

潜标 CTD 的现场温盐比测方法研究

陈 钊^{1,2}, 魏传杰^{1,2*}, 刁新源^{1,2}, 陈 磊^{1,2}, 孙 毅^{1,2}, 赵张南^{1,2}, 潘 俊^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘 要: 潜标温盐深剖面测量仪 (CTD) 在长期使用后仪器数据会发生漂移、准确度降低, 对科学研究的正确性和可信性造成严重影响。本文依据船载 CTD 的作业内容, 为 SBE37 潜标 CTD 设计了一种用于比测的 CTD 底托架, 将大洋水体视为恒温槽, 以 SBE911 船载 CTD 为比测标准, 通过回归方法计算了潜标 CTD 的温盐传感器校准系数, 并将该系数下获取的数据与未校准的数据进行比较。温度比测误差绝对值的均值为 $3.833\ 3 \times 10^{-4}\ ^\circ\text{C}$, 原始误差绝对值的均值为 $5.500\ 0 \times 10^{-4}\ ^\circ\text{C}$, 电导率比测误差绝对值的均值为 $2.166\ 7 \times 10^{-4}\ \text{S/m}$, 原始误差绝对值的均值为 $2.333\ 3 \times 10^{-4}\ \text{S/m}$, 以上结果证明, 本文中设计的比测方法对提高潜标 CTD 准确性有一定作用。

关键词: 潜标 CTD; 船载 CTD; 回归分析

中图分类号: P716 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2021) 02-0039-06

潜标是一种在水下进行长期海洋环境观测的锚定系统, 主要结构包括主浮球、多种海洋观测仪器、声学释放器、重力锚和串联仪器的缆绳, 大规模布放潜标已成为远洋综合科考船的常规作业内容^[1-3]。温盐深剖面测量仪 (CTD) 作为测量海洋物理性质的重要观测仪器有多种测量布放方式, 包括站位测量, 走航测量和长期定点测量^[4-6]。潜标 CTD 是长期定点测量的典型方案, 是潜标系统中必不可少的设备, 可以为科研人员提供不同深度下精确的海水温度、盐度等参数^[7], 对大洋暖池形成机制、热盐环流效应等研究有重要意义^[8]。

温盐传感器的制作工艺和材料特性决定了其测量结果会随时间漂移^[9], 解决这一问题的方法为传感器校准。目前, 陆地实验室校准技术已经较为完善^[10], 通过恒温槽、铂电阻温度计、测温电桥、盐度计、压力计等设备可进行高精度的数据校准^[11],

但潜标 CTD 由于时间和成本原因无法全部带回陆地进行校准, 科考船也不具备海上校准的设备和条件, 潜标 CTD 在长期使用后仪器数据发生漂移、准确度降低, 对科学研究的正确性和可信性造成严重影响^[12]。设计一种潜标 CTD 的作业现场比测方法具有现实需求和重要意义。本文依据船载 CTD 的作业内容, 为 SBE37 潜标 CTD 设计了一种比测装置, 以 SBE911 船载 CTD 为测量标准, 计算了潜标 CTD 的温盐传感器校准系数, 并将该系数下获取的数据与未校准的数据进行比较, 为提升我国海洋科学观测网的数据准确度提供了技术支撑。

1 比测设备

1.1 船载 CTD 和潜标 CTD

校准实验室的核心设备为恒温槽, 槽内各个位置的水温一致^[13], 而且可以通过测温电桥和标准

收稿日期: 2020-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41806164)

作者简介: 陈钊 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋调查技术研究。E-mail: chenzhao@qdio.ac.cn.

通讯作者: 魏传杰 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋调查技术研究。E-mail: weicj@qdio.ac.cn

铂电阻精确测量^[14]。大洋的温盐结构较为稳定^[15]，在短时间内不会发生大幅度变化，并且大洋可视为分层水体^[16]，其水平方向上的临近点可视为同一水团^[17]，其温盐可由 SBE911 船载 CTD 进行测量，通过一定时间段内的数据平均可得到该位置的相对准确的温盐值。SBE911 船载 CTD 是目前深海观测中应用最为广泛的产品，在同类海洋仪器中具有最高的测量精度^[18]，其技术指标如表 1 所示。

表 1 SBE911 船载 CTD 技术指标

指标内容	电导率 / $S\cdot m^{-1}$	温度 / $^{\circ}C$
测量范围	0 ~ 7	-5 ~ +35
准确度	0.000 3	0.001
稳定度	0.000 3/ 月	0.002/ 年

SBE37 潜标 CTD 具有高精度温盐传感器，其电导率传感器配置有抽水泵，测量准确度与 SBE911 船载 CTD 一致，目前广泛应用于潜标系统中，是使用最多的潜标 CTD，其技术指标如表 2 所示。

表 2 SBE37 潜标 CTD 技术指标

指标内容	电导率 / $S\cdot m^{-1}$	温度 / $^{\circ}C$
测量范围	0 ~ 7	-5 ~ 45
准确度	0.000 3	0.002
稳定度	0.000 3/ 月	0.000 2/ 月

本文将以 2020 年 9 月进行了实验室校准的船载 CTD 数据作为标准，对 SBE37 潜标 CTD 的测量数据进行对比。

1.2 装置设计

本文设计的比测装置需要满足以下两点：

(1) 为使潜标 CTD 与船载 CTD 测量同一层水体，二者的温盐探头需要在同一平面上。

(2) 根据仪器的结构设计，潜标 CTD 的布放方式为探头一端朝上竖直放置^[19]。

本文根据这两点设计了用于比测的 CTD 底托架，如图 1 所示。布放船载 CTD 时将底托架固定

于 CTD 整体的下方，在底托架上有上下四根固定横杆，最多可在一个站位的船载 CTD 作业中校准 8 台潜标 CTD，可以满足一套及以上潜标系统的 CTD 使用数量。

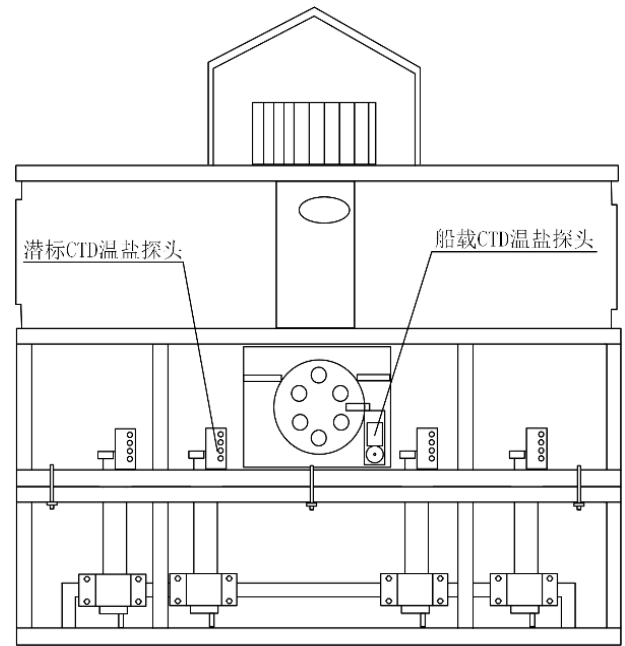


图 1 比测底托架安装示意

2 比测实验

2.1 实验方法

本实验于 2020 年 9 月依托“科学”号西太平洋航次进行，实验步骤如下：

(1) 设置潜标 CTD 的采样间隔为 5 s，并与船载 CTD 进行时间同步，将其固定在比测所用的底托架上。

(2) 进行船载 CTD 作业，在下放过程中选取船载 CTD 显示温度为 27 $^{\circ}C$ ，25 $^{\circ}C$ ，20 $^{\circ}C$ ，15 $^{\circ}C$ ，10 $^{\circ}C$ ，5 $^{\circ}C$ ，3 $^{\circ}C$ 附近的位置，并记录到达该位置的时间。每个位置静置 2 min，使两种 CTD 测量的水团充分混合。

(3) 船载 CTD 回收后，读取潜标 CTD 数据，根据时间查找比测数据，取静置时间段内第 2 min 的数据进行平均，以减小水团不稳定引起的误差。

CTD 温盐剖面图如图 2 所示。

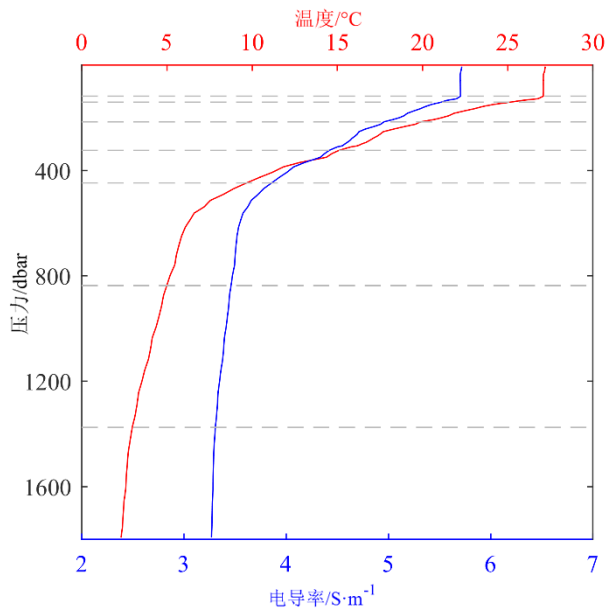


图2 船载 CTD 温盐剖面图

2.2 求解校准系数

通过仪器配置说明, 温度校准系数 a_0, a_1, a_2, a_3 的相关表达式为^[20]:

$$\frac{1}{T_{\kappa} + 273.15} = a_0 + a_1 \times \ln(N_{T\kappa}) + a_2 \times \ln^2(N_{T\kappa}) + a_3 \times \ln^3(N_{T\kappa}) \quad (1)$$

式中: T_{κ} (°C) 代表船载 CTD 第 κ 组温度平均值; $N_{T\kappa}$ (Hz) 代表潜标 CTD 第 κ 组温度通道频率平均值。通过 5 组数据的回归分析方法确定 a_0, a_1, a_2, a_3 值。

电导率校准系数 g, h, i, j 的相关表达式为:

$$C_{\kappa} = \frac{g + h \times F_{c\kappa}^2 + i \times F_{c\kappa}^3 + j \times F_{c\kappa}^4}{1 + \delta T_{\kappa} + \varepsilon p_{\kappa}}$$

式中: $\delta = 3.25 \times 10^{-6}$, $\varepsilon = -9.57 \times 10^{-8}$, C_{κ} (S/m) 代表船载 CTD 第 κ 组电导率平均值; $F_{c\kappa}$ (kHz) 代表潜标 CTD 第 κ 组电导率通道频率平均值; T_{κ} (°C) 代表船载 CTD 第 κ 组温度平均值; p_{κ} (dbar) 代表船载 CTD 第 κ 组压力平均值。在实验室校准中, p_{κ} 项近似为 0, 往往忽略不计^[21], 而由于本实验是在大洋高压环境中进行, 所以 p_{κ} 项为重要参数, 必须参与计算, 求解所需数据见表 3。

表3 求解校准系数使用的相关数据

船载 CTD 温度 / °C	船载 CTD 电导率 / S·m ⁻¹	船载 CTD 压力 / dbar	潜标 CTD 温度频率 / Hz	潜标 CTD 电导率频率 / kHz
27.089 7	5.704 682	117.947	191 672	6.274 469
25.120 4	5.515 471	140.895	206 924	6.185 770
19.876 6	4.955 319	215.466	254 840	5.915 133
15.091 4	4.420 198	323.802	309 972	5.644 125
9.665 4	3.856 616	447.480	389 746	5.343 512
4.990 8	3.460 497	836.713	477 681	5.121 418
2.961 6	3.306 555	1 375.233	522 744	5.032 355

3 比测结果

该实验中使用的潜标 CTD 有 3 组校准系数, 分别为 2014 年 3 月的原始校准系数、2020 年 5 月的实

验室校准系数和 2020 年 6 月的比测校准系数, 其中比测校准系数由式 (1)、式 (2) 和表 3 数据计算得出, 温度校准系数见表 4, 电导率校准系数见表 5。

表4 温度校准系数

温度校准系数	a_0	a_1	a_2	a_3
原始参数	$-1.322\ 395 \times 10^{-4}$	$3.151\ 961 \times 10^{-4}$	$-5.201\ 941 \times 10^{-6}$	$2.215\ 198 \times 10^{-7}$
比测参数	$-1.561\ 898 \times 10^{-4}$	$3.207\ 567 \times 10^{-4}$	$-5.632\ 493 \times 10^{-6}$	$2.326\ 395 \times 10^{-7}$
实验室参数	$-7.793\ 584 \times 10^{-5}$	$3.021\ 872 \times 10^{-4}$	$-4.165\ 205 \times 10^{-6}$	$1.940\ 322 \times 10^{-7}$

表 5 电导率校准系数

电导率校准系数	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>
原始参数	-9.950 192×10 ⁻¹	1.705 038×10 ⁻¹	-4.493 789×10 ⁻⁴	6.353 402×10 ⁻⁵
比测参数	-1.014 297	1.737 803×10 ⁻¹	-1.186 355×10 ⁻³	1.102 768×10 ⁻⁴
实验室参数	-1.006 527	1.727 168×10 ⁻¹	-9.848 226×10 ⁻⁴	1.003 916×10 ⁻⁴

分别选取 6 组参考温度、电导率真值，通过实验室校准系数分别计算出 $N_{ik}(\text{Hz})$ 和 $F_{ck}(\text{kHz})$ ，将二者代入原始校准系数和比测校准系数，通过式（1）和式（2）由比测系数和原始系数分别计算温度、电导率值和相应误差。计算电导率时假定温度为 20℃，压力项忽略。

温度比测结果如表 6 所示，误差对比见图 3(a)，电导率比测结果如表 7 所示，误差对比见图 3(b)。

表 6 温度比测结果

参考温度真值 /℃	实验室校准系数计算的 温度频率 /Hz	比测系数计算的温度	比测误差	原始系数计算的温度	原始误差
30	171 446	29.999 5	-0.000 5	29.998 9	-0.001 1
25	207 906	24.999 3	-0.000 7	24.999 2	-0.000 8
20	253 581	19.999 4	-0.000 6	19.999 5	-0.000 5
15	311 154	14.999 7	-0.000 3	14.999 9	-0.000 1
10	384 195	10.000 0	0	10.000 3	0.000 3
5	477 484	5.000 2	0.000 2	5.000 5	0.000 5

表 7 电导率比测结果

参考电导率真值 /S·m ⁻¹	实验室校准系数计算的 电导率频率 /kHz	比测系数计算的 电导率 /S·m ⁻¹	比测误差 /S·m ⁻¹	原始系数计算的 电导率 /S·m ⁻¹	原始误差 /S·m ⁻¹
6	6.410 093	5.999 5	-0.000 5	5.999 4	-0.000 6
5.5	6.178 311	5.499 7	-0.000 3	5.499 6	-0.000 4
5	5.937 147	4.999 8	-0.000 2	4.999 8	-0.000 2
4.5	5.685 428	4.499 9	-0.000 1	4.499 9	-0.000 1
4	5.421 707	3.999 9	-0.000 1	3.999 9	-0.000 1
3.5	5.144 170	3.499 9	-0.000 1	3.500 0	0

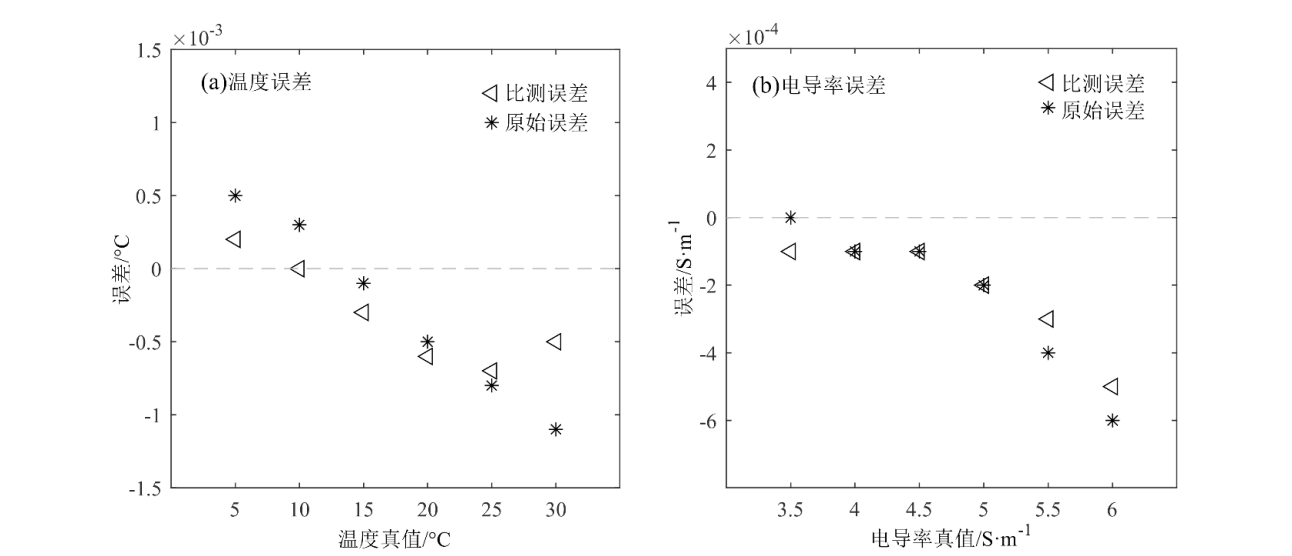


图 3 温度和电导率误差对比

由表 6、表 7 和图 3 可知, 通过原始校准系数和比测所得校准系数计算的温度、电导率值与与实验室校准后的结果存在误差。对二者的误差进行比较, 比测误差较原始的误差小, 在选取的 12 个温度和电导率特征点上, 比测误差绝对值比原始误差绝对值小的有 6 个, 相同的有 3 个, 大的有 3 个。温度比测误差绝对值的均值为 $3.833\ 3\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$, 原始误差绝对值的均值为 $5.500\ 0\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电导率比测误差绝对值的均值为 $2.166\ 7\times 10^{-4}\text{ S/m}$, 原始误差绝对值的均值为 $2.3333\times 10^{-4}\text{ S/m}$ 。

4 结 论

本文设计了一种比测装置, 该装置使潜标 CTD 与船载 CTD 测量同一水团, 便于两者进行数据对比。通过现场实验对两种 CTD 进行比测, 以船载 CTD 作为标准数据, 通过回归分析方法计算了船载 CTD 的温盐传感器校准系数。通过给定真值和实验室校准系数计算出传感器频率值, 再将该值与校准前后的系数代入计算公式, 分别得到校准前后测量仪器的误差。实验结果表明, 以船载 CTD 为标准对潜标 CTD 进行比测后, 数据误

差降低, 本文中设计的比测方法对提高测量设备准确性有一定作用。

由于本文中使用的潜标 CTD 是用于实验室计量认证, 使用率较低, 所以该 CTD 的数据漂移并不明显, 其测量结果与实验室校准后的测量结果相差不大, 这导致比测实验对数据准确度的提高效果不显著。若实验设备在具有腐蚀性的海水中长期使用, 本实验的效果将更加明显。实际上, 海水温盐场的波动较为明显, 无法达到恒温槽效果, 本文中的船载 CTD 数据经过平均处理后, 船载 CTD 与潜标 CTD 数据一致性较好, 有一定偶然性。此外, 本实验需要使用 $0\sim 1\ 500\text{ m}$ 的 CTD 数据, 所以该校准方法仅适用于 $1\ 500\text{ m}$ 以深的海区, 且必须为温盐结构较为稳定的大洋区。

本文中的比测方法可以提高潜标 CTD 的测量精度, 可为作业现场的 CTD 校准提供一种解决方案, 但是此方法限制条件较多, 不能适用于所有海区。因此, 进行陆地实验室校准或建设一套船载的标定系统才能从根本上提高潜标 CTD 的数据质量问题。

参考文献:

- [1] 刘松, 左文镔, 隋智享. 国外海洋科考船现状及总体设计技术发展方向 [J]. 舰船科学技术, 2014, 1(S1):8-14.
- [2] 王凡, 汪嘉宁. 我国热带西太平洋科学观测网初步建成 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2):258-262.
- [3] 王凡, 胡敦欣, 穆穆, 等. 热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(06):595-602.
- [4] 汪嘉宁, 王凡, 张林林. 西太平洋深海科学观测网的建设和运行 [J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6):1471-1479.
- [5] 张兆英. CTD 测量技术的现状与发展 [J]. 海洋技术, 2003, 22(4):105-110.
- [6] Fu C, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992, 16(4): 482-493.
- [7] Ronghui H, Fengying S. Impacts of the Thermal State and the Convective Activities in the Tropical Western Warm Pool on the Summer Climate Anomalies in East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1994.
- [8] 黄瑞新. 大洋环流: 风生与热盐过程: Ocean circulation: wind-driven and thermohaline processes[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [9] 胡波, 李晖, 张川. UCTD 海上比测方法探讨 [J]. 海洋技术, 2011, 30(1):41-43.
- [10] 晏天, 梁杰, 赵东蕾, 等. 温盐深测量仪电导率传感器校准的优化与提升 [J]. 中国测试, 2018, 44(12):51-54.

- [11] 吴晓芬, 周慧, 曹敏杰, 等. 船载 CTD 仪与自动剖面浮标观测资料质量初探 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(2):46-58.
- [12] 张嫦娥, 姚勇. 海洋 CTD 仪器校准——方法与探讨 [J]. 海洋技术学报, 1998, 17(1):74-78.
- [13] 孙建平, 张金涛, 邱萍, 等. 高精度自动绝热量热计的实验研究与分析 [J]. 计量学报, 2006(4):331-334.
- [14] 于厚隆, 贾肇基. 国内外 CTD 校准实验室及校准技术研究的现状和展望 [J]. 海洋技术, 2000, 19(1):34-43.
- [15] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000.
- [16] Mamaev O I. Temperature-salinity analysis of world ocean waters[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1975.
- [17] 毛汉礼, 任允武, 万国铭. 应用 T-S 关系定量地分析浅海水团的初步研究 [J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(1): 1-22.
- [18] Fleming, Richard Howell. The oceans, their physics, chemistry, and general biology[M]. New York: Prentice-Hall, 1946.
- [19] Galbraith P S, Kelley D E. Identifying overturns in CTD profiles[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1996, 13:688-702.
- [20] 张素伟. 国产 HM2000 型剖面浮标 CTD 传感器的校准及其漂移现象分析 [J]. 计量与测试技术, 2018, 45(9):64-67.
- [21] 李红志, 王云泉. 高精度 CTD 剖面仪电导率传感器的研究和实验 [J]. 海洋技术, 2001, 20(1):147-153.

Research on the Field Comparative Measuring Method of CTD on Subsurface Buoy

CHEN Zhao^{1,2}, WEI Chuan-jie^{1,2}, DIAO Xin-yuan^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, SUN Yi^{1,2}, ZHAO Zhang-nan^{1,2}, PAN Jun^{1,2}

1. Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Center for Ocean Mega-Sciences, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266061, China

Abstract: After long-term use of CTD on subsurface buoy, the data will drift, and its accuracy will decrease, which will adversely affect the correctness and credibility of scientific research. According to the operation of shipboard CTD, a bottom bracket is designed for subsurface buoy CTD comparing measurement. The ocean water is regarded as a thermostat, SBE911 CTD as the standard measurement. The calibration coefficient of subsurface buoy CTD temperature and salinity sensors are calculated by regression method, and data obtained by new coefficient are compared with uncalibrated one. The mean of the absolute value of the temperature comparing error is $3.8333 \times 10^{-4} ^\circ\text{C}$, original error is $5.5000 \times 10^{-4} ^\circ\text{C}$, while the mean of the absolute value of the conductivity comparing error is $2.1667 \times 10^{-4} \text{ S/m}$, original error is $2.3333 \times 10^{-4} \text{ S/m}$. The results prove that the comparing measurement method designed in this paper has an effect on improving the accuracy of the subsurface buoy CTD.

Key words: subsurface buoy CTD; shipboard CTD; regression analysis