

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2023.05.004

海洋上层高分辨率温度链观测系统设计

武文豪¹, 徐霄阳², 张晨光¹, 徐国峰¹

(1. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南 三亚 572025; 2. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572025)

摘要: 为满足海洋上层温度数据高分辨率实时观测需求, 本文设计出一种成本低、体积小、精度高的温度链观测系统, 可搭载于调查船、浮标等多种海洋观测平台, 具备高分辨海表温度数据实时观测功能。本文介绍了温度链系统架构的整体设计, 阐述了温度传感器的高精度测量原理与方法, 采用 RS-485 通信方式并设计出一套适用于温度链的软件通信协议, 通过标定、均一性测试、稳定性测试验证了传感器的测量性能, 研制出总长 200 m 的温度链观测设备, 设备带有 10 个测温节点, 传感器节点初始测量精度优于 ± 0.005 °C, 温度链采样间隔最短可达 2.7 s。本温度链在我国南海进行了拖曳功能测试, 试验结果表明: 温度链海上作业通信稳定可靠, 数据测量准确, 满足海洋现场观测对数据高时效、高精度、低误码率的传输要求。

关键词: 海洋上层温度; 温度链; 高分辨率观测; 实时通信

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2023) 05-0026-10

海洋上层高分辨率温度数据对海洋牧场建设、全球气候变化评估、海洋环境预报、防灾减灾等具有重要意义^[1-2]。目前, 国内外对海洋上层温度剖面的观测主要采用挂载自容式温度传感器的方式, 这种观测方式只能等到设备回收时才能获取数据, 观测数据的时效性差, 无法满足实时观测需求^[3-4]。另外, 传统的温度传感器存在体积大、价格昂贵等问题, 大幅度增加了海上作业布放难度和观测成本。

因此, 国际上开始研制一种新型高精度小型化温度链。此类设备是在满足测量精度性能下实现实时数据观测, 整个系统携带多个传感器节点, 可完成不同深度海域的温度数据测量。以加拿大 RBR 公司的 concerto3Tx、德国 GEOPRECISION 公司的 T-Node 和 RST Instruments 公司的 Thermistor Strings 为主要代表。其中, RBR 公司研制的 concerto3Tx

采样间隔最短可达 3 s, 链路可配备 24 个传感器节点, 链路长度 400 m, 测量精度 ± 0.005 °C, 该链式观测设备在国际上已逐渐开展应用^[5-6]。目前国内一些高校、科研院所、海洋公司也开展了对温度链的研究, 但存在观测系统结构复杂、观测深度较浅、研制成本较高、测量精度不够等问题^[7-8]。

基于上述背景, 本文设计研制了一种可实时获取海洋上层温度剖面数据的温度链系统, 其链路总长 200 m, 具有 10 个测温节点, 采用 RS-485 通信方式, 测量初始精度优于 ± 0.005 °C, 如图 1 所示。其具有成本低、体积小的优点, 方便集成于调查船、漂流浮标等多种海洋观测平台, 可有效满足海洋上层高分辨率温度剖面观测需求。

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 海南省科技计划三亚崖州湾科技城联合项目 (120LH060)

作者简介: 武文豪 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋传感器开发与应用。E-mail: 113945525@qq.com

通讯作者: 徐霄阳 (1987—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋传感器开发与应用。E-mail: xxxxy@126.com



图 1 温度链外观图

采用聚氨酯材质电缆, 电缆内部嵌有凯芙拉纤维, 可有效防止海水对设备的侵蚀及生物附着, 并提供一定的结构强度。节点传感器研制完成后, 按照指定线序将分支缆与主缆进行连接, 通过逐级硫化方式将多个传感器节点集成在链路上。主缆的头部集成了水密连接器和钢网护套, 使整个系统可以集成多种观测平台。

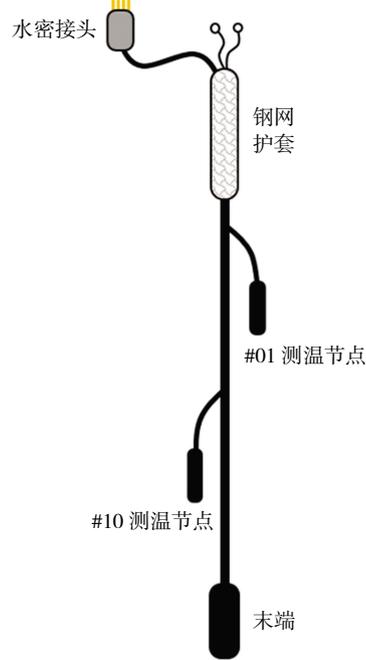


图 2 温度链系统结构示意图

1 系统架构设计

本文设计的温度链主要搭载于调查船、浮标等观测平台, 通常以拖曳和悬挂的方式观测海洋上层温度, 实际作业时需考虑其耐压能力、拖曳能力和防腐蚀能力。温度链整体架构上采用了一种树状分支结构, 可分为主缆(通信电缆)和分支缆(传感器节点)两部分, 结构示意如图 2 所示。这种结构的优势在于能够将通信电缆和各测温节点分离开, 测温节点可实现独立制造和标定。主缆和分支缆均

本文设计的温度链链路总长 200 m, 携带有 10 个传感器节点, 节点平均分配在主缆上, 各个节点间隔 20 m, 第一个节点距离首端和最后一个节点距离尾端均为 10 m, 考虑到整条链路的简洁度并保证传感器节点集成时有足够的弯曲空间, 传感器节点与主缆之间的分支缆长度设定为 18 cm, 节点分布如图 3 所示。

温度链系统的主要技术指标如表 1 所示。

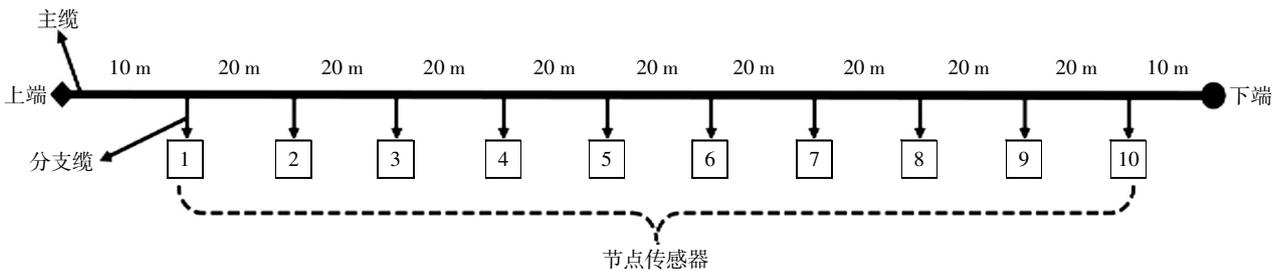


图 3 温度链节点分布图

表1 温度链系统主要技术指标

参数	指标数值
耐压深度/m	250
空气中重量/kg	11.8
水中重量/kg	5.2
电缆直径/mm	6
适用海况/m	$H_{1/3} \leq 1$
巡航速度/kn	8
承载拉力/kg	50
供电范围/V	9 ~ 12
通信速率/ baud	9 600
温度测量范围/°C	0 ~ 35
温度测量分辨率/°C	0.000 1
温度测量精度/°C	± 0.005

2 传感器节点硬件设计

温度链系统的传感器节点由温度探头与硬件电路组成。硬件电路主要由测量电路、主控电路、通信电路和电源电路4部分组成,设计框图如图4所示。测量电路是传感器节点的核心,使用了24位的模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)^[9],以满足高分辨率测量需求。主控电路中使用了PIC18F系列单片机^[10],其具有体积小、功耗低等优点,通过外接高速晶振来提高单片机的整体工作效率。通信电路主要是将控制器的逻辑电平转换成RS-485电平,与通信电缆配合实现总线通信。电源电路主要是将入口电压进行降压处理,为后级主控电路和通信电路提供符合要求的供电,同时也为测量电路提供高质量的电压基准。最后通过温度探头对环境参数的感知,结合硬件各功能模块电路,实现传感器节点的测量与通信功能。

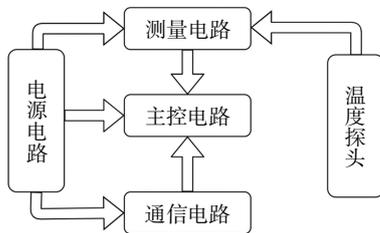


图4 传感器节点电路设计框图

2.1 温度探头设计

温度传感器的敏感元件主要有热电偶、金属热电阻和热敏电阻。热电偶测温范围广但灵敏度低,达不到高精度测量要求。金属热电阻中铂热电阻应用最为广泛,测量精度高、稳定性强,但其具有灵

敏度低、成本高的缺点。热敏电阻具有温度系数大、灵敏度高、体积小、成本低等优点,在汽车电子、工业电子、家庭电器等领域有着广泛的应用^[11],其又分为正温度系数(Positive Temperature Coefficient, PTC)热敏电阻和负温度系数(Negative Temperature Coefficient, NTC)热敏电阻,根据NTC、PTC热敏电阻的阻温特性曲线,本文选取NTC热敏电阻作为感知环境温度的敏感元件。

NTC热敏电阻的温度系数为负值,且温度系数随温度的增加而减小,温度系数越小,灵敏度越低,存在严重的热电非线性,其阻温特性曲线如图5所示。因此,需要通过科学规范的标定过程与校准方法,对热敏电阻进行线性化处理,以满足高精度测量需求。

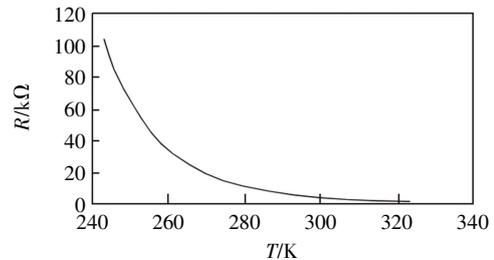


图5 NTC热敏电阻的阻温特性曲线

本文选用的NTC热敏电阻基于微型化制备技术及其超薄绝缘密封工艺,具备耐振动、冲击的环境适应性,由于最大作业深度为200 m,设备将承受一定的水压,需要对热敏电阻进行铠装保护。本文采用的铠装壳体是316L不锈钢金属,其能够减小压阻效应影响,具备测温性能稳定、环境适应性强的特性,能够更好地满足海洋拖曳式工作环境,保证在海洋恶劣环境下温度探头的安全可靠,同时也兼顾了感知元件对温度变化快速响应的性能要求与稳定性要求。通过仿真模拟得到3 MPa外压下,温度探头铠装壳体的应力及位移分布分别如图6、图7所示,最大位移仅为0.000 2 mm,最大应力为14 MPa,远小于铠装壳体屈服强度170 MPa,说明设计的铠装壳体满足耐压封装要求。

2.2 温度测量设计

为实现温度链测量高精度要求,本文从系统供电、ADC选取、测量原理、外围电路方面展开了研究。首先设计了一种高精度的供电方案,通过低纹波、宽输入电压范围的DC-DC芯片,将电源入口

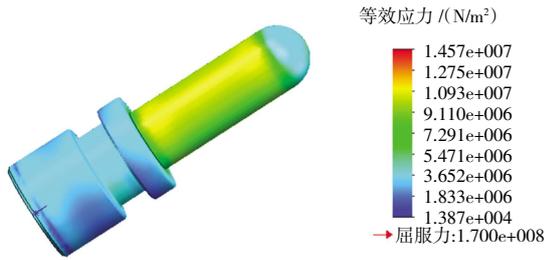


图 6 3 MPa 外压下温度探头铠装壳体的应力示意图

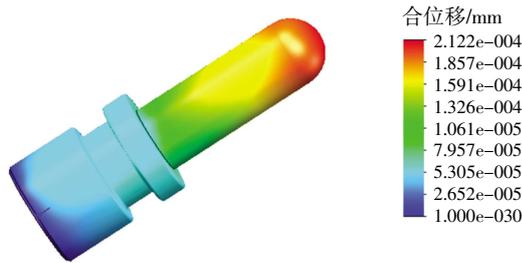


图 7 3 MPa 外压下温度探头铠装壳体的位移分布示意图

电压转换成稳定的系统电压, 并利用电压基准源芯片给 ADC 提供基准电压, 来满足高精度的测量需求; ADC 选用了 24 位高分辨率模数转换器, 其具有超低的功耗, 高度集成的电路, 外围电路只需要极少的元器件, 有利于实现电路规模小型化设计的需求。ADC 的模数转换技术采用的是三角积分 ($\Sigma-\Delta$) 转换技术, 其与传统的模数转换原理不同, 不是直接根据抽样数据大小进行量化编码, 而是以

极高的抽样频率对输入模拟量进行抽样, 并对两个抽样之间的差值进行低位量化, 从而得到用低位数码表示的数字信号, 对低位数码进行抽取滤波, 从而得到高分辨率的线性脉冲编码调制的数字信号^[12], 这种转换技术能够将环境噪声降到最低, 适用于宽动态范围、低频信号的测量, 满足本文对采样频率和测量精度的需求, 转换技术如图 8 所示。



图 8 ADC 转换技术框图

在测量原理上, 采用比例测量法来设计温度测量电路^[12], 即敏感元件热敏电阻与参考电阻的比值等于测量电压和参考电压的比值, 其优势在于电源受到干扰时, 驱动电压和参考电压的比值不会发生改变, 避免了因电源电压不稳引起的漂移, 从而提高测量电路的精确度; 在外围电路上, 为了防止数字地和模拟地大面积铜皮直接相连导致互相干扰, 采用低值电阻将模拟和数字部分进行隔离, 能有效限制环路电流, 提高电路的稳定性^[13]; 同时, 参考电阻选取低温漂精密电阻, 其阻值受温度影响极小, 进而保证测量的准确度。温度测量原理图如图 9 所示。

从图 9 可以得出, $V_o = V_{cc} \times R_x / (R_{ref} + R_x)$, 其

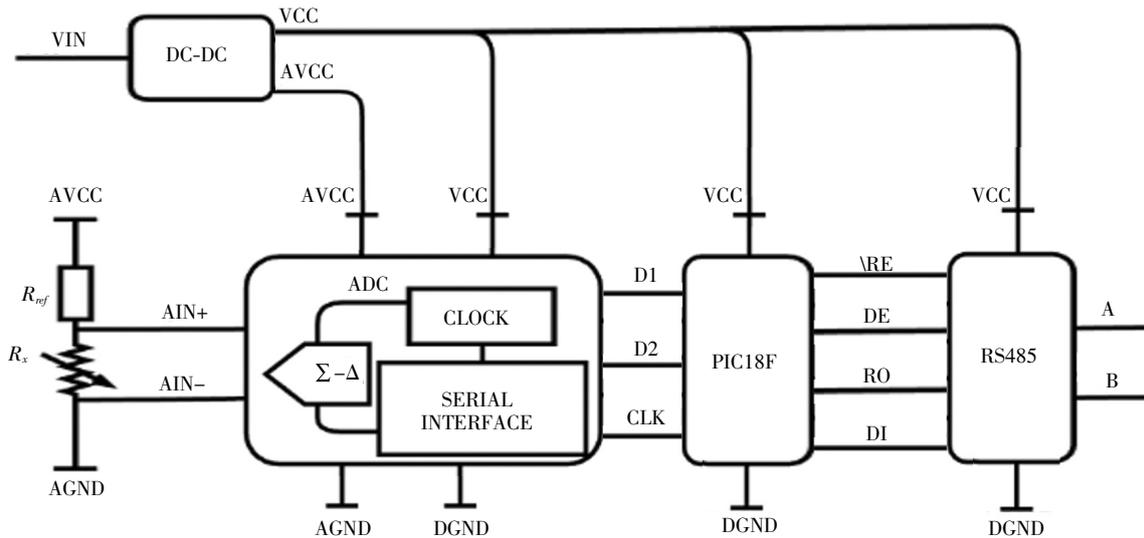


图 9 温度测量原理图

中, V_{cc} 是热敏电阻所在支路和测量电路的供电电压; V_o 是采样电路的差分输入电压, 得出温度对应的 AD 码值为: $Code = AD_{max} \times R_x / (R_{ref} / R_x)$, 测量结

果与电路供电电压无关, 从而消除了电源电压不稳对数据测量的影响, 保证了传感器节点的高精度温度测量。

3 传感器节点软件设计

3.1 低功耗设计

为了降低系统功耗，本设计在软件上采用了状态机的思想，根据工作原理将传感器节点分成了3个状态：休眠状态、采样状态、待机状态，如图10所示。系统上电后单片机首先完成寄存器的初始化配置，配置结束后进入主程序循环。当传感器收到采样命令后，会跳转到采样状态，单片机控制ADC完成采样，采样数据处理完毕后通过RS-485通信模块将数据回传；采样状态结束后会跳转到待机状态，待机状态下传感器节点与上位机有更直接的交互，如果待机状态下长时间未收到命令，传感器则进入休眠状态。当传感器处于休眠状态时，单片机进入掉电模式，停止一切工作，此时的仪器耗电量降到最低，下次工作时需要通过外部中断将其唤醒。



图10 传感器节点3种状态工作流程图

3.2 通信设计

温度链系统采用RS-485串行物理总线方式与观测平台进行通信交互。RS-485通信采用平衡发送和差分接收的方式，抗干扰能力强，理论上最远的通信距离是1200m，数据传输速率最大2.5Mbyte/s，观测平台可利用单一的RS-485接口方便地与传感器节点建立连接^[14]。另外，RS-485通信只需要两根信号线，降低了温度链的生产成本、加工难度、布放难度，通信电缆中将两根信号线进行了双绞，提高了温度链通信可靠性。温度链系统使用一主多从的通信结构，为确保各传感器节点测量数据在总线上高效、低误码率的传输，设计了一套温度链命令交互、数据传输的通信协议，协议格式如表2所示。该协议分为帧头、配置参数、校验位和帧尾4部分，其中帧头为传感器节点物理地址标识符(ID)，帧尾为固定的<CR><LF>字符，配置参数根据命令返回相应信息。校验采用CRC-8方式，其具有计算速度快，检错能力强的优点，易于用编码器

等硬件电路实现，在电子通信领域应用非常广泛^[15]。

表2 温度链通信协议

格式	帧头	配置参数	校验位	帧尾
命令	#ID	CMD	*00	<CR><LF>
返回	@ID	data	*00	<CR><LF>

链路的每个节点都有自己的专属ID，以避免工作时总线上有多台设备占用出现通信紊乱的情况，测温节点单次温度采样时间约340ms，数据输出在9600baud条件下耗时约220ms，即理论上获取单个节点数据需要约560ms。获取各个节点的数据时，可通过轮询采样和广播采样两种方式，如图11、图12所示。

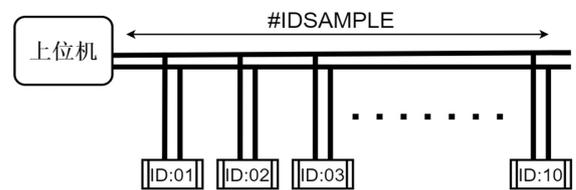


图11 轮询采样操作流程示意图

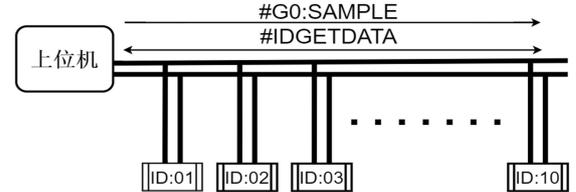


图12 广播采样操作流程示意图

轮询采样时，以一定的时间间隔向链路的各个节点发送采样指令。通过设计0.45s、0.5s、0.55s、0.6s四种采样间隔测试，发现轮询时间间隔为0.45s和0.5s时，链路不能正常工作，间隔为0.55s和0.6s时链路工作正常。因此，在轮询工作模式下获取一条链路数据最短所需时间为：0.55s × 10 = 5.5s，测试结果如表3所示。

表3 轮询采样测试

时间间隔/s	总耗时/s	通信状态
0.6	6	正常
0.55	5.5	正常
0.5	5	丢包
0.45	4.5	紊乱

广播采样时，向链路发送广播采样指令，链路所有节点收到指令并同步开始采样，随后再以一定时间间隔向各个节点发送获取数据指令，根据表3

测试结果, 为防止数据丢包和通信紊乱, 发送广播命令后等待 500 ms 用于各个节点采样工作, 再设定 150 ms、200 ms、220 ms、250 ms 作为轮询间隔, 进行实际测试。测试发现, 当轮询间隔设定为 150 ms 时通信出现异常, 200 ms 时出现丢包现象, 当轮询间隔为 220 ms、250 ms 条件下均能正常工作, 因此获取一条链路数据最短需要时间: $500\text{ ms} + 220\text{ ms} \times 10 = 2.7\text{ s}$, 测试结果如表 4 所示。

表 4 广播采样测试

采样时间/ms	轮询间隔/ms	总耗时/s	通信状态
500	250	3	正常
500	220	2.7	正常
500	200	2.5	丢包
500	150	2	紊乱

从上述两种工作模式的测试比较中可以看出, 轮询采样模式耗时约为广播采样模式的两倍, 因此在实际应用时, 可使用广播采样工作模式, 既提高了作业效率, 又保证了各传感器节点采样的同时性, 更适用于海洋上层温度数据的剖面观测。

4 传感器标定与海上试验

4.1 传感器标定

由于温度链的温度敏感元件选用的是热敏电阻, 其阻温特性曲线呈非线性, 要获得高精度的测量数据, 需要对其进行标定。温度传感器节点的标定使用恒温水槽, 其控温区间为 1~40 °C, 短期波动度优于 0.001 °C。同时水槽中放有美国海鸟公司生产的 SBE56 型数字温度传感器作为温度标准, 其温度测量准确度为 $\pm 0.002\text{ °C}$, 可溯源 ITS-90 温度标准。通过标准源数据与待标定传感器输出的测量数据建立合理的线性化数学模型, 并对传感器节点的输出值进行拟合得到拟合系数, 实现海水温度的高精度测量。

温度标定实验选取了 8 个控温点, 分别为 35 °C、30 °C、25 °C、20 °C、15 °C、10 °C、5 °C、1 °C, 标定时按温度点分布从高到低控制水槽温度。将标准源传感器按 1 s 采样间隔进行配置并采样。当达到控温点且温度变化稳定时, 配置传感器节点进入标定模式, 进行约 2 min 的数据采样, 记录标准源数

据与传感器节点实际测量数据。标定实验过程中获得的温度变化曲线, 如图 13 所示。在水槽控温系统的控制下, 水温呈阶梯状变化。

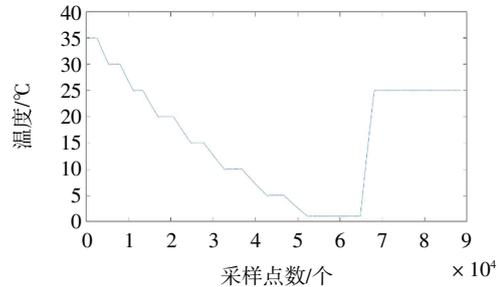


图 13 温度标定曲线图

表 5 是 8 个控稳点温度稳定时的标准温度值与传感器采样获得的电阻值。由于传感器的测温敏感元件采用的是负温度系数热敏电阻, 因而在高温时电阻值较低, 在低温时阻值较高。

表 5 温度标定数据

标准温度/°C	采样电阻值/ Ω
34.996 9	27 396.74
29.995 5	33 824.42
24.995 2	42 021.12
19.994 6	52 547.37
14.994 7	66 157.02
9.995 6	83 884.08
4.496 5	109 857.78
0.997 1	124 570.22

根据表 5 中的数据, 利用 Steinhart-Hart 方程^[6]进行拟合求解。

$$\frac{1}{T} = g + h \times \ln R_T + i \times \ln^2 R_T + j \times \ln^3 R_T \quad (1)$$

式中, T 为标准温度, 单位为 K; R_T 为采样电阻值; g 、 h 、 i 、 j 为所求的拟合系数, 使用线性回归算法, 即可解算获得 4 个拟合系数。将拟合系数重新代入式 (1) 中, 利用表 5 中的电阻值, 得出 8 个温度点下的仪器测量示值, 通过与标准源温度数据作差比对, 得出示值误差, 如表 6 所示。

由表 6 可知, 传感器标定后的示值误差整体优于 $\pm 0.005\text{ °C}$ 。测量仪器的示值误差表现出一个仪器的测量准确度, 可见传感器的温度测量精度满足设计要求。采用相同的标定方法对链路所有测温节点进行标定校准, 结果均符合设计要求。

标定完成后对测温节点的测量性能进行了均一

表6 温度标定示值误差

仪器示值	示值误差
34.996 9	0.000 0
29.995 6	0.000 1
24.995 2	0.000 0
19.994 5	-0.000 1
14.994 8	0.000 1
9.995 6	0.000 0
4.496 4	-0.000 1
0.997 2	0.000 0

单位: °C

性测试, 测试时各节点传感器分开进行供电与通信, 对10台节点传感器分两批次进行了测试, 第一批次抽取1、3、5、7、9、10号节点, 第二批次为2、4、6、8号节点。将准备好的节点传感器放置于装满水的桶中, 配置采样时间间隔为5s进行10h以上连续测试, 测试结果如图14、图15所示。

从测试结果来看, 各节点传感器温度测量变化趋势一致, 验证了传感器节点的测量准确性符合精度要求。

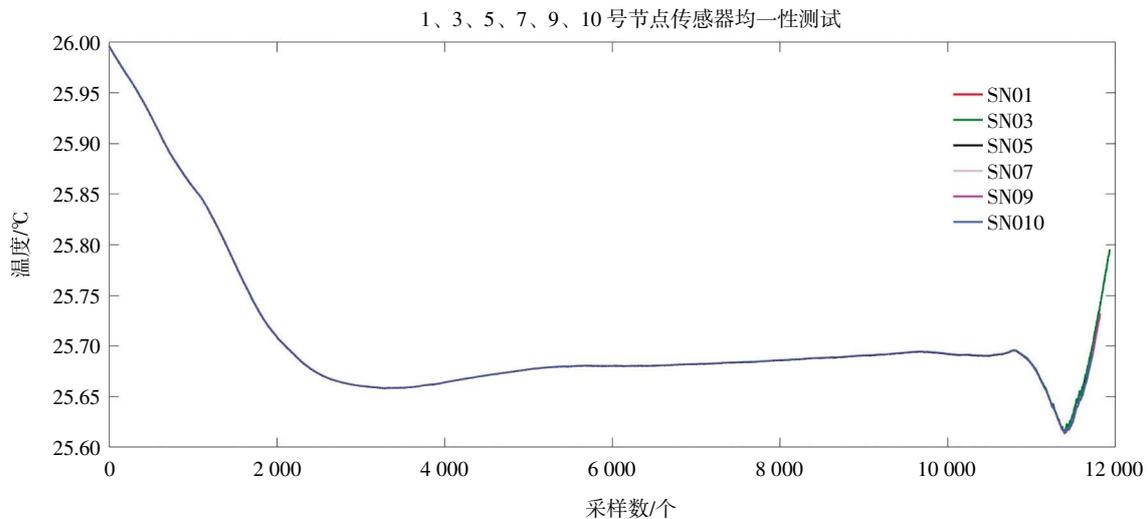


图14 第一批次节点传感器均一性测试

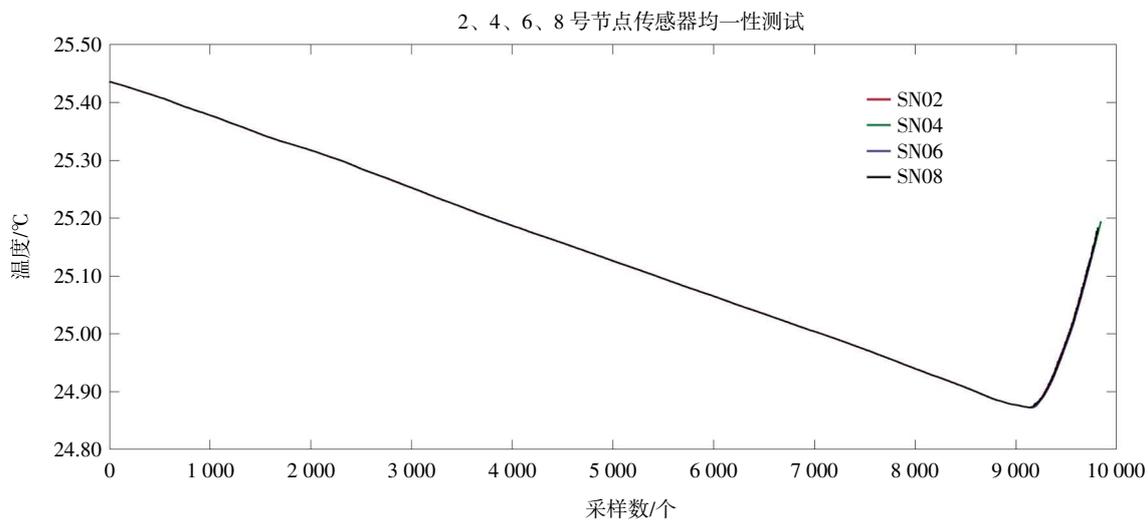


图15 第二批次节点传感器均一性测试

4.2 海上试验

2022年10月, 本文设计的温度链搭载海洋调查船于我国南海西沙某海域进行了海上试验, 试验目的是对温度链进行拖曳作业功能性验证, 其中包括传感器的数据采集与数据传输可靠性测试。

本次海试作业的温度链总长200m, 共10个传感器节点, 以20m间隔均匀分布在链路当中。将研制完成的温度链与承重缆通过专用防护胶带缠绕在一起, 使用过程中设备可得到有效防护, 同时提高了链路的拖曳能力, 保证了海上作业的实用性和

可靠性。温度链搭载调查船进行走航式工作, 设备提前缠绕在绞盘机中, 如图 16 所示。温度链一端配有重物, 先布放入水, 后通过绞盘机匀速将链路全部布放, 为验证传感器数据测量准确性, 在链路布放过程中, 将一台自容式 SBE56 传感器与温度链

的 5 号节点传感器节点捆绑在一起, 并提前配置其开始工作, 采样间隔设定为 5 s, 用于后期数据比测。温度链另一端通过水密缆与船上主机相连, 通过主机发送采样命令控制链路进行工作。

海试过程中, 设定温度链总体采样间隔为 5 s,



图 16 缠绕在绞盘机上的温度链

调查船航行速度 8~9 kn, 航行拖曳过程约 1.5 h。拖曳结束后, 同样采用绞盘机对链路进行回收, 回收至 5 号节点时, 将自容 SBE56 取下并下载数据。对温度链 10 个传感器节点与 SBE56 传感器数据进

行处理分析, 获得温度链在拖曳过程中的温度数据曲线, 以及 5 号节点与自容 SBE56 的温度测量误差曲线, 分别如图 17、图 18 所示。

从测温曲线可以看出, 海水温度随深度增加而

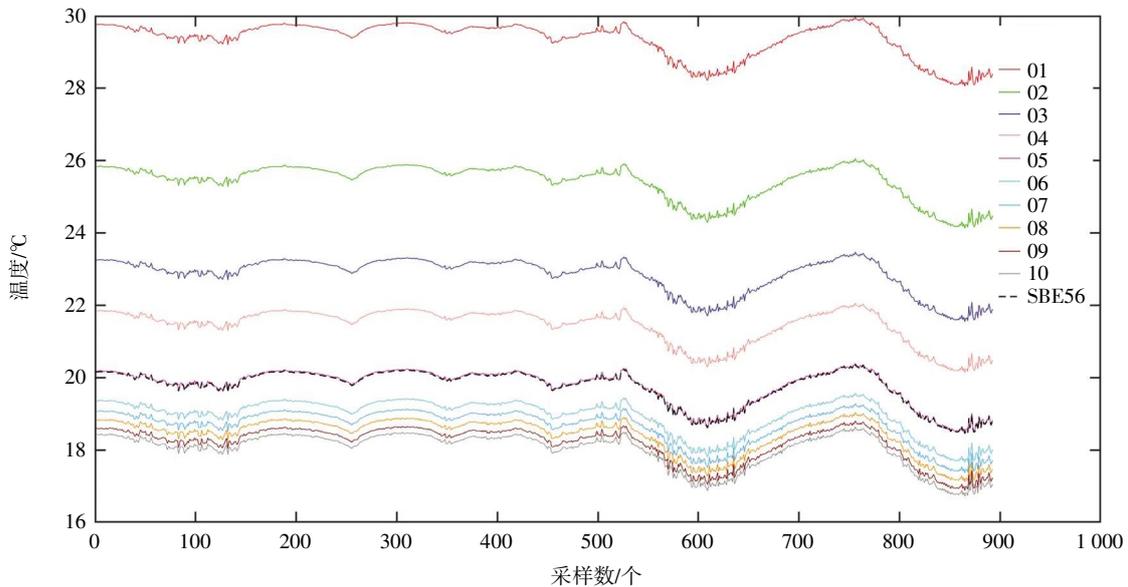


图 17 温度链与自容传感器拖曳过程中的数据曲线

不断减小, 且越靠近海表, 温度下降趋势越明显, 这主要是海表长期接收日光照射, 温度较高, 随着水深增加大部分光线被吸收, 温度下降趋势逐渐不明显。另外, 从自容 SBE56 的温度变化与温度链各

节点的温度变化来看, 二者测量数据一致性较好, 数据的变化可能是由于航行过程中链路的起伏造成的。从误差曲线可以看出, 温度链 5 号节点与 SBE56 的误差平均值为 $-0.006\ 47\ ^\circ\text{C}$, 数据表明温度

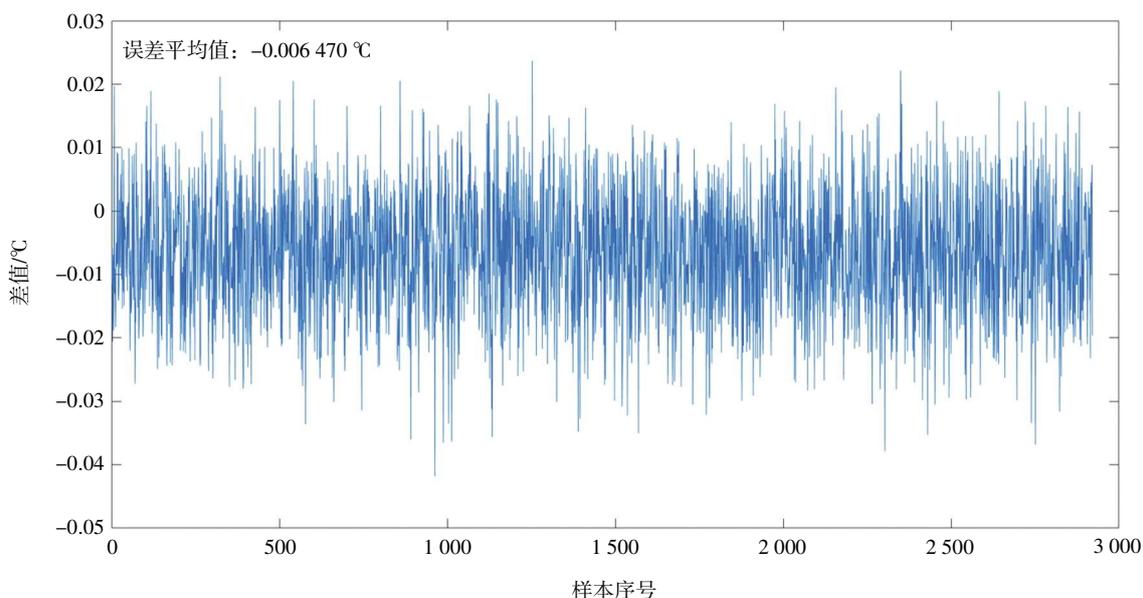


图 18 温度链 5 号节点与自容 SBE56 的测量误差曲线

链传感器具有较好的测量准确性。海试过程中未出现数据通信中断的现象，数据传输连续可靠，表明温度链设备拖曳作业功能达到要求。

4.3 温度测量稳定性评估

温度链海上试验结束后，随即对各测温节点温度测量准确都进行了复检测试，以验证传感器的温度测量长期稳定性。将本次复检测试实验的测温节点温度测量示值与标准温度进行对比，得到该测温节点的漂移量，复检测试实验的误差如表 7 所示。

表 7 复检测试实验数据

单位: °C		
标准温度	复检仪器示值	复检误差
35.004 2	35.001 1	0.003 1
29.993 7	29.990 7	0.003 0
25.002	24.998 5	0.003 5
19.995 3	19.998 6	-0.003 3
15.000 3	14.997 7	0.002 6
9.995 6	9.993 4	0.002 2
4.495 1	4.498 2	-0.003 1
1.999 2	1.997 3	0.001 9

本次复检测试实验与初始标定实验间隔了近 3 个月，从表 7 可以看出，测温节点测量的仪器示值与标准温度间存在 ± 0.003 °C 的误差，通过对链路上 10 个测温节点做相同的复检测试实验，其整体误差

小于 ± 0.005 °C，表明本文研制的传感器具有较好的长期稳定性，满足观测要求。同时也可以看出传感器长期使用后还需重新标定以满足高精度需求。

5 结 论

本文首先对系统架构设计进行了介绍，接着对温度探头和传感器节点的软硬件设计过程做了阐述，在实验室完成了标定测试、均一性测试，验证了传感器节点的测量性能，最终研制出链路总长 200 m，带有 10 个测量节点的温度链观测设备，具备体积小、成本低、精度高等优点。温度链设备搭载调查船进行了海上拖曳试验，试验结果表明，温度链海上拖曳作业稳定可靠，数据测量准确，走航时可高时效、高分辨率的获取海洋上层温度剖面数据。海试结束后通过实验室二次复检测量误差，评估了系统温度测量的稳定性，结果表明系统测量的总体漂移误差较小，满足观测需求。温度链观测系统具有良好的平台移植性，可方便集成于调查船、浮标等多种海洋观测平台，对深入开展海洋环境调查与应用具有重要的研究意义。

参考文献:

- [1] 端义宏,朱建荣,秦曾灏.一个高分辨率的长江口台风风暴潮数值预报模式及其应用[J].海洋学报(中文版),2005,27(3):11-19.
- [2] 杨龙奇.海洋近表层流和上层温盐对1215号台风“天秤”的响应[J].热带海洋学报,2015,34(3):13-22.
- [3] 王波,李民,刘世萱.海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J].仪器仪表学报,2014,35(11):2401-2414.
- [4] 张龙,叶松,周树道.海水温盐深剖面测量技术综述[J].海洋通报,2017,36(5):481-489.
- [5] HOPPMANN M, NICOLAUS M, HUNKELER P A, et al. Seasonal evolution of an ice-shelf influenced fast-ice regime, derived from an autonomous thermistor chain[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(3): 1703-1724.
- [6] BONDUR V G, SEREBRYANY A N, ZAMSHIN V V, et al. Intensive internal waves having anomalous heights in the Black Sea shelf area[J]. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2019, 55(1): 114-127.
- [7] 张登攀,冯盼,王永杰.船载拖曳式光纤温度剖面测量系统研究[J].激光与红外,2016,46(10):1261-1267.
- [8] 章恒,窦银科,马春燕.极地多点低温低功耗高精度柔性温度链的设计[J].传感技术学报,2019,32(5):681-687.
- [9] MAYES M,京湘.新型24位 $\Delta\Sigma$ ADC[J].电子产品世界,2003,10(7A):35-38.
- [10] 张海忠,邓先明,袁启东.基于PIC18单片机的RS485/CAN智能转换器的设计[J].现代电子技术,2007,30(4):14-16.
- [11] 王恩信,荆玉兰,王鹏程.NTC热敏电阻器的现状与发展趋势[J].电子元件与材料,1997,16(4):1-9.
- [12] 冉全,章涤峰,钟时明.AD7715在精密分析仪器中的应用研究[J].单片机与嵌入式系统应用,2003,4:249-252.
- [13] 党武松,范寒柏,胡杨.基于AD7791的海水温度和深度测量系统的设计[J].微型机与应用,2013,32(20):25-28.
- [14] 李成,王鹏,丁天怀.RS-485总线的高速串行远距离数据传输方法[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(5):68-71.
- [15] 彭伟.嵌入式系统CRC循环冗余校验算法设计研究[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2012,4(3):258-265.
- [16] STEINHART J S, HART S R. Calibration curves for thermistors[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1968, 15(4): 497-503.

Design of High Resolution Thermistor Chain Observation System in the Upper Ocean

WU Wenhao¹, XU Xiaoyang², ZHANG Chenguang¹, XU Guofeng¹

(1. Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Sanya 572025, China; 2. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572025, China)

Abstract: In order to meet the demand for high-resolution real-time observation of upper ocean temperature data, this paper designs a low-cost, small-volume, high-precision thermistor chain observation system, which can be mounted on various ocean observation platforms such as survey ships and buoys. At the same time, it also has the function of real-time observation of high-resolution upper-ocean temperature data. This paper introduces the overall design of the thermistor chain system architecture, expounds the high-precision measurement principle and method of the temperature sensor, adopts the RS-485 communication method and designs a set of software communication protocols suitable for the thermistor chain. The measurement performance of the sensor was verified through calibration tests, uniformity tests and stability test, and a thermistor chain observation device with a total length of 200 m has been successfully developed, including 10 temperature measurement nodes. The initial measurement accuracy of the sensor nodes is better than ± 0.005 °C, and the sampling interval of the thermistor chain can be as short as 2.7 s. The towing function test of this thermistor chain was carried out in the South China Sea. The test results show that the thermistor chain's offshore operation communication is stable and reliable, and the data measurement is accurate, which meets the transmission requirements of high timeliness, high precision and low bit error rate for marine field observation.

Key words: upper ocean temperature; thermistor chain; high resolution observation; real-time communication