

引用格式: 李默竹, 郑荣, 任福琳, 等. AUV 浮力调节装置的设计及试验 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(增刊 1): 11–18.
LI M Z, ZHENG R, REN F L, et al. Design and testing of AUV variable buoyancy device[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(Supp 1): 11–18.

AUV 浮力调节装置的设计及试验



李默竹^{*1,2}, 郑荣^{1,2}, 任福琳^{1,2}, 杨斌^{1,2}

1 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016
2 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169

摘 要: [目的] 自主式水下航行器(AUV)在使用过程中受不同水域密度差异的影响, 需相应计算和调整其配平状态及控制参数, 而增加浮力调节装置可以使 AUV 具备更好的自主调节能力, 适应更多的应用场景。 [方法] 基于可变体积原理, 设计一种采用油囊吸排油方法的浮力调节装置, 实现双向定量传油, 通过改变外油囊体积来调节 AUV 的浮力状态。 [结果] 水池性能测试及搭载 AUV 湖试的结果表明, 所设计的浮力调节装置可以辅助 AUV 在水中完成定深悬停、航行下潜等功能, 实现了在 51 m 深的湖底成功着陆, 原地完成 90 h 低功耗坐底观测。 [结论] 试验证明了浮力调节装置工作的有效性, 为提高 AUV 使用效能、扩展应用范围提供了可能性。

关键词: 浮力调节装置; 自主式水下航行器; 管理系统; 湖试; 坐底观测

中图分类号: U674.941 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02500

Design and testing of AUV variable buoyancy device

LI Mozhu^{*1,2}, ZHENG Rong^{1,2}, REN Fulin^{1,2}, YANG Bin^{1,2}

1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
2 Robotics and Intelligent Manufacturing Innovation Institute, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China

Abstract: [Objectives] The motion state of autonomous underwater vehicle (AUV) is impacted by different densities of water, so it is necessary to recalculate the balance and control parameters. However, the use of a variable buoyancy device can add a more effective self-regulation capability to the AUV, making it suitable for operation in a wider range of scenarios. [Methods] This paper proposes the design of a variable buoyancy device for an AUV. Through adopting an oil bladder that can intake/discharge oil and transfer it quantitatively in a dual manner, the device can change the volume of the external oil bladder and regulate the AUV's buoyancy status. [Results] The results of the tank and lake tests show that the designed device can help the AUV to achieve the functions of fixed-depth hovering and diving during navigation, and complete a 90-hour mission of low-power-consumption parking for in-situ observation after soft-landing on the lakebed at a depth of 51 m. [Conclusions] The results prove the validity of the variable buoyancy device and lay the groundwork for enhancing the operation effectiveness of AUVs, as well as extending their application scope.

Key words: variable buoyancy device; autonomous underwater vehicle (AUV); management system; lake trial; bottom-sitting observation

0 引 言

目前, 我国经济形态和发展格局呈现出了前所未有的“依海”特征, 在海洋科学研究、海洋资

源开发、海洋环境保护等方面的投入不断增加。在此背景下, 自主式水下航行器(AUV)的应用领域得到了不断扩展^[1]。为克服不同水域的温度、密度等因素的差异对 AUV 航行造成的影响, 通

收稿日期: 2021-08-25 修回日期: 2021-10-05 网络首发时间: 2021-12-23 12:18
基金项目: 国防基础科研计划资助项目(JCKY2019207A019)
作者简介: 李默竹, 男, 1985 年生, 硕士, 副研究员。
*通信作者: 李默竹

过在 AUV 上搭载浮力调节装置可使其具备更好的适应性。浮力调节方法根据实现浮力变化原理的不同主要分为可调压载和可变体积这两种方式。

可调压载调节是指在 AUV 外形基本不变的情况下,通过改变 AUV 重量,使其所受重力与浮力的差值发生变化,而得到理想的受力状态。通常,采用的方法是在 AUV 中增加耐压水舱,通过海水泵配合阀组吸入或排出水舱中的水来改变 AUV 在水中的重量。其中,比较典型的应用包括:美国的第 2 代“阿尔文”号水下载人航行器(human occupied vehicle, HOV)以及“海马”号 AUV、日本的“深海 6500”号 HOV 以及中国的“蛟龙”号 HOV 等^[2-4]。可调压载调节方式的优点在于系统构成形式相对简单、调节范围大且对环境没有污染,但缺点是因其系统为开放性的,需要液压元件具有很强的耐腐蚀性,从而增加了开发难度和成本。

可变体积调节是指在不改变 AUV 重量的情况下,采取调整排水体积的方式来改变其所受浮力的大小。通常采用的方法是在 AUV 内、外部分别安装 2 个经液压管路联通的油囊。当需要增加浮力时,系统液压泵配合相应的阀组将内油囊中的油抽排至外油囊,以增大外油囊的体积;当需要减小浮力时,系统将外油囊中的油抽回至内油囊,以减小外油囊的体积。采用上述原理进行浮力调节的潜水器包括美国第 1 代“阿尔文”号 HOV、日本“浦岛”号 AUV^[5-6]、我国 COPEX 海洋剖面探测浮标以及“海翼”号水下滑翔机等^[7-11]。采用可变体积调节方式来改变水下航行器浮力的优点是,其系统组成呈现封闭性,不存在与外界的物质交换,可避免外界环境带来的腐蚀和污染影响,安全性和可靠性较高;同时,此方式还便于模块化开发,更易于集成到各类型的水下航行器中。但其缺点是,在深水环境下外油囊长期工作在较大的压力时,易发生形变,影响调节能力。

综上,本文将针对工作深度小于 200 m 的浅水型 AUV,结合实际的航行环境和使用需求,运用可变体积调节原理,借鉴油囊吸排油方式,设计开发一种浮力调节装置。该装置在结构上独立成段,可提供标准的机械接口,便于在 AUV 上安装使用。同时,采取模块化设计各部分功能单元,以实现高集成度、指令响应速度快和较好的控制与调节效果。

1 浮力调节装置构成及工作原理

用于搭载浮力调节装置的 AUV 整体呈流线型,全长 8.6 m,直径 534 mm。结合 AUV 的外形

结构特点,使用浮力调节装置替换原有的艏、艉垂直槽道控制器和推进器。浮力调节装置在 AUV 上的布局位置如图 1 所示。AUV 内部的电池组可以为装置的运行提供电能,AUV 驾驶单元负责通过通信总线对装置下达控制指令以完成相应的调节功能。

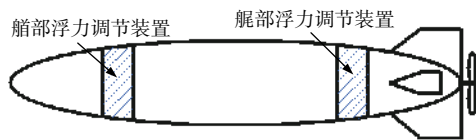


图 1 浮力调节装置布局
Fig. 1 Layout of variable buoyancy devices

浮力调节装置结构组成如图 2 所示。该装置舱段总长 720 mm,自重 96 kg,舱段壳体采用 5A06 铝合金材料,设计耐压深度 200 m。在舱段外部,使用过渡支架将外油囊固定于原有的垂向槽道内,并经穿壁油管使其与舱段中的内油囊相连。如此安装,既可利用槽道空腔对外油囊进行保护,又能够减小对原有 AUV 外形的改变程度,确保了在航行期间不产生额外阻力。舱段内部的液压和电子设备分别安装在隔板的上、下部位,这样,既可节省空间,也能够减小不同类型设备间运行时产生的相互干扰。

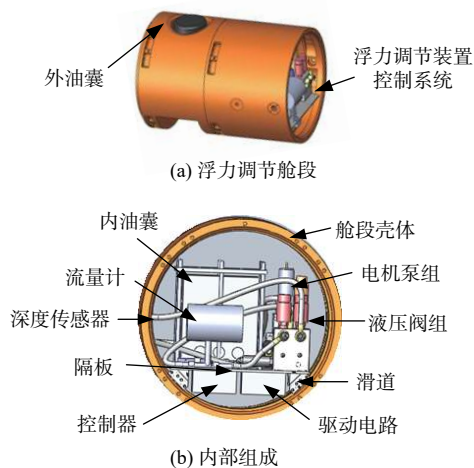


图 2 浮力调节装置结构图
Fig. 2 Structure diagram of variable buoyancy device

AUV 的浮力调节是通过改变外油囊体积实现的,而对于浮力调节装置的设计而言,体积调节量是一个重要参数,其取值大小直接决定了 AUV 对不同环境的适应能力^[12]。式(1)为外油囊体积调节量 ΔV 需要满足的不等式。

$$\Delta V \geq \Delta V_p + \Delta V_\rho + \Delta V_B \quad (1)$$

式中: ΔV_p 为初始配平细调时 AUV 所需排水体积调整量; ΔV_ρ 为不同水域密度差导致浮力变化所对应的排水体积调整量; ΔV_B 为克服包括耐压壳

体形变等影响因素在内的且可保证 AUV 可靠上浮所需浮力对应的排水体积调整量。

ΔV_p 的取值可根据 AUV 自重和初始排水体积的相对变化量以及 AUV 在水中的姿态进行设计。AUV 首先要完成设备和配重的计算和粗调, 在吊放入水后就可以利用 ΔV_p 自动调整 AUV 重心、浮心的相对位置, 使 AUV 在水中的姿态能够满足航行任务要求, 如此, 则可极大地减少吊放次数, 简化配平流程。通过实测, 选取 $\Delta V_p = 2L$ 可以满足初始配平要求。

ΔV_p 的取值需要根据试验水域的密度情况进行估算。已知 AUV 初始状态的排水体 $V_0 = 1700 L$ 。假设某试验区域海水平均密度 $\rho_0 = 1.023 g/cm^3$, 最小密度 $\rho_{min} = 1.020 g/cm^3$, 最大密度 $\rho_{max} = 1.026 g/cm^3$ 。若要使 AUV 在水下航行中所受到的浮力不变, 则需调整 AUV 的体积。令 AUV 调节后的最小和最大排水体积分别为 V_{min} , V_{max} , 需要分别满足如下等式:

$$\rho_{max} \cdot V_{min} = \rho_0 \cdot V_0 \quad (2)$$

$$\rho_{min} \cdot V_{max} = \rho_0 \cdot V_0 \quad (3)$$

由此, 可得 ΔV_p 的计算公式为

$$\Delta V_p = V_{max} - V_{min} = (\rho_{max} - \rho_{min}) \cdot V_0 \rho_0 / \rho_{max} \rho_{min} \quad (4)$$

将上述数据代入式(4), 得 $\Delta V_p = 9.97 L$ 。

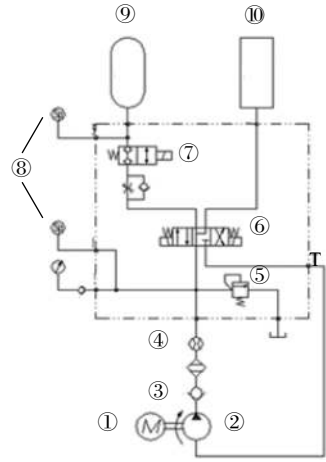
此外, 在特殊情况下, 需要试验中的 AUV 正浮力约为 15~25 N, 以保证 AUV 在无动力的情况下可安全上浮至水面。本文设计适配的浮力调节装置所用载体为浅水型 AUV, 在此水压环境下, 浮力材料和耐压壳体压缩量都相对较小, 故取 $\Delta V_B = 2L$ 即可克服形变等因素的影响而实现上浮。综合以上计算, 可知需要 $\Delta V \geq 13.97 L$ 。鉴于一台 AUV 可以搭载的浮力调节装置数量为 2 个, 所以单个装置的外油囊容积设计为 7 L 即可满足浮力调节要求。

2 浮力调节装置系统设计

2.1 液压系统

浮力调节装置液压系统的构成如图 3 所示^[13-14]。该液压系统的额定工作压力为 3 MPa。在动力传动方面, 系统采用直流电机经减速器与齿轮泵相连接, 其中, 直流电机额定功率为 150 W, 额定转速为 6 940 r/min, 减速比 4.3:1, 齿轮泵的排量 1.3 mL/r。考虑到容积效率, 液压系统的实际输出流量为 1.5 L/min, 而系统中的流量值能够通过管路中的涡轮流量计测量获得。

在液压系统工作过程中, 需要先后对齿轮泵、换向阀和电磁阀进行控制。当需要增加浮力时, 图 3 中换向阀导通方向为正向, 电磁阀打开后齿轮泵将内油囊中的液压油传至外油囊中; 当需要减小浮力时, 换向阀导通方向为反向, 电磁阀打开后齿轮泵将外油囊中的液压油传回至内油囊中; 当需要恒定浮力时, 齿轮泵停止传油, 同时电磁阀和换向阀下电, 切断传油回路, 保持外油囊体积不变。



1-直流电机; 2-齿轮泵; 3-单向阀; 4-流量计; 5-溢流阀;
6-换向阀; 7-电磁阀; 8-压力传感器; 9-外油囊; 10-内油囊
图 3 液压系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of hydraulic system

2.2 管理系统

浮力调节装置管理系统主要负责供电和实现硬件设备的功能。图 4 所示为管理系统总体结构, 该系统中主要包括了控制器、供电检测电路、电源变换模块、驱动电路、信号调理电路和外围的传感器等。控制器的核心为 Intel Atom N455/D525 处理器, 符合 PC/104 标准, 其通过 RS485 总线与 AUV 驾驶单元保持通信, 可实时传输控制指令和状态信息。扩展 I/O 接口可用于驱动继电器, 负责控制直流电机、电磁阀以及换向阀的工作状态, 执行相应的传油动作。扩展的 A/D 接口可采集传感器反馈的电流、温度、压力和流量状态信息, 监测装置当前的工作状态。

由于各种传感器输出的信号类型不同, 因此, 测量的结果一般不能直接发送至处理器, 而是需要通过信号调理电路对其进行滤波、隔离、电平转换等处理。如图 5 所示, 信号调理电路前端的 R1 与 C1 构成了低通滤波器, 用于去除信号中的高频干扰分量, 然后, 通过对 R2 和 R3 阻值比例大小的设计, 将运算放大器输出信号的电压值调整到合理的区间。电路输出端的二极管 D1 和 D2 起到了双向限幅的作用, 可保证输出到处理器

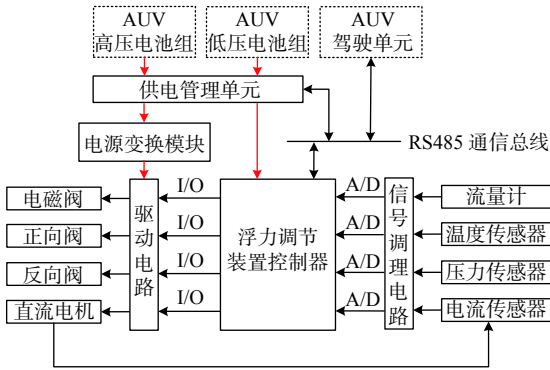


图 4 浮力调节装置管理系统

Fig. 4 Management system of variable buoyancy device

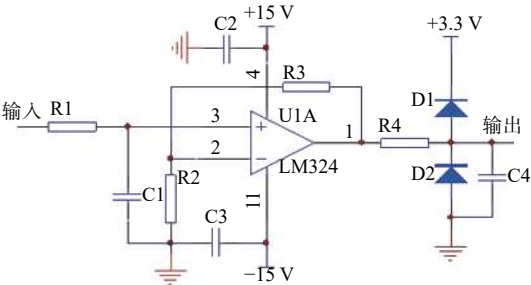


图 5 信号调理电路

Fig. 5 Signal conditioning circuit

的电压安全。

在供电方式上,浮力调节装置使用 AUV 内部的铅酸电池组。铅酸电池单节标称电压为 12 V,标称容量(20 h 放电率)为 21 Ah,通过不同的串并

联关系,分别构成低压电池组和高压电池组。低压电池组额定电压为 24 V,可以为浮力调节装置控制器以及外围传感器供电。高压电池组额定电压为 360 V,输出电压通过浮力调节装置内部的电源变换模块进行降压处理,然后再提供给直流电机和阀组使用。采取上述设计不仅能够减少电池组到浮力调节装置间线路上的电流、密封舱内供电线路的发热量,以及均衡分配高、低压电池组的电能消耗、延长 AUV 在水下的作业时间,而且还有利于使大功率设备与控制器等弱电设备间相互隔离,减小液压设备工作中对控制系统供电造成的干扰。

2.3 任务系统

任务系统是浮力调节装置的控制核心,系统基于 VxWorks 实时操作系统进行开发。在实际使用中,浮力调节装置通过接收 AUV 驾驶单元的控制指令,判别相应的标识位,然后再选择进入调试模式或工作模式^[15]。如图 6 所示,调试模式用于 AUV 设备的检查和配平。在此模式下,装置会根据操作人员手动设定的传油方向和体积来完成定量的传油过程。工作模式则用于 AUV 在水下自主执行任务的阶段,此时,AUV 会自动采集分析水中温度、盐度、压力以及深度等环境参数,计算出由此产生的浮力改变量,并根据 AUV

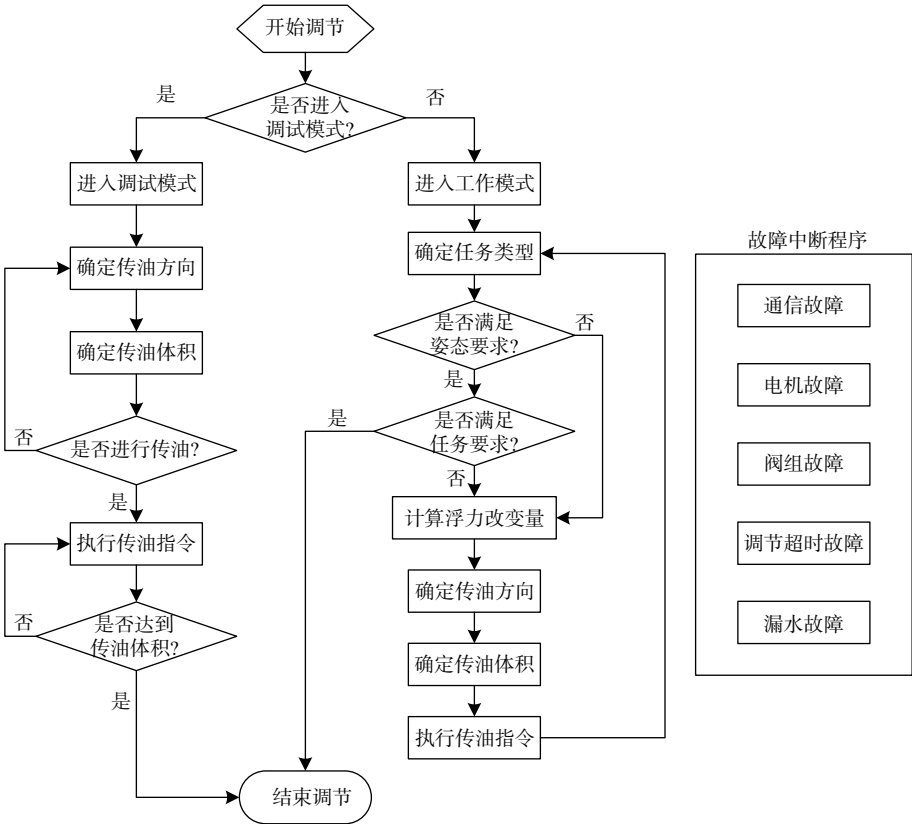


图 6 任务系统运行模式

Fig. 6 Operation mode of mission system

驾驶单元下达的航行任务,向管理系统和执行机构发出控制信号,完成相应的调节任务。另外,当调节过程出现故障时,系统会自动判别故障类型并执行相应的故障中断程序予以应急处理,确保 AUV 的航行安全。

3 功能测试

为了确保实现调节功能,保证 AUV 的航行安全,在 AUV 上搭载浮力调节装置之前,需要对其各项性能指标进行测试,包括装置设备联调测试和水池功能测试。

3.1 设备联调测试

设备联调测试主要用于考察电子及液压设备工作的稳定性,测试现场如图 7 所示。



(a) 电子设备测试



(b) 液压设备测试

图 7 系统性能测试

Fig. 7 Images of system performance test

在运行过程中,由于 AUV 需要调节外油囊油量来改变自身的浮力状态,因此会出现不同压力环境下根据指令频繁定量传油的情况。图 8 所示为回路中加装溢流阀模拟 2 MPa 压力的情况下,通过程序控制完成间歇性定量传油的过程曲线。浮力调节装置由外油囊向内每完成 1 L 油的传油后,会自动停止 15 s,之后,继续传油直至外油囊油量为 0。从测量得到的数据曲线可以看出,浮

力调节装置可准确定时、定量地执行传油动作,并满足 AUV 在航行过程中的浮力调节需求。

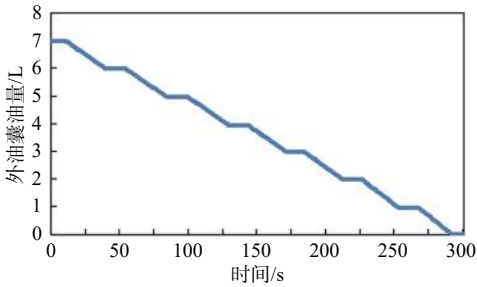


图 8 定量传油测试结果

Fig. 8 Test results of quantitative oil transfer

3.2 水池功能测试

为进一步测试浮力调节装置在水中的工作状态,由 AUV 的艏部舱段、浮力调节舱段和密封端盖组成了一个测试密封舱,密封舱内除安装有浮力调节装置控制系统外,还布置了为控制器和液压系统供电的电池组。通过预置的测试程序,实现了密封舱下潜和上浮的调节过程。图 9 所示为水池测试过程。



(a) 下潜过程



(b) 上浮至水面

图 9 调节功能水池测试

Fig. 9 Tank test images of buoyancy regulation function

测试时,浮力调节装置对外油囊油量和瞬时传油速率进行了记录,获得如图 10 所示数据曲线。传油量以 3 L 为一个周期,保持外油囊油量在 2~5 L 之间变化。初始时,外油囊油量为 5 L,舱段处于正浮力状态漂浮在水面。当向内传油

时,舱段所受浮力逐渐减小,舱段开始下潜;传油量达到 3 L 后,系统自动改变传油方向,当舱段所受浮力足以克服重力和下沉的惯性时,舱段开始上浮,如此在水中往复运动。通过试验,验证了浮力调节装置在水中的工作效果,并进一步检验了液压系统执行双向定量传油指令的准确性。

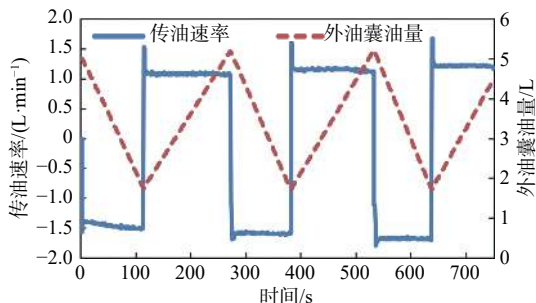


图 10 传油速率与外油囊油量曲线

Fig. 10 The curve of oil transfer rate vs. oil quantity of external oil bladder

4 搭载试验

4.1 AUV 定深悬停试验

定深悬停是指 AUV 通过调整使自身垂直方向上的受力达到平衡并悬浮在水中指定深度的状态。原有控制方式使用垂直方向的槽道推进器,通过向下或向上排水来改变 AUV 的升沉状态。在定深悬停过程中,为保证 AUV 处于合适的受力状态,槽道推进器需要持续工作,能耗较大。而使用浮力调节装置可以直接调整 AUV 的浮力直至达到平衡点,然后停机,除非 AUV 深度超出指定范围,才会重新上电运行。因此,在长时间悬停工况下,AUV 可以大幅减少自带能源的使用。图 11 所示为使用浮力调节装置的 AUV 在 10 m 定深过程中的状态曲线。AUV 在指定深度悬停过程中,深度均值为 10.36 m(标准差为 0.45 m),纵倾角均值为 2.43°(标准差为 0.72°),横滚角均值为 -0.17°(标准差为 0.07°)。由此可见,浮力调节装置可以使 AUV 在较平稳的状态下实现定深悬停的功能。

4.2 AUV 坐底试验

搭载浮力调节装置为 AUV 长时间坐底作业提供了可能,因此,对 AUV 下潜过程和坐底方式的研究具有了一定的价值^[16-17]。考虑到水下作业的安全性,试验将下潜坐底的过程分为 4 个阶段:

- 1) 航行至指定就位点,在水面附近漂浮或定深悬停;
- 2) 通过浮力调节装置减小浮力,实现下潜;

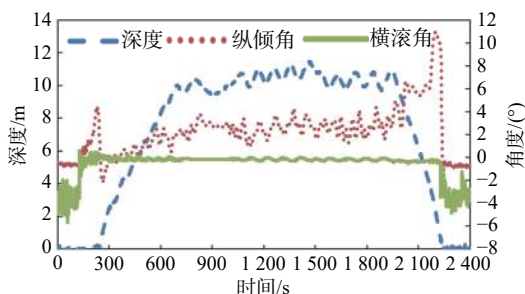


图 11 AUV 在 10 m 定深悬停过程中的状态曲线

Fig. 11 Working condition chart of AUV hovering at a depth of 10 m

3) 通过高度计实时测量 AUV 距湖底的高度,在接近湖底时,再次定高悬停,调整 AUV 下潜速度和姿态;

4) 再次通过减小浮力实现下潜,并以较低速度着陆坐底。

AUV 下潜坐底时的状态曲线如图 12 所示。在水面的初始阶段,艏、艉浮力调节装置的油囊同时向内传油。在开始进入下潜状态时,说明浮力已满足下潜要求。此时,浮力调节装置仅起到辅助控制的作用,以及保证下潜速度及姿态,而且会出现少量油液往复调节的现象。AUV 从水面附近一直下潜至水下 41.3 m,在距湖底 10 m 处开始降低下潜速度,然后在距湖底 8 m 处稳定悬停,并再次通过减小浮力使 AUV 缓慢下落,直至着陆坐底。为便于下潜并考虑到 AUV 坐底过程中保护艉部推进器,艏部外油囊向内传油的体积要大于艉部外油囊,故 AUV 会呈现出低艏下潜的状态,坐底后艉部略微高于艏部,这样可有效减少推进器和水平舵附着湖底泥沙和受到掩埋,为顺利离底上浮提供有利的条件。

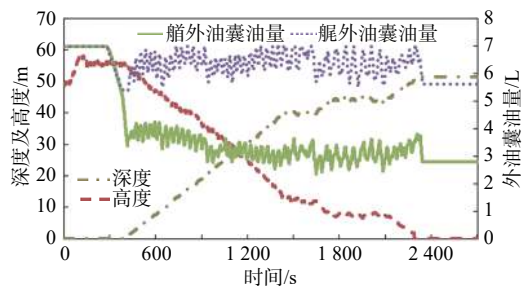


图 12 AUV 在下潜坐底过程中的状态曲线

Fig. 12 Working condition chart of AUV diving and bottom-sitting

完成坐底后,AUV 艏、艉浮力调节装置均进入停机状态,不会产生额外的能量消耗。试验中,AUV 在湖底停留了 90 h,期间观测和记录了周围水文环境参数。AUV 在预设坐底时间内完成任务后,浮力调节装置重新开机运行并向外油囊传油,随着浮力逐渐的增大,最终,克服湖底土壤的黏着力实现了离底上浮。图 13 所示为 AUV 坐底试验的全过程图像。

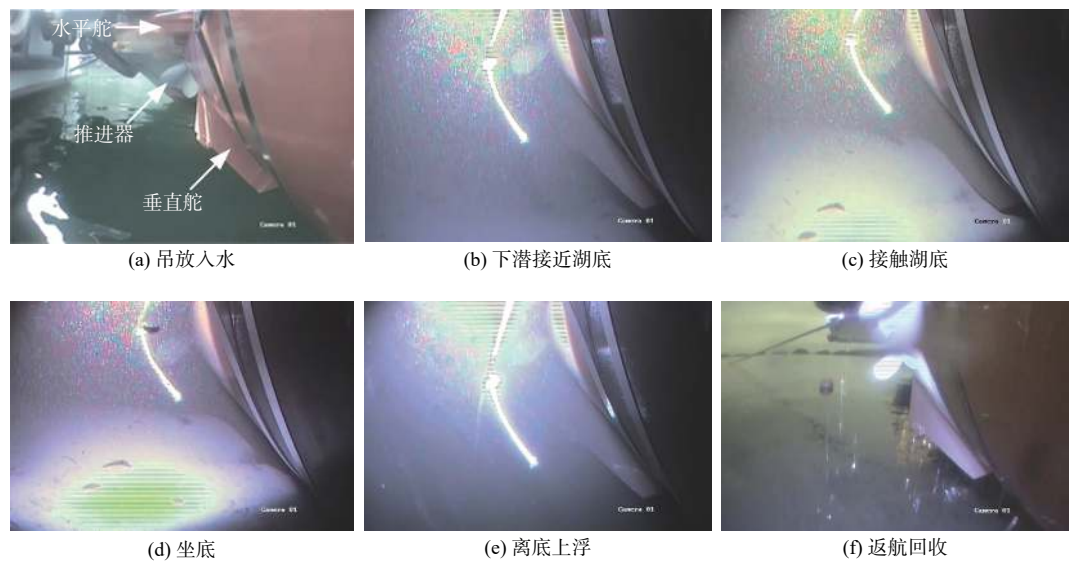


图 13 AUV 湖试时的坐底过程

Fig. 13 Bottom-sitting process of AUV in lake test

5 结 论

为了使 AUV 具备更好的自主调节能力,基于油囊吸排油原理,本文设计了一种最大传油速率为 1.5 L/min 的浮力调节装置,并针对其开展了水池性能测试和湖上搭载试验,通过调节浮力使 AUV 实现了下潜及完成 90 h 的坐底运行,验证了浮力调节装置的基本功能,取得了相关环境数据和影像资料,并得出如下结论:

1) 根据指令浮力调节装置可以实现双向定量传油功能。在 AUV 上搭载及初始配平时,能够实现浮力微调,降低配平难度,以及提高 AUV 使用中的便捷性。

2) AUV 经浮力调节能够实现水中定深悬停。从测试数据可以看出,AUV 悬停深度的误差及超调量均保持在较小范围内,其俯仰和横滚姿态保持得也较为稳定,可以满足水中定深观测的需求。

3) 坐底期间,只有低功耗监控电路和观测设备保持工作,显著节省了 AUV 自带能源的消耗,为水底长时间的定点观测提供了一种新方式。

参考文献:

[1] 蒋新松,封锡盛,王棣棠.水下机器人[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2000: 231-235.
JIANG X S, FENG X S, WANG D T. Underwater Vehicle[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2000: 231-235 (in Chinese).
[2] 杨友胜,任荷.潜水器浮力调节技术发展现状与展望[J].中国海洋大学学报,2019,49(增刊1): 110-119.
YANG Y S, REN H. Development status and prospect of buoyancy control technology for submersibles[J].

Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(Supp 1): 110-119 (in Chinese).
[3] TANGIRALA S, DZIELSKI J. A variable buoyancy control system for a large AUV[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(4): 762-771.
[4] 邱中梁,胡晓函,焦慧锋,等.“蛟龙号”载人潜水器液压系统设计研究[J].液压与气动,2014(2): 44-48.
QIU Z L, HU X H, JIAO H F, et al. Design and research of hydraulic system for “Jiaolong” manned submersible[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(2): 44-48 (in Chinese).
[5] 范腾涛. AUV 浮力调节系统及深海模拟实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
FAN T T. Research on buoyancy regulation system in autonomous underwater vehicle and deep-sea simulating experiment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017 (in Chinese).
[6] AOKI T, TSUKIOKA S, YOSHIDA H, et al. Advanced technologies for cruising AUV URASHIMA[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2008, 18(2): 81-90.
[7] 余立中. 我国的海洋剖面探测浮标—COPEX[J]. 海洋技术, 2003, 22(3): 47-55.
YU L Z. The China's ocean profiling explorer — COPEX[J]. Ocean Technology, 2003, 22(3): 47-55 (in Chinese).
[8] 王雷,姚宝恒,魏照宇,等.剖面浮标的分段浮力调节策略研究[J].舰船科学技术,2020,42(5): 98-102.
WANG L, YAO B H, WEI Z Y, et al. Study of multi-step buoyancy regulation strategy for profiling float[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(5): 98-102 (in Chinese).
[9] 穆为磊,邹振兴,孙海亮,等.潜水器浮力调节系统的低功耗控制策略[J].西安交通大学学报,2018,52(12):

- 44–49.
- MU W L, ZOU Z X, SUN H L, et al. A control strategy with low power consumption for buoyancy regulation system of submersibles[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(12): 44–49 (in Chinese).
- [10] 俞建成, 张奇峰, 吴利红, 等. 水下滑翔机器人运动调节机构设计与运动性能分析 [J]. *机器人*, 2005, 27(5): 390–395.
- YU J C, ZHANG Q F, WU L H, et al. Movement mechanism design and motion performance analysis of an underwater glider[J]. *Robot*, 2005, 27(5): 390–395 (in Chinese).
- [11] 张安通, 张华, 肖冬林, 等. 基于数值运动仿真的水下滑翔机浮力调节设计及试验研究 [J]. *船舶力学*, 2020, 24(9): 1119–1126.
- ZHANG A T, ZHANG H, XIAO D L, et al. Design and experimental study of buoyancy adjustment of underwater glider based on numerical motion simulation[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(9): 1119–1126 (in Chinese).
- [12] 武建国, 徐会希, 刘健, 等. 深海 AUV 下潜过程浮力变化研究 [J]. *机器人*, 2014, 36(4): 455–460.
- WU J G, XU H X, LIU J, et al. Research on the buoyancy change of deep-sea autonomous underwater vehicle in the diving process[J]. *Robot*, 2014, 36(4): 455–460 (in Chinese).
- [13] 尹远, 刘铁军, 徐会希, 等. AUV 用高精度吸排油浮力调节系统 [J]. *海洋技术学报*, 2018, 37(5): 66–71.
- YIN Y, LIU T J, XU H X, et al. High resolution oil bladder type variable buoyancy system for autonomous underwater vehicles[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2018, 37(5): 66–71 (in Chinese).
- [14] 田冠枝, 苑利维, 宋显成, 等. 高精度 UUV 浮力调节装置控制驱动技术研究 [J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(11): 108–111.
- TIAN G Z, YUAN L W, SONG X C, et al. Control and drive techniques for the high-precision buoyancy regulation device of UUV[J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(11): 108–111 (in Chinese).
- [15] 李磊. 浮力调节软件的单元测试技术研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(3): 119–122.
- LI L. Research on unit testing techniques of buoyancy adjusting software[J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(3): 119–122 (in Chinese).
- [16] 孙庆刚, 郑荣, 杨斌, 等. 基于浮力调节系统的 AUV 水底着陆策略研究 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(6): 134–193.
- SUN Q G, ZHENG R, YANG B, et al. Research on AUV underwater landing strategy based on variable buoyancy system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(6): 134–193 (in Chinese).
- [17] 侯巍. 具有着陆坐底功能的水下自航行器系统控制与试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- HOU W. System control and experiments on autonomous underwater vehicle with capabilities of landing and sitting-bottom[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006 (in Chinese).