

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108714

波浪驱动式海洋高频次精细化观测剖面仪的设计^{*}

杨 杰^{1,2}, 王 焱¹, 金萍萍^{1,2}, 马纯永^{1,2}, 陈 戈^{1,2}
(1. 中国海洋大学海洋技术学院 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋
动力学与数值模拟功能实验室/“观澜号”海洋科学卫星工程部 青岛 266237)

摘 要:波浪驱动式海洋剖面观测平台具有自主升降、快速剖面、高时空分辨、长期连续的综合优势,对当前海洋中小尺度动力过程、浮游植物生理昼夜变化、生物地球化学循环等快变过程研究具有重要意义。自主设计并研制了一种完全由波浪驱动的海洋剖面仪样机系统,于 2021 年 8 月 8 日~8 月 31 日在青岛胶州湾海域以锚泊方式连续开展了 23 天海试,获取总剖面数 2 367 个,平均每天 102 个,剖面平均周期 8.19 min。结果进一步表明,在 1 级左右的低海况下,系统工作受潮流影响较大;而在 2 级以上的较高海况下,基本可以实现全天时连续工作,证明了自研波浪驱动式剖面仪样机具有良好的工作灵敏性、状态稳定性和机械耐受性,且设计成本只有国外同类产品价格的 20% 左右,为实现新型剖面观测平台的国产化目标迈出了关键一步。
关键词:波浪驱动;剖面仪;精细化观测;国产化
中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

Design of wave powered profiler for high-frequency and fine ocean observation

Yang Jie^{1,2}, Wang Yan¹, Jin Pingping^{1,2}, Ma Chunyong^{1,2}, Chen Ge^{1,2}
(1. College of marine technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Regional
Oceanography and Numerical Modeling/Engineering Department of Guanlan Satellite for Ocean Science,
Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: The wave-driven ocean profile observation platform has the comprehensive advantages of independent lifting, fast profile, high temporal-spatial resolution and long-term continuity. It is of great significance to the study for the fast changing processes of small-submesoscale dynamic process, phytoplankton physiological diurnal change and biogeochemical cycle in the ocean. In this article, a wave powered profiler prototype is independently designed and developed. The test is implemented in Jiaozhou Bay, Qingdao for 23 days from August 8 to August 31, 2021. A total number of 2 367 profiles are obtained, which are probably 102 profiles per day with an average profile cycle of 8.19 minutes. The results further show that the system is greatly affected by tidal current under the calm sea state at about level 1. However, in the relatively high sea condition above level 2, the prototype could nearly work continuously throughout the day. The sea test has preliminarily proved that the prototype of the developed wave powered profiler has a good working sensitivity, state stability and mechanical endurance. The cost is only about 20% of the price of similar foreign products. The success of the prototype is a key step to achieve the goal of localization of the new profile platform.
Keywords: wave powered; profiler; fine observation; localization

0 引 言

海洋科学是一门基于观测的数据密集型学科,对海洋剖面的多参数同步、高时空分辨和长时间连续观测是海洋学家的不懈追求^[1]。潜标是较早应用于海洋剖面观

测的平台系统,但需要沿缆敷设多层传感器,布放、回收复杂,综合成本昂贵^[2]。此外,还相继发展了只携带同一类传感器、通过平台升降即可实现全剖面连续观测的多类测量系统,包括以电机驱动为主的系缆式(如海床基绞车、McLane Moored Profiler, MMP 等)和以浮力驱动为主的非系缆式(如 Argo、Glider 等)^[3-4]。然而,这些测量系

统的自主升降本质上都依赖于电能驱动,并至少消耗所携带电能的 60%~70%^[5]。像 Argo 和 Glider,为了提高使用寿命,往往需要非常严格的浮力计算和低功耗设计,且搭载重量也较为有限,全生命周期总剖面数一般不超过 300~500 个^[6-7]。为此,能否利用海洋中无处不在的波浪能,设计一种不消耗任何电能就能完成自主升降的剖面测量系统(携带电池仅用于传感器工作),进而实现海洋剖面参数的高频次、精细化和长时间连续观测,将对未来海洋学的深入发展具有巨大推动作用。

国外于 20 世纪末便开展了波浪驱动式剖面仪的相关技术探索。1997 年,加拿大贝德福德海洋研究所率先研制出了“Seahorse”波浪驱动式剖面仪样机^[8]。该系统利用波浪能,在特殊设计的棘爪机构作用下,辅以控制棘爪开合的低功耗电机,实现升降平台的剖面循环运动。尽管由于棘爪结构自身的固有原因,在长期工作稳定性方面未能取得进一步突破,但 Seahorse 的成功问世,无疑加快了波浪驱动式剖面仪的技术创新与科学应用进程。1999 年,美国斯克瑞普斯海洋研究所以不同于 Seahorse 棘爪机构的啮合机构——凸轮机构原理,研制了一款名为“Wirewalker”的波浪驱动式剖面仪样机,采用双侧、多凸轮、对称式、全机械化结构设计,剖面运动完全依靠波浪能,不消耗任何电能,首次海试便成功获取 218 组 60 m 剖面数据,验证了以凸轮机构实现可靠啮合的技术可行性^[9-10]。在美国海军办公室和美国国家自然科学基金委持续资助下,经过近 20 年的海试试验、技术研发和不断创新,Wirewalker 凭借多传感器同步搭载(水文、生化、光学、声学等)、连续快速剖面(工作深度可达 500~1 000 m,每天约 100 个剖面@100 m)、高时空分辨(~cm 级,~min 级)、长期在位(~1 年)、锚泊和漂流两种部署模式等综合观测优势,对海洋中快速变化的中小尺度动力过程、浮游植物生理变化特征、浮游生物薄层等现象观测显示出非常大的应用潜力^[11-12]。发展至今,Wirewalker 已在南加州、罗德岛、北太平洋、印度洋和南中国海等海域累计完成了超过 50 万次的剖面测量,单次部署连续工作时间可达 1 年,单次剖面数达几万级以上,其机械结构的长期耐受性和稳定性经历了严酷考验,取得了巨大成功^[13-14]。2016 年,Wirewalker 产品正式进入商业化市场,由德尔玛海洋公司生产销售,青岛亚必锐海洋仪器设备有限公司负责中国区的产品代理,市场价格约为 ¥60~80 万元。

为学习、引进国外先进海洋观测技术,国内在“十五、十一五”国家 863 计划支持下,先后启动了电机驱动^[15]、波浪驱动^[16]和浮力驱动^[17]的剖面观测技术攻关,填补了国内空白。其中,2005 年,中国科学院海洋研究所以 Seahorse 为原型,较早开展了波浪驱动式剖面平台技术研究,采用特殊的棘爪结构+电机控制棘爪离合的组合设计,首次完成了波浪驱动式剖面测量系统的原理样机研

制,初步开展了青岛和三亚近海试验,获取上百组剖面数据^[18]。但是,如上所述,由于 Seahorse 棘爪机构技术的固有原因,最终未能走向实际应用。

为此,为实现波浪驱动式海洋剖面仪的国产化,本团队基于 Wirewalker 的凸轮机构啮合原理,于 2016 年开展了海洋波浪驱动式剖面仪的技术探索,经过几年的技术攻关,在关键系统结构设计、运动学和动力学分析等方面取得了突破,自主设计并成功研制了完全由波浪驱动的、可实现连续快速剖面与精细化观测的剖面仪样机系统。

1 原理方法

1.1 工作原理

波浪驱动式剖面仪,可形象地比喻为波浪驱动下的“猴爬杆”,是一种完全利用海洋波浪实现剖面平台自主升降的新型观测系统。其系统结构如图 1 所示,主要包括:海表浮球、系统、升降平台和张紧锤。系统缆上下端分别连接海表浮球和张紧锤,在波浪的驱动下,升降平台“骑着”系统缆上下往复运动,张紧锤使系统缆处于拉直状态。海表浮球除了提供系统浮力外,在波浪的驱动下还提供升降平台运动的动力。

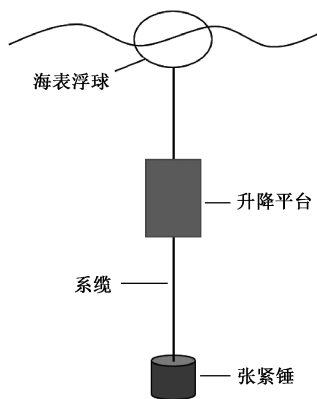


图 1 波浪驱动式剖面仪的系统组成

Fig. 1 The system composition of the wave-powered profiler

波浪之所以能够驱动升降平台往复运动,关键在于升降平台内部具有单向阀功能的啮合机构。具体工作原理为:

1) 升降平台向下运动:此状态下,由于内部的啮合机构与系统缆处于单向耦合状态(即系统缆相对升降平台只能向上运动),升降平台(净浮力>0)在正浮力作用下因具有向上运动趋势而处于单向锁紧状态。因此,当波浪袭来时,海表浮球的瞬间快速上浮,将带动系统缆和张紧锤一起向上运动(升降平台由于惯性仍停在原处不动);随后,当海表浮球回落时,张紧锤在重力作用下将带动系

缆、升降平台整体向下运动(此时,升降平台与系缆处于锁紧状态)。故而,在每一次波浪作用下,升降平台会骑着系缆向下进动一次,直至到达下预设深度。

2)升降平台向上运动时:当升降平台到达下预设深度时,在下阻尼块碰撞或电机控制下,啮合机构与系缆完全解耦,此时恢复“自由状态”的升降平台将在自身正浮力作用下匀速上浮,在此过程中传感器开始按设定的采样频率工作。当升降平台到达上预设深度时,上阻尼块碰撞或电机控制啮合机构,再次将其切换至与系缆的单向耦合状态,并开始下一个周期的剖面运动,如此循环往复。

1.2 动力学与运动学分析

1) 动力学分析

(1)吃水深度计算:静止海况下,系统处于平衡状态,在升降平台净浮力与上/下阻尼块水中重力相对忽略不计的情况下(二者可基本相互抵消),海表浮球所受浮力 $F_{球浮}$ 等于海表浮球重力 $G_{球空}$ 、包塑钢缆水中净重 $G_{缆水}$ 和张紧锤水中净重 $G_{锤水}$ 之和,即:

$$F_{球浮} = G_{球空} + G_{缆水} + G_{锤水} \quad (1)$$

计算得到海表浮球的吃水深度 h_0 为:

$$h_0 = \frac{4(G_{球空} + G_{缆水} + G_{锤水})}{\rho_{海水} g \pi d^2} \quad (2)$$

其中, $\rho_{海水}$ 为海水密度; g 为重力加速度; d 为海表浮球直径。

(2)工作阈值条件:当海浪袭来时,只有当海表浮球、包塑钢缆、张紧锤这一整体的初始加速度 $a_{整}$ 大于升降平台的初始加速度 a_0 时,升降平台才开始向下步进工作,故工作条件应满足:

$$\frac{\rho_{海水} g \left(\frac{1}{4} \pi d^2 h \right)}{m_{球} + m_{缆} + m_{锤}} \geq \frac{F_{净}}{m_{平台}} \quad (3)$$

即,

$$h \geq \frac{F_{净}(m_{球} + m_{缆} + m_{锤})}{m_{平台} \rho_{海水} g \left(\frac{1}{4} \pi d^2 \right)} \quad (4)$$

其中, h 为浪高; $m_{球}$ 、 $m_{缆}$ 、 $m_{锤}$ 、 $m_{平台}$ 分别为海表浮球、系缆、张紧锤和升降平台的质量; $F_{净}$ 为升降平台在水中的净浮力。

2) 运动学分析

(1)下降过程:在浪高满足阈值条件后,升降平台向下步进的速度取决于海况和系统本身,浪高决定步幅,浪频决定步频。由式(4)进一步可知,在相同海况下,升降平台下降速度与浮球直径、浮球高度(当浪高大于浮球高度时)、升降平台质量等参数正相关,与升降平台净浮力、浮球质量、系缆质量、张紧锤质量等参数负相关。此外,升降平台的下降速度还与其外形有关。当对平台外形不做特殊设计时,垂向阻力较大,升降平台在回落过程中的

速度较慢,完全“复位”花费的时间更长,如在高频波的海况下,很可能导致系统未完全复位即开始了下一个过程的工作,从而影响平台的下降步幅,降低整体下降速度。不仅如此,较大的垂向阻力还会减缓升降平台上升阶段的“收尾速度”。同时,流线型设计还将增加升降平台在水下工作的稳定性。因此,将升降平台设计为具有较低垂向阻力的流线型,将十分有利于系统的高效工作。

(2)上升过程:升降平台在上升过程中与系缆完全解耦,将在自身净浮力作用下自由上浮,很快满足净浮力 $F_{净}$ 等于流体阻力 $f_{阻}$ 的平衡条件,并以收尾速度 ϑ_0 匀速上浮。即:

$$F_{净} = \frac{1}{2} c \rho_{海水} S \vartheta_0^2 \quad (5)$$

得到:

$$\vartheta_0 = \left(\frac{2F_{净}}{c \rho_{海水} S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中, c 为海水粘滞系数; S 为升降平台迎流面积;由式(6)可知,收尾速度主要与升降平台的净浮力和迎流面积大小有关。

2 系统设计

2.1 系统组成

自主设计的波浪驱动式剖面仪样机系统主要由海表浮球、升降平台、张紧锤、包塑钢缆和上/下阻尼块组成。系统结构及升降平台如图 2 所示,系统参数如表 1 所示。

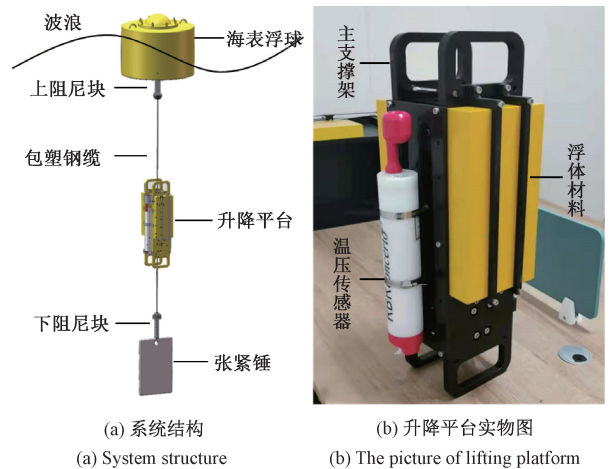


图 2 自研波浪驱动式剖面仪

Fig. 2 Self-developed wave-powered profiler

根据 1.2 节理论分析,通过样机参数理论计算的海表浮球吃水深度为 0.18 m,工作阈值条件(浪高)为 8.89×10^{-3} m,收尾速度为 0.47 m/s。

表 1 波浪驱动式剖面仪样机参数

Table 1 The parameters of wave-powered profiler prototype

系统构成	尺寸/mm	备注
海表浮球	$\varphi=600;h=360$	空气中重:32 kg
升降平台	长宽高:240×160×650	空气中重:13 kg 水中重:-0.6 kg
张紧锤	长宽厚:420×300×20	空气中重:20 kg
包塑钢缆	$\varphi=8$	空气中重:0.25 kg/m
上下阻尼块	$\varphi=60$	POM 材料

2.2 核心机构

1) 啮合机构:是升降平台与系缆(本设计为包塑钢缆)耦合的核心机构,采用双侧对称式六凸轮结构,凸轮凹槽尺寸与系缆直径吻合,在上下移动时可较好地实现开合控制,如图 3(a)所示。

2) 切换机构:是升降平台在下降过程中与系缆耦合、上升过程中与系缆解耦的重要辅助单元,要求结构轻巧灵敏。本设计采用杠杆结构,通过上/下阻尼块(限位剖面范围)的碰撞,实现啮合机构在系缆上端“耦合”与下端“解耦”两个功能间的灵活切换。

3) 引导机构:是保证系缆顺利导入啮合机构不可或缺的重要组成部分。引导机构分别安装在升降平台的上下两端,系缆从中间穿过,即使在海流影响下的倾斜状态也能保证系缆与凸轮凹槽的良好啮合。本设计引导机构采用十字交叉式四滚轮结构,可大大降低系缆磨损,提升系统使用寿命,如图 3(b)所示。

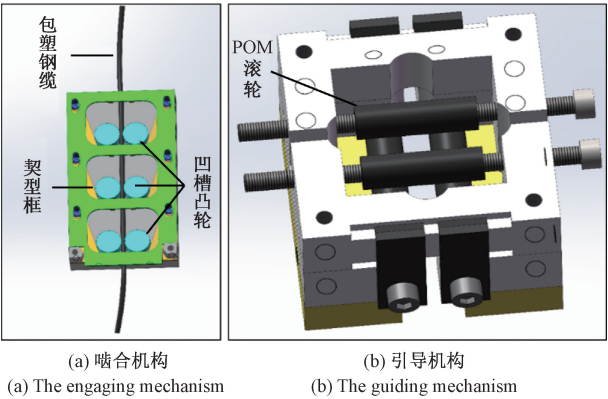


图 3 核心机构
Fig. 3 The diagrams of key mechanism

4) 传动机构:是将海洋波浪能转化为升降平台自主升降的辅助机构,包括海表浮球、包塑钢缆、张紧锤。其中海表浮球提供波浪动力,张紧锤除了使系缆绷直外,也是海表浮球回落时带动升降平台向下移动的动力源。在一定海况条件下,波浪能的传递效率取决于 3 者间的合

理配置。

5) 支撑机构:是系统实现安装、搭载与集成的重要单元,可安装浮体材料、搭载耐压密封舱、集成传感器等,并根据需要进行扩展,一般采用模块化设计。

6) 浮力调节机构:是升降平台在波浪驱动下实现向下进动和自由上浮的重要部分。该机构不仅要保证升降平台具有正浮力特性,且要各方向受力平衡,以尽量减小传导机构与系缆间的摩擦。

7) 其他:海表浮球除提供浮力和波浪动力外,也是 GPS 定位、卫星通信、航标灯等模块的安装平台;系统整体设计要求低阻力、可扩展、易安装。

3 海试结果

3.1 近海试验

1) 海试准备:为完成连续多天测试,本次海试采用锚泊工作模式,布放前需完成升降平台的浮力及平衡调节、剖面工作深度(系缆长度)设置、锚泊系统准备、传感器搭载调试等工作。其中,升降平台搭载有 RBRduo3 T.D 温深传感器,设置采样频率 1 Hz,以实现剖面温度和压力的自容式连续测量。同时在海表浮球上安装 GPS、AIS 避碰网位仪、太阳能夜间爆闪灯等,以监视、保护剖面仪系统。

2) 海试实施:试验海域选择青岛胶州湾(120.270°E, 36.075°N,如图 4(a)所示),该海域是一个以潮汐运动为主导的半封闭型浅湾,仅通过一条宽 3 km 的狭窄水道与黄海相通,除冷空气、寒潮及台风影响外,常年多为 1 级和 2 级海况,以波高较小的高频波为主,尤其在 7、8、9 月份,若无台风登陆,整个胶州湾是非常平稳的^[19]。同时,由于靠近近岸,潮流较大,大潮期间的潮流可达 1.2 m/s 以上^[20],强大的潮流将使锚泊模式下的系统系缆不可避免地发生倾斜。因此,胶州湾典型的浪小流大环境,将对系统的工作灵敏性提出挑战,这也是此次海试试验的主要目的之一。部署剖面工作深度为 24 m,布放时间为 2021 年 8 月 8 日 07:00,回收时间为 8 月 31 日 09:00,共计 23 天。布放、工作、回收如图 4 所示。

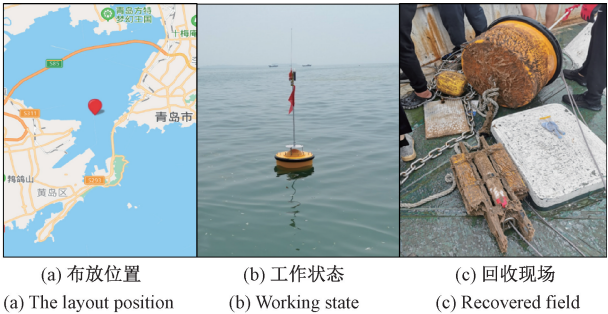


图 4 近海试验
Fig. 4 Offshore test

3.2 海试结果

本次海试成功获取了连续 23 天的剖面数据,深度-时间剖面图如图 5 所示,每日剖面统计如表 2 所示。

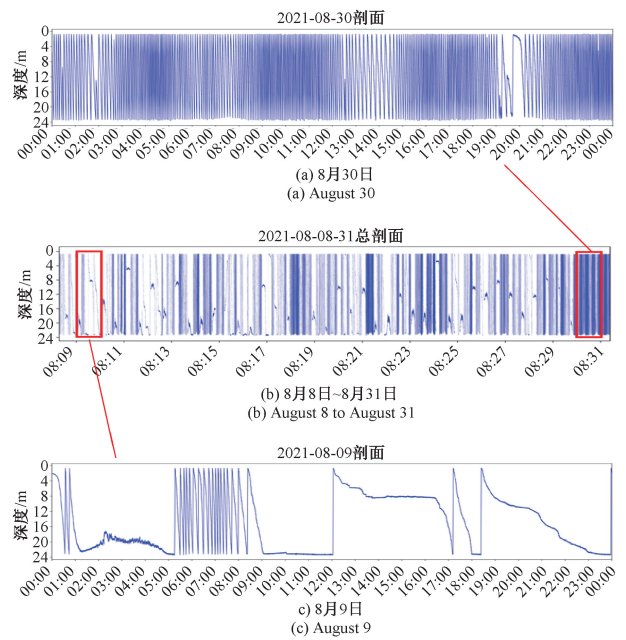


图 5 剖面深度-时间图

Fig. 5 The depth-time diagrams of profiles

由表 2 可知,本次海试累计获取总剖面数 2 367 个(如图 5 (b) 所示),平均每天 102 个,剖面平均周期 8. 19 min;在海试的完整自然天内,一天获取的最少剖面数为 23 个(8 月 9 日,图 5 (c) 所示),最多剖面数为 287 个(8 月 30 日,图 5 (a) 所示),每天的剖面平均周期范围为 4. 11~22. 13 min。

3.3 结果分析

1) 剖面特征分析

由每日剖面深度-时间特征可知,系统的工作状况除了与系统自身配置有关外,还与浪高、海流等环境因素有关,具体如下:

(1) 在 1 级左右的低海况下,潮流对锚泊模式下的样机工作影响较大。对每天的剖面深度-时间图进行分析发现,多天都存在 2~6 h 的“工作停滞期”,升降平台在该时段内下降较为缓慢,甚至在某一深度反复振荡而停滞不前。结合当天的潮汐时刻表,这些“停滞时段”主要发生在涨落潮时的潮流峰值期间。可能由于潮流较大时,系缆发生了较大倾斜,而低海况下的较小浪高使系缆在垂向上的分加速度和分位移较小,以至于升降平台下降缓慢甚至无法正常工作。比如剖面数最少的 8 月 9 日(农历七月初二,大潮),单次最长停滞时间达 6 h,当天累计停滞 15. 8 h(图 5 (c) 所示);进一步统计可知,在

表 2 每天剖面特征统计

Table 2 The feature statistics of daily profile

日期	剖面数	平均周期/min	停滞时间/h	日期	剖面数	平均周期/min	停滞时间/h
8 月 8 日	21	22. 13	8. 6	8 月 20 日	48	14. 40	8. 5
8 月 9 日	23	11. 00	15. 8	8 月 21 日	153	5. 54	7. 5
8 月 10 日	60	12. 12	6. 5	8 月 22 日	79	8. 96	7. 5
8 月 11 日	68	8. 23	12. 0	8 月 23 日	174	5. 73	6. 5
8 月 12 日	25	15. 20	12. 5	8 月 24 日	123	5. 98	9. 0
8 月 13 日	80	10. 20	9. 5	8 月 25 日	84	10. 48	7. 5
8 月 14 日	134	6. 96	7. 0	8 月 26 日	91	9. 36	8. 5
8 月 15 日	66	12. 31	7. 0	8 月 27 日	74	11. 79	7. 0
8 月 16 日	47	13. 50	12. 5	8 月 28 日	111	8. 20	8. 5
8 月 17 日	52	13. 59	9. 0	8 月 29 日	158	7. 51	3. 0
8 月 18 日	183	6. 90	2. 5	8 月 30 日	287	5. 01	0
8 月 19 日	91	12. 78	4. 0	8 月 31 日	135	4. 11	0

布放的总计 554 h 内,累计“停滞工作”时长约为 180 h,占比 32. 6%。考虑到大、中、小潮的潮流依次降低,由此推断其对系统的影响程度应该会逐渐减弱,获取的剖面数应依次增加。基于此,统计了大、中、小潮期间的平均日剖面数,结果分别为 80、95、124 个,与推断结果一致。上述结果表明,在浪小流大的胶州湾海域,近岸潮流会对

锚泊模式下样机的正常工作产生一定影响。

(2) 在高海况下(2 级以上),锚泊模式下的样机受潮流影响较小,基本可以实现全天时连续工作。由表 2 统计可知,每天剖面数的最小值与最大值可相差一个数量级。经查证 2021 年 8 月份历史天气,在每天剖面数超过 100 个的 8 月 14 日、18 日、21 日、23~24 日、28~31 日,全

都是多云或雨天天气,风力在3~4级以上,浪高普遍在0.3 m以上;特别在8月28~31日期间,受台风“巴威”及“副高边缘切变线”影响,青岛连续几天出现中到大雨、暴雨,风力4~5级,局部7~8级,浪高平均在0.5 m以上。仅在8月30日,系统获取剖面数为287个。在8月31日的9 h内完成的剖面数已达到135个(因样机于8月31日上午9:00回收),若按照24小时估计,预计31日获取的剖面数有望突破350个。上述结果表明,在2级以上的持续高海况下,即使受近岸潮流影响,锚泊模式下的剖面仪样机仍然可以做到全天时连续工作。

2) 收尾速度计算

通过对升降平台上浮过程的收尾速度进行计算,得到实际收尾速度为0.44 m/s,略小于理论计算的0.47 m/s。实际结果偏小的原因可能与锚泊模式下的系缆倾斜有关。由于升降平台在上浮过程中与倾斜状态的系缆不可避免地产生摩擦,从而减缓了上升速度,且潮流越大,系缆倾斜程度越大,收尾速度相对越小。因此,如果系统在漂流模式下工作,升降平台的实际收尾速度可能会更加接近于理论设计值。

3) 机械磨损评估

波浪驱动式剖面仪的寿命在很大程度上依赖于机械性能的稳定性和耐受性。由于升降平台在完成每一次剖面循环过程中,啮合机构与系缆之间可能要经历几十次甚至几百次的反复锁紧与释放,而波浪驱动式剖面仪部署一次要连续完成几万次剖面,这对平台的机械耐受性是一个巨大考验。为此,评估机械结构磨损也是本次试验的主要目的之一。经过对系统各零部件进行仔细查验,发现除了1个D型卸扣连接处有1处严重损伤外(可能是由于同1个D型卸扣同时连接了八字环和鸡心环,二者碰撞所致),包括系缆包塑面、啮合机构凸轮凹槽、阻尼块表面、杠杆架等都无明显磨损或损伤。本次试验证明,自研波浪驱动式剖面仪样机的机械结构一方面经受了初步考验,另一方面也需要未来进一步开展更长时间、恶劣海况、复杂环境下的测试与评估。

4 结 论

以国外Wirewalker的核心啮合机构原理为基础,自主设计并研制了一种完全由波浪驱动的海洋高频次精细化观测剖面仪样机,于2021年8月8日~8月31日在青岛胶州湾海域连续开展23天的海试试验,布放深度24 m。主要结论如下:

1) 获取总剖面数2 367个,平均每天102个,剖面平均周期8.19 min;每天最少剖面数23个,最多剖面数287个,最快剖面周期约为4 min。

2) 锚泊模式下样机工作状态受浪高和潮流因素的共

同影响。在1级左右的低海况下,样机工作受潮流影响较大,每天剖面深度-时间图呈现出与潮流峰值时段一致的“工作停滞期”。由于胶州湾典型的浪小流大特征,布放期间样机工作停滞时间比例近33%;而在2级以上的高海况下,样机工作受潮流影响较小,基本可以做到全天时连续工作。由此推断,若部署在受潮流影响较小、且海况相对较“恶劣”的外海海域(漂流模式效果更佳),自研波浪驱动式剖面仪样机有望实现全天时、全天候工作。

3) 本次海试初步证明了自研波浪驱动式剖面仪样机的技术可行性、工作灵敏性、状态稳定性和机械耐受性,且设计成本只有国外同类产品价格的20%,为实现海洋新型剖面平台的国产化进程奠定了重要技术基础。

致谢

感谢青岛海洋科学与技术试点国家实验室唐军武研究员在本仪器研发过程中给予的专业指导和建议。

参考文献

- [1] 陈戈,杨杰,张本涛,等. 新一代海洋科学卫星的思考与展望[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(10): 110-117.
CHEN G, YANG J, ZHANG B T, et al. Thoughts and prospects on the new generation of marine science satellites[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(10): 110-117.
- [2] 刘长华,王春晓,贾思洋,等. 锚泊式海洋剖面观测浮标系统[J]. 海洋科学, 2014, 38(8): 99-102.
LIU CH H, WANG CH X, JIA S Y, et al. The system of mooring marine profiling observation buoy[J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 99-102.
- [3] 王波,李民,刘世萱,等. 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.
WANG B, LI M, LIU SH X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2401-2414.
- [4] 刘长华,王春晓,王旭,等. 锚定式海洋水体剖面观测技术的研究与应用[J]. 海洋科学, 2019, 43(12): 139-147.
LIU CH H, WANG CH X, WANG X, et al. Research and application of anchor-type profile observation technology of marine water[J]. Marine Sciences, 2019, 43(12): 139-147.
- [5] OSSE T J, MEINIG C, STALIN S, et al. The PRAWLER, a vertical profiler powered by wave energy[C]. OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington. IEEE, 2015: 1-8.
- [6] RUDNICK D L. Ocean research enabled by underwater

- gliders[J]. Annual Review of Marine Science, 2016, 8: 519-541.
- [7] RISER S C, FREELAND H J, ROEMMICH D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 145-153.
- [8] FOWLER G A, HAMILTON J M, BEANLANDS B D, et al. A wave powered profiler for long term monitoring[C]. Oceans' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings. IEEE, 1997, 1: 225-228.
- [9] RAINVILLE L, PINKEL R. Wirewalker: An autonomous wave-powered vertical profiler [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(6): 1048-1051.
- [10] PINKEL R, GOLDIN M A, SMITH J A, et al. The WireWalker: A vertically profiling instrument carrier powered by ocean waves[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011, 28(3): 426-435.
- [11] OMAND M M, CETINIC I, LUCASA J. Using bio-optics to reveal phytoplankton physiology from a WireWalker autonomous platform[J]. Oceanography, 2017, 30(2): 128-131.
- [12] CUMBEE S C. WireWalker experiences with two navy-funded systems utilizing iridium communications [C]. OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE, IEEE, 2019: 1-5.
- [13] LUCAS A J, PINKEL R, ALFORD M. Ocean wave energy for long endurance, broad bandwidth ocean monitoring[J]. Oceanography, 2017, 30(2): 126-127.
- [14] 陈鹿, 潘彬彬, 曹正良, 等. 自动剖面浮标研究现状及展望[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(2): 1-9.
- CHEN L, PAN B B, CAO ZH L, et al. Research status and prospects of automatic profiling floats[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(2): 1-9.
- [15] 商红梅. 系缆式水下自动升降平台[J]. 海洋技术, 2005, 24(1): 19-20.
- SHANG H M. The moored automatic rising-sinking platform[J]. Ocean Technology, 2005, 24(1): 19-20.
- [16] 陈永华, 李思忍, 龚德俊, 等. 波浪驱动式海洋要素垂直剖面持续测量搭载系统[J]. 海洋工程, 2008, 26(3): 89-93.
- CHEN Y H, LI S R, GONG D J, et al. A wave-driven vertical profiler for sustained observations of ocean elements[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(3): 89-93.
- [17] 杜亮. 深海垂直剖面实时监测系统的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2014, 37(1): 107-109.
- DU L. Design and implementation on the real-time measurement system for deep-sea vertical section [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(1): 107-109.
- [18] 刘素花, 龚德俊, 徐永平, 等. 海洋剖面要素测量系统波浪驱动自治的实现方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 603-609.
- LIU S H, GONG D J, XU Y P, et al. Method to realize wave-powered autonomous system for marine profiling measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 603-609.
- [19] 常德馥. 胶州湾波浪状况分析[J]. 海岸工程, 1991, 10(4): 13-20.
- CHANG D F. Analysis of wave conditions in Jiaozhou bay[J]. Coastal Engineering, 1991, 10(4): 13-20.
- [20] 高飞, 李广雪, 乔璐璐. 山东半岛近海潮汐及潮汐、潮流能的数值评估[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(12): 91-96.
- GAO F, LI G X, QIAO L L. Resource assessment of the tidal energy around the shandong Peninsula [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(12): 91-96.

作者简介



杨杰, 2007 年于中国海洋大学获得学士学位, 2016 年于中国海洋大学获得硕士学位, 现为中国海洋大学实验师, 主要研究方向为海洋现场观测技术。

E-mail: yangjie2016@ouc.edu.cn

Yang Jie received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Ocean University of China in 2007 and 2016, respectively. He is currently an experimentalist in the Institute of Marine Technology at Ocean University of China. His main research interest is marine field observation technology.



陈戈(通信作者), 1988 年于中国海洋大学获得学士学位, 1990 年于中国海洋大学获得硕士学位, 1993 年于中国海洋大学获得博士学位, 现为中国海洋大学海洋技术学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星海洋遥感与大数据海洋学。

E-mail: gechen@ouc.edu.cn

Chen Ge (Corresponding author) received his B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from Ocean University of China in 1988, 1990, and 1993, respectively. He is currently a professor in the Institute of Marine Technology at Ocean University of China. He is a professor and a Ph.D. advisor at Ocean University of China. His main research interests include satellite ocean remote sensing and big data oceanography.