doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.03.007

适用于极地海底热流调查的低温段泥温传感器低温工作特性分析

冯志涛[1],李国富[1],杨光兵[2],秦玉峰[1]
(1.国家海洋技术中心,天津 300112;2.自然资源部第一海洋研究所,山东 青岛 266061)

摘 要:本文基于极地海底地热流调查需求,针对在极地严酷的低温环境下泥温测量电路容易出现的失效、温度漂移等问题进行了分析,并采用了恒流源测温方式,有效降低了自发热和引线电阻干扰,并简化电路结构,增强了电路低温状态工作稳定性。本文阐述了低温段泥温传感器工作原理,结合调查实践确定了泥温传感器的主要设计参数;对电路结构进行详细拆解分析,分析各模块在低温条件下存在的失效风险及低温工作性能;对实际电路进行试验验证,利用数据分析传感器的测量精度,并在低温条件下对泥温传感器进行了实测。测试结果表明,低温段泥温传感器在低温条件下工作稳定,数据稳定性和一致性表现良好。

关键词:海底热流;低温段;低温特性分析;泥温测量
中图分类号:P733 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2020)03-0049-06

极地海底热流调查是研究海洋地球动力学、海底热液活动、大陆边缘沉积盆地演化及开展海上油气资源评价的重要基础，对于维护极地海洋环境、服务国家极地战略、参与国际极地资源开发等具有很强的现实意义。海底泥温场是海洋工程设计建造与运行管理所需的重要环境条件,对海底结构物的保温、载流、疲劳、腐蚀和生物附着等都有一定的影响[1]。众所周知,极地气候恶劣,受洋流和反气旋影响,常年温度偏低,平均气温介于-40~-20℃间。在极地热流调查实践中发现，某些极地海域海床温度超出量程，例如特拉诺瓦海盆底质的温度接近-2℃[2]。因此,针对极地热流调查的工作环境及特点,研究有效的低温段沉积物温度测量技术必要性很强。

极地热流调查通常采用的是我国台湾大学海洋研究所研制的 OR-166 型附着式小型温度计固定于重力柱状采样器的方式。另外,德国 ANTARES 公司生产的 MTL 温度记录仪和法国 NKE 公司生产的 THP 海底泥温仪也是国际上较为成熟的海底温度场探测设备。我国开展南、北极热流调查工作相对较晚,数据相对匮乏。近年来,我国在热流探测领域进行了大量工作，研制开发了多款泥温传感器,关键性能指标与市场成熟产品基本持平,代表性的研发机构有国家海洋技术中心、广州海洋地质调查局、广东工业大学、中国科学院南海海洋研究所等。但是,这些技术成果在实践中应用较少,海底热流探测技术领域相关科研机构依然需要投入更大力量[3-6]。伴随“建设海洋强国”战略的实施,国内海洋技术装备的设计研发能力得到了极大提升,与世界先进技术间的差距逐步缩小、甚至反超。因此,国内热流调查领域相关单位能使用国产泥温传感器,为其技术产业化提供应用实践平台。

1 测温电路工作原理

铂(Pt)电阻传感器是利用金属铂电阻值随着温度变化而变化的物理特性制成的温度测量装置[7]。

收稿日期:2019-07-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41306093,41706038);山东省自然科学基金资助项目(ZR2017QD005);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2017Q01);天津市自然科学基金资助项目(18JCQNJC08700)
作者简介:冯志涛(1982-),男,硕士,工程师,主要从事海底沉积物热流探测技术研究。E-mail:arzhi2008@163.com

铂电阻自身线性度高、稳定性强等特性决定了它在高精度测温领域具有先天优势。按照 IEC751 国际标准,现在常用的 Pt1000(R_0=1 000 Ω)是以温度系数 TCR=0.003 851 为标准统一设计的铂电阻,其温度电阻特性是:

当 $T\in[-200℃,0℃]$时

$$R_r=R_0\left[1+AT+BT^2+C(T-100)^3\right] \tag{1}$$

当 $T\in[0℃,850℃]$时

$$R_T=R_0(1+AT+BT^2) \tag{2}$$

式中:R_T 为 T ℃时铂(Pt1000)的电阻值;R_0 为其 0℃时的电阻值;TCR=0.003 581 时的系数值为:A=3.908 3×10^{-3}℃$^{-1}$,B=−5.775×10^{-7}℃$^{-2}$,C=−4.183×10^{-12}℃$^{-4}$。

恒流源测温电路原理框图如图 1 所示[8]。首先将恒流源电流加到精密电阻和 Pt1000 电阻两端,分别在高精电阻和 Pt 电阻两端得到两个电压信号,而后将两个电压信号进行恰当的信号调理。信号调理电路的性能直接关系到前端电阻与后端 AD 转换器输入的电压信号之间转换的相关性。当温度发生变化时,铂电阻值发生变化,而高精电阻值保持不变,由于在其两端加恒定电流,可得到与温度变化相对应的电压信号,将铂电阻两端电压信号输入 AD 转换器的输入端,精密电阻两端电压作为基准电压,完成模数转换,最后主控芯片进行计算换算为温度值。

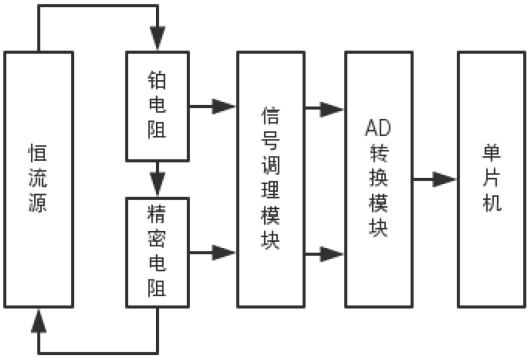


图 1 恒流源测温电路原理框图

2 测温电路关键技术指标论证

2.1 测温范围

由于海洋表层受太阳辐射影响较大,而海洋深处受太阳辐射和表层热量的传导、对流影响较小。因此,从表层海水到 1 000 m,水温随深度增加而迅速递减,1 000 m 以下,水温下降则变慢。全球海洋的水温变化一般在−2~30℃间,其中年平均水温超过 20℃的区域占整个海洋面积的一半以上。海水温度日变化较小,日温度变化水深范围从海表面深入到水下 30 m 处,而年变化可到达水深 350 m 左右处。在水深 350 m 左右处,有一恒温层。但随深度增加,水温逐渐下降,在水深 3 000~4 000 m 处,温度达到−1~2℃。在极地实际的调查作业过程,探测到海底泥温最小值在−3℃以右。曾信等[4]研究表明海底的底层水温往往波动较大,影响表层沉积物的温度梯度,非常有必要对海洋水体温度剖面以及海底沉积物—海水界面水层温度进行探测,通过热传导方程方式分析泥温梯度。因此泥温传感器的温度范围上限应涵盖海水表层海水温度,其下限应涵盖极地泥温极小值,最终确定低温段泥温传感器测温范围为−5~35℃,据此为保证在极地环境中布放阶段电路正常工作,不出现宕机现象,电路工作温度下限应不高于−40℃[9-10]。

2.2 测温精度

安永宁[1]研究提出,海底泥温设计参数的推算方法主要分为 2 种:一维热传导方程法和回归分析方法,其中一维热传导方程无需水温和泥温实测支持,可基于海水底层与海底表层界面的同一性,仅借助水温数据推算泥温值。

一维热传导方程的微分形式为:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=k\frac{\partial^2 T}{\partial d^2} \tag{3}$$

式中:T 为泥温;t 为时间;k 为沉积物导热系数;d 为测温点深度。

其中,沉积物导热系数可由经验数值给出,也可以通过实测数据计算得到,

$$k=\frac{(d_1-d_2)\pi}{(\ln T_1-\ln T_2)t} \tag{4}$$

式中:d_1 和 d_2 为测温点深度;T_1 和 T_2 为两测温点温度;t 为温度变化周期值。研究表明在 3 350 m 深的部分海域季节温度变化依然会对海底沉积物产生一定的温度波动影响[4]。由实测数据表明,底层水温极大值出现在夏秋季节,而极小值出现在秋冬季节[9],因此底层水温变化是以年为周期的,不妨设定 t 为 365 d。

分析之前泥温调查实测值,并依据上述公式加以计算验证,泥—水界面随着深度增加逐渐减小,结合应用实践,本研究设定测温精度不低于±0.01℃,可满足沉积物温度梯度测量。

3　电路的低温工作特性分析

对测温电路进行低温工作特性分析,需首先对测温电路系统按功能模块进行分解。本研究设计电路为达到低温可靠性要求,在设计之初,即确定在完成功能基础上采用最简化设计原则,实现芯片功能的兼并复用,电路结构实现了最简。电路设计中,如何在保证性能的前提下精简外围电路是本研究中难度最高的工作。

电路按照功能分为 MCU 主控单元、存储单元、AD 转换单元、电源管理单元和锂电池主要核心器件,以及电阻、电容、晶振等外围器件。下面将逐一对电容电阻低温特性及失效风险进行分析。

(1) AD 转换芯片

本研究 AD 转换芯片选用的是 TI 公司制造的 ADS1248 芯片,它是整个测温电路的核心,该芯片可 24 位采样,内置可编程增益放大器,内置基准电压温漂为 10 ppm/℃, 且其工作温度范围为-40~125℃,储藏温度范围-60~150℃。在接近-40~0℃降温过程中,其放大器增益误差(Gain Error)会逐步减弱,最大仅 0.04%;输入基准补偿在增益值最大时仅为 6 uV;数据转换率误差(Data Rate Error)也会随着温度降低其性能会有改善,最大仅 0.6%。此外,-40℃的低温环境中, 芯片内部基准电压会下降 0.003 V,约占标称幅值 2.048 V 的 0.15%,为避免引入该误差本研究没有采用内部基准电压源。综上,在-40℃低温环境中, 作为测温电路的最核心器件,排除安装焊接环节出现的虚焊风险,ADS1248 几乎不会对电路采样性能形成任何威胁。

(2) MCU 主控芯片、电源芯片和存储芯片

在低温环境中,芯片的响应速度(Response)、开始时间(Start-up)和建立时间(Set-up)等性能均会产生一定程度的迟滞,但是迟滞时间非常有限,不会造成芯片功能性的失效。电源芯片的输出电平(Output Voltage)也会略有降低,但是依然在系统工作电平范围之内。因此,电路中主控芯片、电源芯片及存储芯片不存在失效风险。

(3) 贴片电阻、电容元件

贴片电阻、电容均存在温度系数,温度变化时,其阻容值也会随之变化。一般来说,电容值会伴随温度降低而升高,而电阻则相反。电容在-40℃条件下,其电容升高仅 5%,这一误差在可接受范围内,不会对电路运行产生影响。本研究选用的贴片电阻温度系数均为±50 ppm/℃,在从室温(27℃)降至-40℃时,其温度跨度约 67℃, 相应电阻值变化约为:

$$50\ \text{ppm/℃}\times 67℃=0.335\% \qquad (5)$$

这与其动辄 1%至 5%的阻值误差相比,已经在可接受范围内了。

(4) 晶振

晶振是电子电路的心脏,它产生的时钟信号是整个系统运行的节拍,关系着整个系统的运转。本研究采用的 FC-12M 晶振工作最低温度极值可达到-40℃,在极地低温条件下仍可正常工作。但在低温环境下晶振确实存在着停振或者不起振的风险,究其原因,是电路自身在低温环境中激励能力下降或晶振起振激励需求增加造成的,亦即激励不匹配造成的。针对此种情况,可选用容值略小一点的匹配电容,将有效降低激励起振难度,降低时钟停振风险。

在解决掉晶振低温环境正常工作的问题后,本文重点关注了其低温条件下工作性能。低温环境中晶振存在一定的频率偏移,其工作性能直接关系到电路中的软件延时、定时器计时、计数器、日历等模块的正常运行,无源晶振 FC-12M 的频率温度系数为-0.04×10^{-6}/℃MAX,在从室温(27℃)降至-40℃的极限情况下,其频率变化为

$$-0.04\ \text{ppm/℃}\times[27℃-(-40℃)]=2.68\ \text{ppm} \qquad (6)$$

这一误差与晶振固有的频率稳定度误差 20 ppm 相比,可基本忽略其影响。

(5) 电池

锂电池在低温条件下,由于电解液传输性能变差、金属锂沉积以及扩散速度变慢等因素综合影响,其放电能力及容量均会出现下滑,在极地低温环境使用,对电池的要求也相对更加苛刻[11]。本研究采用的是 ER4250 型一次锂亚硫酰氯高能量型电池,其标称电压为 3.6 V,标称容量 1.2 AH,最大连续放点电流 40 mA,工作温度范围为-55~85℃,其电压—温度曲线图见图 2。

图 2 可见,电池随着温度下降,其放电电压出现了明显的下降,最低接近了 3.0 V,对电路运行产生了很大威胁,极有可能出现失效风险,但是这一问题可以通过增加电池串联数量,提高电路输入端电压的方式解决。本研究中的测温电路功耗较小,能力下降则不会对电路运行产生任何影响。本研究

中的测温电路在完成布放前配置后进入待机模式，待到达启动时间通过内部中断启动测量电路。在该模式下，系统内除 MCU 中的 RTC 之外的所有模块电路均处于休眠模式，电源管理芯片处于关闭状态，该状态下的静态电流约为 0.15 uA，系统待机总电流不超过 7 uA，在该模式下，如图 2 中橙色曲线所示，低温状态(–30℃为例)电池电压不会低于电源管理芯片可允许的最低输入门限，亦即电路不存在低温宕机风险。电路工作电流范围在 15~20 mA 之间，该电路可通过上位机设定开机时间，在极端低温气候条件下可设置传感器入水后启动电路，此时水温相对气温较高，参考图 2 蓝色曲线，可知电压输出仍然可满足需要。

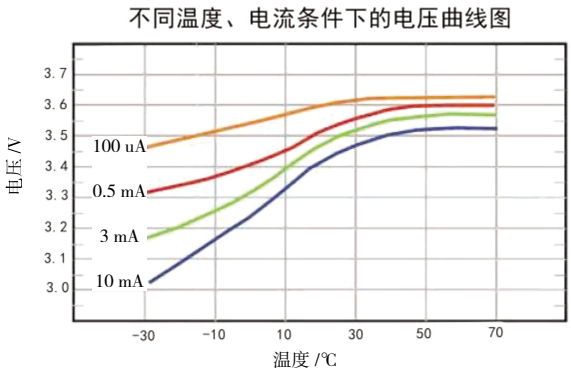


图 2 ER14250 电池电压–温度曲线图

4 测温电路精度分析及低温工作测试

在国家海洋技术中心恒温标定水槽完成了 0℃以上温度段的标定试验。

从本次试验对象中选取是 3 支传感器，并以 0℃标定点为例对传感器测温性能展开分析。由于极地海底沉积物泥温约 3℃左右，因此该温度点工作性能具有较好的代表性。截取控温点前 5 分钟内的测温数据，每 20 s 一组数据，每个传感器各 16 个温度点。将其绘制成温度变化曲线，其温度 t(℃)与时间 t 的关系图如图 3。由图 3 可见，3 支传感器测温曲线波动具有较好的一致性，曲线之间相同时间点通道差值控制在 0.005℃以内，总体误差控制在可接受范围内，优于±0.01℃的设计指标。

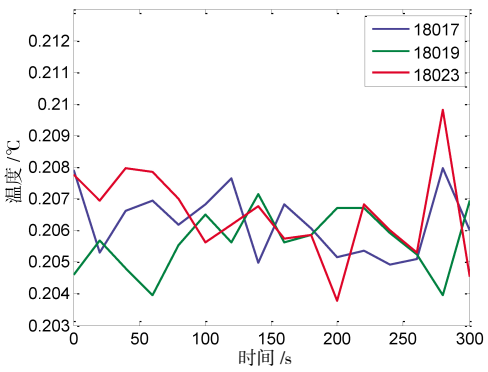


图 3 0℃温度点温度变化曲线

由相邻值之间的差值的绝对值$|x_i-x_{i-1}|$可观察其相邻数据震荡情况，该数据主要可反映出电路在恒定温度点的流体环境中，基本排除外界环境温度的扰动之后电路自身的系统噪声水平。图 4 中横坐标为时间，纵坐标为泥温传感器相邻测量值之间差值的绝对值，由图 4 可知，在总体 45 个抖动值中，只有 43 个抖动值在 0.003℃以内，占总数据量的 95.6%。数据震荡值表现较好，也反映出传感器电路系统噪声性能较为优异，这得益于电路设计阶段确立的最简化设计原则，电路结构最大程度简化，降低了系统噪声，同时也降低了系统的失效风险。

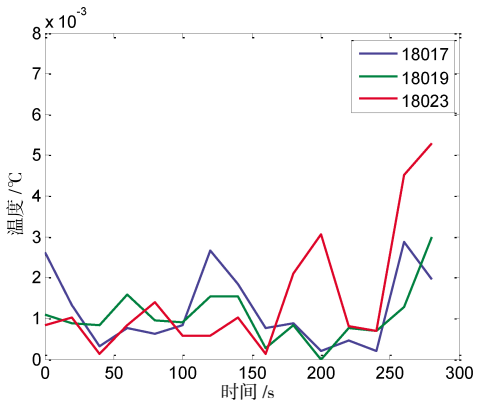


图 4 相邻值震荡特性曲线

最后将测量值与标定标准值(0.206℃)相减，并取其绝对值，可获取其测温的正偏差柱状统计图，见图 5。通过柱状统计图，可清晰的看到偏差分布的区间，约有 74%的样本数据偏差位于 0~1.25×10^{-3}℃区间，大约 98%的样本偏差位于 0~2.5×10^{-3}℃区间内，最大偏不超过 4×10^{-3}℃，且仅占总样本数的 2%。

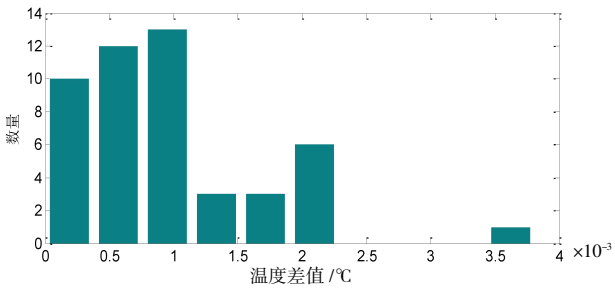


图 5 测量值与标准值正偏差统计

2018 年 12 月 3 日，在国家海洋技术中心实验室完成了–5℃温度点的温度标定试验，试验步骤与

前述相同。试验历时 1 h，获取了传感器在低温段下测温数据。

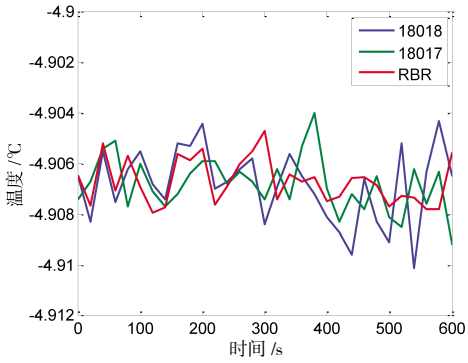


图 6　−5℃温度标定试验与 RBR 温度传感器比测曲线

试验恒温水槽采用 FLUKE7381 恒温标定水槽，标准温度采用加拿大 RBR 温深传感器温度测量值。获取的数据温度曲线如图 6 所示。通过观察，红色曲线为 RBR 传感器测定值，蓝色和绿色曲线分别为泥温传感器测定值，可见 3 条曲线之间偏差较小，数据一致性较好，数据偏差值控制在±0.003℃以内。

由于水槽控温精度略有欠缺，可采用控温时间段内数据求均值的方法来消除波动误差，将三者温度求取平均值，可得表 1。

表 1　传感器与 RBR 温传感器数据均值对比

传感器型号	RBRduo	STS(Seabed Temperature Sensor)	
编号	50 774	18 017	18 018
温度均值/℃	−4.907 02	−4.906 56	−4.906 27

可见在低温段其平均测温误差基本控制在 0.000 7℃，其测温精度性能已达到设计参数。

随机选取 2 支泥温传感器在冰箱冷冻室进行低温工作测试，试验容器采用密封盒，内部灌满无水酒精。经测试，泥温传感器在冰箱低温环境中工作稳定，测温数据平滑，一致性较好，最低测试温度约为−16.32℃。通过测试，印证了泥温传感器经受住了低温环境的考验，其工作性能稳定可靠，能够实现低温段的泥温高精度测量。

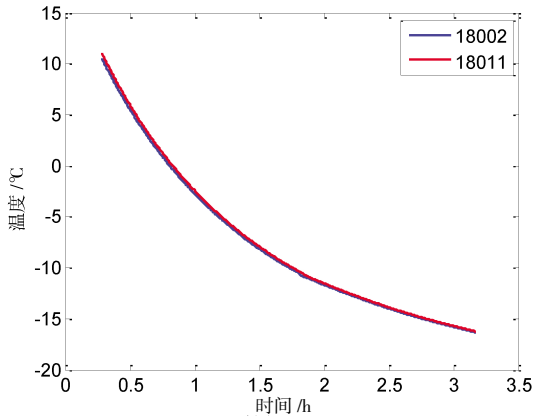


图 7　冰箱冷冻室低温环境测试温度变化曲线

5　结 论

本文提出了一种基于 Pt1000 电阻为感温元件的高精度泥温传感器电路，并针对泥温传感器电路低温环境中的工作特性进行了分析，将电路按模块进行分解，从基础参数入手分析各模块中可能存在的失效风险因素，从设计阶段排除导致电路失效的隐患，该电路低温各模块工作特性符合低温环境中的测量需求。本文还对低温段测温电路进行了低温环境运行测试。测试结果表明，该电路在低温环境中运行正常，测量数据稳定准确，未发现测量值剧烈抖动等现象，电路测温精度优于±0.01℃，可满足海底浅层底质的温度梯度测量工作需求，准确获取沉积物各层间的纵向温度梯度的分布数据。

参考文献：

[1] 安永宁.任意海区海底泥温设计参数的推算方法研究[J].海岸工程,2018,37(4):9−16.
[2] 国家海洋局极地专项办公室.北极海域地球物理调查[A].北京:海洋出版社,2016.
[3] 汪集旸,张健,胡胜标,等.地热学及其应用[A].北京:科学出版社,2015.
[4] 曾信,杨小秋,杨军,等.海底热流长期观测系统中低功耗测温单元的设计与实现[J].海洋技术学报,2016,35(2):1−8.
[5] 王向鑫,丁忠军,杨磊,等.用于深海温度梯度探测的高分辨力测温系统[J].海洋技术学报,2018,37(4):23−28.
[6] Marion Pfender, Heinrich Villinger. Miniaturized data loggers for deep sea sediment temperature gradient measurements[J]. Marine Geology, 2002:557−570.
[7] 方益喜,雷开卓,屈健康,等.基于 PT1000 的高精度温度测量系统[J].电子设计工程,2010,18(10):79−82.
[8] 薛风国.一种恒流源驱动的高精度温度测量系统设计[J].信息技术,2012(9):5−8.
[9] 刘文通,宋珊.渤海中部海底泥温铅直分布特征以及与水温的关系[J].海洋与湖沼,1993,24(6):584−591.

[10] Hideki Hamamoto, Makoto Yamano. Heat flow measurement in shallow seas through long-term temperaturemonitoring[J]. Geophysical Research Letters,2005:32.

[11] 王洪伟,杜春雨,王常波.锂离子电池的低温性能研究[J].电池,2009,39(4):208-210.

Analysis of Low Temperature operation Characteristics of Low Temperature Section Mud Temperature Sensor Suitable for Polar Heat Flow Investigation

FENG Zhi-tao[1], LI Guo-fu[1], YANG Guang-bing[2], QIN Yu-feng[1]

1. *National Ocean Technology Center, Tianjin* 300112, *China*;

2. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao* 266061, *Shandong Province, China*

Abstract: This paper is based on the needs of the polar seabed geothermal flow survey, and analyzes the problems such as failures and temperature drifts that are easy to occur in the extremely harsh temperature environment. In this paper, the constant current source temperature measurement method is innovatively used to effectively reduce the self-heating and lead resistance interference. At the same time, the circuit structure is simplified and the working stability of the circuit at low temperature is enhanced. Firstly, the working principle of the low temperature section mud temperature sensor is introduced. The main design parameters of the mud temperature sensor are determined by the investigation practice. Then the circuit structure is analyzed in detail, and the failure risk of each module under low temperature conditions is analyzed in detail. Its low temperature performance. Finally, the actual circuit is tested and verified, and the measurement accuracy of the sensor is analyzed by the data, and the mud temperature sensor is measured under low temperature conditions. The test results show that the low temperature section mud temperature sensor works stably under low temperature conditions, and the data stability and consistency are good.

Key words: submarine heat flow; low temperature section; low temperature characteristics analysis; mud temperature measurement