

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.05.003

UCTD 数据处理方法研究

张挺, 田雨*, 兰卉, 高坤, 程敏, 许丽萍
(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要: 本文研究了走航式温盐深剖面测量仪 (UCTD) 下降速度模型, 根据基本参数计算了 UCTD 的下降速度。理论计算和海上试验表明, UCTD 下降速度远大于传统剖面测量 CTD, 在下放过程中, UCTD 下降速度呈现波动减小的现象, 给数据处理工作带来新的挑战。本文在借鉴传统 CTD 数据处理过程的基础上, 提出了适用于 UCTD、与下降速度相关的数据处理方法, 由理论及海试数据计算出具体 UCTD 数据处理参数, 并建立起数据处理参数与下降速度的依赖关系。UCTD 海试数据经过处理后, 盐度测量噪声改善明显, 测量误差显著减少, 与 SBE911Plus CTD 相比, 温度、电导率和盐度的平均绝对误差优于 0.01°C 、 0.03 mS/cm 、 0.03 PSU , 达到了 UCTD 的设计指标。本文建议用户采用自由投放模式投放 UCTD, 以期获得良好的数据质量。

关键词: 走航式温盐深剖面测量仪; 下降速度; 数据处理

中图分类号: P714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2020) 05-0019-06

走航式温盐深剖面测量仪 (Underway Conductivity Temperature Depth Profiler, UCTD) 是一种低成本、结构紧凑的温盐深剖面测量仪器, 使用配套绞车进行投放和回收, 在船舶航行时进行温度、电导率和压力测量, UCTD 适应船速 $0 \sim 12\text{ kn}$, 航速 12 kn 时下放深度达到 400 m ^[1]。国内外 UCTD 均采用无泵设计的三电极电导率传感器测量方案, 借助 UCTD 的快速下降实现电导率传感器内的海水导流。相对于传统剖面测量 CTD (Conductivity Temperature Depth Profiler, CTD), UCTD 下降速度不仅快而且随深度变化, 导致其数据处理参数依赖于当前速度, 在 UCTD 数据处理过程中, 需要进一步排除粘性耗散导致的升温效应, 还要考虑热质订正参数、传感器响应和匹配时间受流速影响而发生变化的情况。因

此, 有必要研究 UCTD 下降过程, 并在传统剖面测量 CTD 数据处理方法基础上进行改进, 得到适用于 UCTD 的数据处理方法和参数。CTD 数据处理方法在国内外已有充分的研究, UCTD 相关文献却较少, 国内文献以产品介绍和应用研究为主^[2-3], 美国罗得岛大学学者深入研究了 UCTD 数据处理的模型, 强调 UCTD 数据处理需考虑速度效应^[4]。

1 UCTD 下降速度模型

UCTD 主要由探头部分、密封壳体 and 尾杆构成, 如图 1 所示, 探头部分包含温度、电导率传感器, 密封壳体表面有压力传感器, 内部安放电池和测量电路。自由投放模式下, 按照预设的投放深度, 绕线机在尾杆上往返缠绕若干层缆绳, 入水后尾

收稿日期: 2020-03-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFC1400502, 2017YFC1403403, 2017YFC1403304)

作者简介: 张挺 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋观测仪器研发。E-mail: 549713174@qq.com

通讯作者: 田雨 (1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事 CTD 产品化研究。E-mail: 21918655@qq.com

杆和绞车卷筒双端放线, UCTD 下降速度基本不受船舶航速的影响。

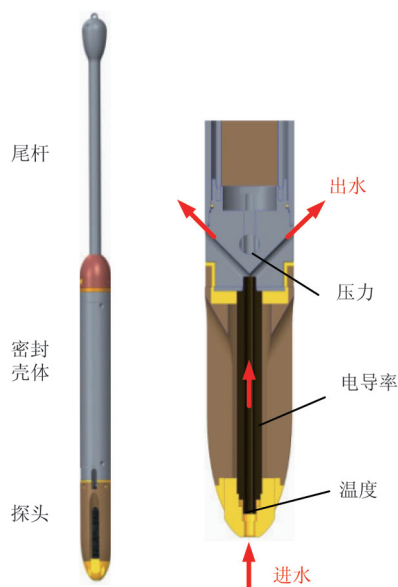


图1 UCTD 结构示意图

自由下落时, UCTD 受到重力、浮力、运动阻力和放线阻力的共同作用, 参考 XBT 运动方程^[5], 可以建立 UCTD 运动方程:

$$\begin{cases} M \frac{d^2 z}{dt^2} = Mg - F_f - D - L \\ M = M_0 - mz \\ F_f = (\rho_0 + 0.01z)g(V_0 - vz) \\ D = \frac{1}{2} C_d (\rho_0 + 0.01z) S U^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为 UCTD 在 z 深度处的质量; L 为放线阻力; M_0 , V_0 为 UCTD 入水时刻的质量和体积; m , v 为单位长度缆绳质量和体积; F_f 为 UCTD 在 z 深度处所受浮力; ρ_0 为表层海水密度; D 为 UCTD 运动阻力; C_d 为阻力系数; S 为 UCTD 截面积; U 为下降速度。

代入 UCTD 和缆绳的基本参数, 假设入水时速度为 5 m/s, 求解运动方程, 得到 UCTD 下降速度与深度关系:

$$U = 4.6 - 0.0025z \quad (2)$$

受投放高度、入水姿态、绕线质量及海区差异的影响, UCTD 实际下降速度与理论值差别较大, B2-1 站位 UCTD 实际下降速度如图 2 所示, 0 ~ 430 dbar 区间 UCTD 处于双端放线状态, 下

降速度的量级和趋势与理论计算大体相符, 波动与尾杆上缆绳的放线方向的周期性变化有关。至 430 dbar 时 UCTD 放线完毕, 受缆绳拖拽作用, 下降速度骤降至 1.4 m/s, 随后缓慢均匀下降至 930 dbar 时绞车开始回收。

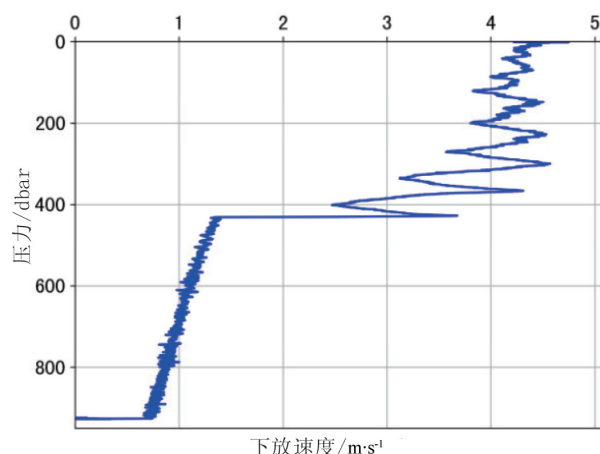


图2 UCTD 下降速度曲线

2 粘性耗散修正

UCTD 下降速度较快, 需要考虑粘性耗散作用, 粘性耗散是流体在流动过程中由粘性摩擦力引起的机械能转换成热能的现象, 在粘性耗散加热下, 温度传感器会产生与流速平方成正比的测量误差^[6]:

$$dT = 0.214 \sqrt{v} (U - \Delta U)^2 = 0.214 \sqrt{v} (U - 0.4)^2 \quad (3)$$

式中: v 为海水运动粘性系数; U 为 UCTD 下降速度; ΔU 为电导池内外速度差。根据 Ullman^[4]提出的模型, 流经温度传感器的流速与 UCTD 下降速度在 1 ~ 5 m/s 区间内基本成线性关系, 平均偏低约 0.4 m/s。当 UCTD 下降速度为 4 m/s 时, 会产生超过 +0.003 °C 的温度测量误差, 该误差应根据当前下降速度予以修正。

3 滤波

UCTD 沿用 Mudge 和 Lueck 提出的低通滤波算法^[7], 通过同步温度和电导率传感器响应时间的方式削弱盐度等衍生量的尖峰, 为避免相移, 对数据先后做正向和反向滤波。

$$\begin{cases} Y(n) = aY(n-1) + b(Y_0(n) + Y_0(n-1)) \\ b = 1/(1 + 2\tau f) \\ a = 1 - 2b \end{cases} \quad (4)$$

式中: Y 为传感器滤波后的值; Y_0 为原始数据; τ 为时间常数; f 为采样频率。

UCTD 传感器时间常数与下降速度相关, 根据经验, 下降速度较低时, 分别给予温度、电导率、压力时间常数为 0.15 s, 0.1 s, 0.15 s 的低通滤波, 可以在削弱噪声和保留测量细节之间达到较好的平衡; 下降速度超过 3 m/s 时, 三个传感器时间常数均取 0.1 s。如图 3 所示, UCTD 经过滤波处理, 盐度尖峰得到一定程度的抑制。

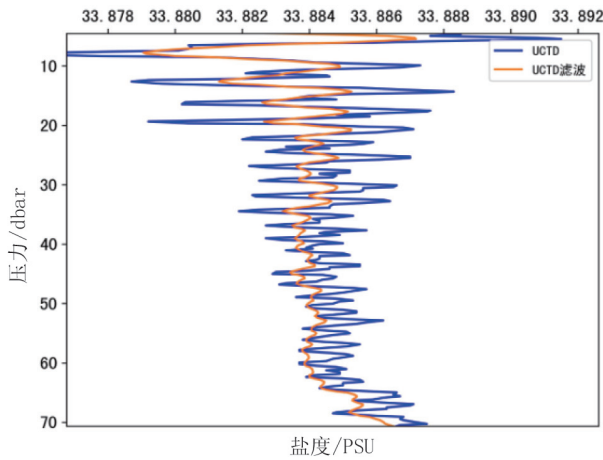


图3 滤波效果对比图

4 位置订正

受传感器响应时间、采样时序、安装位置的影响, 温度、电导率传感器无法同步测量同一水团, 导致盐度等衍生量产生虚假尖峰现象。一般用位置订正算法同步温度、电导率传感器数据, 消除尖峰, 保证测量结果的准确性。如图 4 所示, 假定 UCTD 在 0 时刻穿越一个温盐阶跃, T_{pos} 为水团经由温度传感器流向电导率传感器的时间, T_t , T_c 分别为温度、电导率响应时间。从图中可以看出, 做位置订正时保持温度不动, 电导率数据挪动时间:

$$T_{align} = T_{sample} + T_{pos} + T_c - T_t \quad (5)$$

式中: T_{align} 为位置订正参数, 正值表示电导率相对于温度数据向前移动, 负值表示向后移动; T_{sample} 代表电导率相对于温度采集的时序差。

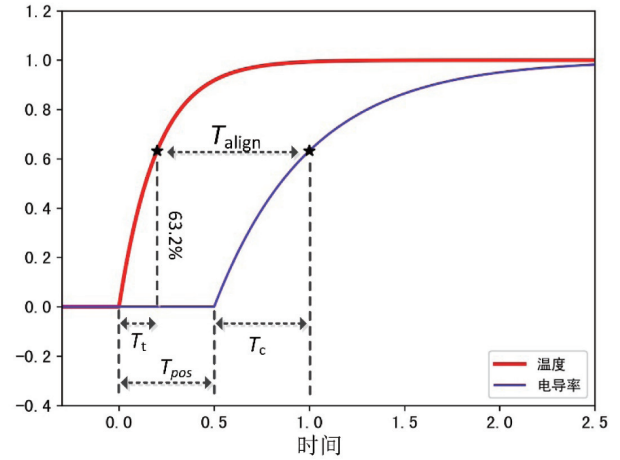


图4 位置订正参数影响因素示意图

位置订正参数影响因素中除了 T_{sample} 固定不变, 其他都随流速而变化。从传感器测量原理看, T_{pos} , T_c 与流速成反比, Raymond W 等^[8]实验表明, T_t 与流速的平方成反比。分别估算不同流速下 T_{pos} , T_c , T_t 的值存在困难, 因此将位置订正参数作为一个整体来研究, 挑选 2016 年至 2019 年 3 次海试 16 组不同下降速度的 UCTD 数据, 保持温度、压力数据不动, 对电导率数据以 0.01 s 为间隔向前、向后移动和线性插值, 并重新计算盐度。以盐度曲线长度最小为目标, 求解不同下降速度对应的最优位置订正参数。

$$f(T_{align}) = \sum \sqrt{(P_{n+1} - P_n)^2 + (S_{n+1} - S_n)^2} \quad (6)$$

式中: P 为压力; S 为盐度; n 为采样序号。

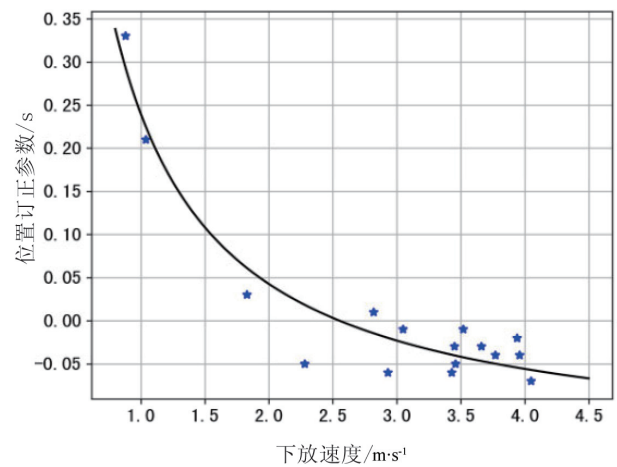


图5 位置订正参数与下降速度关系图

如图 5 所示, 低速时 T_{pos} , T_c 很大, 位置订正参数为正; 随着速度的增加, T_{pos} , T_c 相对于 T_i 快速减少, 导致位置订正参数变成了负值。对图中数据点做拟合, 得到公式:

$$T_{\text{align}} = \frac{0.394}{U} - 0.154 \quad (7)$$

图 6 给出了位置订正的对比效果, UCTD 捆绑在 SBE911 Plus CTD 仪器架上, 下降速度为 1.1 m/s, 计算 T_{align} 为 0.2 s, 经过位置订正, UCTD 盐度尖峰显著削弱。

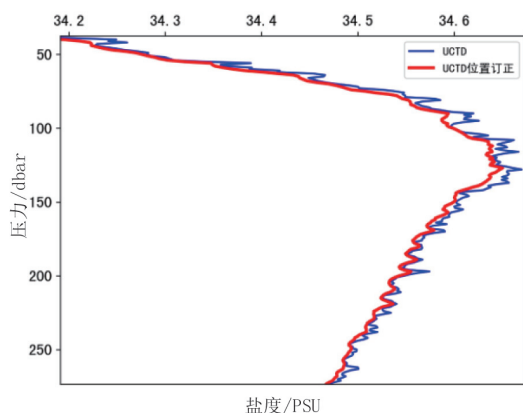


图 6 位置订正效果对比图

5 热质订正

电导率传感器由铂环电极、玻璃管、封装胶和支撑托架构成, 传感器上存储的热量会延缓流经海水温度的变化, 导致电导率测量值产生测量误差, 一般用 Lueck 和 Picklo 提出的热质订正算法^[9]予以修正:

$$\begin{cases} C_T(n) = -BC_T(n-1) + rA(T(n) - T(n-1)) \\ A = 2\alpha / ((\tau f)^{-1} + 2) \\ B = 1 - 2A\alpha^{-1} \\ r = 0.1(1 + 0.006(T(n) - 20)) \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_T 为电导率修正值; T 为温度; r 描述电导率与温度的关系; n 为采样序号; f 为采样频率; α 和 τ 为热质订正参数, 分别代表由热质效应引起的误差幅值和时间常数。根据 Morison 热质订正模型^[10], α 和 τ 参数与流速相关。通过海上试验确定 α 和 τ 的值, 估算其与下降速度的关系。

2018 年 9 月的南海海试中, 将 UCTD 捆绑在

SBE911 Plus CTD 的架子上, 按 1.1 m/s 的下降速度开展了 8 组同步比测。使用 SBE Data Processing 软件处理 SBE9 数据, 对 UCTD 数据做粘性耗散、滤波、位置订正, 然后遍历 α , τ 参数做热质订正。以两者 10 ~ 500 dbar 区间的盐度测量差值的均方根值最小作为目标, 求解最优 α 和 τ 参数。从图 7 中可以看出, $\alpha=0.07$, $\tau=15$ 是一组比较合适的参数。其他 7 个同步比测剖面的计算结果与之类似。

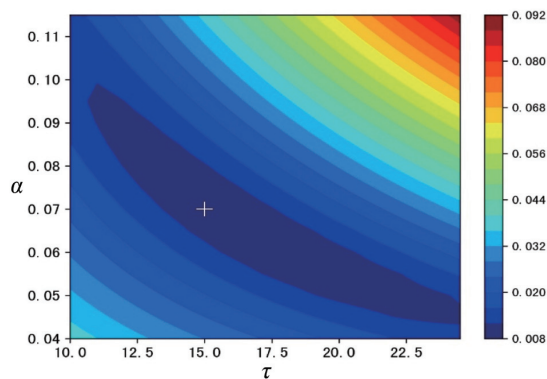


图 7 盐度测量误差的均方根值与 α , τ 的关系图

将 UCTD 单独投放的剖面数据照此处理, 得到下降速度为 4 m/s 下的最优参数 $\alpha=0.01$, $\tau=1$ 。参考 Morison 模型^[10], 得到热质订正参数与速度的对应关系:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{0.091}{U} - 0.0128 \\ \tau = \frac{30.87}{\sqrt{U}} - 14.44 \end{cases} \quad (9)$$

图 8 给出了 UCTD 热质订正的对比效果, 经过热质订正, UCTD 与 SBE911 Plus CTD 盐度测量差异显著减少。

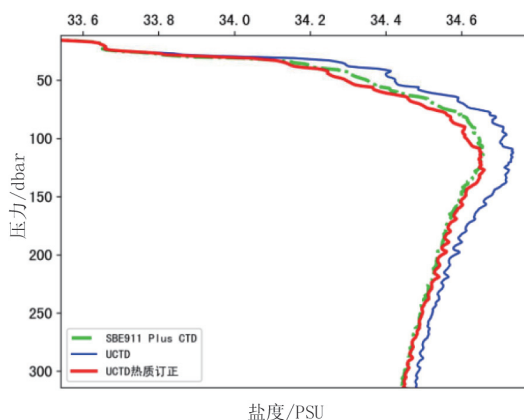


图 8 热质订正效果对比图

6 典型剖面数据处理

图 9 中红色曲线为 B2-1 站位 UCTD 原始盐度, 未经处理的 UCTD 盐度曲线噪声很大, 图中 SBE911 Plus CTD 为相邻站位已处理的盐度测量曲线。图中还可以看出, 在尾杆放线完毕(430 dbar)和开始回收(930 dbar)处, 两次速度骤降均伴随盐度突然增加的现象, 幅度约在 0.03 PSU 左右, 数据处理时必须予以剔除。

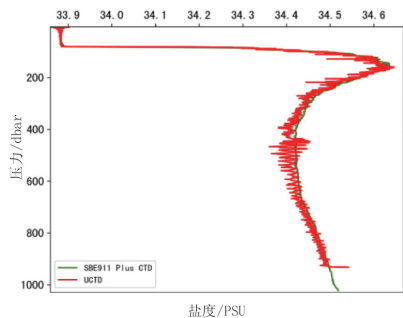


图 9 UCTD 原始盐度曲线

数据处理时, 要计算当前 UCTD 下降速度对应的处理参数, 然后进行粘性耗散订正、滤波、位置订正、热质订正和平均处理, 处理效果如图 10 所示。处理后, UCTD 与 SBE911 Plus CTD 的温度、电导率和盐度的平均绝对误差分别为 0.008℃、0.029 mS/cm 和 0.026 PSU, 满足表 1 中测量准确度的技术指标。

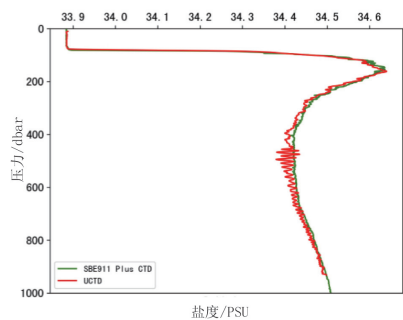


图 10 UCTD 处理后盐度曲线

表 1 UCTD 主要技术指标

参数	电导率 /mS·cm ⁻¹	温度 /℃	压力 /dbar
准确度	0.05	0.01	0.1% F.S
测量范围	0 ~ 70	-2 ~ 35	0 ~ 1 000
采样率 /Hz	16		
耐压 / dbar	1 500		
电池	50 次投放或连续 8 小时使用		

数据处理后, UCTD 盐度噪声显著减少, 与 SBE911 Plus CTD 盐度曲线更加接近, 尤其在双端放线部分(0 ~ 430 dbar), 处理效果比较明显。在尾杆放线完毕 UCTD 继续下降时(>430 dbar), 因缆绳拖拽作用, UCTD 速度较慢且姿态发生倾斜, 传感器过水不畅, 数据处理效果有限, 仍存在明显的盐度抖动现象, 建议用户做中值滤波、滑动平均处理, 同时忽略测量细节。

7 结论

UCTD 是一种可以在船舶航行过程中使用的温盐深剖面测量仪器, 在获取高水平分辨率数据的同时, 不可避免地会牺牲其数据质量, 在这种情况下, 必须采用一套与其运动特性相适应的数据处理方法, 确保准确地获取温盐剖面数据。在开展 UCTD 数据处理时, 首先计算当前下降速度对应的数据处理参数, 然后依次进行粘性耗散温度修正、温盐传感器响应时间匹配、温盐传感器测量数据同步、电导率传感器热质效应修正, 最后还要剔除速度骤降导致的盐度异常。

多次海上试验表明, 确保 UCTD 平稳下降, 是获取高质量 UCTD 数据的前提和关键, 在条件允许的情况下, 建议用户尽量按照操作规程在尾杆上紧密绕线, 采用自由投放的模式投放 UCTD, 结合规范的数据处理, 可以有效减少盐度测量噪声和误差, 获得较好的温盐剖面数据。

参考文献:

- [1] 任炜, 李晖, 李永奇, 等. UCTD 系统及其关键技术介绍 [J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 8-18.
- [2] 李晖, 兰卉, 张挺, 等. UCTD 样机海上试验和应用研究 [J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 3: 42-44.
- [3] 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.
- [4] David S Ullman, David Hebert. Processing of underway CTD data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 31: 984-998.
- [5] Zachariah R Hallock, William J Teague. The fall rate of the T-7 XBT[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1991, 9: 470-483.
- [6] Nordeen Larson, Pedersen Arthur M, et al. Temperature measurements in flowing water: viscous heating of sensor tips[C]. Montreal QC Canada: Proceedings of the First IGHEM Meeting, 1996.
- [7] Todd D Mudge, Rolf G Lueck. Digital signal processing to enhance oceanographic observations[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 11: 825-836.
- [8] Raymond W Schmitt, Robert C Millard, et al. A double-diffusive interface tank for dynamic-response studies[J]. Journal of Marine Research, 2005, 63: 263-289.
- [9] Rolf G Lueck, James J Picklo. Thermal inertia of conductivity cells: observations with a Sea-Bird cell[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7: 756-768.
- [10] James Morison, Roger Andersen. The correction for thermal-lag effects in Sea-Bird CTD data[J]. Notes and Correspondence, 1994, 11: 1151-1164.

Research on the UCTD Data Processing Methods

ZHANG Ting, TIAN Yu, LAN Hui, GAO Kun, CHENG Min, XU Li-ping

National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract: The Underway Conductivity Temperature Depth Profiler (UCTD) descent rate model is studied in this paper. The basic parameters of the UCTD are used to calculate the UCTD descent speed, and the theoretical calculations and sea trials show that the UCTD descent rate is much faster than traditional profile measurement CTDs. This phenomenon brings new challenges to data processing. Based on the research of the traditional CTD data processing process, this paper proposes a data processing method related to decent rate suitable for UCTD. The specific UCTD data processing parameters are calculated from the theory and sea trial data. Relationship between data processing parameters and decent rates is established. After data processing, the UCTD salinity measurement noise has improved significantly and the measurement errors have been significantly reduced. Compared with the SBE911Plus CTD, the mean absolute errors of temperature, conductivity and salinity are better than 0.01°C, 0.03 mS/cm, 0.03 PSU, which has reached the design target of UCTD. It is recommended that users use the free fall mode to launch UCTD in order to obtain good data quality.

Key words: UCTD; descent rate; data processing