

doi:10.11720/wtyht.2015.6.17

彭登,罗贤虎,徐行,等.海底热流探针的温度校验技术[J].物探与化探,2015,39(6):1199-1204.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.6.17

Peng D, Luo X H, Xu X, et al. Research on temperature calibration technique of submarine heat flow probe[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1199-1204. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.6.17

海底热流探针的温度校验技术

彭登,罗贤虎,徐行,陈爱华

(广州海洋地质调查局,广东 广州 510760)

摘 要: 海底热流探针是一种高分辨、高精度的温度测量设备,定期对其进行温度校验是保证其测量数据准确性的一个必要环节。鉴于海底热流探针的尺寸和其他技术指标等特点,传统的温度校验方式无法适用于广州海洋地质调查局自主研发的温度测量仪。针对该问题,设计了一种基于美国海鸟 SBE 917plus 型温盐深(CTD)测量仪的适用于深海测温设备的温度校验方法,通过海上试验确定其可以适用于海底热流探针的校验,为用常规方法无法进行校验的深海测温设备提供了新的校验方法。该方法也可用于其他的深海测温设备的温度校验工作。

关键词: 热流探针;温度;校验;CTD;恒温槽

中图分类号: P631;P716+.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2015)06-1199-06

海底热流测量是海洋地质地球物理调查的重要手段之一^[1]。海底热流探针是一种高分辨、高精度的温度测量设备,由于测温仪电路板存在温漂和零点漂移的影响,以及传感器 NTC 热敏电阻阻值漂移的影响,必须定期对其进行温度检测校准^[2-4]。然而,常规的高精度温度测量设备校验都是在国家级计量研究中心的高精度控制的恒温槽内进行的^[5-6]。由于海底热流探针设备的尺寸(广州海洋地质调查局“十一五”期间自主研发的“剑鱼 1 型多通道海底热流原位探测系统”,总长度为 7.1 m,其中探针长度 6 m,目前国家计量中心无法对其进行校准)和使用环境的特殊性^[6],且海底热流探针温度校验直接在计量中心进行校验的困难性,海底热流探针的温度校验是开展海底热流测量工作的一个重要环节,温度校验质量直接影响到温度测量的准确度,因此,开展海底热流探针的温度校验技术和方法研究十分重要。

针对海底热流探针需要定期进行高精度的温度校验,广州海洋地质调查局在生产实践中总结出一套海底热流探针温度校验系统流程,在海上调查应用中取得了良好的效果。文中将重点介绍海底热流探针的温度校验技术与方法,并对校验的结果进行温度测量准确度的评估和分析。

1 常规温度校验方法

常规的温度计校准采用比较测量法,将标准器与被校准温度计同时置于一个温场较均匀、恒定的测温介质中,待达到热平衡后,按一定的顺序读取标准及被校准温度计示值,从而确定被校准温度计的校准结果。目前温度计校准主要有以下标准:JJG128-2003《二等标准水银温度计》、JJG351-1996《工作用廉金属热电偶》、JJG229-1998《工业铂、铜热电阻》^[7-8]。

高精度的温度校验需要在计量部门的实验室内进行校验与测量。校验设备由高精度恒温槽、一等铂金热电偶、高精度温度测量电桥和交流稳压设备等组成,精确度 0.001℃,恒温槽通过铂电阻检测温度,在 35、30、25、20、15、10、5、1℃各稳定 1 min,通过温度偏移量计算的方法对校验设备进行温度校验^[6]。

2 热流探针技术特点

在海洋调查中,海底热流探针通常分为两种类型。一类是 Lister 型探针,同时获得海底沉积物中的海底温度、地温梯度和原位热导率等地热参数;另一类是 Ewing 型探针,Ewing 型探针在取样过程中,

通过捆绑在大型重力取样管中,一方面采集地热参数数据,另一方面可获得沉积物样品,再用专用的松散沉积物样品的热导率测量设备在室内对样品进行热导率测量^[9-11]。

MTL 海底地温梯度测量系统由德国 Bremen 大学和德国 FIELAX 公司合作研制,FY-1 型温度测量仪为广州海洋地质调查局自行研发。FY-1 型温度测量仪由温度采集模块、姿态判断模块、主控电路模块、上位机处理模块四部分组成,是一个集高准确度的温度测量电路、姿态测量监控电路、数据存储和传输于一体的电子单元,选用 16 位高性能、多通道、低能耗的 MSP430F123 芯片作为主处理器,高精度的 NTC 型热敏电阻 YSI55032 为传感器,通过直流不平衡电桥的测量方式,来检测热敏电阻随温度变化的电阻值,然后通过前置放大电路上,使用多路开关、信号放大滤波技术进行信号调理;最后通过 24 位高分辨率 A/D 转换器将阻值温度信息转化为数字量信息并记录到系统的 FLASH 存储单元。系统内部的时钟模块电路具有功耗极低的多功能时钟/日历芯片,可以为系统提供万年历和时分秒定时等功能。采用 USB 接口技术,PC 机可通过密封电子舱的水密插头,传输测量系统工作参数的设置和数据。图 1 为海底沉积

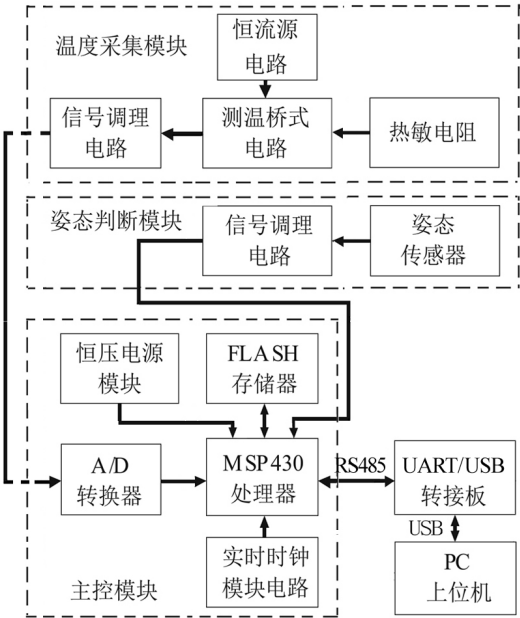


图 1 海底沉积物地温梯度测量系统框图

物地温梯度测量系统框图。

多年的野外实践证明,两种设备的温度测量具有较高的一致性^[5]。表 1 为 MTL 海底地温梯度测量系统和 FY-1 型温度测量仪技术指标,图 2 为 MTL 海底地温梯度测量探针和 FY-1 型温度测量仪探针外观图。

表 1 MTL 海底地温梯度测量探针和 FY-1 型温度测量仪技术指标

参 数	MTL 海底地温梯度测量系统	FY-1 型温度测量仪
测量范围	-5~+40℃	-2~+52℃
分辨率	0.001℃	0.001℃
精度	±0.005℃	±0.003℃(0~25℃)
采样率	可编程,最高 1 s	可编程,最高 1 s
内存	0.129 Mbit	16 Mbit
连续工作时间	1s 采样率可连续工作 18 h	1s 采样率可连续工作 120 h(受电池和环境温度影响)
通信接口	RS232	RS232
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	6 000 m	6 000 m
尺寸	直径 15 mm,长 160 mm	直径 20 mm,长 220 mm
校准方法	国家海洋标准计量中心恒温槽校准或利用 CTD 设备海上自行校准	国家海洋标准计量中心恒温槽校准或利用 CTD 设备海上自行校准

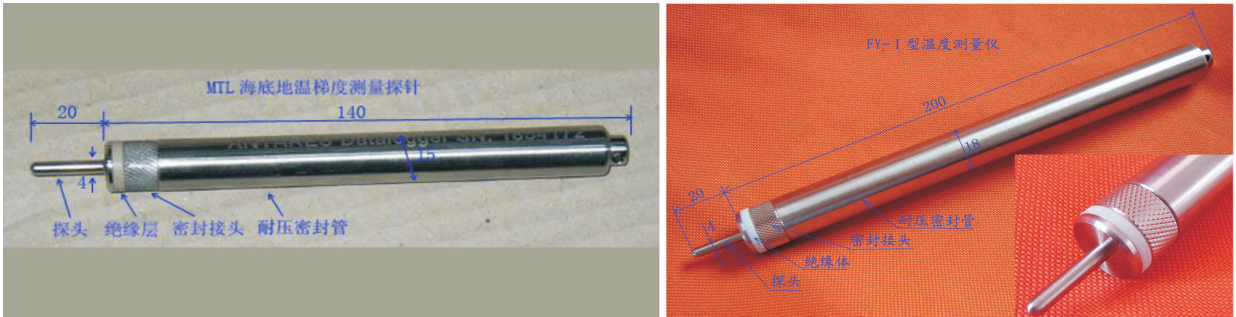


图 2 MTL 海底地温梯度测量探针(左)与 FY-1 型温度测量仪探针外观(右)

3 温度校验

笔者介绍的海底热流探针的温度校验方法充分利用了深海水体是一个天然的优质的“恒温槽”这一条件。根据 CTD(温盐深,conductance temperature depth)测量剖面变化规律和前人的资料,可以把水体分为变温层、斜温层和恒温层^[12-13],其中,南海的恒温层一般在 1 500 m 以下,因此作者将热流探针的温度校验设计在水深大于 2 000 m 的深海环境下,与其他的高精度测温测量进行对比观测,从而实现温度校验目的。在实际海上校准过程中,因为海底热流探针校准使用非线性拟合算法,为了使其数据具有代表性,一般是采用底层、2 000、1 500、1 200、900、700 m 这 6 个层位的数据;而 CTD 的校准则是在天津国家海洋计量站恒温海水槽中进行校准。

本次热流探针的温度校验,采用高精度 CTD 测量系统中部分传感器作为对比设备。其中,美国海鸟 SBE 917plus 型 CTD 测量仪的温度测量传感器的技术指标是:测量范围,−3 ~ +32 ℃;初始精度,±0.005 ℃;分辨率,0.000 5 ℃。CTD 系统的测温参数优于 MTL 和 FY-1 温度测量仪,因此可以满足温度校验的需要。虽然差距不是很大,但仍然存在一些误差传递现象。通过试验计算,得出误差传递范围为±0.001 ℃;而 MTL 海底地温梯度测量系统的精

度为±0.005 ℃,FY-1 型温度测量仪的精度为±0.003 ℃(0~25 ℃),因此,并不会影响其测量精度。

2012 年 2 月 14 日,天津国家海洋计量站对广州海洋地质调查局的 SBE 917plus 型 CTD 测量仪进行校准,主要是针对温度、电导率和压力进行校准。其证书编号:GHJ(2012)校字 023 号。温度的校准是在温度标准实验室(温度 20.0℃,相对湿度 40%)中进行的。温度校准使用的标准计量器具见表 2。

在校准过程中,把带温度传感器的 CTD 和温度标准计量器具均放在较大的恒温海水槽中,校准温度从高温到低温,分 8 个校准温度点进行,每个测温点的恒温时间长 10~15 min 不等。由于 CTD 的温度传感器为铂电阻,故依据标准的温度值和仪器温度示值,经过回归公式计算,各温度测量点的校准结果如表 3 所示。可以看出,SBE 917plus 型温盐深(CTD)测量仪的温度测量值,经过数学回归方法处理后,与标准温度值的误差是非常小的。

表 2 温度校准使用的标准计量器具

名 称	型号/规格	不确定度(准确度)等级或最大允许误差	证书编号
标准铂电阻温度计	0~231.928 ℃	一等	RGep2011-0283
测温电桥	0~1.299 999 9	±1×10 ⁻⁷	DLzk2011-1113

表 3 各温度测量点校准后的温度值及温度误差 ℃

温度点号	1	2	3	4	5	6	7	8
标准温度值	35.1612	29.9319	25.1124	20.2098	15.0942	10.1924	5.1094	0.1879
仪器温度示值	35.1607	29.9326	25.1128	20.2093	15.0936	10.1925	5.1101	0.1876
温度误差	-0.0005	0.0007	0.0004	-0.0005	-0.0006	0.0001	0.0007	-0.0003

2012 年 4 月 3 日,在南海北部水深 2 670 m 的海域,对 MTL 探针和 FY-1 型温度测量仪探针在海上用 CTD 设备进行了校准。试验过程分安装、设置和校验三个部分。

安装。将 FY-1 型测温仪探针(编号为:8870、8874、8876 和 8881)与 MTL(Miniaturized Temperature data Logger,编号为:137、145、168、171、172、173、174、175、181 和 182)探针分成 3 组,用钢丝穿好后扎紧在 CTD 上,探头高度与 CTD 温度探头高度相同。图 3 为 FY-1 型测温仪探针、MTL 探针捆绑在 CTD 系统上的示意。

设置。首先设置 FY-1 型测温仪探针和 MTL 探针的采样参数,使 FY-1 型测温仪探针、MTL 探针、CTD 主计算机的时间与导航时间同步;然后将 FY-1

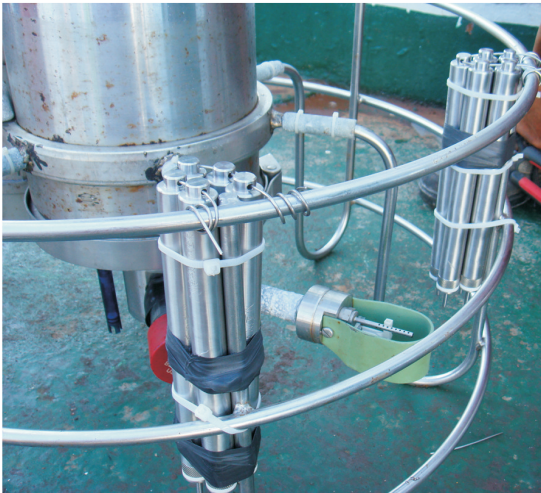


图 3 FY-1、MTL 探针捆绑在 CTD 系统上

型探针与 MTL 探针固定在 CTD 上,两者随 CTD 下放,再将设备放置到水深 2 500 m 的水体中。

校验。在校验温度段控制方面,采用了不同深度具有不同的温度段原理进行数据的采集。当设备开始采样后,停留 3 min,以使设备探头充分适应到海水的温度,测温设备与环境达到热平衡;而后每收缆至 2 000、1 500、1 200、900、700 m 各停留 3 min,将设备收上来。其间共停留 6 个层位,考虑到变温层中温度变化较大,没有在该温度段中停留和校验。

设备回收甲板之后,卸下 FY-1 型测温仪探针和 MTL 探针,冲淡水并擦干,分别读出 4 支 FY-1 型测温仪探针、10 支 MTL 探针的数据以及 CTD 系统中的采集数据,此次温度校验没有出现数据缺失或错误的情况。

4 实验结果和数据分析

温度测量结果如图 4 所示,实验数据见表 4。

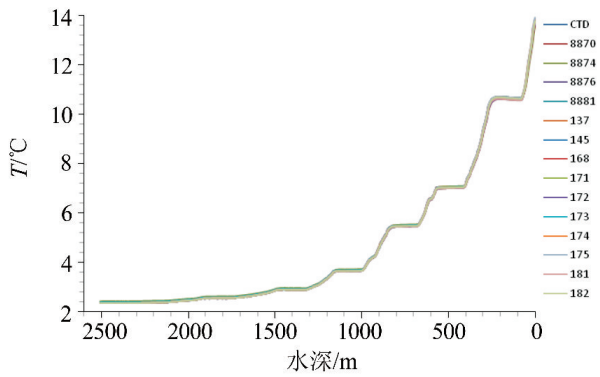


图 4 FY-1、MTL 探针与 CTD 的温度记录(校准前)

表 4 海试 CTD 与 FY-1 型测温仪探针、MTL 探针测温原始数据 °C

探针编号	测试深度/m					
	2502.35	1999.56	1500.71	1118.57	901.23	700.45
CTD 温度	2.3567	2.5567	2.8892	3.6514	5.4699	7.0178
8870 探针	2.3567	2.5563	2.8894	3.6518	5.4617	7.0176
8874 探针	2.3570	2.5563	2.8891	3.6515	5.4682	7.0176
8876 探针	2.3567	2.5561	2.8891	3.6515	5.4612	7.0179
8881 探针	2.3567	2.5563	2.8891	3.6515	5.4692	7.0179
137 探针	2.3564	2.5574	2.8893	3.6517	5.4718	7.0176
145 探针	2.3564	2.5564	2.8892	3.6516	5.4715	7.0176
168 探针	2.3564	2.5564	2.8894	3.6516	5.4728	7.0176
171 探针	2.3564	2.5564	2.8899	3.6518	5.4730	7.0176
172 探针	2.3564	2.5564	2.8894	3.6518	5.4723	7.0176
173 探针	2.3564	2.5571	2.8897	3.6518	5.4720	7.0176
174 探针	2.3564	2.5564	2.8904	3.6518	5.4725	7.0176
175 探针	2.3564	2.5564	2.8902	3.6518	5.4718	7.0176
181 探针	2.3564	2.5564	2.8904	3.6518	5.4720	7.0176
182 探针	2.3564	2.5561	2.8894	3.6516	5.4723	7.0176
所有探针均方差	0.00019	0.000357	0.000471	0.000129	0.003925	0.000109

从图 4 可以看出,15 条温度曲线变化情况基本一致。对于 FY-1 型测温仪探针、MTL 探针,采用 STEINHART & HART 方程来进行 R-T 转换,即:

$$\frac{1}{T} = a + b(\ln R) + c(\ln R)^3,$$

(1)

式中: T 为温度读数,单位 K; R 为热敏电阻阻值,单位 Ω ; a 、 b 、 c 为系数,分别用 3 个 T 和 R 由式(1)求出系数,然后再用这些系数算出其他的温度数据。由于 STEINHART & HART 方程系数由实验室环境校准数据拟合而来,故在海洋全浸环境下,FY-1 型测温仪探针的测试条件已经发生变化,需要对其进行零点漂移和温度漂移的修正^[14-15]。

1) 零点漂移修正:

$$\Delta T_{\text{零点}} = T_{\text{CTD}} - T_{\text{飞鱼}},$$

(2)

式中, $\Delta T_{\text{零点}}$ 为 FY-1 型测温仪探针零点的修正值, T_{CTD} 为 CTD 的温度, $T_{\text{飞鱼}}$ 为 FY-1 型测温仪探针的温度。采用下式对 FY-1 型测温仪探针进行逐点修正

$$(T_{\text{飞鱼零点修正}})_i = (T_{\text{飞鱼}})_i + \Delta T_{\text{零点}}。$$

(3)

2) 温度漂移修正:

$$\Delta T_{\text{温漂}} = \alpha(T_{\text{飞鱼零点修正}} - T_{\text{CTD}}) - \beta。$$

(4)

对上述温漂修正公式进行线性回归,求解其系数 α 和 β 。

3) 零点和温漂联合修正公式:

$$T_{\text{飞鱼修正值}} = (1 - \alpha)(T_{\text{飞鱼测量值}} + T_{\text{CTD}}) + \beta。$$

(5)

经过零点和温漂修正后与 CTD 比较温度误差。校准后在稳定深度的条件下,CTD 与 4 支 FY-1 型测温仪探针、10 支 MTL 探针的温度误差见表 5。

表 5 校准后 4 支 FY-1 型测温仪探针、10 支 MTL 探针与 CTD 的温度改正值 ℃

探针型号	测试深度/m					
	2502.3480	1999.5630	1500.710	1118.570	901.230	700.450
CTD 温度	2.3567	2.5567	2.8892	3.6514	5.4699	7.0178
8870 探针	0	0.0004	-0.0002	-0.0004	-0.0008	0.0002
8874 探针	-0.0003	0.0004	0.0001	-0.0001	0.0007	0.0002
8876 探针	0	0.0006	0.0001	-0.0001	-0.0003	-0.0001
8881 探针	0	0.0004	0.0001	-0.0001	0.0007	-0.0001
137 探针	0.0003	-0.0007	-0.0001	-0.0004	-0.0009	0.0002
145 探针	0.0003	0.0003	0	-0.0002	-0.0006	0.0002
168 探针	0.0003	0.0003	-0.0002	-0.0002	-0.0009	0.0002
171 探针	0.0003	0.0003	-0.0007	-0.0004	-0.0001	0.0002
172 探针	0.0003	0.0003	-0.0002	-0.0004	-0.0004	0.0002
173 探针	0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0004	-0.0001	0.0002
174 探针	0.0003	0.0003	-0.0010	-0.0004	-0.0006	0.0002
175 探针	0.0003	0.0003	-0.0010	-0.0004	-0.0009	0.0002
181 探针	0.0003	0.0003	-0.0010	-0.0004	-0.0001	0.0002
182 探针	0.0003	0.0006	-0.0002	-0.0002	-0.0004	0.0002
所有探针均方差	0.00019	0.000357	0.000471	0.000133	0.001397	0.000109

从表 5 可以看出, 4 支 FY-1 型测温仪探针、10 支 MTL 探针和 CTD 的温度误差非常之小。从 2 500 ~700 m 水深,其温度从 2.35 ℃ 上升至 7.01 ℃ , 4 支 FY-1 型测温仪探针、10 支 MTL 探针与 CTD 之间的误差绝大多数是在±0.001 ℃ 之内,并且其均方差值都较小,波动大小的量较小,说明其测量准确度是有保证的,可达到海底沉积物地温梯度测量准确度的要求。

5 结语

分析 MTL、FY-1 型探针和 CTD 测量系统的工作原理和各自的技术特点,将 CTD 设备作为热流探针的温度校验设备是可以满足校验要求的,所带来的误差传递不至于影响热流探针的测量精度。针对海底热流探针的技术指标和尺寸的特殊性,根据深海环境下的温盐深变化规律,将深水环境的恒温层作为热流探针校验的天然恒温槽,其方法是可行的。

海上试验表明,用温度测量范围-3 ℃ ~ +32 ℃ ,初始精度±0.005 ℃ ,分辨率 0.0005 ℃ 的 CTD 设备校验 MTL 和 FY-1 探针,其误差绝大多数是在±0.001 ℃ 之内,其测量准确度是有保证的,可达到海底沉积物地温梯度测量准确度的要求。因此,在今后的工作中,推行用 CTD 设备作为校验设备,利用深海环境作为天然的“恒温槽”对海底热流探针进行定期的校验是一种高效、简捷和可靠的技术方法。用类似的方法,也可以用于其他深海的测温设备的温度校验工作。

参考文献:

[1] Moridis G J, Sloan E D. Gas production potential of disperse low saturation hydrate accumulations in oceanic sediments [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48 (6) : 1834-1849.

[2] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases, second edition [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1998: 19-23.

[3] 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.

[4] 蒋忠祥, 徐敏山, 姚卫星. 基于数值分析的仪器系统差校正 [J]. 物探与化探, 2013, 37 (2) : 287-290.

[5] 陈宗恒, 罗贤虎, 徐行. 海底地温梯度探测系统设计 [M] // 国土资源部广州海洋地质调查局. 南海地质研究 (2009). 北京: 地质出版社, 2010: 123-127.

[6] 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 [M] // 国土资源部广州海洋地质调查局. 南海地质研究 (2007). 北京: 地质出版社, 2008: 102-110.

[7] 国家质量技术监督局. JJF 1170-2007 负温度系数低温电阻温度计校准规范 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 1-30.

[8] 周登锦, 陈子骞, 徐标, 等. 提高接触式表面温度计校准可靠性的方法 [J]. 上海计量测试, 2011 (4) : 46-48.

[9] Langseth M J. Techniques for measuring heat flow through the ocean floor [G] // Lee W H K. Terrestrial heat flow: Geophys Monogr Ser 8. American Geophysical Union, 1965: 245-271.

[10] 徐行, 罗贤虎, 肖波. 海洋地热能测量技术及其方法研究 [J]. 海洋技术, 2005, 24 (1) : 77-81.

[11] Hyndman R D, Davis E E, Wright J A. The measurement of marine geothermal heat flow by a multipenetrated probe digital acoustic telemetry and in-situ thermal conductivity [J]. Mar Geophys Res, 1979 (4) : 181-205.

[12] 刘文通, 徐德伦, 王正林, 等. 渤海中部海底恒温层温度及泥温相位随深度变化特征 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26 (5) : 460-465.

[13] 胡国霞, 于航. 自然分层型水蓄冷槽布水器的模拟 [J]. 能源技术, 2007, 28 (3) : 237-240.

[14] 李波, 陈光华, 徐行, 等. 基于热敏电阻的多通道高精度温度测

量系统[J].仪表技术与传感器,2008(5):87-88.

仪中的应用[J].仪表技术与传感器,2010(1):18-19.

[15] 高厚秀,李波,吴来杰,等.Agilent34401A 在沉积物热导率测量

Research on temperature calibration technique of submarine heat flow probe

PENG Deng, LUO Xian-Hu, XU Xing, CHEN Ai-Hua
(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: The submarine heat flow probe is a high-resolution, high-precision temperature measurement equipment, temperature calibration is carried out periodically which is an essential part to ensure the accuracy of the measurement data. The traditional temperature calibration is not applicable to Guangzhou Marine Geological Survey temperature gradient probe because of the size and other technical indicators of the submarine heat flow probes, design a calibration method based on US Seabird SBE 917plus type conductivity-temperature-depth system (CTD) which is suitable for deep-sea temperature measurement equipment. This method can be applied to check sea-floor heat flow probe by sea trials, which provides a new checking method while the conventional methods can not be verified in the deep sea temperature measurement equipment. This method achieved good results in the offshore applications survey and broaden its applications, which can also be used to temperature calibration for other deep-sea temperature measurement devices.

Key words: heat flow probe; temperature; calibration; CTD; thermostatic bath

作者简介: 彭登(1987-),男,工程师,华南理工大学研究生毕业,现从事海洋地质与地球物理调查和技术方法研究工作。

上接 1198 页

Abstract: The prediction of oil-bearing sand of the second member of Eocene Shahejie Formation of Tuo 11 south area faces many problem.First,oil-bearing sand cannot be identified by seismic data because of the small thickness;Second,there exists difference of P-impedance between oil-bearing sand and water-bearing sand.Through the analysis of the geophysical characteristics of oil-bearing sand and water-bearing sand,the authors predicted the spatial distribution characteristics of oil-bearing sand using geostatistical inversion under the constraints of resistivity curve,and also predicted the oil-water interface.Inversion results have confirmed that the oil-water interface is at about the depth of 2 237 m,which expands the oil-bearing area determined by early studies and is in good agreement with the results of the new drilling.Geostatistical inversion results have achieved good result in Tuo 11 south area for the first time,which widens the train of thought for the further exploration.

Key words: Tuo 11 south area;the second member of Eocene Shahejie Formation;oil-bearing sand;geostatistical inversion;seismic data

作者简介: 杨国杰(1986-),男,2012年毕业于中国石油大学(华东)矿产普查与勘探专业,现从事油气田勘探储层预测工作。