

光谱干涉式海水密度传感器的动态性能

白小雪¹, 王 鑫¹, 张牧子¹, 王梦真¹, 苏 娟¹, 吴 铮^{1,2*}

(1. 山东大学 海洋研究院, 山东 青岛 266237;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘 要: 光学传感器在海水密度测量中具有抗电磁干扰和高灵敏度等优势, 光学折射率法能够直接测量海水密度, 并对非离子溶质的影响更为敏感, 从而提高测量的准确性。然而, 在动态海洋环境中, 传感器的测量稳定性可能受到流体流动的影响, 因此提高传感器的抗流动干扰能力是确保其测量精度的关键问题。为此, 提出了一种抗流设计, 并通过实验验证了其有效性。首先, 在实验室水池环境中, 研究了传感器在不同流速条件下的测量标准差和波动范围, 以评估其抗流动能力。随后, 在海洋观测现场开展剖面实验, 将传感器测量的密度数据与温-盐-深传感器计算的密度进行对比, 分析其在动态环境中的测量一致性。实验结果表明, 在不同流速条件下, 传感器的测量标准差保持在 $1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 以内, 展现出良好的抗流动干扰能力。在现场剖面实验中, 光学传感器与温-盐-深传感器测量的密度之间的差异低至 $4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, 进一步验证了抗流设计在动态环境中的适用性。本研究为光学海水密度传感器的抗流动优化提供了实验依据, 并为实际海洋观测中的动态密度测量提供了技术参考。

关键词: 光学传感; 海水密度; 剖面测试; 抗流设计

中图分类号: P716.42 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250106

引用格式: BAI Xiaoxue, WANG Xin, ZHANG Muzi, et al. Dynamic performance of seawater density sensor based on spectral interference principle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(5): 20250106.

白小雪, 王鑫, 张牧子, 等. 光谱干涉式海水密度传感器的动态性能[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(5): 20250106.

0 引 言

海水密度是影响海洋动力过程的重要物理参数, 广泛应用于海洋环流、物质输运、内部波、混合过程及气候变化的研究中^[1]。由于海水密度的微小变化可能对海洋动力过程产生深远影响, 因此, 精确测量密度对于解析海洋环境变化至关重要^[2-3]。

传统的海水密度测量主要依赖于电导率-温度-深度 (Conductivity-Temperature-Depth, CTD) 传感器。通过测量电导率、温度和压力, 并利用海水热力学方程 (Thermodynamic Equation of Seawater-2010, TEOS-10) 来计算密度^[4]。然而, CTD 传感器的密度计算依赖于电导率的测量, 而电导率对离子成分敏感, 但对溶解的非离子组分 (如硅酸盐和溶解有机物) 则不敏

感, 这可能影响密度的精确计算^[5-7]。相比之下, 基于光学原理的密度传感器通过直接测量折射率来获取密度信息, 具有高精度、抗电磁干扰、高灵敏度、无电极腐蚀、响应速度快以及适用于不同水体环境等优点^[8-9], 并能对非离子溶质的影响做出响应^[10], 从而提高测量的准确性。

在动态海洋环境中, 海水流动可能对密度测量产生干扰。流体流动会导致传感器探测区域内液体交换速率的变化, 从而影响测量的稳定性^[11-12]。为了降低流速变化的影响并提高测量的稳定性, CTD 传感器通常通过水泵主动引导水流。然而, 水泵的使用不仅增加了系统的能耗, 还可能引入机械振动, 从而影响测量的精度。此外, 水泵系统的复杂性也增加了长期部署时的维护成本^[13]。

收稿日期: 2025-02-17; 修订日期: 2025-03-18

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 项目 (GML2021GD0808)

作者简介: 白小雪, 女, 博士生, 主要从事海洋光学传感器的研究及应用方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 吴铮, 男, 教授, 博士, 主要从事海洋传感器的研究及其在海洋物联网、海洋牧场中的应用方面的研究。

针对上述问题,文中提出了一种抗流设计,以提高光学传感器在动态环境中测量海水密度的稳定性。该设计通过优化探测区域的流体交换模式,在无需额外水泵的情况下,减少流速变化对测量结果的影响,避免了机械振动,同时提高了液体更换速率。为了验证该设计的有效性,文中分别在实验室水池环境和海洋现场观测中开展了实验。在实验室水池中,研究了不同流速条件下传感器测量密度的标准差和波动范围,以评估其抗流动能力。在海洋剖面实验中,将该传感器的测量结果与CTD传感器计算的密度进行对比,以分析其在实际海洋环境中的测量一致性。实验结果表明,该抗流设计能够有效提高光学密度传感器的测量稳定性,为光学海水密度测量技术的应用提供了技术支持。

1 系统设计

1.1 传感原理

基于光谱干涉原理的海水密度传感器的工作原理是将一束入射光分成两束,分别照射到两面反射镜上,然后再反射回来重新合并。由于这两束光的频率相同、振动方向一致且相位差恒定,因此它们能够发生干涉现象。这种干涉现象可用于测量光程差的变化,从而在各种光学传感应用中发挥重要作用。在环

境监测领域,该干涉仪可用于测量介质的折射率。由于传感臂的相位随光程长度的变化而变化,进而与参考臂之间产生相位差,从而形成谐振信号,并可观察到干涉条纹。通过利用光谱分析仪精确测量谐振峰/谷的位移,可以检测微小的折射率变化。鉴于海水的折射率与密度之间存在直接关系,通过测量折射率可以推算出海水的密度^[14-15]。

如图1(a)所示,实验系统采用波长范围为 (1325 ± 25) nm的宽带光源(最大输出功率为40 mW),其出射光经过环形器进入3 dB光纤耦合器,分束为传感臂和参考臂。两束光经过单模光纤传输至准直器组后形成平行光束(光束直径0.4 mm),分别入射至传感光路和参考光路,入射光用红色箭头表示。在这两个光路中,被测物质与参考介质分别被限定在由蓝宝石光学窗口构成的测量腔体内。该蓝宝石窗口的通光孔径为 $\Phi 9$ mm(占窗口直径的90%),厚度为16 mm。测量腔体采用TC4钛合金封装,经COMSOL流体静压仿真验证,可在125 MPa工作压力下保持结构稳定性。

如图1(b)和(c)所示,待测海水和参考介质分别被限制在传感臂与参考臂的测量腔体内,两腔体的光学路径长度严格匹配为10 mm。反射镜(1300~1400 nm波段的反射率>99.8%)将光束折返后,在耦合器处产生干涉,干涉信号通过环形器传输至高速光

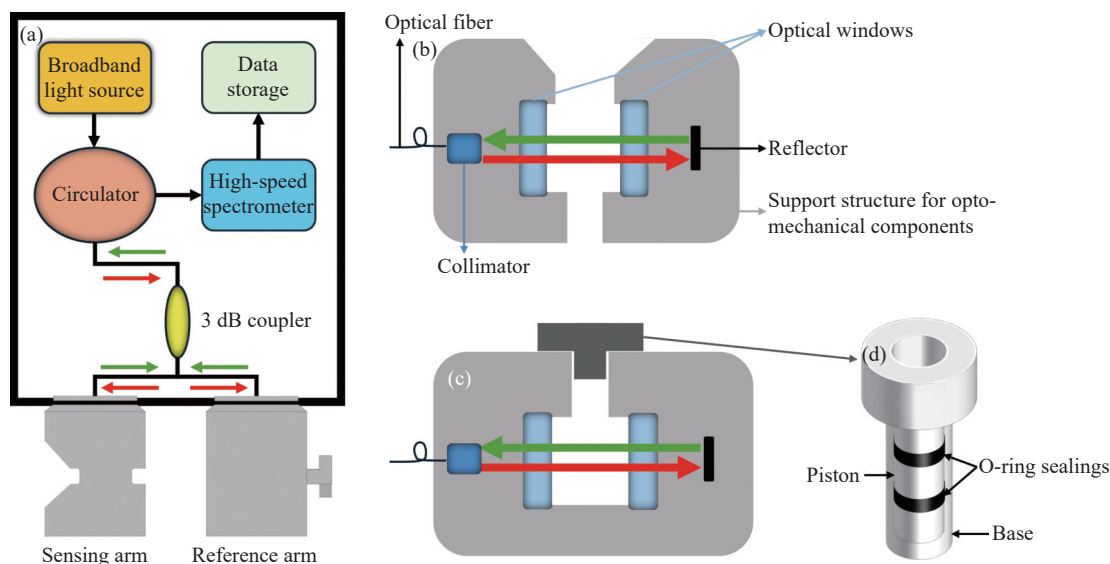


图1 (a) 光谱干涉式海水密度传感系统; (b) 传感臂示意图; (c) 参考臂示意图; (d) 压力传递器

Fig.1 (a) Spectral interferometric seawater density sensing system; (b) Schematic diagram of sensing arm; (c) Schematic diagram of reference arm; (d) Pressure transmitter

谱仪 (采样率为 3 kHz), 反射光用绿色箭头表示。整个光学系统通过六轴精密调整架实现共光路校准, 实验数据由计算机实时采集。

干涉信号的强度 I 可由传感臂和参考臂的相位差 $\Delta\theta$ 表示为:

$$I = I_S + I_R + 2\sqrt{I_S \cdot I_R} \cdot \cos(\Delta\theta) \quad (1)$$

式中: I_S 和 I_R 分别代表传感臂和参考臂的反射光强度。当两臂的光程差 $\Delta\varphi$ 恒定时, 干涉信号的强度随波长 λ 呈周期性变化, 关系如下:

$$\Delta\theta = 4\pi \cdot \Delta\varphi / \lambda \quad (2)$$

当外界环境变化导致传感臂的光程发生改变时, 相位差 $\Delta\theta$ 可由两臂的光程差 $\Delta\varphi$ 计算得到, 此时 $\Delta\varphi$ 可表示为:

$$\Delta\varphi = n_S \cdot L_S - n_R \cdot L_R \quad (3)$$

式中: n_S 和 L_S 分别代表传感臂中被测介质的折射率与光学窗口间距; n_R 和 L_R 分别代表参考臂中参考介质的折射率与光学窗口间距。在研究中, 被测介质为海水, 参考介质为标准海水。两臂的光学窗口间距相同, $L_S = L_R = 10 \text{ mm}$, 因此两臂的光程差仅由两种介质的折射率差决定。通过分析干涉信号中谐振峰对应的波长变化, 可以反向求解海水的折射率和密度^[16]。

在干涉光谱中, 光强的最大值称为谐振峰, 其位置受到相位差 $\Delta\theta$ 变化的影响, 即谐振峰会随着光程差 $\Delta\varphi$ 的变化而发生偏移。基于这一特性, 可以通过监测谐振峰的波长变化 $\Delta\lambda$ 来检测海水的折射率和密度变化。此外, 海水密度 ρ 受到海洋中温度 T 和压强 P 的共同影响。在本传感器中, 这一关系可以用多项式表示为:

$$\rho = c_0 + c_1 \cdot \lambda + c_2 \cdot P + c_3 \cdot T \quad (4)$$

式中: c_0 、 c_3 为多项式系数。

1.2 探头设计

在海洋中, 由于高压条件的影响, 传感臂中光学窗口的间距可能发生变化, 这将导致光程差的改变, 进而干扰折射率的测量准确性。此外, 长期处于高压环境下, 探头的老化以及光学窗口的蠕变也会对测量精度产生负面影响。为了解决这些问题, 将参考臂与压力传递器相连, 使参考臂与传感臂能够同步感知海

水压力的变化。其工作原理示意图如图 1(d) 所示。该压力传递器由基座、活塞和两个环形密封圈构成。基座通过螺丝固定于探头上, 内部为空心结构, 允许活塞在垂直方向上自由移动, 同时防止其滑出。当外部压力超过探头内部压力时, 活塞向内位移, 从而压缩参考臂内的标准海水; 相反, 当外部压力低于探头内部压力时, 活塞向外推动, 使标准海水相对于其初始状态膨胀。活塞上安装的两个环形密封圈确保了外部环境 with 内部标准海水之间的有效隔离。由于参考臂与传感臂均处于同一海水温度场中, 因此能够实时补偿海洋的压力和温度变化对传感臂中光路物理长度 (即光学窗口间距) 的影响, 从而使干涉仪输出的干涉光谱仅与被测海水和标准海水的折射率 (密度) 有关, 有效消除了温度和压力对传感器输出信号的影响, 确保测量结果的准确性和长期可靠性。

在海洋动态测试中, 传感器常常面临液体交换率不足的问题。为了提高原位测量的实时性, 部分传感器采用水泵来加速液体更换。然而水泵的使用会引发诸多潜在问题, 例如增加系统能耗、引入机械振动干扰测量结果, 以及提高系统的复杂性和维护成本。为了解决这一问题, 在探头结构设计中采用了一种无水泵的抗流设计方案。图 2 中, 设计了 V 型槽和与之相对的直线槽, 以促进测量臂内海水的高效流动, 实现液体的快速更换。此外, 该结构还能够利用环境压力自动排出较小的固体杂质, 从而有效防止光路污

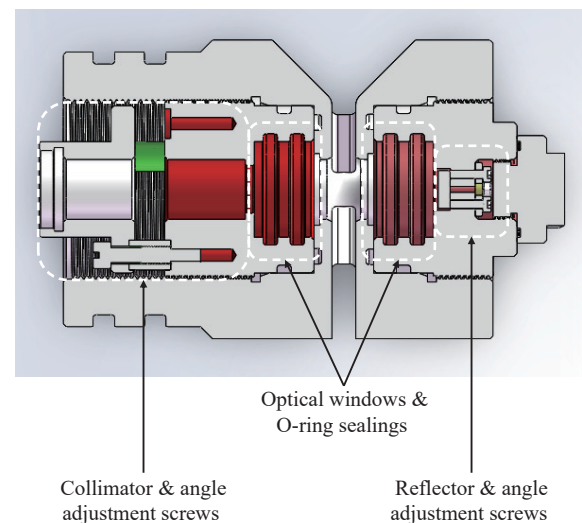


图 2 传感臂的抗流设计

Fig.2 Anti-current design in sensing arm

染。该设计不仅避免了水泵带来的不利影响,还提高了传感器在动态环境下的实时测量能力和稳定性。

2 实验验证

2.1 水池实验

当传感器在海洋中穿越不同水层时,流速的变化可能引发局部湍流,进而改变传感器周围水体的状态,从而影响其测量精度。为了评估传感器在不同流速条件下的动态性能,在实验室水池的拖曳测试平台上进行了实验。实验装置的示意图如图 3(a) 所示,其中驱动器以不同速度 v 沿滑轨拖动光学传感器,以模拟不同的流速,其运动方向由图中粗箭头标示。光学传感器被浸没在水池中,水流经过探头的路径和方向如图 3 (b) 所示。

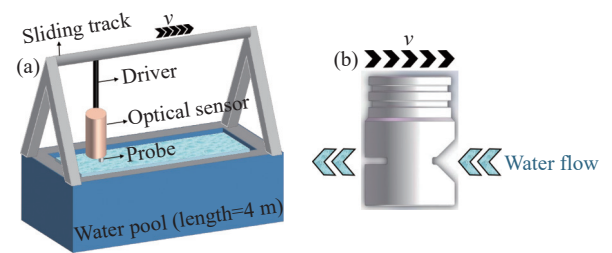


图 3 传感臂的抗流设计
Fig.3 Anti-current design in sensing arm

实验在室温条件下进行,光学传感器的采样率设定为 3 kHz。实验过程中唯一的变量为移动速度 v 。图 4 展示了在 10 mm/s~2 m/s 范围内的测量结果。

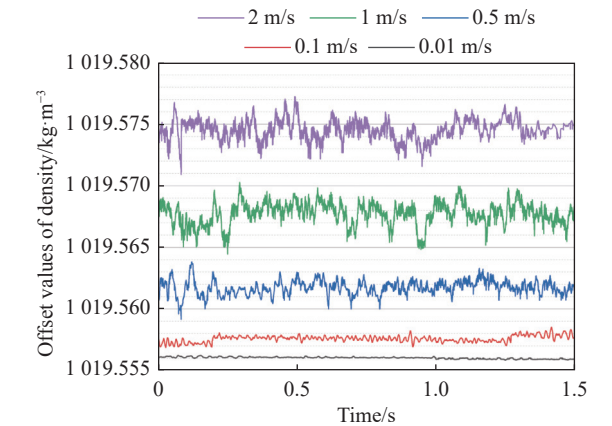


图 4 不同流速条件下光学传感器的密度测量结果
Fig.4 Measurement results of the optical sensor under different current velocities

表 1 列出了不同流速条件下的测量结果的波动范围及标准差。实验结果表明,当流速低于 1 m/s 时,传感器表现稳定,尽管密度测量结果存在一定波动,但标准差始终保持在 $1\times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 量级,且条纹对比度均大于 0.8,表明传感器在高流速条件下依然能够保持较高的测量精度。这一结果充分验证了探头的抗流设计对流速变化具有较强的适应能力。

表 1 不同流速条件光学传感器的密度测量结果分析
Tab.1 Analysis of measurement results of the optical sensor under different current velocity conditions

Velocity/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Variation range (=Max – Min, kg/m^3)	Standard deviation/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Interference fringe contrast
0.01	0.4×10^{-3}	0.8×10^{-4}	0.92
0.1	2×10^{-3}	3×10^{-4}	0.97
0.5	5×10^{-3}	6×10^{-4}	0.99
1	6×10^{-3}	9×10^{-4}	0.83
2	6×10^{-3}	8×10^{-4}	0.95

当流速增大至 2 m/s 时,测量结果的标准差有所减小,这可能与水池的长度限制有关。在 $v=2 \text{ m/s}$ 的测试中,测量时间较短,采样点数量较少,导致难以对该条件下的统计特性进行全面分析。

2.2 海洋剖面实验

在海洋剖面测试中,验证了光学传感器在不同深度下的密度响应,并将其与 CTD 传感器 (Sea-Bird Scientific, SBE 37) 测得的密度值进行了比较。在测试过程中,CTD 传感器与光学传感器被紧密安装在同一仪器架上,以确保它们处于相同的水团中。剖面测试的最大深度约为 3600 m 深度,设备通过船载缆绳缓慢下放至指定位置。在此过程中,设备持续运行,实时测量海水得密度、温度、盐度等参数。

测试结果如图 5 所示,图中从左至右依次展示了光学传感器的波长测量 (图 5(a)),以及 CTD 传感器的盐度 (图 5(b))、温度 (图 5(c)) 和密度 (图 5(d)) 测量结果。其中,图 5 (b) 和 (d) 的数据基于 TEOS-10 海水状态方程,由 CTD 传感器测得的海水电导率、温度 (图 5(c)) 和实时压力计算得出。

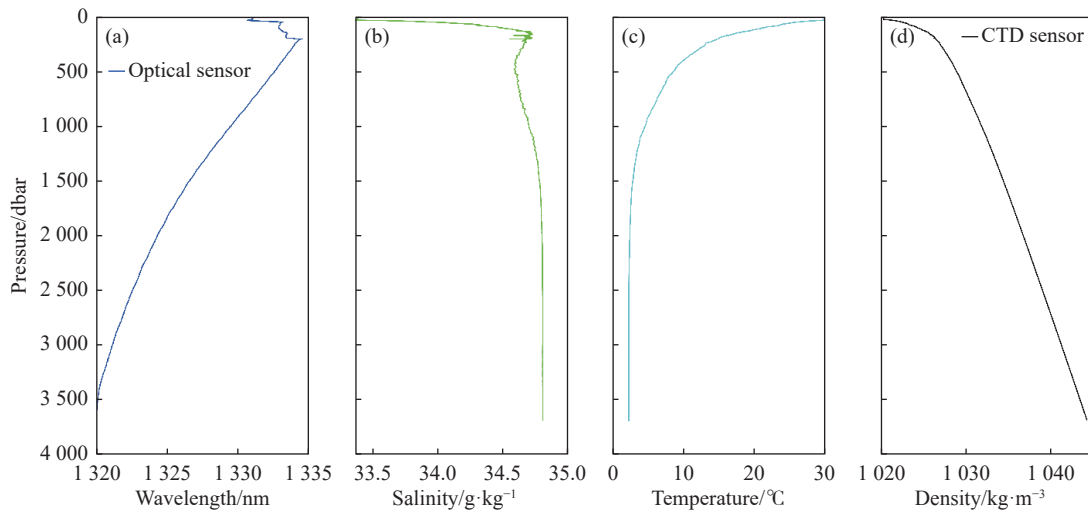


图5 剖面实验测量结果

Fig.5 Measurement results of profile testing

从海表到 1500 m 深度得水域,海水密度变化显著,主要受温度和盐度变化的影响。光学传感器的波长曲线 (图 5(a)) 存在明显波动,表明其具有较高的灵敏度,能够有效捕捉盐度得变化。同时,CTD 传感器测得的盐度曲线 (图 5(b)) 在某些深度范围内出现尖峰,这主要是由于温度和盐度测量不同步所致,并对密度曲线 (图 5(d)) 产生了一定影响。在 1500 m 以下,温度和盐度趋于稳定,密度随深度增加而增加,光学传感器的波长连续变化趋势与密度变化保持一致,表明其能够准确反映海水的密度变化。

在剖面测试过程中,浅海密度跃层的存在导致海水温度和盐度发生剧烈变化,形成层流与湍流共存的复杂环境,这对具有开放式测量腔的传感器产生了显著影响。该研究提出的光学传感器采用了抗流优化设计,使海水在开放测量腔内单向流动,从而确保测量过程中海水折射率的空间均匀性,并提升传感器的动态响应能力。

图 6 展示了光学传感器的测量数据,并与 CTD 传感器的密度测量结果进行了比较。两者随深度变化的趋势高度一致,密度差异范围为 $\pm 4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$,平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 为 $2.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 。这一结果验证了光学传感器在动态海洋环境中的适应性,并表明其具备高精度和广泛测量范围的应用能力。

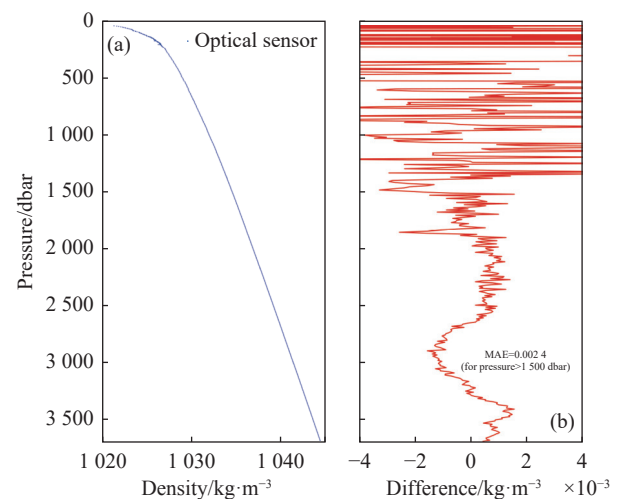


图6 剖面实验中光学传感器与 CTD 传感器的密度测量差异

Fig.6 Difference in density between optical sensors and CTD sensors in profile testing

3 结 论

文中研究通过实验验证了基于光谱干涉原理的海水密度传感器的动态性能。在水池实验中,传感器在流速低于 1 m/s 的条件下表现出良好的稳定性,标准差保持在 $1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 以内,验证了其抗流设计的有效性。在海洋剖面实验中,光学传感器的测量结果与 CTD 传感器具有较好的一致性,密度测量误差范围为 $\pm 4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$,进一步验证了传感器在动态环境中的可靠性。这项研究表明,该光学传感器能够在复

杂的动态环境中提供高精度、实时的海水密度测量, 为未来海洋观测系统的发展提供了新的技术支持。

参考文献:

- [1] KONIKOW L F, AKHAVAN M, LANGEVIN C D, et al. Seawater circulation in sediments driven by interactions between seabed topography and fluid density [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(3): 1386-1399.
- [2] OKA E, KAWABE M. Characteristics of variations of water properties and density structure around the Kuroshio in the East China Sea [J]. *Journal of Oceanography*, 1998, 54(6): 605-617.
- [3] GARCÍA-ABDESLEM J. On the seawater density in gravity calculations [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 183: 104200.
- [4] McDougall T J, Barker P M. The Gibbs Seawater (GSW) oceanographic toolbox of TEOS-10[EB/OL]. (2011-05-26) [2024-10-16]. https://teos-10.org/pubs/gsw/html/gsw_front_page.html.
- [5] MILLERO F J, FEISTEL R, WRIGHT D G, et al. The composition of standard seawater and the definition of the reference-composition salinity scale [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, 55(1): 50-72.
- [6] MCDUGALL T J, JACKETT D R, MILLERO F J, et al. A global algorithm for estimating Absolute Salinity [J]. *Ocean Science*, 2012, 8(6): 1123-1134.
- [7] BUDÉUS G T H. Potential bias in TEOS10 density of sea water samples [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2018, 134: 41-47.
- [8] LE MENN M, GIULIANO A P A, LAGO S, et al. The absolute salinity of seawater and its measurands [J]. *Metrologia*, 2019, 56(1): 015005.
- [9] LE MENN M, NAIR R. Review of acoustical and optical techniques to measure absolute salinity of seawater [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1031824.
- [10] SU J, XIAO Y, CHEN S, et al. Comparison of salinity measurement based on optical refractometer and electric conductivity: A case study of urea in seawater [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(2): 2172-2179.
- [11] MUNDAY D R, MEREDITH M P. On the dynamics of flow past a cylinder: Implications for CTD package motions and measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(7): 5708-5728.
- [12] LIU D, YANG T, WANG Y, et al. Pankun: A new generation of broadband ocean bottom seismograph [J]. *Sensors*, 2023, 23(11): 4995.
- [13] ALVAREZ A, STONER R, MAGUER A. Performance of pumped and un-pumped CTDs in an underwater glider[C]//2013 OCEANS - San Diego, 2013: 1-5.
- [14] LORENTZ H A. Ueber die beziehung zwischen der fortpflanzungsgeschwindigkeit des liches und der Körperdichte [J]. *Annalen der Physik*, 1880, 245(4): 641-665.
- [15] MILLARD R C, SEAVER G. An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density, and wavelength [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1990, 37(12): 1909-1926.
- [16] BAI X, WANG X, ZHANG M, et al. High-resolution seawater density sensor based on michelson interferometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(24): 40400-40408.

Dynamic performance of seawater density sensor based on spectral interference principle

BAI Xiaoxue¹, WANG Xin¹, ZHANG Muzi¹, WANG Mengzhen¹, SU Juan¹, WU Qi^{1,2*}

(1. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangdong 511458, China)

Abstract:

Objective Seawater density, as a critical parameter governing oceanic dynamic processes, demands precise measurement for advancing marine environmental studies. While optical sensors offer inherent advantages in density measurement through refractive index detection—including electromagnetic immunity, high sensitivity, and provide response to non-ionic solutes—their measurement stability in dynamic marine environments remains compromised by fluid flow interference. This study addresses this challenge by proposing a novel anti-flow structural design to improve measurement consistency under hydrodynamic disturbances. Traditional conductivity-temperature-depth (CTD) sensors, though widely utilized, suffer from inherent limitations. Their indirect density calculation via TEOS-10 equations exhibits reduced sensitivity to non-ionic components and necessitates energy-intensive pumping systems that introduce mechanical vibrations. Our objective focuses on developing a flow-immune optical sensor that eliminates auxiliary pumps, minimizes turbulence-induced errors, and validates its performance through systematic laboratory and field experiments. By optimizing fluid exchange patterns within the sensing cavity, this design aims to achieve high-precision density measurements under varying flow conditions, thereby enhancing the reliability of optical sensing technology in practical oceanographic applications.

Methods This study developed a seawater density sensing system based on spectral interferometry. The sensing probe features two parallel sapphire optical windows spaced 10 mm apart, allowing seawater to flow freely through the measurement cavity. A pump-free anti-current design was implemented through hydrodynamic-optimized channel geometry: V-shaped inlet channels with a 45° inclination angle paired with linear drainage grooves (Fig.2) enhance unidirectional flow efficiency. Variations in refractive index were detected via wavelength shifts of interference extrema using a high-resolution spectrometer.

Results and Discussions In the seawater flow velocity simulation device, the measurement environment was simulated with seawater flow velocity ranging from 0.01 m/s to 2 m/s. Under these conditions, the interference fringe contrast recorded by the optical density sensor remained above 0.8, and the fluctuation in density measurements was consistently within the order of 10^{-3} kg/m³. Subsequently, a profiling test conducted at a maximum depth of approximately 3600 meters to evaluate, the consistency between the measurements of optical density sensor and the CTD sensor. The density difference between the two sensors remained within $\pm 4 \times 10^{-3}$ kg/m³, confirming the effectiveness of the anti-flow design in complex oceanic environments.

Conclusions This study successfully demonstrates the effectiveness of an anti-flow optimized optical sensor for measuring seawater density in dynamic environments. Laboratory tests conducted under controlled flow conditions (≤ 2 m/s) confirmed exceptional stability, with standard deviations in density measurement maintained below 1×10^{-3} kg/m³. Field profiling experiments revealed strong consistency between optical and CTD sensor

measurements, with a mean absolute density error of $2.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. The anti-current design eliminates the need for pumping systems while improving fluid exchange efficiency, effectively suppressing turbulence-induced signal fluctuations through hydrodynamically optimized channel geometry. These findings establish the sensor's capability for high-resolution density monitoring in complex marine environments, offering a potential supplement to CTD sensors, and advancing real-time monitoring of fine-scale oceanic processes.

Key words: optical sensor; seawater density; profiling test; anti-current design

Funding projects: Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2021GD0808)