帮助清绘插图,在此表示衷心致谢。

参考文献 (References)

- [1] 汪集暘. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [WANG Jiyang. Geothermics and its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [2] O卡普迈耶 O, 海涅尔 R. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1981. [Kappelmeyer O, Haenel R. Geothermics with Special Reference to Application[M]. Beijing: Science Press, 1981.]
- [3] 徐行, 罗贤虎, 肖波. 海洋地热流测量技术及其方法研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(1): 77-81. [XU Xing, LUO Xianhu, XIAO Bo. Research on the methods & technique of marine heat flow measurement [J]. Ocean Technology, 2005, 24(1): 77-81.]
- [4] 徐行, 陆敬安, 罗贤虎, 等. 南海北部海底热流测量及分析[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 562-565. [XU Xing, LU Jing'an, LUO Xianhu, et al. The marine heat flow survey and the result discussion in the northern part of South China Sea [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 562-565.]
- [5] 罗贤虎, 徐行, 张志刚, 等. XXG-T型海底地温梯度探测系统的研发及技术特点[J]. 南海地质研究, 2007(1): 102-110. [LUO Xianhu, XU Xing, ZHANG Zhigang, et al. Development and technical character of XXG-T marine geothermal gradient measurement system [J]. Research of Geological South China Sea, 2007(1): 102-110.]
- [6] Bullard E C. The flow of heat through the floor of the Atlantic ocean [J]. Proceedings of the Royal Society of A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1954, 222(1150): 408-429.
- [7] Von Herzen R, Maxwell A E. The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method [J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64(10): 1557-1563.
- [8] Sclater J G, Corry C E, Vacquier V. In situ measurement of the thermal conductivity of ocean - floor sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(4): 1070-1081.
- [9] Hyndman R D, Erickson A J, Von Herzen R P. Geothermal measurement on DSDP Leg 26[M]//Davies T A, Luyendyk B P. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 26. Washington: US Government Printing Office, 1974: 675-742.
- [10] Lister C R B. The pulse-probe method of conductivity measurement [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1979, 57(2): 451-461.
- [11] Pfender M, Villinger H. Miniaturized data loggers for deep sea sediment temperature gradient measurements [J]. Marine Geology, 2002, 186(3-4): 557-570.
- [12] Chang H I, Shyu C T. Compact high-resolution temperature loggers for measuring the thermal gradients of marine sediments [J]. Marine Geophysical Research, 2011, 32(4): 465-479.
- [13] 钱翼鹏. 南海北部地热流测量及其成果[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1982, 2(4): 104-109. [QIAN Yipeng. Terrestrial heat flow measurements and the results in the north of South China Sea [J]. Marine Geological Research, 1982, 2(4): 104-109.]
- [14] 姚伯初. 中美合作调研南海地质专报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. [YAO Bochu. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China & USA[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994.]
- [15] Nissen S S, Hayes D E, Yao B C, et al. Gravity heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B11): 22447-22483.
- [16] Qian Y P, Niu X P, Yao B C, et al. Geothermal Pattern Beneath the continental margin in the northern part of the South China Sea[C]//CCOP/TB, 1995, 25: 89-104.
- [17] 徐行, 罗贤虎, 许鹤华, 等. 南海地热流探测、研究与展望[J]. 南海地质研究, 2015: 1-18. [XU Xing, LUO Xianhu, XU Hehua, et al. The measurement, review and prospect on geothermal studies of the South China Sea [J]. Geological Research of South China Sea, 2015: 1-18.]
- [18] 徐行, 罗贤虎, 彭登, 等. 系列化的海洋地热流探测技术获得突破[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 621-622. [XU Xing, LUO Xianhu, PENG Deng, et al. Marine geothermal flow detection technology gains breakthrough [J]. Geology in China, 2017, 44(3): 621-622.]
- [19] 彭登, 徐行, 罗贤虎. 海底沉积物地温梯度测量系统设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(6): 1-3. [PENG Deng, XU Xing, LUO Xianhu. Design of marine sediment geothermal gradient measurement system [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(6): 1-3.]
- [20] 张东风, 片秀红. 热工测量及仪表[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2015. [ZHANG Dongfeng, PIAN Xiuhong. Thermal Measurement and Instrumentation[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015.]