

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801935

基于载人潜水器的高分辨力温度梯度检测系统*

王向鑫¹ 丁忠军^{1,2} 杨磊¹ 李德威¹ 赵晟娅¹

(1.国家深海基地管理中心 青岛 266237; 2.青岛海洋科学与技术国家实验室 青岛 266237)

摘要: 针对深海热液区沉积物温度梯度变化微小、水下精细探测难度大等问题,提出了一种基于载人潜水器的高分辨力温度梯度检测系统。系统主要包括温度梯度探针和电子舱,探针和电子舱之间用水密缆连接,探针内装有高精度 NTC 热敏元件,电子舱内装有精密信号调理电路、系统控制单元和锂电池等模块。本文从原理上对信号调理电路进行设计,提高了系统分辨力,降低了电路漂移和失调性能,解决了 NTC 热敏元件互换性差、输出信号微弱等问题;对系统结构进行有限元分析,优化设计结构,减轻了系统重量;最后在实验室完成了系统测试,本系统使用标定分度为 0.05 °C 的 NTC 热敏元件,系统量程为 0~5 °C,分辨力 0.001 °C,工作水深范围是 2 000~4 000 m。在西南印度洋大禧热液区搭载蛟龙号载人潜水器完成了水下实验,实验结果表明,本系统结构设计合理,能够与载人潜水器协同作业,成功获取了大禧热液区深海沉积物的温度梯度数据。

关键词: 温度梯度;潜水器;高分辨力;深海;精细探测

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 416.30

High resolution temperature gradient detection system based on manned HOV

Wang Xiangxin¹ Ding Zhongjun^{1,2} Yang Lei¹ Li Dewei¹ Zhao Shengya¹

(1. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China;

2. Qingdao Nation Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: A high resolution temperature gradient detection system based on manned submersible is proposed in view of the small changes in the temperature gradient of the sediment in the deep-sea hydrothermal area and the difficulty of the fine underwater detection. The system mainly includes the temperature gradient probe and the electronic cabin, the probe and the electronic cabin are connected with water, the probe is equipped with high precision NTC thermosensitive components, and the electronic module is equipped with the precision signal conditioning circuit, the system control unit and the lithium battery module. In this paper, the signal conditioning circuit is designed in principle, which improves the system resolution, reduces the circuit drift and misalignment, solves the problems of poor interchangeability and weak output signal of NTC thermosensitive components. The system structure is analyzed by finite element analysis, the design structure is optimized and the weight of the system is reduced. Finally, the system test is completed in the laboratory. The system uses the calibration score of 0.05. The NTC thermistors at the temperature range is 0~5 degrees, the resolution is 0.001 degrees, and the working water depth is 2 000~4 000 meters. The underwater test was carried out on a manned submersible in the Great Jubilee hot water area of the India Ocean in Southwest China. The experimental results show that the structure of the system is reasonable and can be worked together with the manned submersible, and the temperature gradient data of the deep-sea sediment in the Great Jubilee hydrothermal area have been successfully obtained.

Keywords: temperature gradient; submersible; high resolution; deep sea; fine detection

收稿日期:2018-08-10

* 基金项目:青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2016ASKJ15)、国家重点研发计划(2016YFC1401300)、国家重点研发计划(2016YFC0302600)、海洋公益性行业科研专项(201405036)资助

0 引 言

深海沉积物温度梯度是描述沉积物热状态的一项重要指标,是地热探测的一个重要组成部分,对于研究地球内部能量传输、海洋岩石演化及海底热液矿床的形成等有重要意义^[1-4]。

深海沉积物温度梯度检测的两个关键要素是高分辨力测温系统和水下精确操作。深水近近似一个恒温场,3 500 m 水深的低温热液区沉积物温度异常值通常也只有百分之几摄氏度甚至更低。刘希民等^[5]提出了基于电流法的热电阻温度测量装置,实现了热电阻全温度分度范围的温度测量;张瑜等^[6]提出了四线制恒流源温度测量电路,用于星载微波辐射计定标源的精密测温;何云丰等^[7]以 NTC 热敏电阻为测温元件,设计了一种基于恒流源的温度采集电路;范寒柏等^[8]深入研究了恒压式、恒流式、双积分式等基于 NTC 热敏电阻的典型测温电路;冯志涛等^[9]介绍了一种自返式微型地热探针温度测量电路;他们的研究在面向各自的应用领域都取得了较好的应用效果,但是都没有介绍窄量程(0~5℃)范围内的高分辨力测温方法。在水下操作技术领域,罗玉玺、吕九红、郑国艺等^[10-12]提出了一套基于重力取样器的温度梯度测量系统,在分辨力和精度上取得了较好的效果,但是由于工作模式的限制很难实现精确定位和定点探测;Pfender 等^[13]提出了一种深海小型温度梯度记录仪(MTLs),工作水深 6 000 m,温度分辨力 0.001℃,Chang 等^[14]提出了紧凑型高分辨率温度记录仪(CHTLs),使用 24 位低噪声 A/D 转换器,分辨力优于 0.001℃,工作时需要多个测温装置安装在钢矛或者活塞里,由于其体积过大很难在地形复杂的热液区进行使用;徐志豪、梁康康、李柯良等^[15-17]研制了一套基于水下机器人(ROV)的温度梯度探针,分辨力高达 5‰℃,采用探针和数据舱整体式设计,文献^[16]提出的装置曾在中国大洋第 35 航次进行海上试验,水下作业过程中由于系统尺寸过长重心偏高,出现了机械手夹持困难、插入沉积物时容易引起测量扰动等问题。

综上,实现深海沉积物定点、快速和准确的温度梯度探测还有很多关键技术问题亟需解决。目前,利用载人深潜器可观、可控、精确定位的技术特点,发挥人的主观能动性,可以解决水下精确操作的问题,而有关基于载人潜水器的温度梯度检测系统的研究目前还鲜有报道。

为此,本文针对深海热液区沉积物的温度梯度分布特点,提出了一种基于载人潜水器的高分辨力温度梯度检测系统,使用标定分度为 0.05℃的 NTC 热敏元件,系统量程 0~5℃,分辨力 0.001℃,工作深度范围是 2 000~4 000 m。

1 系统设计

1.1 总体设计

温度梯度检测系统包括温度梯度探针和电子舱两部分,探针和电子舱之间用水密缆连接,系统的总体框图如

图 1 所示,探针内部装有 3 个高精度热 NTC 敏电阻,电阻之间间距 20 cm;耐压电子舱内部有微处理器、信号调理电路、数据采集系统、电源管理系统、数据存储系统和锂电池等部分。

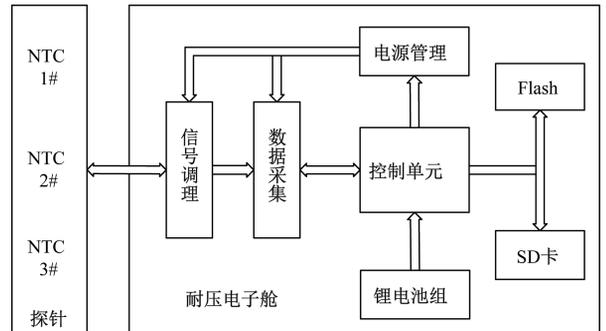


图 1 系统总体框图

电子舱内的电路系统有控制电路和检测电路组成,其中控制电路主要包括单片机控制系统、24 位数据采集电路、Flash 存储电路、SD 卡存储电路等。检测电路主要包括精密电桥电路、电源控制电路、精密电压基准电路和信号调理电路等。

本系统需要搭载在蛟龙号载人潜水器进行深海温度梯度探测,主要用于探测热液区、冷泉区沉积物的温度梯度,系统工作时,潜水器机械手夹持探针手柄将探针垂直插入到被测区域,并停留一段时间,探针内部的热敏电阻能够感知外界温度,温度值与热敏电阻值一一对应,信号调理电路将电阻信号转换为电压信号,由于 NTC 热敏电阻输出的电压信号非常微小,信号调理电路还将微信号中的公共信号去除,放大有用信号,从而提高传感器的分辨力,最终将信号调理成 1~5 V 模拟量。模拟量进入 24 位高精度 A/D 转换器,将模拟量转换为数字量,单片机系统读取数字量信息,通过温度解算程序将电压信号换算成温度信号,并将温度信号存储起来,考虑到海上工作环境恶劣,本系统使用了 Flash 存储芯片和 micro_SD 卡存储,其中可插拔的 SD 卡便于数据存储和导出,Flash 存储的数据用于备份。

1.2 系统工作模式

本系统结合了载人潜水器的水下作业特点,设计了一套与潜水器水下作业相适应的工作模式,系统的工作流程如图 2 所示,系统在搭载前需要与水面支持母船进行对钟操作,以水面支持母船时间为时间基准,即水面支持母船、潜水器本体和深海温度梯度测量系统三者时间同步,存储的温度数据还包含了数据采集时间,由于时间上保持同步,科学家可以结合潜水器搭载的其他传感器设备分析水下环境参数。由于潜水器在下潜过程中设备无需工作,本系统属于自容式探测系统,系统设置了休眠模式,在潜水器下潜和上浮过程中系统进入休眠状态,电源管理系统自动切断信号调理电路电源,单片机进入休眠状态,休眠时间结束后

系统自动开始工作,为了提高测温精度,本文使用成熟的软件查表法来解算通道温度数据^[18]。

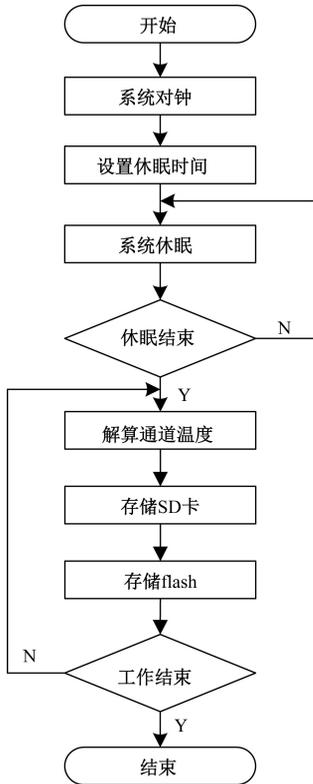


图2 系统工作流程

1.3 信号调理电路

本文为了解决热敏电阻一致性差的问题,对所使用的热敏电阻在同一环境下进行精细标定,标定数据如表1所示,以标定数据为基础对信号调理电路进行优化,本文采用图3所示的典型电路将NTC热敏电阻的电阻信号转换为电压信号,式(1)给出了电阻-电压转换电路输出电压的关系式,可见电压与电阻的关系也是非线性的,需要设计与之匹配的信号调理电路和温度解算方法。

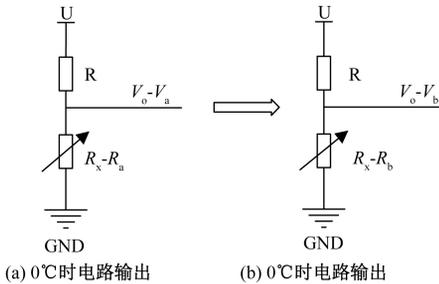


图3 电阻-电压转换电路

根据图3可知,热敏电阻在0℃时电路输出电压为 V_a ,5℃时电路输出电压为 V_b ,其表达式为:

$$V_a = \frac{R_a}{R + R_a} \cdot U, V_b = \frac{R_b}{R + R_b} \cdot U \quad (1)$$

式中:电阻 R 是为电桥匹配的固定电阻; R_x 为NTC热敏电阻的阻值; R_a 为热敏电阻在0℃时对应的阻值; R_b 为热敏电阻在5℃时对应的阻值。热敏电阻在0~5℃的范围变化,则电路的输出电压最大变化范围是 $V_a \sim V_b$,其表达式为:

$$V(R) = V_a - V_b = \frac{R_a}{R + R_a} \cdot U - \frac{R_b}{R + R_b} \cdot U \quad (2)$$

根据式(2),电压变化范围 $[V_a, V_b]$ 可以看成关于匹配电阻 R 的函数,若想获得最高分辨力,就要找到相应的匹配电阻 R 使输出电压 $V(R)$ 最大。根据式(3)可以计算出匹配电阻 R 的阻值。

$$\begin{cases} \frac{dV(R)}{dR} = 0 \\ \frac{d}{dR} \left(\frac{dV(R)}{dR} \right) \Big|_R < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_a, R_b 由热敏电阻的标定数据给出,高精度热敏电阻的精细标定数据如表1所示, U 为5.000V基准电压,可以计算出匹配电阻的阻值为 $R = 20 \text{ k}\Omega$ (取整数)。结合表1的标定数据,根据式(1)、(2)可以计算出电阻-电压转换电路在0℃和5℃时输出电压,具体数值如表2所示。

由表2不难发现,外界温度从0℃到5℃范围内,电路输出信号的变化范围非常小,只有0.32V左右,由于电路中的公共信号(0℃时对应的电路输出 V_b)高达2.5V,微信号很难被放大,为了解决这一问题,本文提出了一种可以消除公共信号的信号调理电路,如图4所示,电压跟随器用于信号隔离,差分放大电路将输出信号与2.500V精密基准电压源相减,可以去除信号中的公共部分,再将信号同相放大,提高了电压转换电路的电压分辨力。

为了降低信号调理电路本身产生的的漂移、失调和电源干扰,本系统所有放大器均使用TI公司生产的TLC2652型高精度斩波稳零型运算放大器,具有非常低的失调和漂移性,能通过其独有的斩波技术可以把来自电源的干扰降到最低,其失调电压最大约为5nV。电压基准源使用基于AD584芯片的精密电压基准源,其电压典型误差 $\pm 0.05\%$,电压漂移 $\pm 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

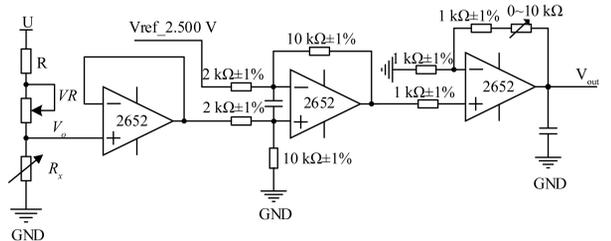


图4 信号调理电路

表 1 电阻值—温度值对照表

温度/ °C	NTC#1/ Ω	NTC#2/ Ω	NTC#3/ Ω	温度/ °C	NTC#1/ Ω	NTC#2/ Ω	NTC#3/ Ω	温度/ °C	NTC#1/ Ω	NTC#2/ Ω	NTC#3/ Ω
0.00	26 539.70	27 371.56	24 622.36	1.70	24 324.38	25 086.32	22 571.07	3.40	22 314.65	23 012.97	20 708.37
0.05	26 471.39	27 301.11	24 559.15	1.75	24 262.44	25 022.42	22 513.69	3.45	22 258.43	22 954.97	20 656.24
0.10	26 403.29	27 230.85	24 496.12	1.80	24 200.68	24 958.71	22 456.47	3.50	22 202.37	22 897.14	20 604.27
0.15	26 335.38	27 160.80	24 433.27	1.85	24 139.10	24 895.18	22 399.41	3.55	22 146.47	22 839.47	20 552.44
0.20	26 267.66	27 090.96	24 370.60	1.90	24 077.69	24 831.83	22 342.52	3.60	22 090.73	22 781.96	20 500.75
0.25	26 200.14	27 021.31	24 308.10	1.95	24 016.46	24 768.66	22 285.78	3.65	22 035.15	22 724.62	20 449.21
0.30	26 132.82	26 951.86	24 245.79	2.00	23 955.41	24 705.68	22 229.21	3.70	21 979.72	22 667.43	20 397.82
0.35	26 065.69	26 882.62	24 183.65	2.05	23 894.53	24 642.87	22 172.79	3.75	21 924.45	22 610.41	20 346.57
0.40	25 998.75	26 813.57	24 121.69	2.10	23 833.82	24 580.24	22 116.54	3.80	21 869.34	22 553.55	20 295.46
0.45	25 932.01	26 744.72	24 059.91	2.15	23 773.28	24 517.79	22 060.44	3.85	21 814.38	22 496.85	20 244.50
0.50	25 865.46	26 676.07	23 998.30	2.20	23 712.92	24 455.52	22 004.50	3.90	21 759.58	22 440.31	20 193.68
0.55	25 799.10	26 607.62	23 936.87	2.25	23 652.73	24 393.42	21 948.72	3.95	21 704.93	22 383.93	20 143.00
0.60	25 732.93	26 539.36	23 875.61	2.30	23 592.71	24 331.51	21 893.10	4.00	21 650.44	22 327.71	20 092.46
0.65	25 666.96	26 471.30	23 814.52	2.35	23 532.86	24 269.77	21 837.64	4.05	21 596.10	22 271.65	20 042.07
0.70	25 601.17	26 403.44	23 753.61	2.40	23 473.19	24 208.20	21 782.33	4.10	21 541.91	22 215.75	19 991.82
0.75	25 535.57	26 335.77	23 692.88	2.45	23 413.68	24 146.81	21 727.18	4.15	21 487.88	22 160.00	19 941.71
0.80	25 470.16	26 268.30	23 632.31	2.50	23 354.34	24 085.59	21 672.18	4.20	21 433.99	22 104.41	19 891.74
0.85	25 404.94	26 201.02	23 571.92	2.55	23 295.17	24 024.55	21 617.34	4.25	21 380.26	22 048.98	19 841.91
0.90	25 339.91	26 133.93	23 511.70	2.60	23 236.17	23 963.68	21 562.66	4.30	21 326.69	21 993.70	19 792.22
0.95	25 275.06	26 067.03	23 451.65	2.65	23 177.34	23 902.99	21 508.13	4.35	21 273.26	21 938.58	19 742.67
1.00	25 210.40	26 000.33	23 391.77	2.70	23 118.68	23 842.47	21 453.75	4.40	21 219.98	21 883.61	19 693.26
1.05	25 145.92	25 933.82	23 332.06	2.75	23 060.18	23 782.12	21 399.52	4.45	21 166.86	21 828.80	19 643.98
1.10	25 081.63	25 867.50	23 272.52	2.80	23 001.85	23 721.94	21 345.45	4.50	21 113.88	21 774.14	19 594.85
1.15	25 017.53	25 801.37	23 213.15	2.85	22 943.68	23 661.93	21 291.54	4.55	21 061.05	21 719.64	19 545.85
1.20	24 953.61	25 735.43	23 153.94	2.90	22 885.68	23 602.09	21 237.77	4.60	21 008.37	21 665.29	19 496.99
1.25	24 889.87	25 669.68	23 094.91	2.95	22 827.84	23 542.43	21 184.15	4.65	20 955.84	21 611.09	19 448.26
1.30	24 826.31	25 604.11	23 036.04	3.00	22 770.17	23 482.93	21 130.69	4.70	20 903.45	21 557.05	19 399.68
1.35	24 762.94	25 538.74	22 977.34	3.05	22 712.66	23 423.60	21 077.38	4.75	20 851.22	21 503.16	19 351.22
1.40	24 699.75	25 473.55	22 918.81	3.10	22 655.32	23 364.44	21 024.21	4.80	20 799.13	21 449.41	19 302.91
1.45	24 636.74	25 408.55	22 860.44	3.15	22 598.14	23 305.44	20 971.20	4.85	20 747.18	21 395.82	19 254.73
1.50	24 573.91	25 343.73	22 802.24	3.20	22 541.12	23 246.62	20 918.34	4.90	20 695.39	21 342.38	19 206.68
1.55	24 511.26	25 279.10	22 744.20	3.25	22 484.26	23 187.96	20 865.62	4.95	20 643.73	21 289.09	19 158.77
1.60	24 448.78	25 214.66	22 686.33	3.30	22 427.56	23 129.46	20 813.06	5.00	20 592.23	21 235.95	19 110.99
1.65	24 386.49	25 150.39	22 628.62	3.35	22 371.02	23 071.14	20 760.64	5.05	20 540.86	21 182.96	19 063.35

表 2 电路 0 °C 和 5 °C 时输出电压

NTC 序号	V_a	V_b	$V_a - V_b$
1#	2.851	2.533	0.318
2#	2.889	2.572	0.317
3#	2.758	2.440	0.319

2 结构设计

2.1 结构方案设计

体积小、重量轻、操作简单的温度梯度探针结构是决

定深海温度梯度测量系统能否实现原位测量的主要因素之一,为了适应载人潜水器水下快速精确作业需要,本文提出了一种耐压电子舱和温度梯度探针的分体式结构设计,如图 5 所示,耐压电子舱固定在潜水器采样篮上,电子舱和探针用水密电缆连接,探针设置有机手夹持手柄,与文献[15]提出的探针结构相比,本设计降低了探针的重量,简化了设计结构,插入沉积物时不易歪倒,海水难以灌入沉积物中,不会对海底沉积物产生较大扰动。水下作业时,仅需机械手操作温度探针插入沉积物进行温度梯度采样,有效减小了以往温度梯度传感器采样操作难度。

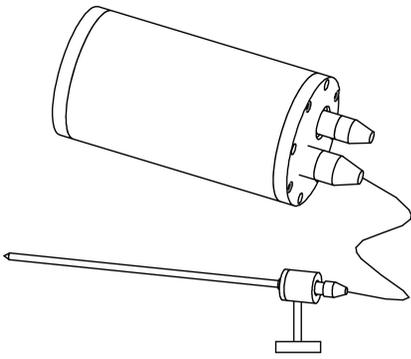
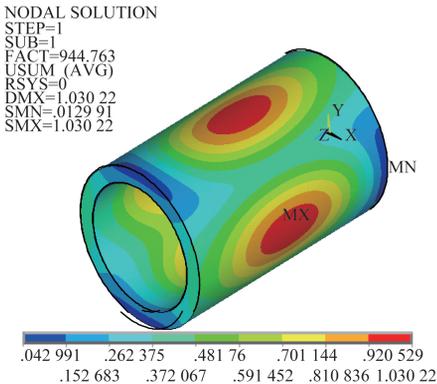


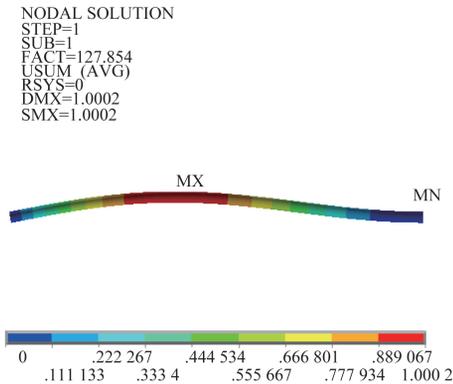
图5 系统结构设计

2.2 有限元分析与仿真

温度梯度探针要求搭载潜水器在4 000 m的海底进行温度探测,耐压电子舱体和温度探针要承受40 MPa的压力,探针还能够承受机械手操作时的轴向压力,温度探针在满足上述高压刚度、强度的条件下其内径、厚度应尽量小,从而提高探针响应时间。本文选用TC4钛合金,该钛合金物理特性及机械性能为:抗拉强度895 MPa,0.2%屈服强度825 MPa,弹性模量124.3 GPa,密度7 900 kg/m³,泊松比0.3。参考所设计的结构,采用ANSYS软件对结构进行非线性屈曲和压杆稳定性分析并最终确定结构的临界载荷,结构分析结果如图6所示。



(a) 电子舱屈曲分析



(b) 探针压杆稳定性分析

图6 系统结构有限元分析

由于探针为细长杆结构,需进行稳定性理论校核,依据材料力学压杆稳定原理,不同约束的等截面临界载荷计算公式为:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 IE}{(\mu L)^2} \tag{4}$$

式中: E 为弹性模量,单位为MPa;材料TC4的 E 值取 1.24×10^5 ; I 为抗弯惯性力矩,单位为 m^4 , $I = \frac{\pi}{64}(D^2 - d^2) = 1.39 \times 10^{-9}$,其中 $D=0.014 m$, $d=0.01 m$; μ 为长度系数,对于一端固定,另一端绞支的压杆, $\mu=0.7$; l 为探针的长度,单位为 m ,取 $0.6 m$ 。

式(1)的适用条件为:

$$\lambda > \lambda_p \tag{5}$$

式中:探针的柔度 $\lambda = \frac{\mu L}{i_{min}}$, i_{min} 为截面积的最小惯性半径,

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} = 4.29 \times 10^{-3} m, \lambda = \frac{\mu L}{i_{min}} = 97.9;$$

设计材料的极限柔度 $\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_P}} = 38.49$ 。根据式(1)得出 $F_{cr} =$

$$\frac{\pi^2 IE}{(\mu L)^2} = 9 633.79 N,$$

将该探针模型导入ANSYS进行压杆稳定性分析,得出横截面的极限压力为127.854 MPa,极限力 $F_{cr} = PA = 9 635.08 N$,可见仿真结果与理论计算值近似,验证了本设计的合理性。

3 系统测试

3.1 信号调理电路测试

由于热敏电阻存在一致性差问题,使每个热敏电阻的共模电压存在微小差异,在工程上,通常在电压转换电路上加一个精密电位器VR对共模信号进行细微调整,将公共信号统一调整为2.50 V,分别调整每信号调理电路每个通道的放大倍数使其电压输出范围在1~4.9 V左右,本文在实验室搭建了信号调理电路测试系统,如图7所示,其中使用富阳精密仪器厂生产的精密电阻箱(型号:ZX54)来模拟热敏电阻在0~5 °C的电阻变化,仪器精度0.01 Ω,使用安捷伦6位半数字万用表(型号:34465A)测量信号调理电路输出电压,表3所示给出了3个热敏电阻在最大和最小条件下电路的目标值和实测结果,实测结果与设计目标值基本相符。

表3 电路输出的目标值和实测结果

输出	电阻/kΩ	目标值/V	值实测/V
VOUT #1@0 °C	26.539 70	1.0	0.452
VOUT #1@5 °C	20.540 86	4.9	4.843
VOUT #2@0 °C	27.371 56	1.0	0.922
VOUT #2@5 °C	21.182 96	4.9	4.901
VOUT #3@0 °C	24.622 36	1.0	0.544
VOUT #3@5 °C	19.063 35	4.9	4.904



图 7 信号调理电路测试系统

3.2 耐压测试

为了检验本文设计电子舱和探针在深海高压环境下的稳定性和密封性,利用深海高压模拟实验室的压力试验装置对系统进行耐压测试,测试封装图如图 8 所示,本次测试取 1.25 倍安全系数,即测试最大压力为 50 MPa,以每分钟 2.5 MPa 的步长加压,压力每增加 5 MPa 后保压 5 min,压力增加到 50 MPa,保压 6 h,再以每分钟 1.25 MPa 的减压步长逐渐减压,直至标准大气压。将系统取出后未发现变形与漏水迹象,表明探针和电子舱结构满足设计指标。

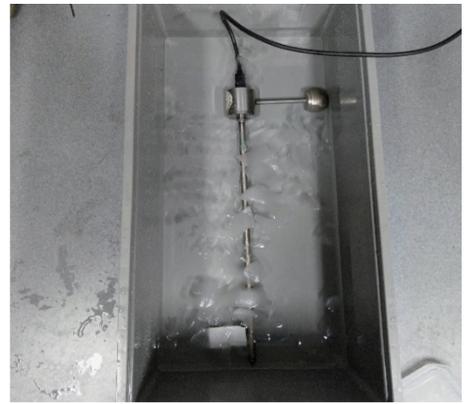


图 8 耐压测试封装图

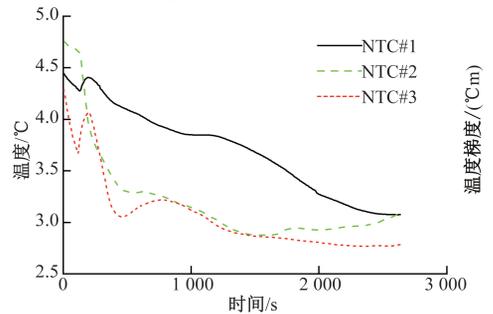
3.3 系统整体测试

本文在实验室做系统性能测试。在水槽中装有冰水混合物,将温度梯度探针水平放置于水槽中,如图 9(a)所示,采样一段时间后系统断电,取出 micro_SD 卡,读取记录的数据,测得温度数据如图 9(b)所示,探针记录了水槽中冰水混合物的温度变化过程,本次实验表明系统整体工作状态良好。

为进一步模拟沉积物温度梯度实验,本文将冰水混合物注入到细长圆筒中,将探针固定在细长筒内,如图 9(c)所示,由于冰的密度小于水的密度会漂在水面,随着时间的推移,细长圆筒会形成一个温度梯度,测量数据如图 9(d)所示,去除探针刚开始插入水中的不稳定数据,读取探针温度稳定后的数据,可以看出,由于探针内的 NTC #1 电阻处在长圆筒低水位处,冰水混合物融化后温度逐渐升



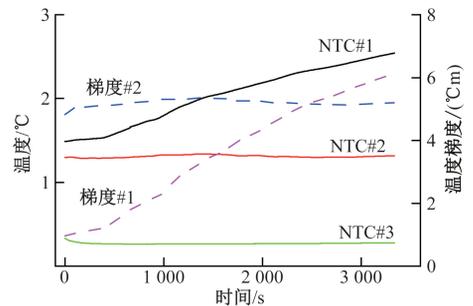
(a) 系统整体性能测试



(b) 系统整体测试数据



(c) 系统温度梯度测试实验



(d) 系统温度梯度测试数据

图 9 水槽测试实验

高,NTC #3、NTC #2 电阻处在冰水混合物中,温度变化缓慢,NTC #1、NTC #2 电阻之间的温度梯度逐渐变大,而 NTC #2、NTC #3 处在冰水混合物中,温度梯度在一定

时间内变化不明显趋于稳定。

4 海上实验

本文设计的高分离温度梯度测量系统参与了中国大洋第38航次(蛟龙号实验应用航次)的第一行航段,在西北印度洋进行科学考察,在蛟龙号的127潜次,蛟龙号搭载本系统在大禧热液区进行科学调查作业,作业深度为3500 m系统实物如图10(a)所示,本系统搭载在蛟龙号采样篮的布置如图10(b)所示,电子舱布置在蛟龙号采样篮的角落里,探针和水密电缆布置在地质取样框里,用橡皮筋简单固定。

在3500 m深的海底作业过程中,蛟龙号在一片沉积物区域开展了温度梯度探测试验,高清摄像机记录的作业图如图10(c)所示,机械手夹持探针手柄快速垂直插进沉积物种,由于作业区域沉积物覆盖较浅,沉积物下面是坚硬的岩石,探针没有完全插进沉积物中,只有NTC#1和NTC#2完全进入沉积物中,采样过程探针中并没有出现歪倒、晃动等情况,系统回收至母船甲板后对探针进行了全面检查,虽然触碰到海底坚硬的岩石,但是探针结构完好,未出现漏水情况,验证了探针结构强度和系统分体式

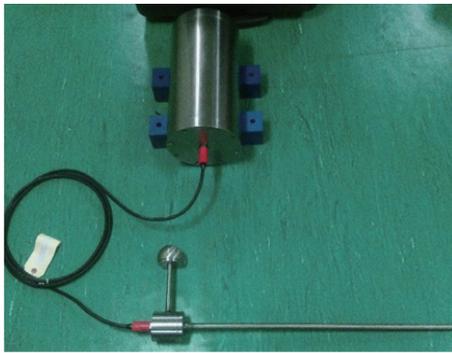
设计的合理性。

将电子舱内记录的温度数据导出,其中NTC1和NTC2的部分数据如图10(d)所示,探针在插入到沉积物过程中由于摩擦生热产生温升,温升幅度大约 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,随后温度开始下降直至与沉积物环境温度平衡,沉积物近似恒温场,表4所示给出了系统采集的温度实时数据,从表中可以看出系统可以分辨出 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化,在系统与外界温度达到平衡后,2#热敏电阻可以维持在 $1.804\text{ }^{\circ}\text{C}$ 数分钟没有波动,直至探针从沉积物中拔出后温度才发生变化。通过本次实验,验证了系统的高分辨力测温性能,同时也发现,本次作业站位的深海区近似一个恒温场,沉积物的温度波动范围可能小于 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

需要指出的是,本次实验测试了分体式设计结构的合理性和系统的高分辨力测温性能,而系统的测量精度主要取决于热敏电阻分度表误差和传感器及信号处理电路产生的误差^[19]。部分研究者认为深海高分辨测温系统通常使用海上标定的手段解决系统测量精度问题^[20],即便使用高精度海水恒温槽来检定测温系统也会有 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的波动^[21],下一步将在蛟龙号科学应用航次进一步研究本系统的海上标定方法,确定系统的精度校正参数。

表4 作业站位深海沉积物温度数据

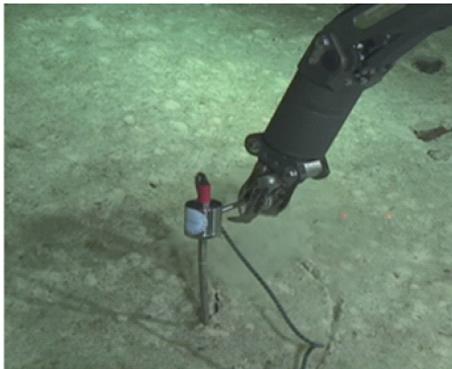
时间	1#/ $^{\circ}\text{C}$	2#/ $^{\circ}\text{C}$									
11:39:11	1.796	1.811	11:41:10	1.79	1.805	11:43:08	1.786	1.804	11:45:07	1.784	1.804
11:39:17	1.796	1.81	11:41:15	1.79	1.805	11:43:13	1.786	1.804	11:45:11	1.783	1.804
11:39:22	1.796	1.81	11:41:20	1.79	1.805	11:43:19	1.786	1.804	11:45:17	1.783	1.804
11:39:27	1.796	1.81	11:41:25	1.789	1.805	11:43:24	1.785	1.804	11:45:22	1.783	1.804
11:39:32	1.796	1.809	11:41:30	1.789	1.805	11:43:29	1.785	1.804	11:45:26	1.783	1.804
11:39:36	1.796	1.809	11:41:36	1.789	1.805	11:43:34	1.785	1.804	11:45:33	1.783	1.804
11:39:42	1.796	1.809	11:41:41	1.789	1.805	11:43:39	1.785	1.804	11:45:38	1.783	1.804
11:39:47	1.796	1.808	11:41:46	1.788	1.805	11:43:43	1.785	1.804	11:45:43	1.783	1.804
11:39:52	1.795	1.808	11:41:51	1.788	1.804	11:43:50	1.785	1.804	11:45:48	1.783	1.804
11:39:57	1.795	1.807	11:41:56	1.788	1.804	11:43:55	1.785	1.804	11:45:53	1.783	1.804
11:40:03	1.794	1.807	11:42:01	1.788	1.804	11:44:00	1.785	1.804	11:45:57	1.783	1.804
11:40:07	1.794	1.807	11:42:07	1.788	1.804	11:44:04	1.785	1.804	11:46:02	1.783	1.804
11:40:13	1.794	1.807	11:42:12	1.787	1.804	11:44:10	1.785	1.804	11:46:09	1.783	1.804
11:40:18	1.793	1.807	11:42:17	1.787	1.804	11:44:15	1.785	1.804	11:46:14	1.783	1.804
11:40:24	1.793	1.806	11:42:21	1.787	1.804	11:44:20	1.784	1.804	11:46:19	1.783	1.804
11:40:28	1.793	1.806	11:42:27	1.787	1.804	11:44:26	1.784	1.804	11:46:24	1.783	1.804
11:40:34	1.792	1.806	11:42:32	1.787	1.804	11:44:31	1.784	1.804	11:46:29	1.783	1.804
11:40:39	1.792	1.806	11:42:36	1.786	1.804	11:44:36	1.784	1.804	11:46:34	1.783	1.804
11:40:44	1.792	1.806	11:42:42	1.786	1.804	11:44:41	1.784	1.804	11:46:40	1.783	1.804
11:40:49	1.792	1.806	11:42:47	1.786	1.804	11:44:46	1.784	1.804	11:46:45	1.783	1.804
11:40:54	1.791	1.806	11:42:53	1.786	1.804	11:44:51	1.784	1.804	11:46:50	1.783	1.804
11:41:00	1.791	1.806	11:42:58	1.786	1.804	11:44:57	1.784	1.804	11:46:55	1.783	1.804
11:41:05	1.79	1.805	11:43:03	1.786	1.804	11:45:02	1.784	1.804	11:47:00	1.783	1.804



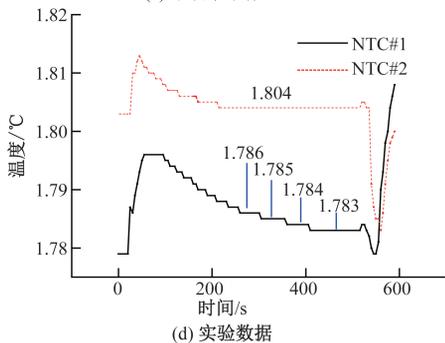
(a) 系统实物



(b) 系统采样篮布置



(c) 系统水下作业



(d) 实验数据

图 10 水下测试实验

搭载蛟龙号载人潜水器水下作业试验。水下试验结果表明,本系统成功获取了西北印度洋低温热液区沉积物的温度梯度数据,验证了本系统分体式设计结构的合理性和系统的高分辨率测温性能,在 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量范围内,系统的温度分辨力高达 $1\% ^{\circ}\text{C}$,这对热液区海洋地热情况的研究和深海矿物能源的勘查具有重要意义。

参考文献

- [1] 陈爱华,徐行,罗贤虎,等.海底流体渗漏区的热流探测技术与方法[J].地球科学,2016,41(10):1794-1802.
- [2] 李官保,裴彦良,刘保华.海底热流探测技术综述[J].地球物理学进展,2005,20(3):611-619.
- [3] 丁忠军,刘保华,刘忠臣,等.海洋沉积物多参数原位探测微探针研究[J].电子测量与仪器学报,2009,23(12):44-48.
- [4] 丁忠军,刘保华,李官保.海洋沉积物热导率高精度快速测量系统研究[J].仪器仪表学报,2008(5):1049-1053.
- [5] 刘希民.基于电流法的热电阻温度测量装置[J].仪器仪表学报,2007(S1):31-34,49.
- [6] 张瑜,张升伟.基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计[J].传感技术学报,2010,23(3):311-314.
- [7] 何云丰,曹小涛,刘南南,等.基于恒流源的高精度空间光学遥感器测温电路[J].国外电子测量技术,2016,35(6):76-81.
- [8] 范寒柏,谢汉华.基于 NTC 热敏电阻的三种高精度测温系统研究[J].传感技术学报,2010,23(11):1576-1579.
- [9] 冯志涛,李家军,李墨,等.自返式微型地热探针温度测量电路设计与实现[J].海洋技术学报,2017,36(6):44-48.
- [10] 吕九红,刘颖,罗玉玺.深海地热探针控制系统设计与实现[J].海洋技术学报,2016,35(6):72-76.
- [11] 罗玉玺,郑国芝,孙牵宇.深海地热探针的设计及应用[J].海洋技术,2012,31(1):62-66.
- [12] 郑国芝,罗玉玺,孙牵宇.深海沉积物地热探针结构设计分析[J].海洋技术,2009,28(3):114-117.
- [13] PFENDER M, VILLINGER H. Miniaturized data loggers for deep sea sediment temperature gradient measurements[J]. Marine Geology, 2002, 186(3): 557-570.
- [14] 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.
- [15] 徐志豪,陈益民,徐鸣亚,等.多通道深海沉积物原位温度梯度探针设计[J].机械与电子,2013(5):40-42,68.
- [16] 梁康康,童怀,徐鸣亚,等.深海机器人专用热流探针设计[J].传感器与微系统,2014,33(9):62-64,67.

5 结 论

本文研制了一套基于载人潜水器的温度梯度检测系统,搭建了系统测试平台,给出了系统的测试结果,完成了

- [17] 李柯良,徐行,任旭光,等. ROV专用热流探针的机械结构设计[J]. 冶金信息导刊,2015(4):68-71.
- [18] 梁嘉琪,董浩斌,葛健.多传感器高准确度便携式温度测量仪[J].中国测试,2016,42(5):70-74.
- [19] 杨浩,唐飞,李曙哲,等.便携式代谢率检测系统的误差分析及改进[J].传感技术学报,2014,27(11):1490-1494.
- [20] 吴世国,张健.海洋地球物理探测[M].北京:科学出版

社,2017.

- [21] 晏天,梁杰,钱飞,等.高精度海水恒温槽的性能测试及不确定度评定[J].计量与测试技术,2017,44(12):1-3.

作者简介

王向鑫,1988年出生,硕士、助理工程师,主要研究方向为深海先进传感技术、微弱信号检测技术、电路与系统、水下观测和监测技术。

E-mail:wangxiangxin@ndsc.org.cn

高精度、快速负载恢复时间:罗德与施瓦茨推出新型双象限电源系列

得益于其高精度和快速负载恢复时间,R&S NGL200系列电源完美适用于移动通信与物联网(IoT)中具有挑战性的应用。该产品的双象限架构允许其同时作为源和接收器工作,快速恢复时间使其能够处理快速的负载变化。

罗德与施瓦茨发布 NGL200 电源系列,专门针对移动通信和物联网领域的用户。单通道 R&S® NGL201 和双通道 R&S® NGL202 每通道输出功率高达 60 W。输出通道具有浮动、隔离、过载保护和短路保护特性。该电源可以以受控方式吸收功率,使其能够模拟电池的特性。该系列还通过电容式触摸屏和高分辨率大屏幕设置了新的标准。优化的用户界面特别直观,温控风扇确保其工作时非常安静。强大的安全功能在发生故障时能够保护被测设备和电源。



极快的负载恢复时间

用于为物联网设备和其他电池驱动设备供电或测试半导体的电源必须能够处理从 μA 到 A 范围的负载变化,且无电压压降或过冲。由于其快速的负载恢复时间少于

30 ms 和最小的过冲,这类电源是完成此类测试任务的理想选择。

作为源或接收器使用

R&S® NGL200 输出端采用线性双象限设计使其能够作为源和接收器进行工作,自动切换模式。

最小电源纹波和低噪声

R&S NGL200 电源具有线性调节功能,可提供极其稳定的输出电压和电流。这使得其成为为敏感模块供电、开发功率放大器以及 MMICs 的正确选择。

高达 $6\frac{1}{2}$ 位分辨率的读数

R&S® NGL200 系列具有高达 $6\frac{1}{2}$ 位的电压、电流和功率测量分辨率,适用于表征被测设备的待机功耗、满载电流大小。覆盖整个测量范围,无需切换量程,快速测量。在许多情况下,不需要再使用额外的数字万用表。这节省了空间和金钱,简化了测试流程。

接口与选件

除了通道输出外,R&S® NGL200 系列还为反馈线缆提供连接器。用于远程控制的 USB 与 LAN 接口作为标配功能。R&S® NGL-K102 选项增加了 WLAN 支持。R&S® NGL-K103 选项提供数字输入和输出,R&S® NGL-B105 硬件选项提供 GPIB(IEEE-488)接口。

R&S® NGL200 新型电源现已上市。详细信息,请访问 <https://www.rohde-schwarz.com/product/ngl200>。