

李洪臣, 陈希, 毛科峰, 等. 考虑海水强跃层特征的 MVP 系统盐度剖面校正方法试验[J]. 海洋学报, 2023, 45(12): 179–192, doi:10.12284/hyxb2023171

Li Hongchen, Chen Xi, Mao Kefeng, et al. Test of salinity profile correction method for MVP system based on temperature gradient profile analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(12): 179–192, doi:10.12284/hyxb2023171

考虑海水强跃层特征的 MVP 系统盐度剖面校正方法试验

李洪臣¹, 陈希², 毛科峰^{2*}, 王鹏皓¹, 李明²

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410003; 2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院 第二学科交叉中心, 江苏 南京 211101)

摘要: 走航式海洋剖面测量系统 (Moving Vessel Profiler, MVP) 具有空间高分辨率温盐剖面探测的优势, 但由于采用无泵型 CTD 进行温盐测量, 对测量数据进行传感器响应时间匹配和热惯量校正处理是其数据应用的重点和难点。本文针对现有热惯量校正方法在强温跃层处仍然存在盐度尖峰的局限性, 提出一种基于测量温度梯度廓线分析的分层热惯量校正参数寻优方法, 校正温度和电导率, 进而校正盐度剖面。利用西太平洋某航次实测数据进行试验, 结果表明, 该方法显著降低了 MVP 上下行测量剖面的盐度差异, 盐度尖峰基本被剔除, 特别是温跃层处得到明显改善, 上下行剖面的平均绝对盐度差从 0.031 降低到 0.016 1, 总体的盐度误差减小 48.1%, 验证了本文提出的 MVP 盐度剖面校正方法的合理性。

关键词: MVP; 盐度校正; 热惯量效应; 温度梯度廓线分析

中图分类号: P732

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)12-0179-14

1 引言

走航式海洋剖面测量系统 (Moving Vessel Profiler, MVP) 作为集成程度和自动化程度较高的快速温盐深探测平台 (图 1), 能在船舶快速走航过程中进行垂直和水平方向高分辨率的温盐剖面观测, 对观测海洋中尺度过程, 如中尺度涡和锋面等海洋现象的精细化温盐结构具有明显的优势。

MVP 探头搭载无泵 CTD, 采用“自由落体”的方式进行剖面测量, 依靠仪器的运动来产生流经电导池的流量。随着仪器下降速度的变化, 流经电导池的流量并不恒定, 由于 MVP 探头的下降速度快且非匀速,

使用传统的泵式 CTD 盐度校正方法对 MVP 测得的盐度数据进行校正会产生较大的盐度尖峰现象, 主要由温度与电导率传感器响应时间不匹配和电导池的热滞后效应这两个方面造成。

温度与电导率传感器响应时间不匹配方面, 引起传感器响应时间不匹配的原因可以归结为以下几个方面: 温度和电导率传感器的工作原理不同、物理特性差异、测量范围不同以及传感器设计或制造缺陷等。这些因素导致传感器对测量的反应时间不同, 从而使得温度和电导率数据存在时间上的提前或滞后。针对泵式 CTD, 通过 T/C 管道的海水流速相对恒定, 传感器响应时间差主要取决于传感器自身对测量

收稿日期: 2023-09-13; 修订日期: 2023-10-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62073332)。

作者简介: 李洪臣 (1999—), 男, 辽宁省大连市人, 研究方向为海洋数据资料处理。E-mail: Lhc190017@163.com

* 通信作者: 毛科峰 (1981—), 男, 副教授, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: maokefeng@nudt.edu.cn

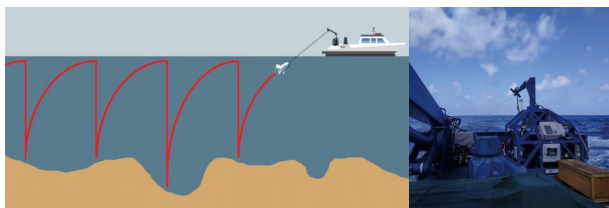


图1 MVP 实物及工作流程

Fig. 1 MVP images and working sketch

的灵敏度,传感器对各自测量的响应时间是定值,因此传感器响应时间差也可以看作是定值。基于此特点,前人提出了单杆滤波法^[1]、Grose 法^[2]和时间常数指数递归数字滤波法^[3],即应用恒定的电导率与温度之间的时间差使温度和电导率传感器的响应时间进行匹配。对于搭载无泵 CTD 的 MVP 探头,通过 T/C 管道的海水流速取决于仪器下降速率,除去传感器灵敏度这个内部因素,外界仪器下降速率的变化导致温度和电导率探头和海水的接触时间也随之发生变化,同样会产生时间的滞后,此时应用恒定的传感器响应时间差进行校正会产生较大的盐度尖峰。任强等^[4]针对 MVP 数据,基于枚举法提出了 MCT(Match Conductivity and Temperature response times)法,对温度、电导率和压力传感器的响应时间进行同步匹配,但是没有给出传感器响应时间差与下降速率的对应关系。Ullman 和 Hebert^[5]参考 Barth 等^[6]对拖曳 CTD 的处理方法,对 UCTD 进行基于下降速率的传感器响应时间最优校正,得到了不同下降速率对应的滞后时间,同时还与船载 CTD 的可靠数据作对比,得到了广泛的认可,可借鉴该方法应用于 MVP 传感器响应时间的修正。

电导池热滞后效应方面,电导池的热滞后效应主要是由于 CTD 的电导池材质自身具有存储热量的能力,电导池壁会对流经电导池的海水进行缓慢的加热/降温,电导率传感器不如温度传感器对周围环境变化敏感,因此会产生时间上的滞后,即热惯量/热滞后效应。Lueck 和 Picklo^[7-8]首次提出了一种热惯量校正的数值算法,获得了热滞后校正参数 α 和 τ 。Morison 等^[9]在 Lueck 的理论基础上,对校正算法进行改进,提高了计算效率,同时还给出一种利用上下行 CTD 剖面的 $T-S$ 曲线之间差异最小化确定热惯量校正参数 α 和 τ 的经验搜索方法。Lueck 和 Morison 提出的热惯量校正算法分别针对电导率和温度进行校正,均较好地移除了盐度尖峰,并一直沿用至今,其算法和原理会在 3.3 节具体讨论。Mensah 等^[10]针对 Morison 等^[9]

提出的热惯量校正参数经验公式在季节性温跃层上存在盐度过度修正现象,重新评估了修正系数 α 和 τ 。上述研究都是针对泵式 CTD 和电导池内流量恒定的假设,对于搭载无泵 CTD 的 MVP 系统,受传感器下降速率变化的影响,不能直接采用有泵 CTD 的热惯量校正参数经验公式。Garau 等^[11]以 Morison 的工作为基础,针对滑翔机平台在测量中上升下降速度变化特点,提出了无泵 Slocum CTD 的热滞后修正方法,即最小化 CTD 下行和上行剖面 $T-S$ 曲线围成的面积,将上述 α 和 τ 的表达式进一步表示为滑翔机下降上升速度的函数,并确定了 4 个修正参数。Liu 等^[12]结合 Garau 法和 IOOS^[13](U.S. Integrated Ocean Observing System)起草的滑翔机质量控制手册,提出一种滑翔机数据的实时质量控制方法,使滑翔机的数据质量明显改善。Morison 法和 Garau 法对于弱温跃层效果较好,对于强温跃层,虽然减小了上下行盐度剖面的差异,却仍然存在盐度尖峰。因此许多学者开展大量研究解决 Morison 法和 Garau 法在强温跃层处的局限,如 Liu 等^[14]提出用中值滤波($N=7$)来移除较大的盐度尖峰,改善热滞后修正效果,成功地减小了滑翔机 CTD 上下行 $T-S$ 曲线之间的差异。究其原因, Morison 法和 Garau 法都是针对整个剖面进行热惯量校正,整个剖面的热惯量校正参数采用同一组系数值,且仅考虑了 CTD 探头垂直运动的速度对测量的影响,未考虑海水温度盐度本身的垂直变化对传感器测量响应的影响,特别是强温跃层内温度梯度大、变化剧烈,传感器本身灵敏度有限,在温跃层处的热滞后效应更加明显。因此应该突破对整个剖面进行热惯量校正的思路,针对测量剖面温度梯度垂直廓线的特性,对温跃层、混合层、缓变层分别研究其热惯量校正参数,充分考虑海水自身环境变化特征对传感器测量的影响。

本文针对现有的热惯量校正参数获取方法在强温跃层的局限性,提出一种基于测量剖面温度梯度廓线分析的分层热惯量校正参数寻优方法,使用温度垂直梯度廓线分析进行剖面分层,校正温度和电导率,进而校正盐度剖面。利用西太平洋某航次的 171 组 MVP 实测数据进行试验和效果分析。

2 资料来源

本文选用 2019 年 5 月 21 日至 6 月 24 日在 $38^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 156^{\circ}\text{E}$ 海域测得的 4 个断面,共 171 组

MVP上下行数据剖面进行试验,各断面 MVP 剖面的具体分布情况、时间范围及命名格式见图2和表1。

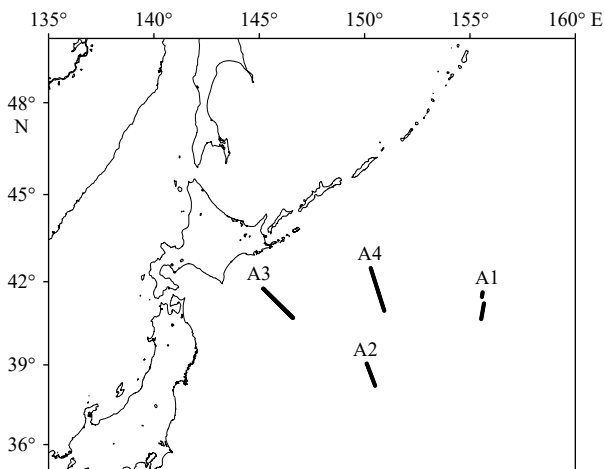


图2 MVP数据断面分布情况
Fig. 2 Distribution of MVP data section

表1 MVP数据剖面分布情况、经纬度及时间范围
Table 1 MVP data profile distribution, latitude, longitude and time scale

断面	剖面命名格式	经纬度和时间范围	剖面数
A1	101, 102, ..., 116	2019年5月21-22日 40.67°~41.61°N, 155.53°~155.60°E	16
A2	201, 202, ..., 219	2019年5月24日 38.22°~38.91°N, 150.10°~150.49°E	19
A3	301, 302, ..., 338	2019年6月6日 40.71°~41.76°N, 145.18°~146.60°E	38
A4	401, 402, ..., 498	2019年6月24日 40.96°~42.48°N, 150.29°~150.93°E	98

3 数据处理方法

本文对 MVP 盐度剖面的校正共分为 3 个步骤:数据预处理、温度和电导率传感器响应时间校正和热惯量校正。其中,数据预处理可细分为剔除仪器不稳定工作状态的数据、全球范围检测、消除逆压和噪声平滑 4 个过程,目的是排除仪器因工作状态产生的异常数据;温度和电导率传感器响应时间校正过程,通过寻找仪器速率与传感器响应时间的对应关系从而进行响应时间上的最优校正;热惯量校正过程,基于相对合理的剖面分层以及热惯量校正参数的变化范围,通过枚举法寻优,找到最佳校正系数对使得 MVP 上下剖面的盐度差异达到最小。具体的技术流程见图3。

3.1 数据预处理

本文在进行盐度校正之前,对 MVP 剖面数据进

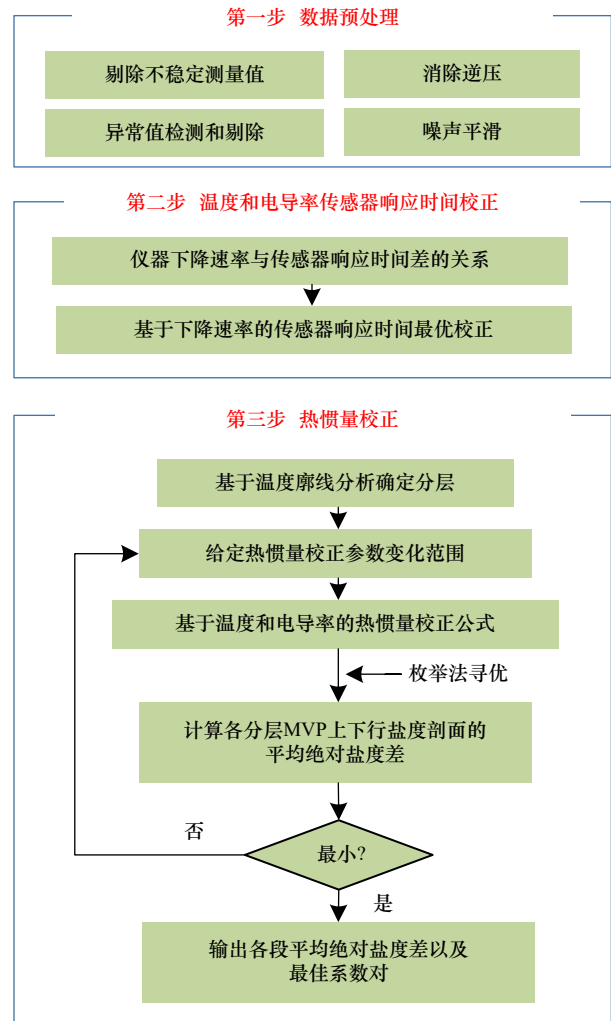


图3 技术流程图

Fig. 3 Technical flow chart

行仪器从激活到稳定工作之间的数据剔除、消除逆压、异常值检测和噪声平滑 4 步预处理过程。

(1)数据剔除。据 CTD 仪器的工作原理,仪器从激活到稳定工作之间的数据不可用,因此本文将 0~10 m 范围的 MVP 剖面数据剔除。

(2)消除逆压。剔除仪器下降(或上升)过程中,由于仪器颠簸而造成的仪器运动反向(譬如下降剖面中的上升数据)或仪器运动过缓(上升或下降速度小于某临界值)的部分,获得稳定的垂向剖面资料。

(3)异常值检测。对于电导率数据,将超出电导率传感器测量范围(0~6 S/m)的数据剔除;对于压力数据,剔除剖面的压力测量大于最大剖面深度 1.1 倍的数据;对于温度和盐度,考虑到有可能发生的海水中的极端情况,将超出温度范围(-2.5~40℃)和盐度范围(0~41)的数据剔除。

(4)噪声平滑。仪器本身会受到外界因素和自身

电信号扰动的影响,因此测量资料中会出现噪声误差。为了确保资料的准确性,本文采用低通滤波去除掉这部分扰动。MVP 的采样频率为 25 Hz,对温度和电导率数据进行 4 点(至截止历经时间为 0.16 s)低通滤波,对压强和垂向速度数据进行 32 点(至截止历经时间为 1.28 s)低通滤波。

3.2 基于下降速率的传感器响应时间校正方法

本文引进基于下降速率的传感器响应时间最优校正算法^[5-6],并将其应用于 MVP 传感器响应时间不匹配的校正,具体方法如下:

参考 Ullman 和 Hebert^[5]对 UCTD 和 Barth 等^[6]对拖曳 CTD 的处理方法,本文将每 80 个点(采样时间共 3.2 s)作为一组,温度相对于电导率滞后定义为温度一阶差分($dT = T_{i+1} - T_i$)和电导率一阶差分($dC = C_{i+1} - C_i$)滞后相关系数最大时的值。具体而言,先找到最大滞后相关系数时的整数滞后点 n ($1 \leq n \leq 80$),然后将该整数滞后点、其前一点和其后一点的相关系数($r(n), r(n-1), r(n+1)$)与滞后点数($\text{lag}(n), \text{lag}(n-1), \text{lag}(n+1)$)做二项式拟合,那么二项式最大值就是最大的滞后相关系数,对应的自变量即滞后。对响应时间校正后的数据做 7 点中值滤波以提高数据质量。

3.3 基于温度梯度廓线分析的热惯量校正方法

针对热滞后效应,目前常用的校正算法有两种,一是 Lueck 和 Picklo^[8]提出的电导率修正关系,即估计在电导池外(没有热惯性)应该测量的电导率,对应的校正算法为

$$C_T(n) = -bC_T(n-1) + \gamma a [T(n) - T(n-1)], \quad (1)$$

式中, T 是测量温度; C_T 为电导率修正量; γ 是电导率对温度的敏感性,其经验公式为 $\gamma(n) = 0.1[1 + 0.006(T(n) - 20)]$; 系数 a 和 b 由 α 和 τ 给出, α 和 τ 分别为热滞后修正系数,即误差的振幅和时间常数; f_n 为采样频率,表达式如下:

$$a = \frac{4f_n\alpha\tau}{1 + 4f_n\tau}, \quad (2)$$

$$b = 1 - \frac{2a}{\alpha}. \quad (3)$$

二是 Morison 等^[9]提出的温度修正关系,即估计在电导池内应该测量的温度,对应的校正算法为

$$T_T(n) = -bT_T(n-1) + a[T(n) - T(n-1)], \quad (4)$$

式中, T_T 为温度修正量。这种算法不需要依赖灵敏度 γ , 因此计算效率更高。

热惯量校正的核心在于如何获得合适的热滞后修正系数(α 和 τ)。Lueck^[7]在水槽实验中得到了 α 和

τ 与平均速率 V 的关系,即 $\alpha \propto V^{-1}$, $\tau \propto V^{-1/2}$ 。Morison 等^[9]在此基础上提出了一种实用(经验搜索)的方法来确定热惯量校正参数 α 和 τ , 方法是使上下 CTD 剖面的 $T-S$ 曲线之间的分离最小化,并用大量剖面数据拟合出 α 和 τ 的经验公式,表达式如下:

$$\alpha = 0.0264V^{-1} + 0.0135, \quad (5)$$

$$\tau = \beta^{-1} = 2.7858V^{-1/2} + 7.1499. \quad (6)$$

Morison 等^[9]的研究是基于常规的 CTD 实验,即假设流速是恒定的。Garau 等^[11]考虑到滑翔机在水中的变速,将上述 α 和 τ 的表达式进一步表示为

$$\alpha(n) = \alpha_o + \frac{\alpha_s}{V(n)}, \quad (7)$$

$$\tau(n) = \tau_o + \frac{\tau_s}{\sqrt{V(n)}}, \quad (8)$$

式中,下标 o 和 s 分别表示偏移量和斜率。此方法,校正依赖于找到 4 个参数($\alpha_o, \alpha_s, \tau_o, \tau_s$)的值,这是通过使上下行 CTD 剖面的 $T-S$ 曲线之间的面积最小化来获得的。

Morison 法和 Garau 法虽然在形式上有所不同,但是核心思想相同,即找到相对合适的 α 和 τ 使上下行 CTD 剖面间的差异尽可能的减小。本文基于此原理对 MVP 热惯量校正方法进行一定的改进,引言中提到 Morison 法和 Garau 法都是针对整个剖面进行热惯量校正,由于电导率传感器灵敏度有限,在遇到温度梯度大且变化剧烈的强温跃层时,热惯量校正效果差强人意。因此为了解决热惯量校正参数获取方法在强温跃层的局限性,本文对盐度剖面进行分层校正,针对测量剖面温度梯度垂直廓线的特性,提取跃层,分别研究其热惯量校正参数。

传统的温跃层是根据温度梯度的阈值进行判断,中国的海洋跃层分析应用主要执行深海和浅海标准,浅水区域(水深 ≤ 200 m)和深水区域(水深 ≥ 200 m)最低限值标准分别为 0.2°C 和 0.05°C 。本文使用深海标准,将温度梯度大于临界阈值($0.05^\circ\text{C}/\text{m}$)范围内的点选取为跃层内的点,将温度剖面划分为跃层和非跃层。

温度实测数据的垂向间隔不一定是均匀的,因此为了更合理地分析数据,将垂直梯度法和不等距微分法结合,计算温度-深度数据梯度,从而对跃层参数进行计算。具体算法如下:

(1)若数据垂向深度均匀,单纯使用垂直梯度法,基本原理如下:

$$G_k = \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T_{k-1} - T_{k+1}}{2\delta Z}, \quad (9)$$

式中, G 为温度梯度值。

(2) 若数据垂向深度间隔不是均匀的, 则加入不等距微分法, 基本算法如下^[15]:

$$\frac{dT}{dZ} = \alpha_i \times \frac{T_k - T_{k-1}}{Z_k - Z_{k-1}} + (1 - \alpha_i) \times \frac{T_{k+1} - T_k}{Z_{k+1} - Z_k}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1, \quad (10)$$

式中, $\alpha_i = \frac{Z_{k+1} - Z_k}{Z_{k+1} - Z_{k-1}}$; Z 为深度实测值; T 为温度实测值。

当对单个样本进行梯度值计算时, 可能出现多个跃层(通常多于 2 个), 此时需要对这些样本进行人工合并。设定跃层之间的间隔阈值(本文为 10 m), 若相邻深度层间隔达到设定间隔阈值时进行跃层合并, 否则不予合并, 将其看作另一个单独跃层。

在温度剖面准确分层的基础上, 采用枚举寻优法, 通过列举所有可能的 α 和 τ 系数对来寻找最佳的系数对。具体处理方法如下:

(1) 对于每一组剖面数据, 将上行剖面的数据插值到与下行剖面数据对应的深度处。

(2) 通过分析温度垂直梯度廓线确定每个剖面的具体分层情况。

(3) 遍历 α 和 τ 的变化范围。本文选取 α 的变化范围为 0.001~0.035, 步长为 0.001; τ 的变化范围为 1~18 s, 步长为 0.5 s。

(4) 对于每个 α - τ 对, 使用式(1)和式(4)分别对电导率和温度进行校正, 计算平均绝对盐度差 $|\Delta S| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{1,i} - S_{2,i}|$ (定义为上下行剖面盐度的平均绝对差, 其中 N 是单个剖面的样本长度, $S_{1,i}$ 和 $S_{2,i}$ 分别为插值后对应深度的上下行剖面盐度值)。对于每一段剖面, 平均绝对盐度差最小的 α - τ 系数对被保留。最后, 计算剖面整体盐度差的均值。

4 结果分析

利用第 3 节提供的技术流程依次按照 3 个过程

处理 171 组 MVP 剖面, 以 A3 断面为示例, 并从 38 组剖面中选取 3 组剖面(307、311 和 326)进行结果分析。

4.1 数据预处理结果

表 2 给出了预处理后 171 组剖面平均绝对盐度差的分布情况。对数据进行预处理后, 171 组剖面 $|\Delta S|$ 的平均值为 0.031, 超过 0.031 的剖面有 65 组, 占剖面总数的 38%。其中 A1 和 A3 断面 MVP 上下行剖面的盐度差异较小, 上下行剖面 $|\Delta S|$ 的平均值分别为 0.02 和 0.023; A2 和 A4 断面 MVP 上下行剖面的盐度差异较高, 上下行剖面的 $|\Delta S|$ 的平均值分别为 0.027 和 0.038。

从图 4 的温盐剖面曲线中可以看出, 在 3 个剖面的温跃层范围内(12.3~243.8 m、12.4~272.8 m 和 12.3~46.3 m), 可以看到明显的盐度尖刺, 即为盐度尖峰。

4.2 剖面分层结果

本文 171 组剖面一共有 9 种分层情况, 见表 3。分别选取代表性剖面较多的 6 种分层情况进行效果展示, 见图 5。图 5a 至图 5f 分别展示的是 323、318、308、301、311 和 314 剖面的分层情况。从温度梯度散点随深度的分布情况可以看出, 温度梯度散点分布较为散乱, 很难直接从图像中看出跃层的划分。为此本文筛选出所有距离基准线(图 5 中红色竖虚线, 即 0.05°C/m 和 -0.05°C/m) 小于 0.05°C/m 的点, 每个点所在深度为剖面层结的分界线, 每个层结的温度梯度为上线界线内所有点的温度梯度均值。若相邻点的深度间隔小于 10 m, 则与上一层进行合并, 合并后的剩余界线则为剖面的最终分层情况。由图 5 可知, 323 剖面分为 2 层, 深度范围为 12.29~111.1 m、111.1~505.5 m; 318 剖面分为 3 层, 深度范围是 12.3~141.2 m、141.2~262.1 m、262.1~506.9 m; 308 剖面分为 4 层, 深度范围是 12.4~117.2 m、117.2~194.3 m、194.3~

表 2 预处理后上下行剖面平均绝对盐度差分布情况

Table 2 Distribution of mean absolute salinity difference between upstream and downstream profiles after pretreatment

平均绝对盐度差 $ \Delta S $	剖面号	数目
$ \Delta S > 0.031$	109, 112, 207, 212, 215, 216, 218, 315, 316, 318, 319, 402~407, 412, 413, 416~419, 421~422, 425, 428, 430~461, 482, 492, 493, 496~498	65
$0.031 \geq \Delta S > 0.02$	110, 111, 113~116, 202, 203, 205, 206, 208~210, 213, 214, 301, 302, 304, 305, 307, 308, 310~314, 317, 320, 321, 324, 327, 329, 410, 408~411, 414~415, 420, 423, 424, 426, 427, 429, 462~481, 483~491, 494, 495	76
$0.02 \geq \Delta S > 0.01$	102~108, 201, 204, 211, 217, 219, 303, 306, 309, 322, 323, 325, 326, 328, 330~338	29
$0.01 \geq \Delta S $	101	1

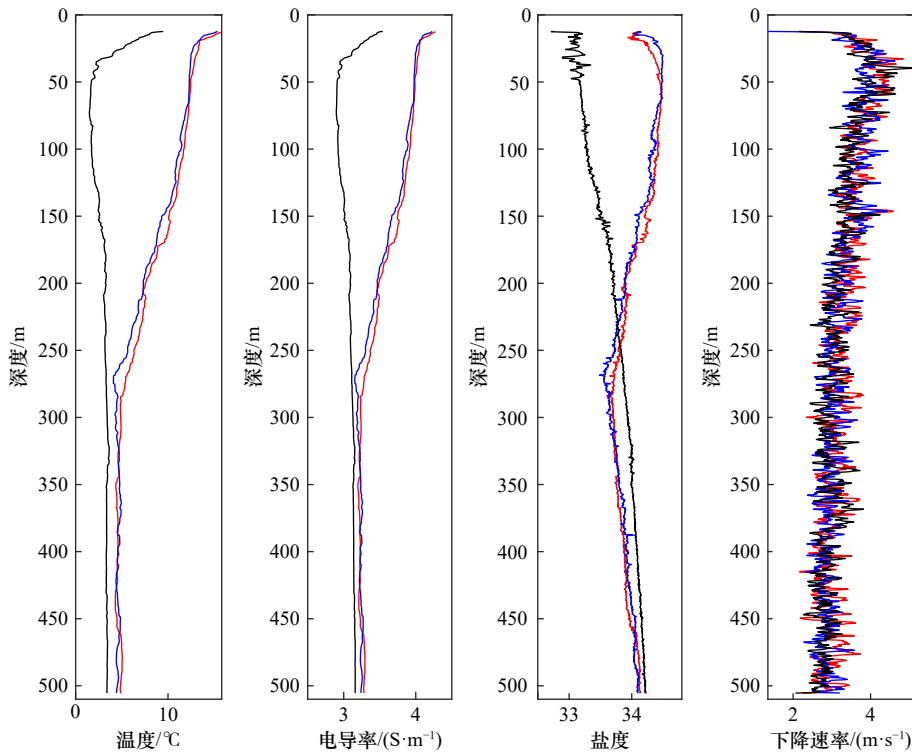


图 4 预处理后 307、311 和 326 剖面温度、电导率、盐度和下降速率的深度分布

Fig. 4 Depth distribution of temperature, conductivity, salinity and descent rate of 307, 311 and 326 profiles after pretreatment

红线、蓝线和黑线分别代表 307、311 和 326 剖面

The red line, blue line and black line represent 307, 311 and 326 profiles respectively

表 3 剖面分层情况

Table 3 Layering of the profile

层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
剖面数	1	41	45	38	13	13	11	4	5

276.4、276.4~507.2 m; 301 剖面分为 5 层, 12.2~40.2 m、40.2~78.6 m、78.6~138.6 m、138.6~284.4 m、284.4~505.2 m; 311 剖面分为 6 层, 12.2~35.6 m、35.6~74.8 m、74.8~141.6 m、141.6~268.2 m、268.2~360.4 m、360.4~506.1 m; 314 剖面分为 7 层, 12.2~55.2 m、55.2~144.3 m、144.3~204.6 m、204.6~227.5 m、227.5~292.1 m、292.1~330.4 m、330.4~505.4 m。结合温度随深度的分布情况, 分层结果基本合理。

4.3 传感器响应时间校正效果

图 6 展示的是温度传感器响应时间相对电导率传感器响应时间的滞后随 MVP 下降速率的变化。以 MVP 采集一次数据的时间为单位, 即一个时间段 (1 scans = 0.04 s), 温度 (T) 相对于电导率 (C) 的滞后与 80 个时间段的探针平均下降速率息息相关。正的滞后被定义为 T 滞后于 C。蓝点是由单个 80 个时间段确定的滞后值 (已去除最大滞后相关系数小于

0.5 的数据), 红点是 0.25 m/s 范围内的平均数, 本文所用的滞后时间值即为 0.25 m/s 范围内的平均值。表 4 则定量给出了上下行剖面温度相对电导率的滞后时间随仪器速率变化的数值。可以看到, 仪器下放时, 温度滞后于电导率, 滞后时间在 2 scans 上下波动; 仪器上升时, 温度提前电导率, 提前时间随着仪器速率增大而增大, 且增大幅度逐渐减小并趋于平稳。

图 7 展示了传感器响应时间校正后与预处理后的上下行剖面盐度对比。可以发现, 进行了基于下降速率的传感器响应时间最优校正和 7 点中值滤波的数据已平滑许多, 盐度尖峰基本被剔除, 上下行剖面的盐度差异显著降低。特别地, 在温跃层范围内, 盐度尖峰的消除效果最明显。

表 5 展示了传感器响应时间校正后上下行剖面平均绝对盐度差的分布情况。进行传感器响应时间校正后, 171 组剖面的 $|\Delta S|$ 为 0.018 7, 超过 0.018 7 的剖面有 63 组, 占剖面总数的 36.8%。 $|\Delta S|$ 大于 0.031 的剖面数由 65 降至 23, $|\Delta S|$ 小于 0.01 的剖面数由 1 增加至 11, 上下行剖面的 $|\Delta S|$ 由 0.031 降至 0.018 7, 降幅为 39.7%。其中 A1 断面上行剖面的 $|\Delta S|$ 由 0.02 降至 0.015, 降幅为 25%; A2 断面上行剖面的 $|\Delta S|$ 由

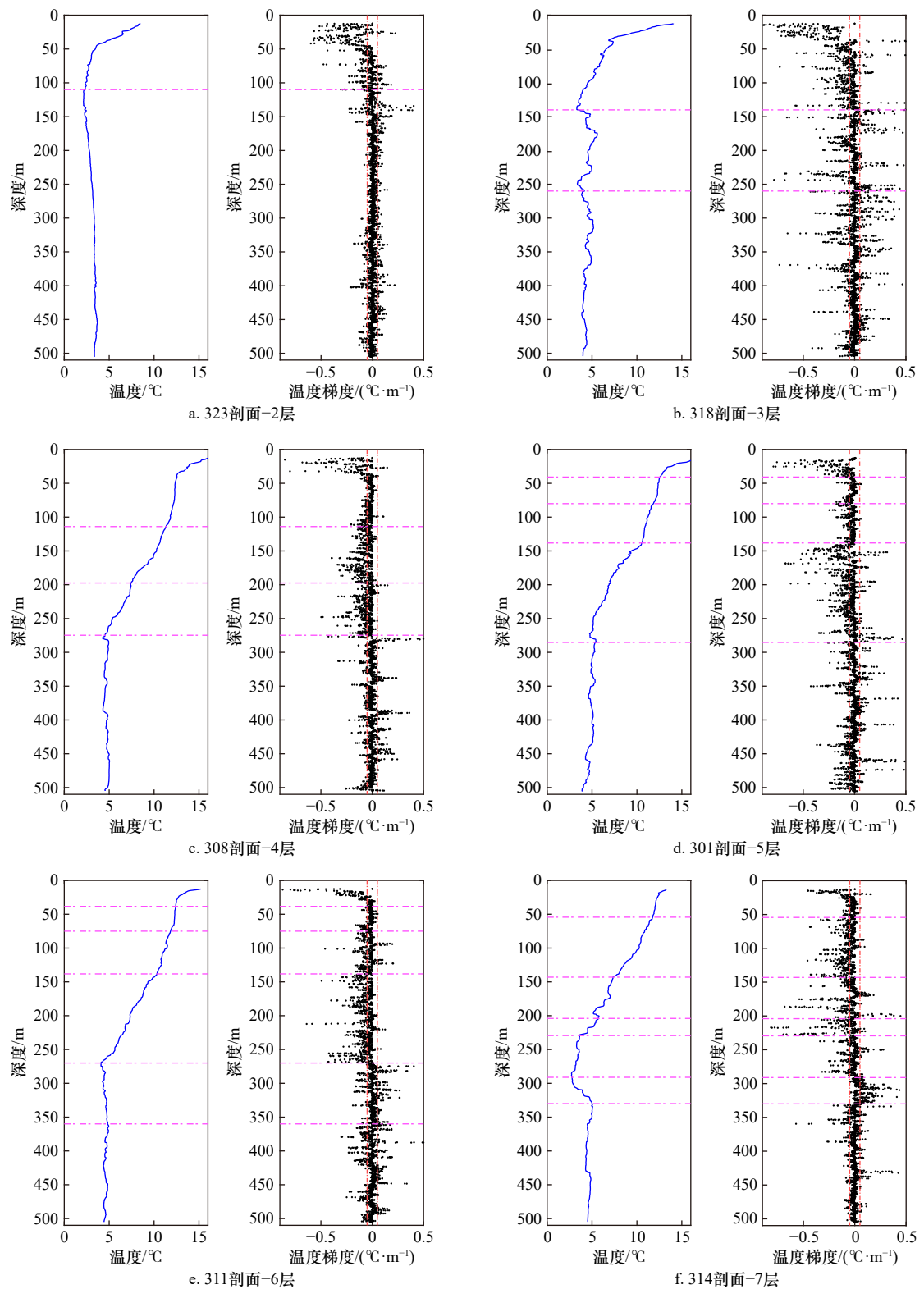


图 5 MVP 温度剖面的分层情况

Fig. 5 Stratification of MVP temperature profiles

a-f 分别是 323、318、308、301、311 和 314 剖面的分层情况。每个子图的左图是 $T-P$ 图, 右图是温度梯度随深度的分布图, 黑色散点是真实温度梯度散点, 红色竖虚线从左至右分别是 $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 和 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 温度梯度阈值线, 品红色横虚线是分层界线

a-f are the stratification of profiles 323, 318, 308, 301, 311 and 314, respectively. The left panel of each subplot is the $T-P$ plot, the right panel is the distribution of temperature gradient with depth, the black scatters are the true temperature gradient scatters, the red dashed lines are the $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ and $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ temperature gradient threshold lines from left to right, respectively, and the magenta horizontal dashed line is the stratification boundary

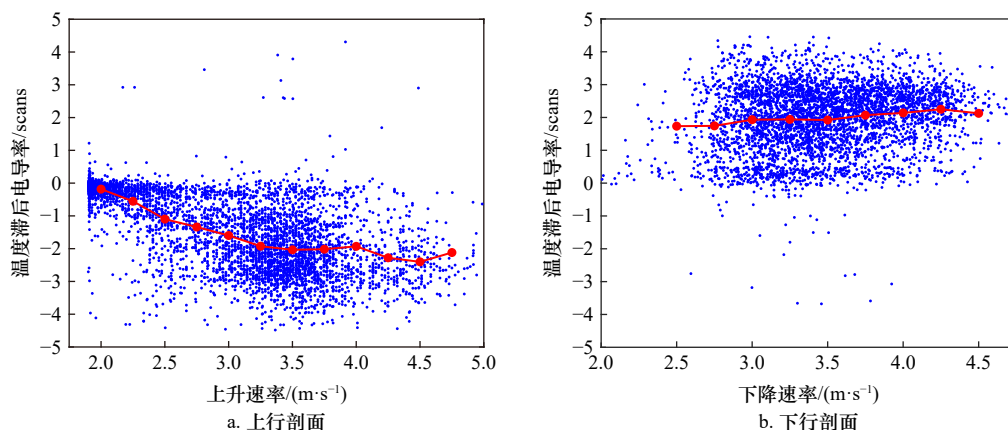


图 6 MVP 上下行剖面温度相对电导率的滞后(1 点=0.04 s)随上升/下降速率的变化

Fig. 6 Lag (1 scans = 0.04 s) of relative conductivity of temperature in MVP upstream and downstream profiles with rising/falling rates

表 4 温度相对电导率的滞后时间与下降/上升速率的关系
Table 4 Temperature relative conductivity lag time versus rate of fall/rise

上行剖面		下行剖面	
上升速率/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	温度滞后 电导率/scans	下降速率/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	温度滞后 电导率/scans
2	-0.183	2.5	1.735
2.25	-0.553	2.75	1.743
2.5	-1.097	3	1.933
2.75	-1.339	3.25	1.942
3	-1.598	3.5	1.922
3.25	-1.925	3.75	2.070
3.5	-2.034	4	2.139
3.75	-2.016	4.25	2.250
4	-1.929	4.5	2.126
4.25	-2.279		
4.5	-2.402		
4.75	-2.118		

0.027 降至 0.021, 降幅为 28.6%; A3 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.023 降至 0.015 5, 降幅为 32.6%; A4 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.038 降至 0.021, 降幅为 44.7%, 降幅最大。

4.4 热惯量校正效果

图 8 展示了热惯量订正后与传感器响应时间校正后的上下行剖面的盐度对比。可以发现, 温度梯度较小时, 热惯量校正的效果不明显, 热惯量校正的主要效果是进一步移除传感器响应时间校正后遗留的“微小”盐度尖峰, 从而减小上下行剖面之间的盐度差异。当温度梯度较大时, 在温跃层处, 可以明显地看

到有无进行热惯量校正后上下行剖面盐度曲线的差异, 主要表现为温盐值以及跃层强度的改变, 这对于研究中尺度涡和锋面等海洋现象的精细化温盐结构至关重要。

图 9 展示了 311 剖面进行热惯量校正后的热滞后校正参数、温度和盐度随深度的变化情况。可以得到, 分层热滞后校正时, 各分层的最佳系数对为 [0.016, 18]、[0.001, 1]、[0.001, 1]、[0.032, 3.5]、[0.002, 18]、[0.007, 9]; 整层热滞后校正时的最佳系数对为 [0.001, 1]。跃层处的最佳系数对与混合层和缓变层存在着明显的差异, 同时整层校正与分层校正得到的最佳系数对也存在较大差异, 使用单一系数对进行整层进行校正不能使热惯量校正的效果达到最好, 从侧面验证了分层热滞后校正的必要性及合理性。

表 6 展示了整层进行热惯量校正后上下行剖面平均绝对盐度差的分布情况。可以得到, 171 组剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 为 0.017 1, $|\Delta S|$ 大于 0.031 的剖面数由 23 降至 15, $|\Delta S|$ 小于 0.01 的剖面数由 11 增加至 26, 上下行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.018 7 进一步降至 0.017 1, 降幅为 8.6%。其中 A1 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.015 降至 0.013 8, 降幅为 8%; A2 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.021 降至 0.02, 降幅为 4.8%; A3 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.015 5 降至 0.014, 降幅为 9.7%; A4 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.021 降至 0.018 3, 降幅为 12.9%, 降幅最大。

表 7 展示了分段进行热惯量校正后上下行剖面平均绝对盐度差的分布情况。可以得到, 171 组剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 为 0.016 1, 相较于整层校正后的 0.017 1, 上下行剖面的盐度误差进一步降低 5.8%, $|\Delta S|$ 小于 0.01 的剖面数由 26 进一步增加至 31。其中 A1 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.013 7 降至 0.013 1, 降幅为 4.4%; A2 断面

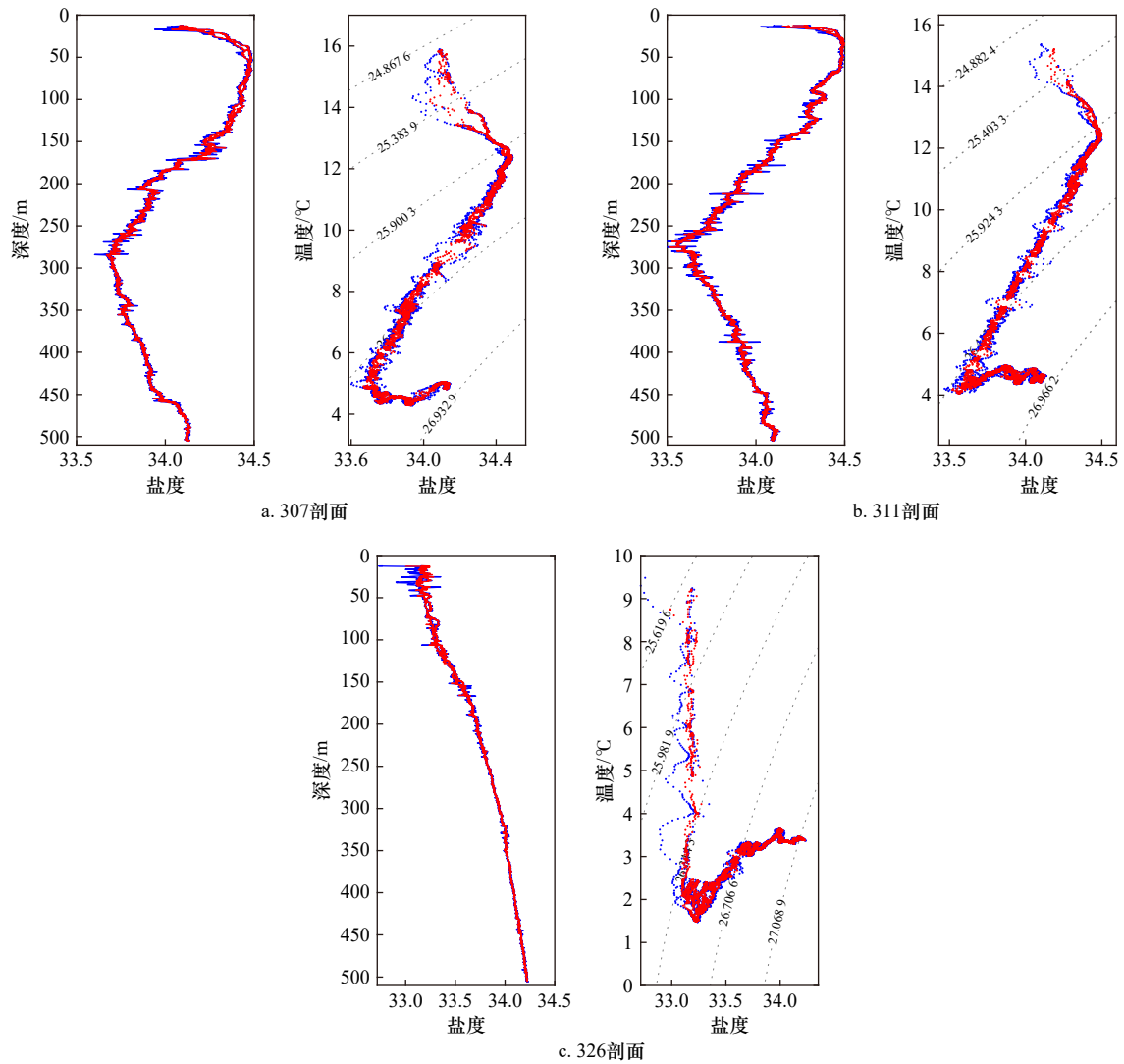


图 7 预处理后和传感器响应时间校正后上下行剖面盐度对比

Fig. 7 Comparison plots of salinity between upstream and downstream profiles after preprocessing and sensor response time correction
a-c 分别为 307、311 和 326 剖面的盐度对比图, 每个子图的左图为 $S-P$ 图, 红线为传感器响应时间校正后的上下行盐度剖面曲线, 蓝线为预处理后的上下行盐度剖面曲线; 每个子图的右图为 $T-S$ 散点图, 红点为传感器响应时间校正后的上下行盐度剖面散点, 蓝点为预处理后的上下行盐度剖面散点

a-c Salinity comparison plots for profiles 307, 311, and 326, respectively; the left plot of each subplot is a $S-P$ plot, with the red line showing the up- and down-row salinity profile curves after sensor response time correction, and the blue line showing the up- and down-row salinity profile curves after preprocessing; and the right plot of each subplot is a $T-S$ scatterplot, with the red dots showing the scatters of up- and down-row salinity profiles after sensor response time correction, and the blue dots showing the scatters of up- and down-row salinity profiles after preprocessing

表 5 传感器响应时间校正后上下行剖面平均绝对盐度差分布情况

Table 5 Distribution of mean absolute salinity difference between upstream and downstream profiles corrected for sensor response time

平均绝对盐度差 $ \Delta S $	剖面号	数目
$ \Delta S > 0.031$	109、112、207、212、215、216、316、318、319、402、412、431、441、443~445、449、453、457~460、482	23
$0.031 \geq \Delta S > 0.0187$	110、111、113、114、205、206、210、218、313、315、317、401、403~405、409、417、419、420、429、430、432~440、442、446~448、450、452、456、493、497~498	40
$0.0187 \geq \Delta S > 0.01$	115、116、201~204、208、209、211、213、214、217、301~312、314、320~336、406~408、410、411、413~416、418、421~428、451、454~455、461~481、483~492、494~496	97
$0.01 \geq \Delta S $	101~107、219、337、338	11

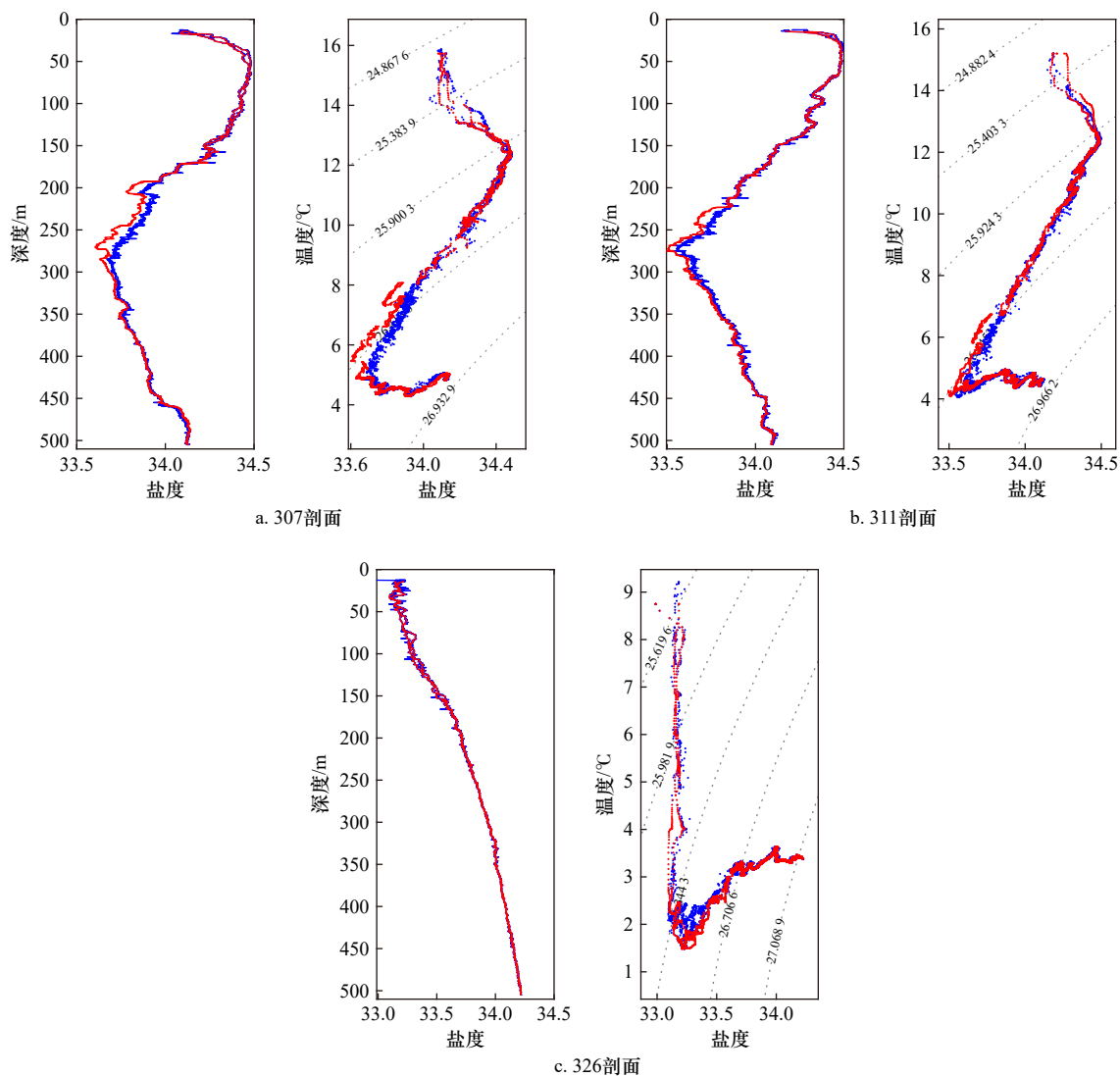


图 8 热惯量订正后与传感器响应时间校正后的上下行剖面的盐度差异

Fig. 8 Difference in salinity between thermal inertia revised and sensor response time corrected up- and down-row profiles

a-c 分别为 307、311 和 326 剖面的盐度对比图, 每个子图的左图为 $S-P$ 图, 红线为热惯量订正后的上下行盐度剖面曲线, 蓝线为传感器响应时间校正后的上下行盐度剖面曲线; 每个子图的右图为 $T-S$ 散点图, 红点为热惯量订正后的上下行盐度剖面散点, 蓝点为传感器响应时间校正后的上下行盐度剖面散点

a-c. Salinity comparison plots for profiles 307, 311, and 326, respectively; the left panel of each subplot is a $S-P$ plot, with the red line showing the upstream and downstream salinity profile curves after thermal inertia revision, and the blue line showing the upstream and downstream salinity profile curves after sensor response time correction; and the right panel of each subplot is a $T-S$ scatter plot, with the red dots showing the upstream and downstream salinity profile scatter points after thermal inertia revision, and the blue dots showing the sensor response time-corrected upstream and downstream salinity profile scatter points in red, and sensor response time-corrected upstream and downstream salinity profile scatter points in blue

上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.02 降至 0.018 8, 降幅为 6%; A3 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.014 降至 0.013 7, 降幅为 2.1%; A4 断面上行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.018 3 降至 0.018 2, 降幅为 0.5%。

虽然经过 3 步处理后, 仍有 15 个剖面的 $|\Delta S|$ 大于 0.031, 但是其上下行剖面的盐度差异仍有一定程度的降低。究其原因, 可能是在有限的拖曳距离中, 遇到锋面等海洋现象致使温盐性质发生急剧变化。总

体来看, 经热惯量校正后, 上下行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.018 7 进一步降至 0.016 1, 降幅为 13.9%。

由表 6 和表 7 可知, 分层热惯量校正的效果要优于整层热惯量校正。为了体现分层热惯量校正, 以 A3 断面为例, 具体分析强温跃层处上下剖面的平均绝对盐度差改善效果, 见表 8。本文将温度梯度大于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的跃层定义为强温跃层, A3 断面 38 组剖面中, 29 组剖面中存在强跃层, 热

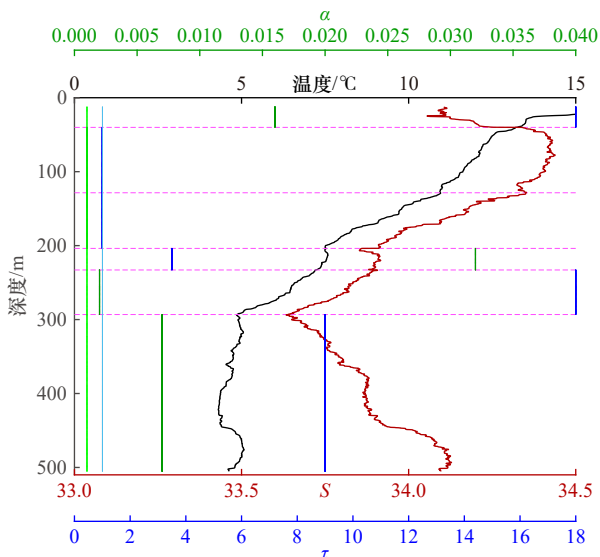


图9 311剖面热惯量校正参数、温度和盐度随深度变化

Fig. 9 The thermal inertia correction parameters, temperature and salinity versus depth for profile 311

其中黑线为温度曲线, 红线为盐度曲线, 绿色、蓝色分段实线为分层热滞后校正最佳系数对, 浅绿色、浅蓝色完整线为整层热滞后校正最佳系数对, 品红色虚线为分层界线

The black line is the temperature profile, the red line is the salinity profile, the green and blue segmented solid lines are the best coefficient pairs for the stratified thermal lag correction, the light green and light blue complete lines are the best coefficient pairs for the whole stratified thermal lag correction, and the magenta dashed line is the stratification boundary

惯量校正 29 组剖面处的强温跃层中平均改善效果为 3.43%, 超过剖面整体的改善效果 (2.1%)。其中 308、310~319 等剖面强跃层处对应的热惯量校正参数与整层热惯量校正参数相同, 因此平均绝对盐度差的改善效果为 0; 其余剖面在强跃层处热惯量校正效

果均有所改善, 302、306、327 和 333 剖面的热惯量校正改善效果最明显, 在 10%~27% 之间。

4.5 盐度剖面校正效果

图 10 展示了 3 个处理过程后 171 组上下行剖面的平均绝对盐度误差。可以发现, 经过校正后的上下行剖面平均绝对盐度差显著降低。结合表 2、表 5 和表 7, 经传感器响应时间校正后, 上下行剖面的 $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.031 降至 0.018 7, 降幅为 39.7%。经热惯量校正后, 上下行剖面的 $|\Delta S|$ 进一步降低, $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.018 7 进一步降至 0.016 1, 降幅为 13.9%。3 个处理过程, 盐度的差异在混合层内不明显, 主要集中在温跃层处。经传感器响应时间校正后, 上下行剖面的盐度差异显著减小, 在温跃层范围内最明显, 集中表现为盐度尖峰的基本消失, 温盐散点的分布从发散到集中。经热惯量校正后, 上下行剖面的盐度差异进一步减小, 一些微小的盐度尖峰被进一步剔除, 温盐值以及跃层强度在温跃层处有较为明显的改变。同时分层进行热惯量校正后得到的各层最佳系数对与整层校正后得到的最佳系数对有着明显的差异, 从侧面验证了分层热滞后校正的必要性及合理性。

综上, 3 个处理过程后上下行剖面的盐度差异显著降低, 在温跃层范围内得到了集中的体现, 一些微小的盐度尖峰都能得到有效的剔除, 温盐散点的分布由发散到集中, $|\overline{\Delta S}|$ 由 0.031 降至 0.016 1, 降幅达 48.1%。

5 结论

MVP 搭载无泵型 CTD 进行温盐测量, 一直以来对测量数据的传感器响应时间匹配和热惯量校正处理是其数据应用的重点和难点。本文针对现有热惯量校正方法在强温跃层处仍然存在盐度尖峰的局限

表 6 整层进行热惯量校正后上下行剖面平均绝对盐度差分布情况

Table 6 Distribution of mean absolute salinity difference between up and down row profiles after thermal inertia correction for the whole layer

平均绝对盐度差 $ \Delta S $	剖面号	数目
$ \Delta S > 0.031$	112、207、212、215、216、316、412、431、445、453、457~460、482	15
$0.031 \geq \Delta S > 0.018 7$	109~111、113、114、205、206、210、218、315、318、319、402~405、419、432~435、437、439~444、446~450、497、498	35
$0.018 7 \geq \Delta S > 0.016 1$	115、213、214、313、314、317、320、401、417、424、429、430、436、438、452、493	16
$0.016 1 \geq \Delta S > 0.01$	116、201~204、208、209、211、217、301、302、304、305、307、309、311、312、321、322、324~336、406~411、413~416、418、420~423、425~428、451、454~456、461~463、469~472、475、477、478、480、481、483、484、486、488~492、494~496	79
$0.01 \geq \Delta S $	101~108、219、303、306、308、310、323、333、337、338、464、465、467、473、474、476、479、485、487	26

表 7 分段进行热惯量校正后上下行剖面平均绝对盐度差分布情况

Table 7 Distribution of the mean absolute salinity difference between upstream and downstream profiles after segmented thermal inertia correction

平均绝对盐度差 $ \Delta S $	剖面号	数目
$ \Delta S > 0.031$	112、207、212、215、216、316、412、431、445、453、457~460、482	15
$0.031 \geq \Delta S > 0.0187$	109~111、113、114、205、218、315、318、319、402~405、419、432~435、437、439~444、446~450、497、498	33
$0.0187 \geq \Delta S > 0.0161$	115、206、210、213、214、313、317、320、401、417、429、430、436、438、452、493	16
$0.0161 \geq \Delta S > 0.01$	116、201~204、208、209、211、217、301、302、305、307、312、314、321、322、324~336、406~411、413~416、418、420~428、451、454~456、461~463、469~472、475、477、478、480、481、483、484、486、488~492、494~496	76
$0.01 \geq \Delta S $	101~108、219、303、304、306、308~311、323、333、337、338、464~468、473、474、476、479、485、487	31

表 8 A3 断面强温跃层处, 分层热惯量校正与整层热惯量校正的效果对比

Table 8 Comparison of the effect of stratified thermal inertia correction with that of whole layer thermal inertia correction at the strong thermocline of A3 section

剖面号	强跃层梯度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	深度范围/m	平均绝对盐度差		改善效果/%
			分层校正	整层校正	
301	0.184	12.34~40.73	0.046 2	0.046 3	0.22
302	0.180	12.29~38.74	0.056 1	0.075 9	26.09
303	0.165	12.26~43.93	0.038 7	0.039 1	1.02
304	0.193	12.34~41.16	0.033 4	0.034 4	2.91
306	0.161	12.35~40.11	0.034 7	0.038 9	10.80
307	0.154	12.37~45.95	0.043 8	0.044 2	0.90
308	0.160	12.28~47.33	0.038 8	0.04	0
309	0.177	12.29~39.93	0.046 6	0.047 2	1.27
310	0.181	12.31~45.6	0.013 8	0.013 8	0
311	0.174	12.3~38.32	0.035	0.035	0
316	0.119	16.69~135.47	0.137 6	0.137 6	0
317	0.216	14.4~42.86	0.052 8	0.052 8	0
319	0.267	12.25~49.72	0.266 6	0.266 6	0
321	0.338	12.31~51.84	0.066 2	0.066 6	0.60
322	0.145	12.28~79.83	0.031 6	0.031 6	0
324	0.343	12.33~43.32	0.050 6	0.051 2	1.17
325	0.209	12.28~65.22	0.054 6	0.057 1	4.38
326	0.312	12.34~46.34	0.035 6	0.035 6	0
327	0.269	12.36~54.67	0.061 6	0.079 8	22.81
328	0.273	12.3~62.24	0.022 9	0.022 9	0
329	0.104	12.4~75.53	0.060 8	0.060 9	0.16
330	0.185	12.3~56.41	0.033 9	0.033 9	0
332	0.367	12.28~34.29	0.039	0.039	0
333	0.134	12.26~58.3	0.033 8	0.044 3	23.70
334	0.195	12.26~72.08	0.029 1	0.029 1	0
336	0.175	12.28~74.06	0.044 3	0.044 3	0
337	0.135	12.27~85.13	0.030 6	0.030 6	0
338	0.140	12.33~81.51	0.025 7	0.025 7	0

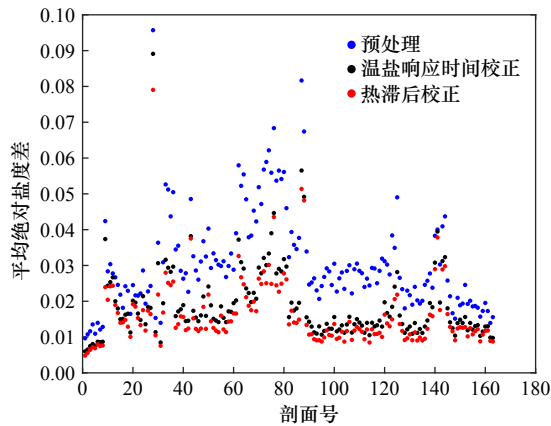


图 10 3步处理过程的平均绝对盐度差

Fig. 10 Mean absolute salinity difference for the three-step process

蓝点、黑点和红点分别为预处理过程、传感器响应时间校正和热惯量校正过程的平均绝对盐度差
The blue, black and red dots are the mean absolute salinity difference for the preprocessing process, sensor response time correction, and thermal inertia correction processes, respectively

性,结合泵式CTD、UCTD和滑翔机的盐度处理方法,以西太平洋某航次测得的171组MVP数据剖面为试验对象,提出一种基于测量剖面温度垂直梯度廓

线分析的分层热惯量校正参数寻优方法,校正温度和电导率,进而校正盐度剖面,同时总结出一套较为完备MVP盐度校正流程。结果表明:

(1)本文推荐的MVP盐度数据处理流程主要分为3个步骤:数据预处理(包括异常值检测、消除逆压、噪声平滑等)、基于下降速率的传感器响应时间最优校正以及利用基于测量剖面温度垂直梯度廓线分析的分层热惯量校正参数寻优方法进行热惯量校正。

(2)该方法显著降低了MVP测量的上下行剖面的盐度差异,盐度尖峰基本被剔除,特别是温跃层处得到明显改善,上下行剖面的平均绝对盐度差从0.031降至0.0161,降幅达48.1%,验证了本文提出的MVP盐度剖面校正方法的合理性。

展望与不足:本文在分层校正的过程中发现,跃层处的最佳系数对与混合层和缓变层有着明显的差异,同时整层校正与分层校正得到的最佳系数对也存在较大差异。下一步计划采取相似流程处理大量水下快速移动平台(MVP、滑翔机等)测得的温盐剖面,探寻跃层处最佳热惯量系数对与跃层强度的关系、变化范围以及变化特征。

参考文献:

- [1] Fofonoff N P, Hayes S P, Millard R C. W. H. O. I. /Brown CTD microprofiler: methods of calibration and data handling[R]. Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution, 1974: 1-64.
- [2] SCOR Working Group 51. The Acquisition, Calibration, and Analysis of CTD Data[M]. Paris: UNESCO Technical Papers in Marine Science, 1988: 94.
- [3] Giles A B, McDougall T J. Two methods for the reduction of salinity spiking of CTDs[J]. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1986, 33(9): 1253-1274.
- [4] 任强, 于非, 刁新源, 等. 处理走航式海洋多参数剖面测量系统(MVP)温度和电导率滞后效应的方法[J]. *海洋科学*, 2014, 38(8): 59-66.
Ren Qiang, Yu Fei, Diao Xinyuan, et al. A data processing method on the hysteresis effect of temperature and conductivity of moving vessel profiler (MVP)[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(8): 59-66.
- [5] Ullman D S, Hebert D. Processing of underway CTD data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(4): 984-998.
- [6] Barth J A, O'Malley R, Fleischbein J, et al. SeaSoar and CTD observations during the Coastal Jet Separation cruise W9408A, August to September 1994[R]. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University, 1996: 170.
- [7] Lueck R G. Thermal inertia of conductivity cells: theory[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7(5): 741-755.
- [8] Lueck R G, Picklo J J. Thermal inertia of conductivity cells: observations with a sea-bird cell[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7(5): 756-768.
- [9] Morison J, Andersen R, Larson N, et al. The correction for thermal-lag effects in sea-bird CTD data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(4): 1151-1164.
- [10] Mensah V, Le Menn M, Morel Y. Thermal mass correction for the evaluation of salinity[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(3): 665-672.
- [11] Garau B, Ruiz S, Zhang W G, et al. Thermal lag correction on Slocum CTD glider data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28(9): 1065-1071.
- [12] Liu Zenghong, Xu Jianping, Yu Jiancheng. Real-time quality control of data from Sea-Wing underwater glider installed with Glider Payload CTD sensor[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(3): 130-140.
- [13] U. S. Integrated Ocean Observing System. Manual for quality control of temperature and salinity data observations from gliders Version 1.0[EB/OL]. (2011-12-01) [2018-08-16]. https://cdn.ioos.noaa.gov/media/2017/12/Manual-for-QC-of-Glider-Data_05_09_16.pdf.

- [14] Liu Yonggang, Weisberg R H, Lembke C. Chapter 17-Glider salinity correction for Unpumped CTD sensors across a sharp thermocline[M]/Liu Yonggang, Kerkering H, Weisberg R H. Coastal Ocean Observing Systems. Amsterdam: Academic Press, 2015: 305–325.
- [15] 张学宏, 张绪东, 李颜. 海洋温跃层特征值的分析与计算 [J]. 海洋预报, 2011, 28(5): 69–76.
Zhang Xuehong, Zhang Xudong, Li Yan. Characteristic analysis and calculation of the ocean thermocline[J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(5): 69–76.

Test of salinity profile correction method for MVP system based on temperature gradient profile analysis

Li Hongchen¹, Chen Xi², Mao Kefeng², Wang Penghao¹, Li Ming²

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410003, China; 2. Second Interdisciplinary Center, College of Frontier Interdisciplinary Sciences, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The Moving Vessel Profiler (MVP) has the advantage of acquiring temperature and salinity profiles with high spatial resolution. However, since a pumpless CTD is used for the temperature and salinity measurements, adjusting the response time of the sensor and correcting for thermal inertia are important issues in processing the measured data and complicate the application of the data. Since the existing thermal inertia correction methods still have salinity peaks at the strong thermocline, in this work we propose a layered method to optimize the thermal inertia correction parameters based on the analysis of the measured temperature gradient profile to correct the temperature and conductivity, and thus the salinity profile. The results show that the method significantly reduces the salinity difference between the upward and downward measured profiles of the MVP and essentially eliminates the salinity peaks, especially in the thermocline. The average absolute salinity difference between the upward and downward measured profiles is reduced from 0.031 to 0.016 1, which corresponds to a 48.1% reduction in salinity error and confirms the appropriateness of the salinity profile correction method proposed in this work for the MVP.

Key words: MVP; salinity correction; thermal inertia effect; temperature gradient profile analysis