

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2024.02.004

基于水下绞车的实时传输潜标研制及海上试验

蔺本浩¹, 汪东平², 董彦凯¹, 任 翀^{1,3}

(1. 崂山实验室, 山东 青岛 266237; 2. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
3. 天津大学机械工程学院, 天津 300350)

摘要: 针对“透明海洋”工程对水下实时、长期、连续观测的迫切需求, 开展基于水下绞车的实时传输潜标研制。该型潜标采用水下绞车牵引卫星通信浮标的方式, 将潜标上搭载的测量仪器观测数据通过铠装通信缆传输到卫星通信浮标, 当卫星通信浮标浮出水面时, 再通过卫星通信传输至数据接收处理装置, 完成数据传输后, 水下绞车牵引卫星通信浮标至海面以下 50 m, 从而实现潜标系统的实时传输功能。本文详细介绍了基于水下绞车的实时传输潜标系统设计及关键组部件设计, 并通过海上试验验证了该型潜标海上应用的可行性。

关键词: 潜标; 实时传输; 水下绞车; 卫星通信浮标

中图分类号: P715.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2024) 02-0027-09

潜标系统是海洋调查的重要技术装备之一, 它能够在恶劣的海洋环境条件下, 无人值守、长期、连续、自动地对海洋环境情况进行全面综合监测^[1]。相比于其他海洋观测装备, 潜标在应用海域范围及观测数据质量上具有更强的优势, 需求更大^[2]。当前, 世界各海洋国家布放的潜标基本还是以自容式为主, 布放水深从几十米到数千米不等^[2]。随着我国海洋强国战略的实施, 在海洋科学研究、经济建设及国防安全等领域对实时海洋环境感知能力提出了迫切需求^[3], 因此, 实时传输潜标得到了长足发展。实时传输潜标是集多学科的海洋调查测量高新技术装备, 既可进行稳定、长期连续、定点观测, 又可及时将观测数据传输至数据接收处理装置, 具有隐蔽性强、数据实时性高等优点。2000年, 美国伍兹霍尔海洋研究所开始研制实时传输潜标, 通过感应耦合技术将测量数据传输到水面浮标, 然后通过卫星发射到岸站或由水下声通讯中转下载^[4]。中国船舶集团有限公司第七一〇研究所等在“十五”863课题支持下,

率先开展潜标数据实时传输的研发, 研发了可连续弹射海面通讯浮标的潜标观测系统^[5]。2015年, 中国科学院海洋研究所在西太平洋海域规模化地应用自研浮子式实时/准实时潜标观测系统^[6]。“十三五”期间, 中国海洋大学研制的深水定时卫星通信潜标系统在西太平洋定点海域完成了系列试验和布放^[7]。

虽然近年来国内相关单位针对实时传输潜标开展了深入研究, 但其普遍采用水面浮标或定时释放主浮体上的通信浮标的结构形式来进行数据传输, 仍旧存在一定问题。采用水面浮标进行数据传输, 水面浮标长期暴露于海面, 隐蔽性差, 并且容易被过往船只和拖网破坏, 影响设备安全; 采用定时释放通信浮标的方式进行数据传输, 存在数据传输只能按照设定时序回收, 观测数据的时效性差, 无法根据实际海洋环境调整传感器观测频率。针对以上存在的问题, 本文提出了一种基于水下绞车的实时传输潜标, 介绍了其系统设计和关键组部件设计, 并通过海上试验验证了该种形式潜标海上应用可行性。

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室“问海计划”项目 (SQ2017WHZZB0501)

作者简介: 蔺本浩 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋观测装备研制。E-mail: linbenhao007@163.com

通讯作者: 任翀 (1978—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事海洋观测装备研制。E-mail: renchong710@163.com

1 系统设计

1.1 系统工作原理

基于水下绞车的实时传输潜标利用水下绞车带动卫星通信浮标进行定点剖面运动,从而实现数据

的实时传输功能。卫星通信浮标长期潜伏于水下指定深度,当需要进行数据传输时,水下绞车排缆,卫星通信浮标在自身正浮力作用下浮出海面,通过卫星通讯将数据回传至岸站数据接收处理装置。完成数据传输后,水下绞车收缆将浮标悬停在指定水深。系统工作原理如图1所示。

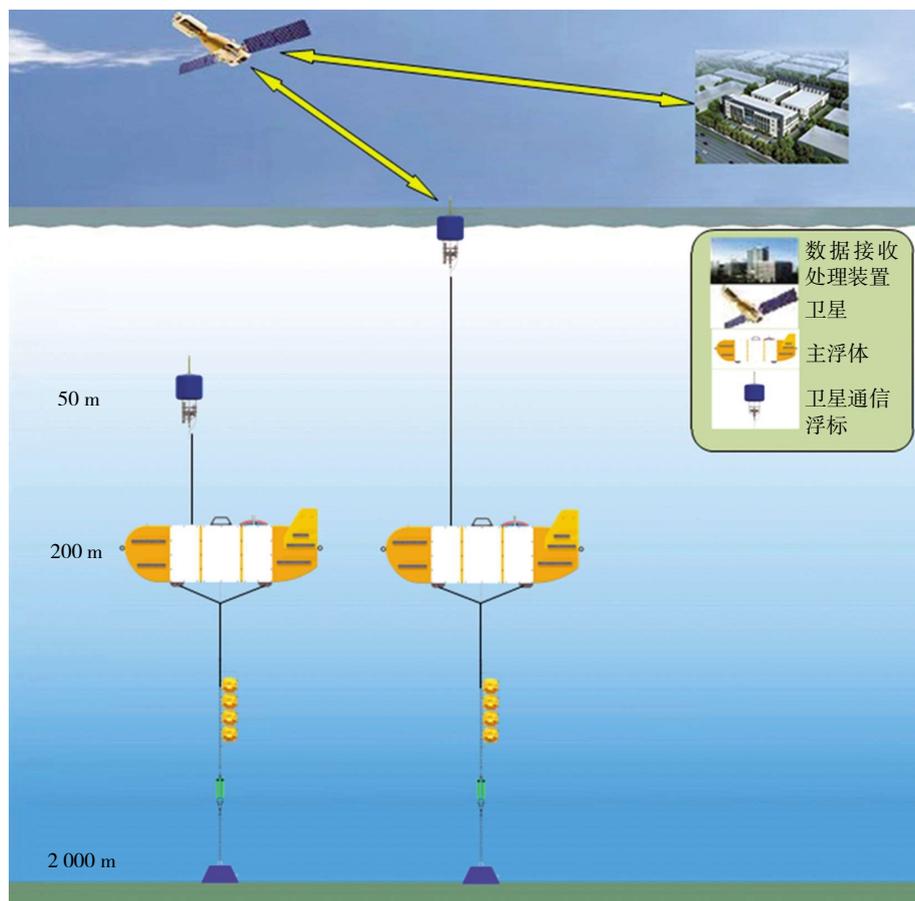


图1 系统工作原理

1.2 系统组成及功能

基于水下绞车的实时传输潜标主要由卫星通信浮标、主浮体、辅助排缆装置、水下绞车、锚泊系留装置、甲板设备等组成(图2)。

卫星通信浮标为水下数据传输中继平台,长期潜伏于水深50 m位置处。主浮体综合控制模块采集的传感器观测数据通过铠装通信缆传输至卫星通信浮标,浮标出水后通过卫星通信将数据传到数据接收处理装置,并反馈通信浮标所处位置等信息,同时也可通过卫星向主浮体传输控制指令。

主浮体位于水深200 m位置处,包含固体浮力材料和结构框架。其上留有动力电池舱、控制舱、辅助排缆装置、声学多普勒流速剖面仪(Acoustic

Doppler Current Profiler, ADCP)、温盐深仪(Conductivity-Temperature-Depth profiler, CTD)及信标机安装接口。主浮体主要为系统提供正浮力及能源,同时也承担潜标系统的综合控制及数据采集传输功能。动力电池舱为水下绞车、辅助排缆装置及系统主控提供能源。控制舱包含综合控制模块、绞车驱动器和控制电池组,用于对水下绞车动作、数据采集及传输进行控制。

辅助排缆装置安装于主浮体,用于给铠装通信缆提供预紧力,保证水下绞车收排缆动作正常。

水下绞车由驱动组件、排缆组件、卷筒组件、传动组件和滑环组件组成。水下绞车安装在主浮体上,内置电机驱动实现铠装通信缆收放,从而控制

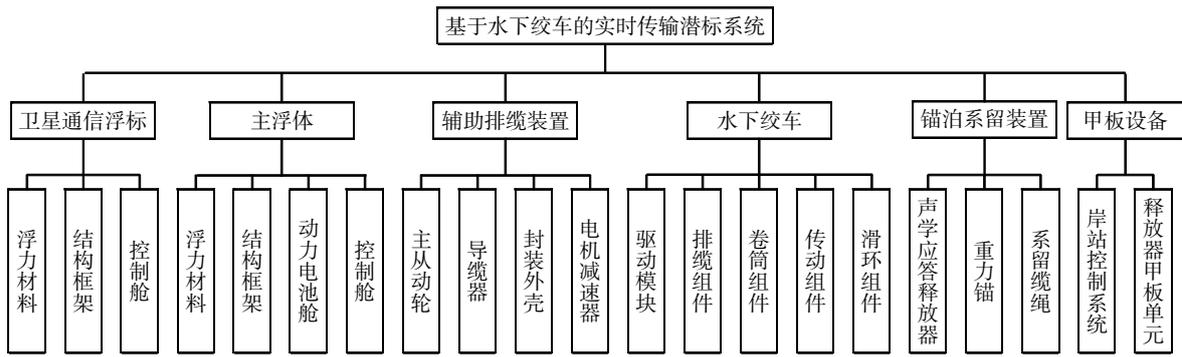


图 2 基于水下绞车的实时传输潜标系统组成框图

卫星通信浮标的升降。

1.3 系统工作流程

基于水下绞车的实时传输潜标工作过程可分为数据采集处理、数据传输、卫星通信浮标上浮、数据传输、卫星通信浮标下潜 5 个阶段。

数据采集处理阶段：主浮体上搭载的 ADCP 和 CTD 传感器采集的观测数据通过水密电缆传输到控制舱，控制舱综合控制模块对观测数据进行打包处理。

数据传输阶段：观测数据通过铠装通信缆传输到卫星通信浮标控制舱。

卫星通信浮标上浮阶段：当水下绞车收到排缆指令时，水下绞车开始排缆，卫星通信浮标在自身正浮力的作用下开始上浮，并通过压力传感器实时感知深度，当浮标上浮至水面时，浮标控制模块向主浮体综合控制模块发送通信浮标当前深度，水下绞车停止排缆。

数据传输阶段：卫星通信浮标浮出水面后，通过卫星将采集到的观测数据发送至数据接收处理装置，同时也可通过卫星对水下绞车的动作时序及传感器的采样频率进行设置。

卫星通信浮标下潜阶段：数据发送完成后，浮标控制模块给主浮体综合控制模块发送收缆指令，综合控制模块控制水下绞车开始进行收缆动作，并通过压力传感器感知浮标深度，当到达水下 50 m 时，水下绞车停止收缆。

2 关键组部件设计

基于水下绞车的实时传输潜标关键组部件主

要有卫星通信浮标、主浮体、水下绞车及辅助排缆装置。

2.1 卫星通信浮标设计

卫星通信浮标长期潜伏于水下 50 m 深度处，由水下绞车带动进行剖面运行。卫星通信浮标由玻璃微珠固体浮力材料、结构框架和控制舱组成，图 3 为卫星通信浮标的结构示意图。玻璃微珠固体浮力材料为卫星通信浮标提供水下正浮力，密度 $380 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ ，在浮力材料上进行切割、钻孔等加工，为控制舱和结构框架提供安装接口。结构框架采用 316L 不锈钢加工焊接而成，本身具有良好的抗海水腐蚀能力，同时采用锌-铝-镉合金进行阳极保护，提高了其防护能力。控制舱采用 6061-T6 铝合金，表面硬质阳极氧化处理，提高其抗海水腐蚀能力。

卫星通信浮标作为整个实时传输潜标重要的数

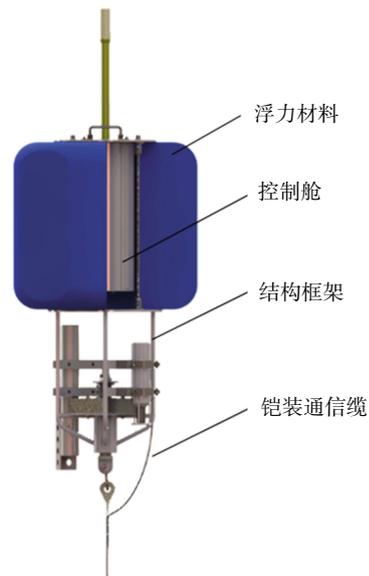


图 3 卫星通信浮标

据传输中继平台,需要满足两点要求:一是整体具有足够的正浮力,保证水下绞车排缆时,卫星通信浮标可在自身正浮力作用下浮出水面;二是为了保证卫星通信浮标出水后能够正常通信,浮标需要具有足够的出水高度和稳定的水中姿态。基于以上两点,需要对卫星通信浮标的衡重参数、出水高度和水中姿态进行设计。衡重设计参数如表1所示,卫星通信浮标具有46.3 kg正浮力。

表1 卫星通信浮标衡重参数配置

序号	名称	空气中重量/kg	水中重量/kg
1	浮力材料	51.66	-74.34
2	控制舱	19.3	4.91
3	结构框架	20	17.4
4	配重	6.5	5.7
合计	—	96.6	-46.3

通过调整卫星通信浮标底部配重及搭载载荷位置,完成对卫星通信浮标姿态及出水高度调整,如表2所示,最终卫星通信浮标质心距离112.6 mm,天线出水高度600 mm。水面姿态如图4所示。

表2 卫星通信浮标姿态参数

序号	项目	参数
1	质心坐标	X=3.9
		Y=161.4
		Z=3.8
2	浮心坐标	Y=274
		Z=0.8
3	质浮心距离/mm	112.6
4	天线出水高度/mm	600

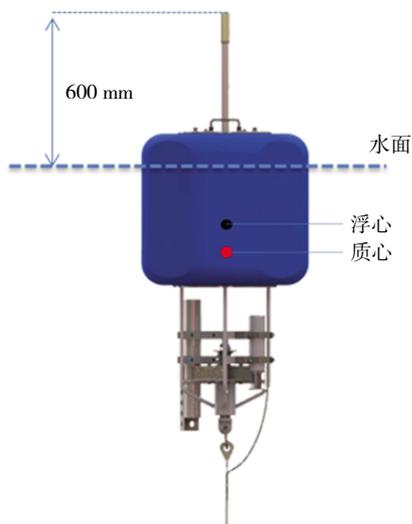


图4 卫星通信浮标水面姿态示意图

为确保水面通信浮标姿态与设计一致,对总装完好的水面通信浮标进行水池试验,试验过程如图5所示,试验表明卫星通信浮标水中姿态良好。

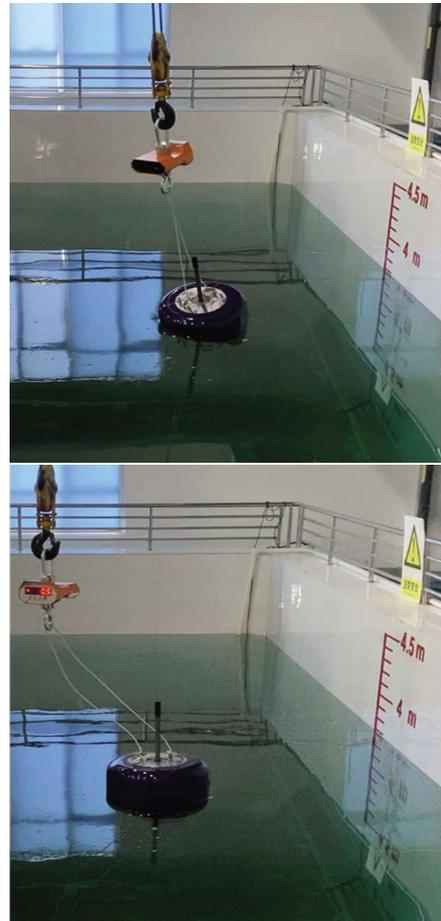


图5 卫星通信浮标水中姿态试验

2.2 主浮体设计

主浮体为实时传输潜标的主要载荷平台,为潜标系统整体提供水下正浮力,使锚系处于绷直状态,保证系统具有良好的水下姿态。同时,主浮体上预留水下绞车、辅助排缆装置、动力电池舱、控制舱及各类传感器安装接口。主浮体整体外形呈流线形,并采用模块化设计,由头部浮力材料、中间结构框架、尾部浮力材料及吊耳等组成。主浮体外形尺寸为3.4 m × 0.9 m × 1.5 m,空气中重量1105 kg,可为潜标系统提供287 kg的正浮力。图6所示为主浮体总装后结构示意图。

当潜标布放在指定海域后,受海流影响,会使主浮体沿海流方向移动,而系留索和锚却阻止这种移动。这样,主浮体最终将会处在某一平衡位置,且水平方向上必将沿流的方向偏移一定的距离,在

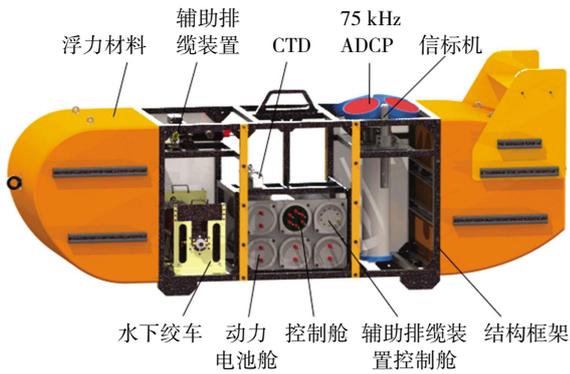


图 6 主浮体总装结构示意图

铅直方向上产生一定的偏降。如果偏降过大, 将会导致主浮体承受压力载荷过大而破坏, 从而不能满足系统设计要求。如果设计过于保守, 必将以牺牲经济成本为代价, 造成经济损失^[8]。而在系统配置不变的情况下, 要减小主浮体的偏降, 直接增加其净浮力效果最为理想^[9]。因此, 需要对主浮体进行合理设计, 使其具有足够的净浮力以减小水下偏降, 保证系统安全。

本文基于锚泊缆绳姿态有限元模型, 针对不同流速, 不同主浮体净浮力条件下主浮体的偏降和系统姿态进行了模拟计算 (表 3)。

表 3 不同流速及净浮力下主浮体偏降

表面流速/kn	净浮力/kg		
	150	250	300
1	5	2.5	1.5
2	38	19.5	15
3	80	52.5	43.5
4	112.7	83.6	73.5
5	136.8	109	98.7
6	155.2	129.1	119.2

通过数值模拟计算可以看出, 将主浮体净浮力控制在 250~300 kg 范围内较为合适, 在极限海况下主浮体偏降较小。基于以上计算, 在设计过程中主浮体浮力材料及各承压结构部件均取 1.5 倍安全系数。

2.3 水下绞车设计

水下绞车是实时传输潜标重要的动力部件, 水下绞车通过铠装通信缆牵引卫星通信浮标进行剖面运动。如图 7 所示, 水下绞车主要由铠装通信缆、卷筒组件、驱动组件、排缆组件、传动组件、滑环组件等组成。绞车整体结构采用钛合金材料以减小

其水下重量并提高抗腐蚀能力。驱动组件主要包括电机、减速器和制动器等, 其输出动力通过传动组件分别驱动卷筒和排缆组件, 从而带动铠装通信缆有序排列在卷筒上。水下绞车与主控之间通过充油补偿电滑环用水密电缆连接。铠装通信缆采用直径 8 mm 的承力电缆, 可传输传感器观测数据、卫星通信浮标深度等信息。

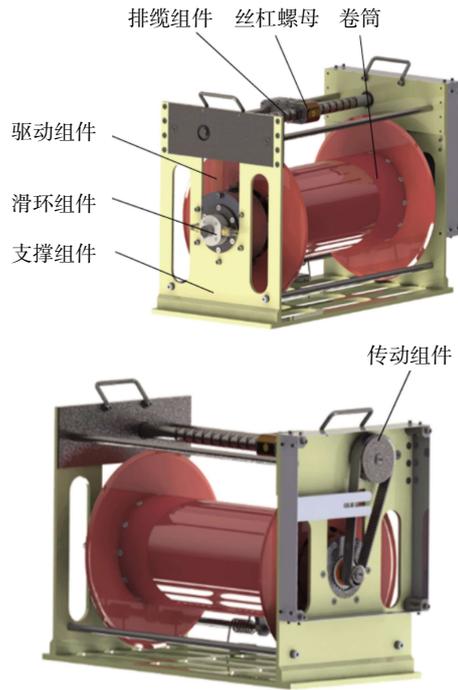


图 7 水下绞车结构组成示意图

2.3.1 驱动组件设计

驱动组件是水下绞车的动力模块, 一方面带动卷筒进行收放缆动作, 另一方面通过齿轮同步带传动结构带动排缆组件进行自动排缆, 具体结构如图 8 所示。电机、减速器内置于密封舱内部, 动力通过输出轴传递至排缆组件小齿轮端, 同时输出轴与卷筒之间通过平键连接, 将减速器的转矩传递至卷筒。密封舱另一端通过花键轴与支撑组件固定, 这样就保证了电机静止而卷筒相对转动。驱动组件动密封位置采用机械密封方式, 静密封位置采用 O 形圈进行密封。

密封舱采用充油补偿结构来抵消外界海水压力变化带来的影响, 减少密封舱厚度, 从而降低水下绞车重量。在压力作用下, 液体的体积会被压缩, 通常情况下在压力较小时, 液体的压缩性可以忽略不计。但在液压系统中由于液体中游离气泡的存在

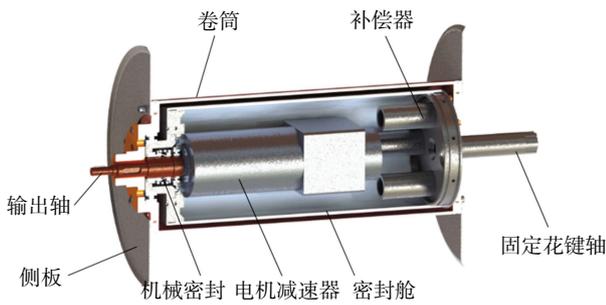


图8 驱动组件结构示意图

会使工作液体的压缩性增加，因此在计算分析时就要将液体的可压缩性考虑在内^[9]。

体积为 V 的液体，当压力增大 Δp 时，体积减小 ΔV ，则液体的体积模量 K 可表示如下。

$$K = -\frac{V\Delta p}{\Delta V} \quad (1)$$

式中， K 表示液体产生单位体积变化所需要的压力增量。在常温下，纯净液压油的体积模量 $K = (1.4\sim 2)\times 10^3$ MPa，综合考虑液压油本身的可压缩性、混在油中空气的可压缩性，以及盛放液压油的密闭容器（包括管道）的容积变形等因素的影响，常用等效体积模量 K' 表示， $K' = (0.7\sim 1.4)\times 10^3$ MPa，取 $K' = 0.7\times 10^3$ MPa。

水下绞车密封舱工作水深为 200 m，压力为 2 MPa，取安全系数为 1.5，则压力为 $\Delta p = 3$ MPa，代入式(1)得到式(2)。

$$\Delta V = 0.0042V \quad (2)$$

密封舱充满油体积 9.019 L，电机密封舱空腔体积 3.697 L，充油容积为两者差值 $V = 5.322$ L，因此，可算得体积最大变化量 $\Delta V = 0.022$ L。

密封舱采用活塞式压力补偿结构，设计有三组活塞，其中单组活塞补偿容积为 0.058 L，可满足设计要求。

2.3.2 传动组件设计

传动组件采用同步带传动方式，齿轮均采用钛合金材料加工而成，具有优良的防海水腐蚀能力。驱动组件通过传动机构同步带动排缆组件实现绞车的收放缆动作。传动组件中，主动齿轮齿数 $Z_1 = 16$ ，从动齿轮齿数 $Z_2 = 48$ ，传动比为 3:1。排缆组件中丝杠导程 24 mm，所用缆绳直径 8 mm，实现主动齿轮转 1 圈，排缆组件中丝杠螺母沿丝杠移动 8 mm，从而实现绕缆与盘缆同步进行。

2.3.3 排缆组件设计

排缆组件采用双向丝杠方式实现双向排缆。其主要工作原理为：卷筒转动同时通过传动机构带动丝杠转动，同时丝杠带动丝杠螺母移动，其移动速度与卷筒转动速度相匹配。当丝杠螺母到达丝杠一侧时，自动实现换向，实现反向排缆。

2.3.4 滑环组件设计

滑环组件由摩擦副、滑环定子、滑环转子、密封壳体、补偿器等组成，具体结构如图 9 所示。卷筒转动同时带动滑环转子转动，摩擦副转子与滑环转子通过螺钉固定跟随一起转动。摩擦副定子固定于滑环定子上，从而实现摩擦副转子与摩擦副定子的相对转动进行信号传输。静密封采用 O 形圈密封，动密封采用格莱圈密封。同时，为提高可靠性，避免外界压力变化引起动密封失效，采用充油补偿形式抵消滑环组件内外压差。

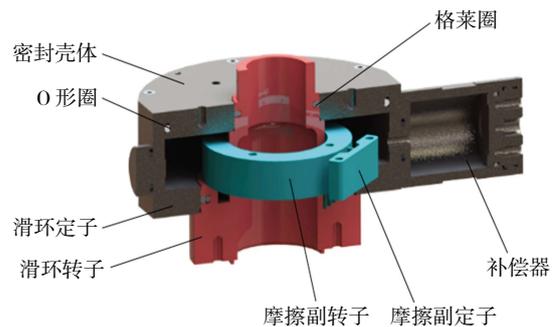


图9 滑环组件结构示意图

2.4 辅助排缆装置设计

辅助排缆装置为水下绞车排缆组件上端铠装通信缆提供一定预紧力，使铠装通信缆处于绷直状态，保证水下绞车正常收排缆。当水下绞车排缆至卫星通信浮标浮出水面后，铠装通信缆失去向上的拉力会导致水下绞车卷筒上的铠装通信缆出现松散。当水下绞车收缆时，就会使铠装通信缆在卷筒上的排缆与排缆组件丝杠螺母的移动出现误差。如此反复几次，所产生的累计误差将导致绞车排缆错乱，最终将导致水下绞车工作失效。

辅助排缆装置由主动轮、从动轮、调节机构、上下导缆器、封装外壳和电机减速器等组成，具体结构如图 10 所示。铠装通信缆穿过下导缆器后被主动轮和从动轮夹紧，再穿过上导缆器，缆绳夹紧力可以通过调节机构调整。主动轮和从动轮外缘采

用聚氨酯包覆, 并开有适配系留通信缆直径的绳槽。导缆器由 6 个滚轮组成, 可保证进入主动轮和从动轮之间的系留通信缆竖直, 不会滑出两轮之间的凹槽。电机和减速器密封在封装外壳内部, 带动主动轮始终逆时针转动, 从而保证水下绞车至辅助排缆装置段的铠装通信缆始终具有向上的预紧力。

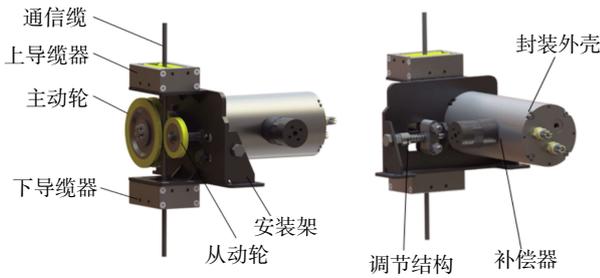


图 10 辅助排缆装置结构示意图

3 海上试验

3.1 试验目的

通过海上综合试验, 验证基于水下绞车的实时传输潜标系统功能及可行性。考核指标为: 系统海上连续工作时间大于 30 天。

3.2 海试情况

按照项目海试大纲要求, 选取中国南海海域作为海试区域, 海试点坐标为 18°08'23"N, 112°08'36"E, 海域水深 2 200 m 左右。

2022 年 1 月 16 日, 潜标搭乘“琼乐渔 16666”试验船, 在中国南海海域开展海上试验, 潜标布

放作业水深 2 227 m, 图 11 所示为潜标海上布放作业。

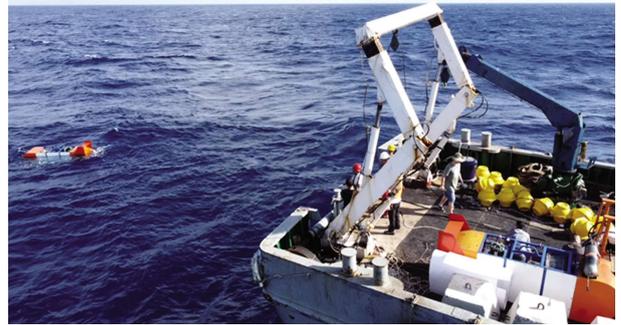


图 11 潜标海上布放

潜标于 2022 年 5 月 24 日成功回收, 潜标共在位时间 130 天, 满足海试指标要求。初步验证了该种形式潜标海上应用可行性。潜标上搭载了 CTD 和 75 kHz ADCP, 图 12 为卫星通信浮标回传的 1 月 16 日至 5 月 30 日的海流观测数据, 图 13 为主浮体上搭载的 CTD 在海试期间的部分观测数据。

从 ADCP 数据可以看出各个流层的合成速度范围为 0 ~ 1.369 m/s。同时, 距离海面处的合速度相比较水深的合速度来说, 速度大一些。同时发现在 5 月 30 日的几天前 ADCP 出现数据缺失情况, 分析原因是 5 月 24 日对设备进行了回收, 没有收到回传数据。

从 CTD 数据可以看出, 主浮体布放水深在 138.5 m 左右, 受海流影响, 主浮体深度出现波动, 偏降基本在 2 m 范围内。

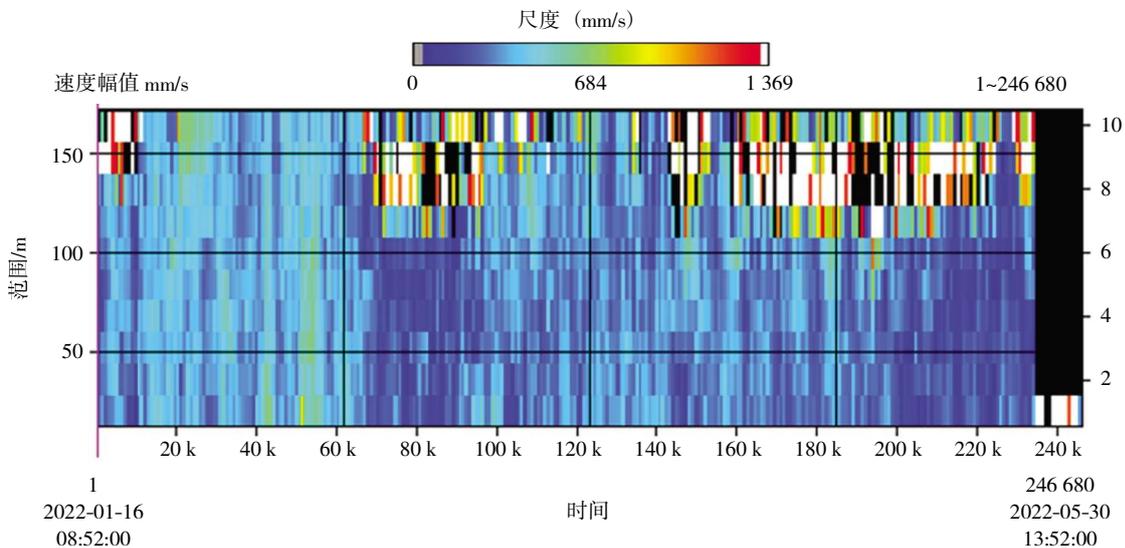


图 12 布放海域合成流速图

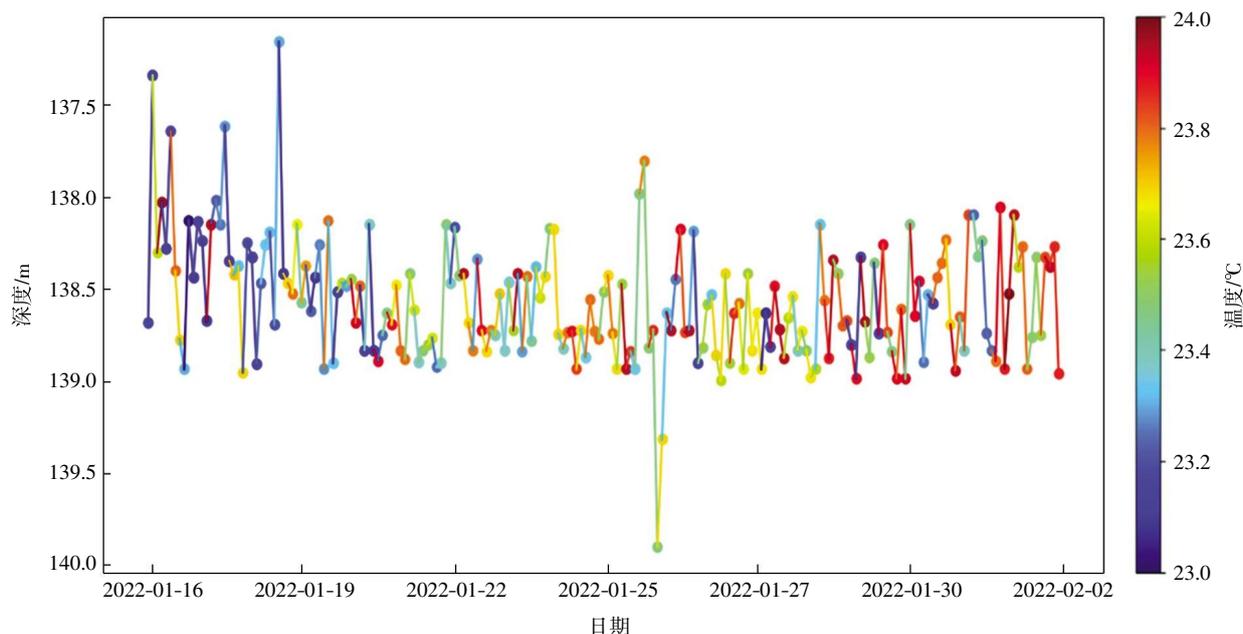


图13 海试潜标CTD部分观测数据

4 结论

本文提出了一种基于水下绞车的实时传输潜标系统,详细介绍了其关键组部件设计,并经过海上试验初步验证了其可行性。该型潜标解决了以往潜标数据回收时效不可控、时效性差的缺点,使数据时效性得到较大提高。同时,该型潜标还存在以下需要优化改进的方面:①与现有弹射通信浮标的定时通信潜标相比,其优点在于数据时效性强,可在较短的周期内得到观测数据。缺点在于系统长期工

作可靠性有待提高,水下绞车由电机带动,动密封性能、海洋生物寄生、腐蚀等方面因素都会影响到系统正常工作,因此,今后在防海洋生物寄生、提高系统密封性能、提高系统整体可靠性方面需要继续研究;②与浮子式实时/准实时通信潜标相比,其优点在于卫星通信浮标长期潜伏于水下,只有传输数据时浮出水面,隐蔽性强,不易被过往船只和拖网破坏。缺点在于数据传输的时效性不如浮子式实时/准实时通信潜标,因此,可深入研究利用波浪能滑翔器、无人船等作为数据传输的水面中继平台等方面,以提高该型潜标数据传输的时效性。

参考文献:

- [1] 王婷. 国外海洋潜标系统的发展[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 324-326.
- [2] 李民, 刘世萱, 王波, 等. 海洋环境定点平台观测技术概述及发展态势分析[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 36-42.
- [3] 李楠, 黄汉清, 赵晓. 水下实时观测潜标系统技术发展[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(2): 99-106.
- [4] 禹润田, 李昊, 冯师军, 等. 潜浮标技术发展应用及展望[J]. 气象水文海洋仪器, 2022, 39(1): 112-116.
- [5] 海重. 新型实时传输潜标系统[J]. 军民两用技术与产品, 2006, 1: 17.
- [6] 贺亚楠, 朱洪海. 海温观测方法发展综述[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(1): 85-89.
- [7] 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.
- [8] 操盛文, 闵强利. 海洋潜标锚泊系统数值计算分析[J]. 水雷战与舰船防护, 2009, 17(1): 27-30.
- [9] 马龙, 张洪欣, 张小波, 等. 深海潜标系统的姿态模拟计算分析及优化配置建议[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(6): 47-53.
- [10] 李振涛, 孙鑫晖, 张玉满, 等. O形密封圈密封性能非线性有限元数值模拟[J]. 润滑与密封, 2011, 36(9): 86-90.

Design and Sea Trial of Real-Time Communication Subsurface Mooring System Based on Underwater Winch

LIN Benhao¹, WANG Dongping², DONG Yankai¹, REN Chong^{1,3}

(1. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China; 2. 710 Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Yichang 443003, China;
3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In view of the urgent demand of "Transparent Ocean" project for real-time, long-term and continuous underwater observation, the design of real-time communication subsurface mooring system based on underwater winch is carried out. This system uses an underwater winch to drive the satellite communication buoy (SCB) for profile movement. The SCB collects observation data from ADCP and CTD sensors on the main float through communication cables. When the SCB moves to sea surface, the data is sent back to the shore station via Iridium communications. This paper introduces the system design and key component design of real-time communication subsurface mooring system in detail, and verifies the feasibility of system design by the sea trial.

Key words: marine submerged buoy; real-time communication; underwater winch; satellite communication buoy