

海洋水下滑翔机浮力调节系统的设计与实验

刘雁集, 马捷

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: **目的** 提高海洋滑翔机浮力调节系统的可靠性, 进一步降低系统功耗, 设计气压与液压结合的低功耗浮力调节系统。**方法** 基于理论分析确定系统的体积控制量, 设计气压调节模块以保证高压油泵的正常工作与回油的顺利进行。利用有限元方法分析承压管路的可靠性, 通过实验测试, 验证浮力系统的响应性能。**结果** 浮力系统的排油效率随着外压的增大而减小, 2 MPa 的压力会使出油率降低 3% 左右, 同时功耗增加 50% 左右。在大气压力环境下, 依靠系统内负压, 400 s 即可完成回油 600 mL, 完成上浮到下潜的转换。**结论** 设计的浮力调节系统的气压调节装置能以较低的功耗保障主泵的正常工作的, 同时保障回油过程的通畅, 满足海洋滑翔机对浮力调节的要求, 可以应用于一般海洋深度的水下滑翔机。

关键词: 水下滑翔机; 浮力调节系统; 气压增压; 压力实验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.12.008

中图分类号: U674.83

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)12-0045-05

Design and Experiment of Buoyancy Regulating System for Underwater Glider

LIU Yan-ji, MA Jie

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Objective To improve the reliability of the buoyancy regulating system of the underwater glider, further reduce the power consumption of the system, and design a low power consumption buoyancy regulating system combining air pressure and hydraulic pressure. **Methods** The volume of the system was obtained based on theoretical analysis. The air pressure regulating module was designed to ensure normal operation of the high-pressure oil main pump and keep the oil recovery smooth. The reliability of the pressure way was analyzed with the finite element method; and the response performance of the buoyancy system was verified through experimental test. **Results** The oil discharge efficiency of buoyancy system decreased with the increase of external pressure. The pressure of 2Mpa would reduce the flow rate about 3% and increased the power consumption by about 50%. Under the barometric pressure, based on the negative pressure in the system, the system drained back 600mL of oil within 400s. The conversion of floating and diving was completed. **Conclusion** The air pressure regulating device designed for the buoyancy regulating system guarantees normal working of the main pump with lower power consumption and smooth oil return of the system. The designed buoyancy system fits the requirements of the underwater glider, can be applied to the underwater glider working in the general ocean depth.

KEY WORDS: underwater glider; buoyancy regulating system; air pressure increasing; pressure test

水下滑翔机作为一种航程远、续航能力强的水下航行器, 已经被广泛应用于海洋探测。经过多年的发

展与完善, 水下滑翔机已经发展出多种成熟的机型, 如 Slocum^[1]、Seaglider^[2]、Spray^[3]、SeaExplorer^[4]、

收稿日期: 2018-07-15; 修订日期: 2018-08-15

作者简介: 刘雁集 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水下机器人、水下滑翔机。

通讯作者: 马捷 (1946—), 男, 教授, 主要研究方向为水下机器人、新型动力装置。

海翼^[5]、海燕号等^[6]。

随着海洋探索的深入,对水下滑翔机的要求越来越高,要求更强的续航力与更深的下潜深度。为提高续航力,Slocum Thermal 滑翔机利用能量转换装置将温差能转换为机械能与电能驱动滑翔机运动^[7]。Seaglider 通过加入合理的死区非线性环节间歇性地开启控制器降低系统能耗。浮力调节系统是滑翔机的主要动力部件,其能耗约占系统总能耗的 70%,合理降低浮力调节系统的能耗可以提高续航能力。Slocum、Seaglider、Spray 等传统滑翔机利用耐压舱内负压实现油液的自动回流,节省回油过程的能耗^[8]。为提高下潜深度,以适应探索深海的需求,滑翔机通常配置具有高压工作能力的柱塞泵作为主泵驱动油液外流,但柱塞泵的自吸能力通常较差,在泵的出口具有高压的情况下,容易造成吸油失效,尤其在柱塞泵入口有气泡的情况下。为保证主泵的正常工,需要在主泵前加入初级增加泵增加主泵的入口压力,但增压泵会增加一定的能耗^[9-10]。

为了保证主泵的正常工,同时合理降低初级增压系统的能耗,文中设计低功耗的空气增压系统。系统采用空气泵作为主要动力原件,利用两个微型气动三通电磁阀实现抽压与增压的转换,一个正负压传感器反馈增压舱内的压力变化,反馈数据为压力的控制提供依据。

浮力系统的响应性能受外部水压影响大。较大的外部压力,不仅增加主泵电机的能耗,而且降低主泵的工作效率。为充分研究外压对浮力系统的影响,设计压力可调的小型海洋压力模拟装置,在其中测试不同压力条件下浮力系统的响应。

1 浮力系统分析与设计

1.1 浮力系统参数分析

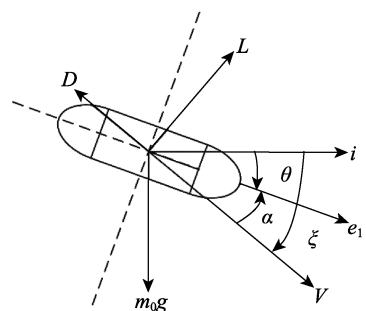
滑翔机通过浮力量的调节控制航行速度,当航速达到一定量时,水动力的合力与浮力的分量平衡,滑翔机匀速运动。滑翔机在垂直平面内稳定下潜和稳定上浮运动过程中的受力分析如图 1 所示,图中 m_0g 为滑翔机净浮力(m_0 为滑翔机总质量与排水质量之差); D 为滑翔机所受的阻力; L 为滑翔机所受的升力; V 为滑翔机在垂直平面内的速度大小; θ 为俯仰角,昂艏为正,俯艏为负; α 为攻角,自 V 向 e_1 逆时针旋转为正,顺时针旋转为负。 ξ 为滑翔角,定义为 $\xi = \theta - \alpha$,且与 θ 同向。

由图 1 可知,

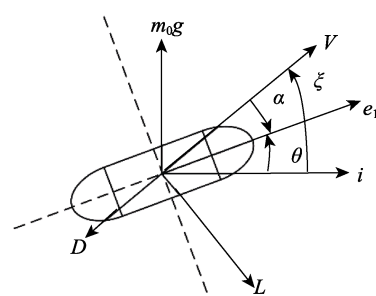
$$D = -m_0 \cdot g \cdot \sin \xi \quad (1)$$

类比于海军系数法 (Admiralty Coefficient),把滑翔机所受的阻力用式 (2) 表示^[11]:

$$D = C_D \Delta^{\frac{2}{3}} V^2 \quad (2)$$



a 下潜过程受力分析



b 上浮过程受力分析

图 1 滑翔机稳态滑翔时的受力平衡

式中: Δ 为滑翔机排水量, kg; C_D 为阻力系数, 根据现有滑翔机参数, 可用数据计算其值约为 0.8。

根据式 (1) 与式 (2), 得到浮力量的表达式:

$$m_0 = -\frac{C_D \Delta^{\frac{2}{3}} V^2}{g \sin \xi} \quad (3)$$

根据现有滑翔机数据, 水下滑翔机一般排水量在 55 kg 左右, 常规最大滑翔速度 0.3 m/s, 滑翔角度一般在 $\pm(20^\circ \sim 40^\circ)$ 之间, 将数值带入式 (3), 得到需要的浮力调节量为 0.18~0.25 kg。考虑在水下时的浮力损失, 设计 20% 的余量, 确定浮力系统的浮力调节量为 -0.3~0.3 kg。

1.2 浮力系统设计

如图 2 所示, 设计的浮力调节主要包含内油囊、外油囊、油路、空气增压系统等 4 个部分。当滑翔机达到设定深度开始上浮时, 出油油路工作, 主泵转动并且空气系统增压, 将油液从低压环境下的内油囊输送到高压环境下的外油囊, 此时机体浮力变大。为防止油液回流, 在主泵的出口管路上设计有单向阀。回油油路的通断通过一个常闭式电磁阀控制, 当滑翔机接近水面时, 回油油路工作, 电磁阀通电开启, 并且空气增压系统降压, 内油囊整体密封于气动增压系统中, 此时油液从高压的外油囊经过回油油路回流到具有一定负压的内油囊。若油液不洁净, 不能达到油泵的用油标准, 将影响系统的正常运行, 因此在主泵入口前, 配备一个 20 μm 孔径的过滤器滤除杂质。

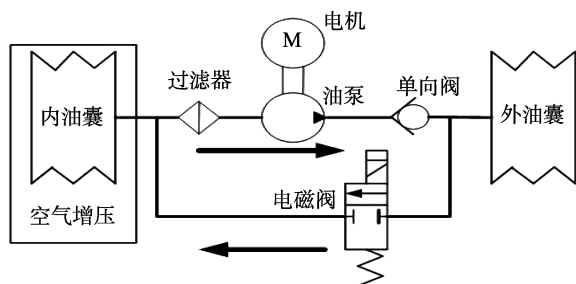


图 2 浮力系统工作原理

根据以上的设计分析,设计浮力调节机构如图 3 所示。内油囊与空气增压系统密封在浮力机构主壳体内,压力调节范围为 $-0.036\sim 0.065$ MPa 的抽打一体空气泵 FNY6003 用于舱体内的气压调节。增压系统的一个端口置于浮力系统壳体内,另一个端口通过密封件连接到浮力系统壳体外。两个气动三通电磁阀与一个气路阀座实现换向功能,控制抽气打气的切换。油路置于浮力系统壳体外,与内油囊通过高压油管连接。采用正负压力传感器 PT65 测量主壳体内的空气压力,量程为 $-0.03\sim 0.05$ MPa,采用直线位移传感器 Novotechnik TX2-100 测量油囊液位,量程为 10 cm。

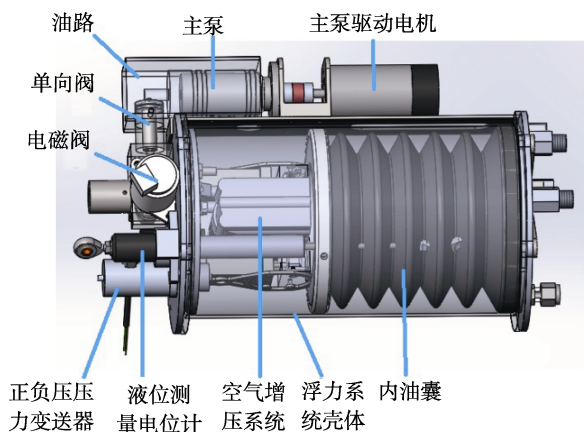


图 3 浮力调节机构

主泵系统的微型高压泵选择柱塞泵 HydroLeduc PB32.5, 极限工作压力为 35 MPa, 理论上可以在 3500 m 的海洋深度工作, 排量为 $45\text{ mm}^3/\text{r}$, 最大转速为 5000 r/min。驱动电机选择 EC-max 40, 最大转速为 8040 r/min, 最大扭矩为 $89.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 。浮力调节机构的浮力调节量为 $225\text{ mL}/\text{min}$ 。设计的原理样机最大调节量为 0.6 L, 则外油囊体积由 0 L 调节到 0.6 L 的最短时间为 160 s。

2 系统校核与实验

2.1 耐压部件强度分析

浮力调节系统通过控制油液在内皮囊与外皮囊之间的流动来控制机体的浮力,系统的外皮囊与海水接触,来自海水的压力通过油液传导到管路上,电磁

阀、单向阀与泵等动力部件阻碍压力的进一步传导,因此,出油油路是系统的承压部分。出油管路由模块化的结构组合而成,需要校验强度,以保证系统的正常运行。

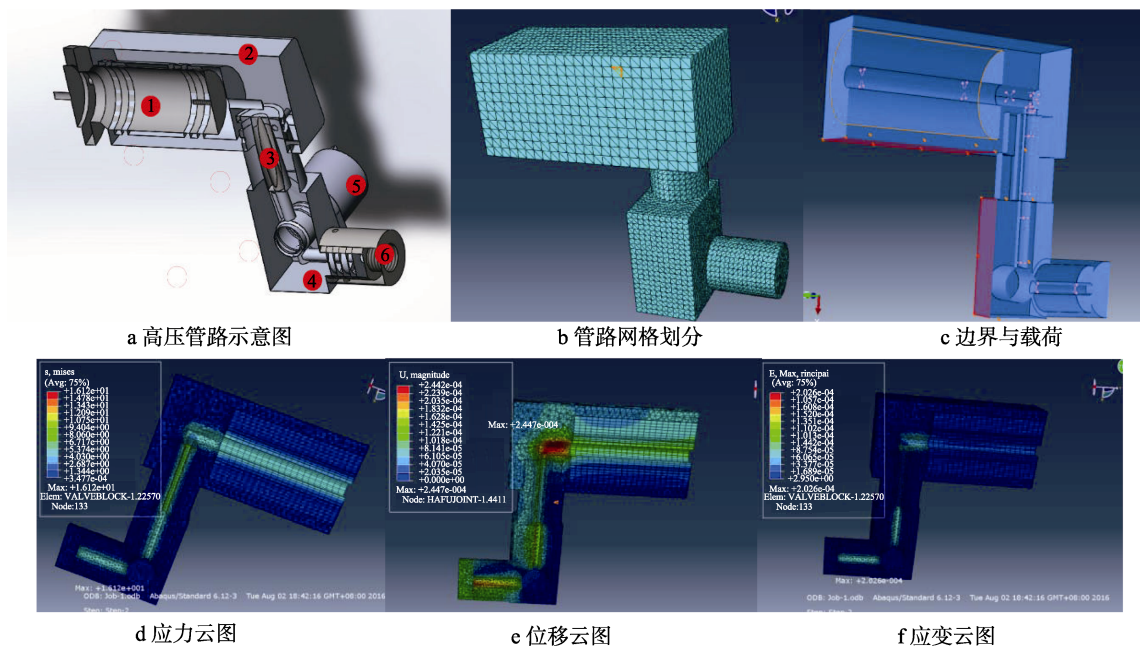
利用有限元方法对出油油路进行计算。建模软件为 Abaqus6.12-3 CAE, 解算软件为 Abaqus6.12-3 Standard。对出油油路内表面施加 3 MPa 压力,观察变形和应力等情况。部件的建模如图 4a 所示。采用 Tex 网格划分,如图 4b 所示。根据结构自身情况定义边界条件及受力面,如图 4c 所示。从图 4d 中可看出,最大应力在阀块部件,为 16.1 MPa;从图 4e 中可以看出,最大位移在主泵座部件,为 $0.000\ 24\text{ mm}$;从图 4f 中可看出,最大应变在阀块部件,为 0.0002 mm 。材料使用的 7075-t6 铝合金,抗拉强度为 530 MPa,取安全系数为 0.65,则许用应力为 344 MPa,最大应力远小于许用应力。从以上分析可知,设计的管路具有较高的耐压能力。

2.2 浮力系统性能实验研究

为研究浮力调节系统在实际工作环境下的性能,在压力环境下测试系统的响应能力。压力环境模拟装置主要由耐压筒体与加压装置组成,通过针阀手动调节筒体内压力。设计的压力装置可以模拟 $0.1\sim 6$ MPa 的压力环境。实验时,浮力系统的尾部结构安装于筒体端盖的安装口,浮力系统的舱外部分整体置于压力筒内,如图 5 所示。

在出油实验过程中,浮力系统向外油囊排油,会进一步增大压力筒内的压力,为了保证稳定的压力环境,通过针阀手动调节压力。回油实验在 0.1 MPa 大气压环境下进行,空气增压系统工作,使内油囊表面压力维持在 -0.03 MPa 左右,直至回油到指定状态。

浮力调节系统依靠一个与内油囊的移动端相连接的位移传感器反馈油囊体积,对油囊体积的准确测量是后续研究的基础。所采用的定排量柱塞泵具有稳定输出的优良属性,通过柱塞泵的转速可以较准确地推算所输送的油液体积。通过多组实验数据,拟合出位移传感器电阻值与油囊体积的对应关系,如图 6 所示。从关系曲线中可以看出,位移变化量与体积变化量的关系并不是严格线性的,而是存在一定的非线性关系。该非线性是由波纹状的皮囊容器造成的,如图 3 所示。在油囊被压缩时,波纹状油囊内部开始贴合在一起,使原有的空间迅速消失,造成此处实测值与理论值间的偏差较大;在油囊被拉伸时,油囊内部不会因贴合而引起空间的快速消失,所以,此时的实测值较准确。总体来说,测量值与理论值的最大偏差小于油囊总体积的 2%,该偏差远小于外压造成的体积损失。可以看出,内皮囊结构造成的缺陷对滑翔机的运动十分影响有限。位移传感器具有毫米级别的分辨率,由于浮力系统工作时内部油液的惯性及油囊的大



1.主泵 2.主泵座 3.单向阀 4.单向阀与电磁阀阀座 5.电磁阀 6.内外皮囊连接管件

图4 浮力系统高压管路校核

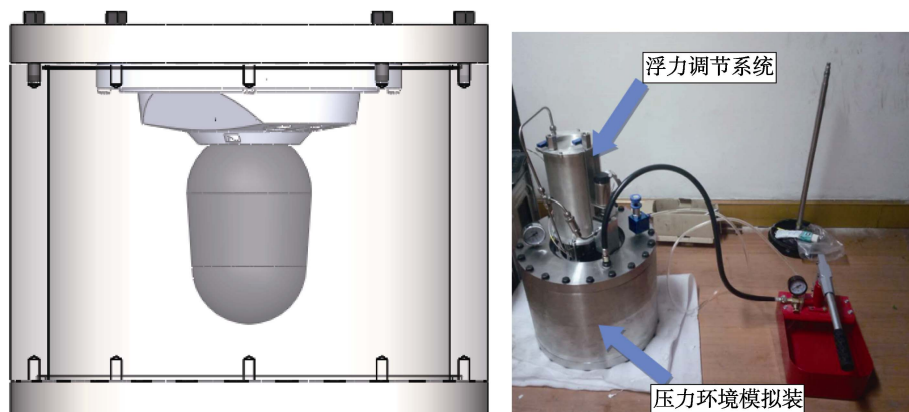


图5 浮力系统试验装置

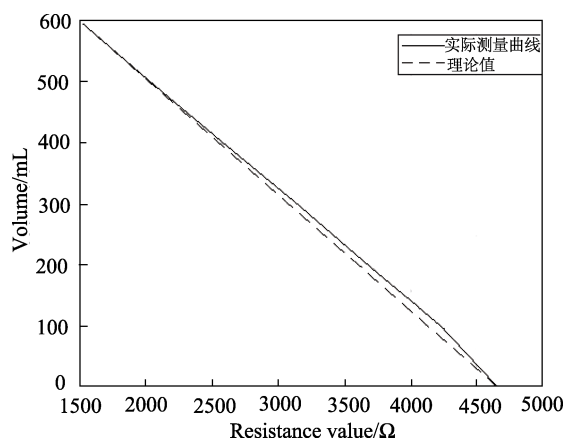


图6 浮力系统体积变化与位移变化的关系

横截面的影响,造成系统对油囊体积的分辨率较低,经多次测试,分辨率约为6 mL。在随后的研究中,认为浮力系统体积的变化是线性的,并且测量是准

确的。

浮力系统的回油依靠作用在内皮囊上的负压,回油时,先将内皮囊上的大气压力控制在 -0.03 MPa 。开始回油的同时,空气压力调节系统不间断工作,以位置腔内的微弱负压来保证回油的顺利进行。系统回油过程内皮囊体积的变化如图7所示,可以看出,在回油开始时刻,回油速度较快。随着回油量的增加,系统内负压减小,回油速度开始变慢。随着回油量的进一步增加,系统内空间越来越小,此时气压调节系统的调节作用相对变强,使系统以较快的速度回油。回油过程中,回油平均速度约 90 mL/min ,系统能耗稳定在 1 W 以内。

滑翔机运行在水下环境中时,浮力系统外皮囊受到海水压力的直接作用,从而影响浮力系统的工作性能。在不同测试压力下测试流量的变化,如图8所示。在外压为 0.1 、 2 、 2.5 MPa 的不同设置下,分别测试

了电机在 3000 r/min 与 4000 r/min 条件下的流量曲线。可以看出, 外部压力对浮力系统的工作效率有一定影响, 随着外压的逐步增大, 系统的流率有逐步减小的趋势, 在 3000 r/min 的条件下, 流率最多下降了 6 mL/min, 降低了 4.5%。4000 r/min 的条件下, 流率最多下降了 5 mL/min, 约占总流量的 2.8%。由此可见, 在外部压力增大的情况下, 泵的工作效率受到影响, 达到设定值需要的时间更长。对于需要精确操控的水下滑翔机, 可以基于这一实验结果对理论值进行修正, 以达到准确反映系统动态变化的目的。同时, 电机通过增大自身功率的方式维持转速, 如图 9 所示。在 0.1 MPa 的大气压力环境下, 电机以 3000 r/min 的转速输送油液需消耗 9 W 左右的能量, 而当外部环境压力为 2.5 MPa 时, 功耗为 30 W, 比大气压力条件下输油的功耗大了 3 倍多。

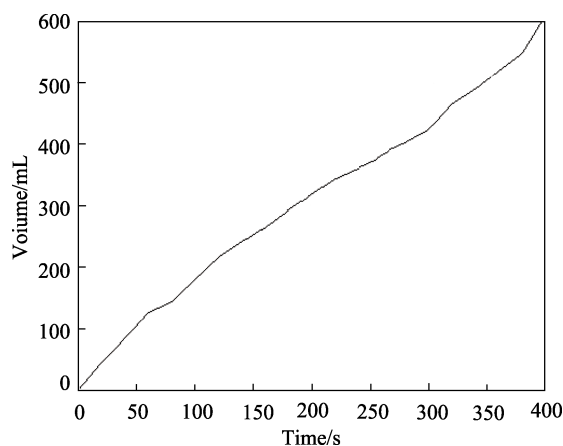


图7 回油曲线

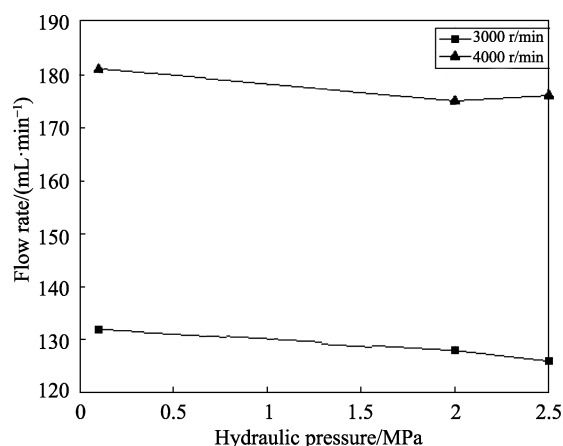


图8 压力对流率的影响

3 结论

笔者初步研究并设计了深海滑翔机的浮力调节系统, 基于理论模型确定浮力调节量参数, 系统通过可以调节正负压力的气压调节装置调节浮力系统内部压力, 以保证主泵的正常工作与系统的顺利回油。

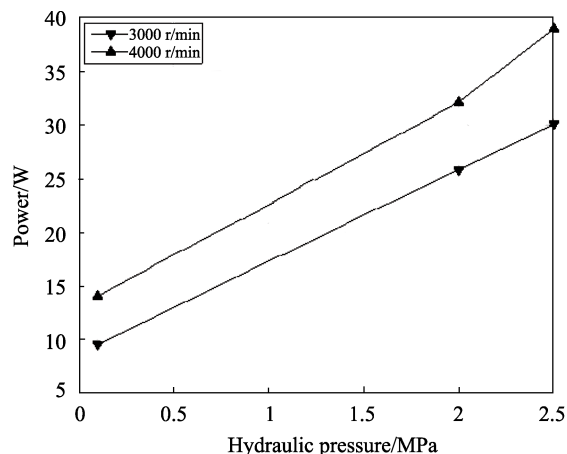


图9 压力对系统功耗的影响

对承压管路的有限元强度计算分析有力保证了系统运行的安全性。最后模拟滑翔机实际运行时的外压变化情况, 在一个压力模拟装置中试验研究了浮力系统的动态响应性能。

参考文献:

- [1] JONES C, ALLSUP B, DECOLLIBUS C. Slocum Glider: Expanding our Understanding of the Oceans[C]// Oceans-St John's. [s.l.]: IEEE, 2014.
- [2] ERIKSEN C C, OSSE T J, LIGHT R D, et al. Seaglider: A Long-range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 424-436.
- [3] SHERMAN J, DAVIS R E, OWENS W B, et al. The Autonomous Underwater Glider "Spray"[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 437-446.
- [4] CLAUSTRE H, BEGUERY L, PATRICE P L A. SeaExplorer Glider Breaks Two World Records Multisensor UUV Achieves Global Milestones for Endurance, Distance[J]. SEA Technology, 2014, 55(3): 19-22.
- [5] ZHANG S, YU J, ZHANG A, et al. Spiraling Motion of Underwater Gliders: Modeling, Analysis, and Experimental Results[J]. Ocean Engineering, 2013, 60: 1-13.
- [6] 王树新, 刘方, 邵帅, 等. 混合驱动水下滑翔机动力学建模与海试研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 19-27.
- [7] WEBB D C, SIMONETTI P J, JONES C P. Slocum: An Underwater Glider Propelled by Environmental Energy[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 447-452.
- [8] JENKINS S A, HUMPHREYS D E, SHERMAN J, et al. Underwater Glider System Study[J]. Scripps Institution of Oceanography, 2003: 1-242.
- [9] DAVIS R E, REGIER L A, DUFOUR J, et al. The Autonomous Lagrangian Circulation Explorer (ALACE) [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1992, 9(3): 264-285.
- [10] 周海亮, 侯巍, 王艳辉, 等. 水下滑翔机浮力驱动系统生存分析与试验[J]. 机械设计, 2015, 32(12): 1-5.
- [11] 杨海. 水下热滑翔机的温差能热机性能与运动控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.