



三峡库区航道智能浮鼓建设及推广应用*

徐晓明

(长江万州航道管理处, 重庆 404100)

摘要: 三峡成库以来, 库区航道条件大为改善, 船舶流量增加, 船舶向大型化发展, 传统助航设施无法满足新时期需求。提出一种能适应三峡库区大水位变幅的智能浮鼓新结构, 通过动态受力分析和构建浮鼓力学模型, 模拟浮鼓在水位变化时的受力过程, 据此提出智能升降技术。针对智能浮鼓的智能升降技术和供电系统在库区航道中的应用情况进行深入分析, 研究表明智能浮鼓能够很好地适应三峡库区大水位变幅运行, 各项技术性能运行良好。建议未来应加快推广应用智能浮鼓, 以满足三峡库区航道新时代的助航需求。

关键词: 三峡库区; 助航设施; 智能浮鼓; 推广应用

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0180-07

Construction and application of intelligent floating drum in navigation channel of Three Gorges Reservoir area

XU Xiaoming

(Changjiang Wanzhou Waterway Management Department, Chongqing 404100, China)

Abstract: Since the construction of the Three Gorges Reservoir, the waterway conditions have been greatly improved, the flow of ships has increased, and ships have developed to large scale. Traditional navigational aids cannot meet the needs in the new era. This article proposes a new intelligent floating drum structure that can adapt to large water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area. The force process of the floating drum during water level changes is simulated through the dynamic force analysis and construction of a floating drum mechanical model. Based on the above, the intelligent lifting technology is proposed. The application of the intelligent lifting technology and power supply systems of floating drums in the reservoir area are analyzed deeply. The results show that intelligent floating drums can adapt well to the large water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area, and its technical performance runs well. It is suggested that in the future, the promotion and application of intelligent floating drums should be accelerated to meet the navigation assistance needs of the Three Gorges Reservoir area in the new era.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; navigational aids; intelligent floating drum; promotion and application

三峡工程蓄水后, 大幅改善了库区航道条件。特别是近 10 a, 水运作为三峡库区的主要运输方式, 库区航道已成为连通长江上下游地区的主干道^[1]。库区航道畅通安全, 不仅关系到三峡工程

的航运效益充分发挥, 而且关系到长江黄金水道的高质量发展, 更维系着沿江经济社会发展以及国内国际双循环物流供应链的稳定。航标是行轮的眼睛, 为标示出船舶安全畅通的黄金水道, 在

收稿日期: 2023-11-23

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600400); 交通运输行业重点科技项目(2021-ZD4-080, 2021-ZD1-024); 2022年重庆市教育委员会人文社会科学研究规划项目(22SKGH374)

作者简介: 徐晓明(1970—), 男, 高级工程师, 从事航道工程方向的研究工作。

三峡大坝—重庆约 600 km 的库区航道上，以视觉航标为主，按一类航标标准配布设航标 1 400 余座，为过往船舶提供助航服务，保障航道通航安全。

随着长江经济带、交通强国等国家战略的深入实施，三峡库区航道在沿江综合交通运输体系中的地位和作用愈加重要。近年来，航道助航设施呈现大型化、标准化、智能化、品质化的发展趋势。陈健强等^[2]分析内河新型 PE 防撞浮标的材料性能、结构设计、平衡机理与受力，证明该浮标形式的可行性；宋成果^[3]分析船舶螺旋桨、生活垃圾粉碎机及农用器械等其他领域防缠绕方法对锚缆防缠绕研究的借鉴意义，并在此基础上提出浮标锚缆防缠绕装置的研究思路；Amaechi 等^[4-7]对海洋浮标结构进行一系列相关研究，填补了基于连接流体力学的波浪衍射力对 CALM 浮标和圆柱结构的流固相互作用机理研究的空白；李尚宇等^[8]基于内河环境和船舶污染事故特点，开发一种适用于内河船舶污染事故应急处理的新型溢油浮标跟踪系统。但与海洋和大型河流相比，三峡库区航道具有大水位变幅运行和汛期流量大等典型通航特征。由于传统的钢质标志船采用首尾双锚锚固在河床，三峡库区调峰运行，水位瞬时变化较快，浮标频繁移位，加之汛期大流速、风、浪的耦合作用，极易发生锚链断裂、浮标漂失等航标灾变现象，进而诱发船-标碰撞的海损事故^[9]。因此，如何适应库区大水深和大水位变幅条件，对三峡库区助航设施升级换代，提升航标维护智能化水平和效率，成为三峡库区航道高质量发展的重要任务^[10]。

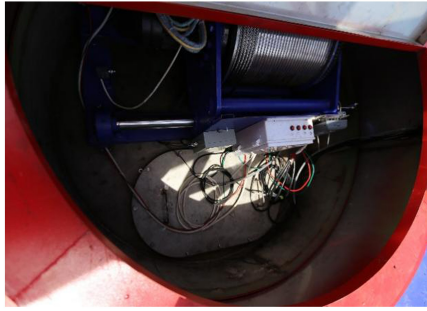
本文基于长江航道局“擦亮行轮眼睛”航标专项行动，重点围绕传统标志船固定锚定问题，提出一种能够实时适应大水位变幅运行的智能浮鼓新结构，并就智能升降关键技术进行论述，分析智能浮鼓在库区航道的推广应用情况，旨在加快推进三峡库区智能航标建设，提高库区航运保障能力和绿色化水平，保障库区航道畅通安全。

1 智能浮鼓整体结构设计

智能浮鼓主要由浮鼓密封仓、锚泊装置、浮鼓牵引控制系统、灯架、航标灯和供电系统等构成(图 1)。浮鼓密封仓包括外部结构和内部结构两部分。其中，内部结构为钢质材料，旨在支撑浮鼓整体标体；外部结构则由超高分子量聚乙烯(UHMWPE)材料制成，采用模块化工艺进行组装。UHMWPE 材料是近年来兴起的一种绿色环保材料，具有高强度、柔韧性好、耐腐蚀和自润滑性好等优势^[11]。锚泊装置由钢缆和沉石组成，钢缆分为水下固定钢缆和水上绞动钢缆，水下固定钢缆一般采用 $\phi 28$ mm 锚链，长度应小于浮鼓布设位置处近 30 a 最低水位时的水深值。水上绞动钢缆的长度根据浮鼓布设位置处水位最大变动幅度确定，该部分长度大于最大变动幅度，且需考虑钢缆的基础长度，水上绞动钢缆一般采用 $\phi 13$ mm 圆形镀锌钢缆。三峡工程 30 m 水位大变幅运行，通常水上绞动钢缆的长度设置为 40 m^[12]。浮鼓牵引控制系统为智能浮鼓运行的核心组件，包括 4G 通讯终端、升降机控制和遥测遥控系统等，主要通过太阳能充电电路控制系统中的铅蓄电池供给电源。遥测遥控系统由集成通讯模块、北斗差分定位模块、倾角传感器和加速度传感器等构成，以利于及时掌握浮鼓的位置、船体机械性能(倾斜角度和碰撞)、环境水深等。灯架为 40 mm×30 mm 的角钢焊接成四棱锥体，用于支撑航标灯，为船舶夜间航行提供指引，亦可为航道维护人员提供检修维护的工作面。



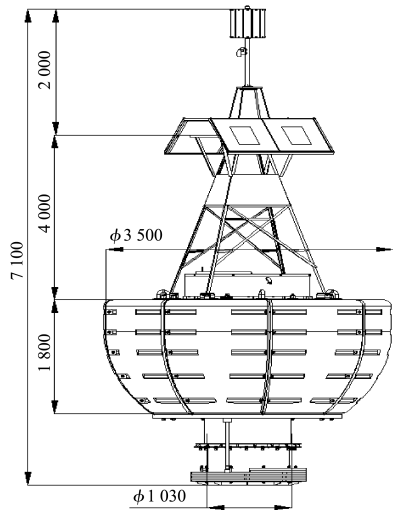
a) 智能浮鼓左标整体结构



b) 牵引控制系统



c) 智能浮鼓右标整体结构



d) 智能浮鼓立面(单位: mm)

图1 智能浮鼓结构

2 智能升降技术

2.1 运行原理

智能浮鼓的主要功能是浮鼓可随水位变动而自动升降,主要通过牵引控制系统实现。首先,应用地面基站建立北斗定位系统和遥控遥测系统,基于差分精确定位原理,实时反映浮鼓精确位置(精度控制在±10 cm范围),通过4G和Internet实现远程监控;然后,设定浮鼓位置控制中心点和浮鼓位置允许变化范围参数,对比浮鼓位置实时

检测数据,判断水位状态以及定位、钢缆倾斜角度等;最后,将上述数据经计算机计算、处理后,根据浮标内设置的数据和远程控制客户端的指令,向升降机控制系统输出正转或者反转信号,实现自动收放钢缆,实时调整水下固定钢缆的长度,从而达到在不同水深和水位变幅情况时,浮鼓位置的偏移值均在控制范围内。

2.2 动态受力分析

浮鼓在水上受力主要来源于水平方向的力 F_x (如风、水流、杂物缠附阻挡和固定沉石通过水下钢缆所产生力的水平分量等,当 $F_x=0$,浮鼓水平方向保持静止状态)、垂直向下方向的力 $-F_y$ (如浮鼓自身重力、水下钢缆的重力、固定沉石通过水下钢缆所产生力的垂直向下分量等)以及基于水面以下的浮鼓内空间产生的浮力 $+F_y$,当 $-F_y=+F_y$ 时, $F_y=0$,浮鼓垂直方向为静止状态。

进一步分析 F_x 使浮鼓产生水平运动,并不产生垂直升降移动,当水平方向合力 F_x 不平衡时,仅仅产生钢缆水平分量力的变化,该变化所产生的力由钢缆传导至沉石上,由沉石的反向力达到平衡。因此,这种力的变化不应该作为控制浮鼓升降运动的依据。但是,由于水平力的作用,将影响浮鼓水平位置的变化,当水平位置静止时 ($F_x=0$,水平方向力达到新的平衡),可能使浮鼓的水平位置超出设定允许的位置范围(参考浮鼓中心位置偏差)。因此在控制过程中,当钢缆所受拉力变化或水位深度不变时,均应时刻监控浮鼓位置变化,并控制钢缆长度,以确保浮鼓位置在正常范围。同时,当水平力 F_x 的合力点偏离浮鼓垂直合力中心点时,对浮鼓与水面的垂直夹角(倾斜角)将产生影响(图2)。

由水位变幅所产生浮鼓垂直方向的合力 F_y 是浮鼓升降控制的主要诱因。如果水下钢缆足够长,所产生的垂直拉力等于钢缆在水中悬浮的重力。钢缆随水深的增大而延长水中悬浮的长度,垂直拉力相应减少;反之,随着其长度减小,垂直拉力增加。在实际运行条件下,水位下降导致钢缆长度大于水深,由于水流力、风力和杂物阻挡等外部因素,浮鼓将不断地向某一方向运动,钢缆

发生倾斜拉住浮鼓达到静止平衡位置，因为钢缆的长度将导致浮鼓偏离设定的位置范围。同理，水位上升引起钢缆长度小于水深时，钢缆将浮鼓向下拉拽，此拉力由沉石承受并产生新的平衡。在极端恶劣情况下，有可能将浮鼓淹没水下或拉断钢缆。因此，根据水位变化实时调整钢缆悬浮在水中的长度是控制浮鼓保持正确位置的关键。

无论是水位变幅或者外界水平力变化，如不及时监测和控制，均将影响浮鼓的助航效能。浮鼓受力分析及偏移见图2。由图可知从整体而言，流速与倾斜角呈正相关，尤其处于低水位时，水下钢缆的长度较短，当流速为0~2 m/s时，浮鼓水平漂移从0 m增至45 m，倾斜角从0°增至约57°。

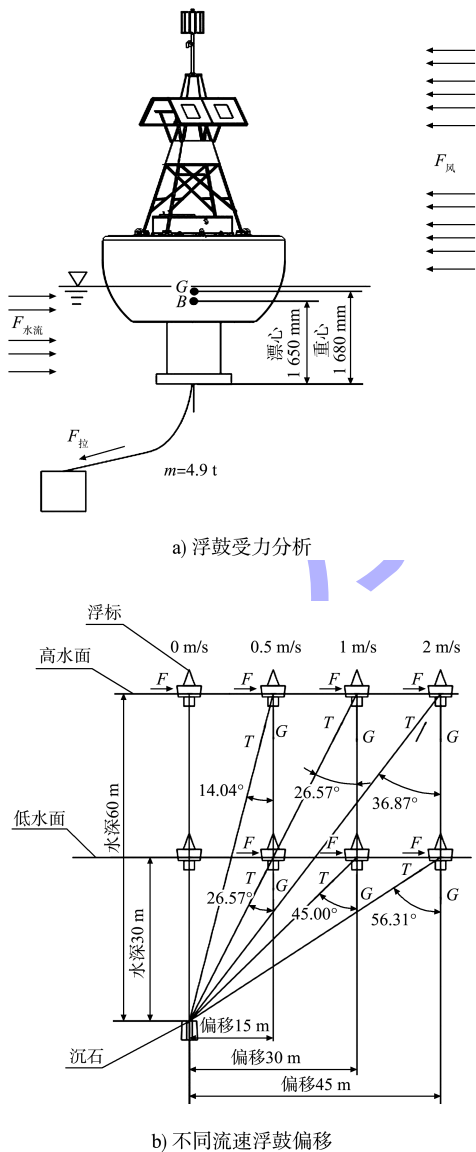


图2 浮鼓受力分析及偏移

2.3 浮鼓力学模型

基于智能浮鼓牵引控制系统，结合传感检测技术，通过浮鼓动态受力分析，利用 MATLAB 建立钢缆牵引力与其他外力相互关系的力学模型，模拟浮鼓受到牵引力减少漂移距离的受力过程。根据水深变化情况及水的流速，随时调整钢缆悬浮在水中的长度，实时控制浮鼓以保持正确的位置，旨在实现浮鼓随水位变幅的智能升降。

浮鼓水位上升受力及控制平衡示意图3。由图可知，初始水位30 m，水位上升2 m，吃水深度增加，浮力提升，检测到浮鼓位置发生水平偏移1 m，小于设定的下限值，通过牵引控制系统自动放缆2 m，较之原位置偏移0.2 m。浮鼓水位下降受力及控制平衡示意图4。由图可见，初始水位60 m，水位下降25 m，检测到浮鼓位置发生水平位移12 m，大于设定的上限值，通过牵引控制系统自动收缆12 m，最后达到新的平衡，较之原位置偏移3 m。

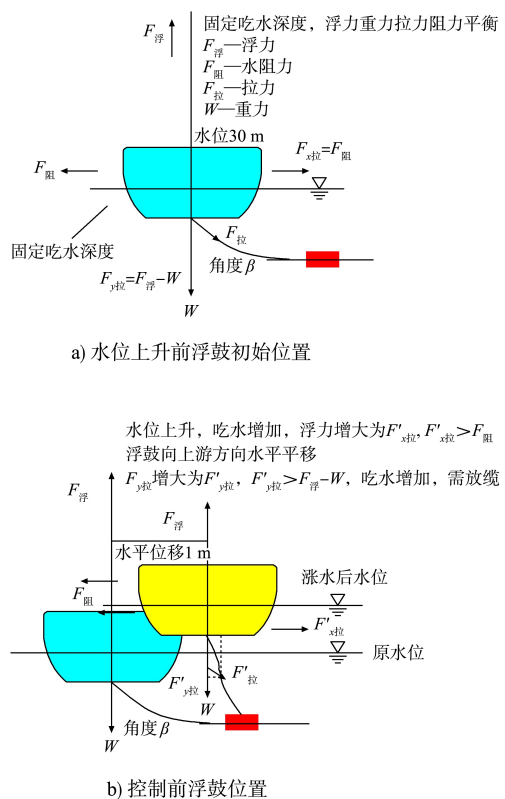


图3 浮鼓水位上升受力及控制平衡示意图

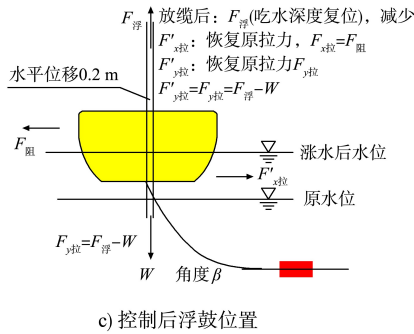
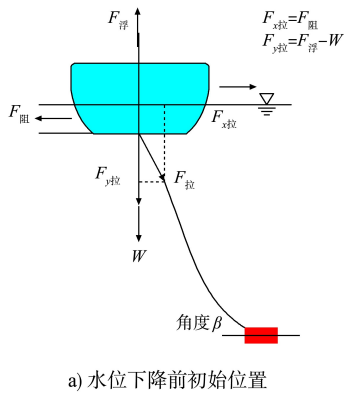
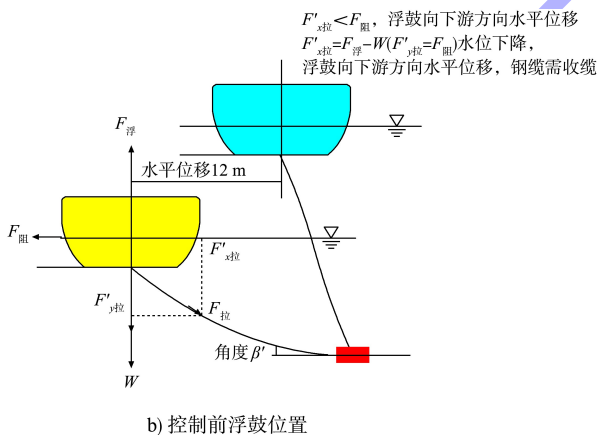


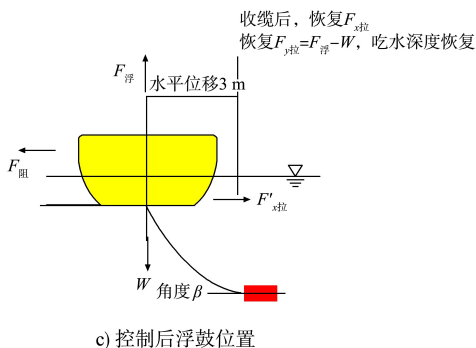
图3 浮鼓水位上升受力及控制平衡示意



a) 水位下降前初始位置



b) 控制前浮鼓位置



c) 控制后浮鼓位置

图4 浮鼓水位下降受力及控制平衡示意

可见, 影响浮鼓位置的因素包括水平力 x 、水位引起的垂直力 y 、设定位置的范围偏差 z (常数),

因此, 建立浮鼓位置控制函数 $Z=f(x,y,z)$ 。对该函数进行分析:

1) 当水位变幅微弱或不变时, 外界水平力变化使浮鼓发生水平偏移, 钢缆倾斜拉住浮鼓直至形成新的平衡(图2), 通过遥测遥控系统检测浮鼓实时位置, 并计算位移偏差 λ , 当 $\lambda > z$ 时, 向升降机系统输出正转控制信号(收缆)直至 $\lambda \leq z$, 以利浮鼓位置回到控制范围之内。

2) 当水位变幅幅度较大时, 考虑到三峡工程水位变幅运行并不连续且干扰因素较多, 精确地理论计算将带来较大的误差, 甚至超出位置控制的误差范围。因此, 本文采用离散型点, 通过测量水深 H 和对应的钢缆拉力 $F_{拉}$, 得到水位深度与拉力的分段坐标见图5。

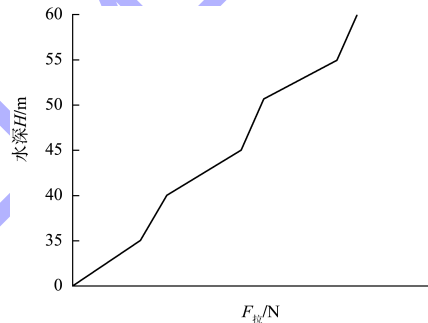


图5 水深与钢缆拉力分段关系趋势

根据上述坐标数据, 在不同的水位深度区间构建线性数学控制模型:

$$F_{拉} = kh_n + c \quad (1)$$

式中: $F_{拉}$ 为坐标 n 段对应水深拉力; h_n 为坐标 n 段对应水深; k 为坐标 n 段对应水深的斜率(常数); c 为坐标 n 段对应水深的偏差。

浮鼓制动控制闭环系统见图6。其中, $F(x,y)$ 为拉力合力, 输出 T (正反转) 为水平和垂直相关的拉力函数; $f(x,y)$ 为水平和垂直拉力的检测值。由图可知, 只要接收位置偏差和电动绞机动作(正反转及动作时间), 即可检测到牵引绳拉力、浮鼓位置、水深、浮体倾角等信息, 通过发送上述信息, 可自动控制电动绞机, 调节牵引绳长度, 使其位置信息达到正常范围, 从而控制智能浮鼓自动收放钢缆以适应水位变幅。

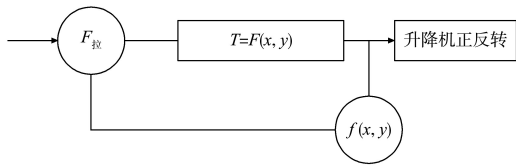


图6 浮鼓制动控制闭环系统

3 智能浮鼓在库区航道中的应用

依托万州库区航道奉节段关刀峡水道和奉节水道(长江上游航道里程 205~225 km)，开展智能

浮鼓在库区航道中的应用。在该段夔门桥右 3# 红浮、口前白浮、光武嘴红浮、黄老虎白浮、幺塘白浮、罗家沱红浮、二坨红浮、先理沟白浮和庙堡红浮等 9 处标位设置智能浮鼓，见图 7。浮鼓设置前吃水 1.2 m，设置后吃水 1.3 m，干舷高度 1.2 m，设置沉石质量 4.9 t，水下固定钢缆 34 m，水上绞动钢缆 40 m。



图7 部分智能浮鼓在库区航道中的布设

供电系统是保证智能收放缆、航标灯器及视频监控正常运行的关键技术。按照重庆地区天气状况，智能浮鼓设计供电电源的最大续航能力为 30 d。以放缆为例，采用直流电机进行，工作电压为 24 V，功率为 1.5 kW，放缆速度 1 m/min，检测时间每 6 h 一次，放缆周期按照极限状态考虑为每天 1 次，每次放缆 1 m。微电脑处理系统 24 h 工作的平均工作电流 80 mA，工作能耗 $Q_1=88.85$ Ah；航标灯的工作电压和功率为 12 V/1.2 W，灯质为定光 14 h，工作能耗 $Q_2=42$ Ah；视频监控装置工作电压和功率为 3 W/12 V，工作一整天能耗 $Q_3=180$ Ah。

蓄电池充电系数 k 取 1.2，计算得到智能浮鼓总蓄电池容量 $Q_{总}=k(Q_1+Q_2+Q_3)=373.02$ Ah。考虑铅酸蓄电池标准型号，本文所设计的智能浮鼓选取 24 V/400 Ah 铅酸蓄电池，满足智能浮鼓所需蓄电池的容量。根据太阳能电池供电遵循日供

电不小于 2 倍的日耗电原则，太阳能电池功率根据式(2)计算：

$$W=2Q_{日耗} V / T \quad (2)$$

式中： W 为太阳能电池功率； $Q_{日耗}$ 为智能浮鼓的日能耗，计算得到 22.36 Ah； V 为太阳能电池开路电压(36 V)； T 为充电时间，取 6 h。

通过计算得到太阳能电池功率 $W=268.32$ W。智能浮鼓采用 3 块 36 V/100 W 太阳能电池，保证太阳能电池每天充电不小于 6 h。综上计算分析，智能浮鼓的供电系统完全满足浮鼓的正常运行。

智能浮鼓与数字航道系统平台融合衔接，见图 8。由图可知，通过数字航道系统和遥遥控系统，可以实时监控智能浮鼓的倾斜角和偏移距离，从而清楚地判断浮鼓的位置和运行状态，并结合水深监测数据对浮鼓牵引控制系统进行指令输出，实现随水位智能升降。

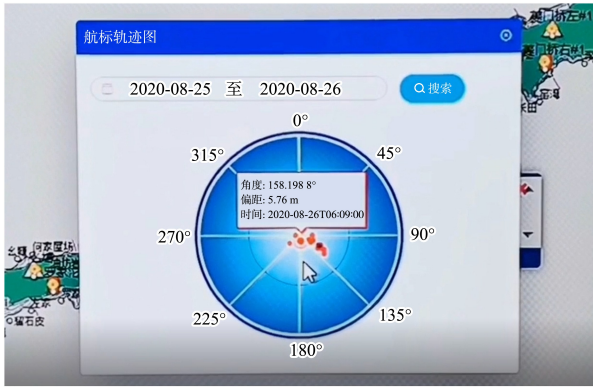


图8 智能浮鼓与数字航道系统平台融合衔接

通过浮鼓视频监控设备、平台数据显示，结合人工日常观测，供电系统正常，浮鼓运行良好。通过终端通讯设备传输到数字航道动态监测平台的数据，分析2020—2024年智能浮鼓的漂移次数，结果见表1。由表可知，智能浮鼓漂移30 m

以上次数大多占比为5%，漂移20~30 m次数约为20%，基本发生于2020年特大洪峰过境期间，受汛期大流速和风浪的耦合作用，浮鼓主要受外界水平力影响发生较大偏移，此时通过牵引控制系统正转收缆，控制浮鼓位置回到设定的偏移范围；以口前白浮和光武嘴红浮为例，漂移0~10 m的次数平均占比约42%，此时水位上升，浮鼓牵引控制系统反转放缆；漂移10~20 m的次数平均占比约36%，此时水位下降，浮鼓牵引控制系统正转收缆。可见，分析2020—2024年浮鼓在库区航道的运行情况，浮鼓各项技术参数正常、相关功能运行良好，可根据水位自动收放钢缆调整航标，基本实现了智能化升降，应用效果良好，在三峡库区航道具有广泛的推广应用价值。

表1 2020—2024年智能浮鼓运行漂移次数

标位名称	漂移 0~10 m		漂移 10~20 m		漂移 20~30 m		漂移 30 m 以上		数据总量	占比/%
	次数	占比%	次数	占比%	次数	占比%	次数	占比%		
夔门桥右3 [#] 红浮	2611	27.9	4 150	44.4	2 302	24.6	283	3.1	9 346	100
口前白浮	4 861	33.2	5 725	39.2	3 341	22.8	678	4.8	14 065	100
光武嘴红浮	6 480	50.2	4 233	32.8	1 473	11.4	719	5.6	12 905	100
黄老虎白浮	1 222	22.9	2 200	41.3	1 237	23.1	682	12.7	5 341	100
幺塘白浮	771	17.6	2 630	59.9	826	18.8	157	3.5	4 384	100
罗家沱红浮	1 981	38.9	1 847	36.3	1 012	19.9	253	4.9	5 093	100
坨红浮	2 506	50.8	1 879	38.2	492	10.0	47	1.0	4 924	100
先理沟白浮	601	12.3	2 804	57.3	1 288	26.3	202	4.1	4 895	100
庙堡红浮	1 016	21.5	2 433	51.6	1 073	22.7	199	4.2	4 721	100

4 结论

1) 智能浮鼓主要由密封仓、锚泊装置、浮鼓牵引控制系统等组成，采用钢质材料和 UHMWPE 材料制成，可实现自动收放锚缆和遥测遥控。

2) 浮鼓依托牵引控制系统检测和发送牵引绳拉力、浮鼓位置、水深、浮体倾角等信息，自动控制电动绞机，调节牵引绳长度，使其位置信息达到正常范围，从而控制智能浮鼓自动收放钢缆以适应水位变幅。

3) 智能浮鼓在三峡库区典型航道2020—2024年的应用情况表明，智能浮鼓各项技术性能运转良好，实现了设计功能，建议未来在三峡库区航道及内河其他库区航道中推广应用。

参考文献:

[1] 范昊天. 数智赋能三峡库区主干道[N]. 人民日报, 2023-07-03.

[2] 陈健强, 刘建平, 谢成鹏. 内河新型 PE 防撞浮标的研制开发[J]. 水运工程, 2003(1): 34-37.

[3] 宋成果. 长江干线浮标锚缆漂浮物缠绕问题研究现状及解决思路[J]. 中国水运(航道科技), 2017(1): 37-42.

[4] AMAECHI C V, WANG F C, YE J Q. Understanding the fluid - structure interaction from wave diffraction forces on CALM buoys: Numerical and analytical solutions[J]. Ships and offshore structures, 2022, 17(10/12): 2545-2573.

(下转第 192 页)