

DOI: 10.7652/xjtuxb201812007

潜器浮力调节系统的低功耗控制策略

穆为磊¹, 邹振兴¹, 孙海亮², 杨友胜¹

(1. 中国海洋大学机电工程系, 266100, 山东青岛; 2. 北京宇航系统工程研究所, 100070, 北京)

摘要: 针对潜器浮力调节系统功耗较高、严重制约潜器续航里程的问题,以剖面浮标为例分析了潜器上浮和下潜的工作过程,发现了上浮过程功耗远大于下潜过程的现象,提出了一种上浮过程的低功耗控制策略。首先推导了柱塞泵额定转速运行时电机输出转矩与海水压强的函数关系式。采用 Matlab/Simulink 建立了无刷直流电机的速度闭环控制仿真模型,通过对仿真数据进行回归分析,分别获得了电机启动功耗和稳定运行功率关于输入转矩的关系式;然后在考虑海水密度随深度变化的条件下,推导出总功耗与调节次数的函数关系式。最后通过对总功耗函数进行数值求解,发现总功耗与调节次数呈非线性关系。计算结果表明 4 km 潜器上浮过程调节 16 次时系统功耗最低,比传统调节一次时节约能量 78.883 J,理论上节约能量 48.3%。

关键词: 潜器;浮力调节系统;低功耗;控制策略

中图分类号: TP273;U674.941 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)12-0044-06

A Control Strategy with Low Power Consumption for Buoyancy Regulation System of Submersibles

MU Weilei¹, ZOU Zhenxing¹, SUN Hailiang², YANG Yousheng¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100070, China)

Abstract: A control strategy with low power consumption for the flotation process of buoys is proposed to focus the problem that power consumption in buoyancy control system of submarines is high and severely restricts the range of submarines. A profile buoy is taken as an example to analyze the working process of submarines, and it is found that the power consumption of floating process is much greater than that of sinking process. Firstly, the relation between the output torque of a motor and the pressure of sea water is deduced. A simulation model of speed closed loop control for BLDCM (Brushless Direct Current Motor) is established by using Matlab/Simulink. The regression equation of start-up power consumption and output torque and the relationship between steady running power and output torque are obtained, respectively, through regression analysis of simulation data. Then, the functional relationship between total power consumption and regulation times is derived by considering the variation of seawater density with depth. Numerical solution of the total power consumption equation reveals that the total power consumption of the buoyancy control system is nonlinear with the number of adjustments.

收稿日期: 2018-06-20。 作者简介: 穆为磊(1986—),男,讲师;杨友胜(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61501418,51505036);山东省重点研发计划资助项目(2017GGX30106);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018MEE023)。

网络出版时间: 2018-09-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180924.1838.002.html>

Calculation results show that when the floating process is adjusted 16 times for a 4000 m buoyancy, the total power consumption is the lowest, and saves 78.883 J energy than that of being adjusted only once, that is, 48.3% save in theory.

Keywords: submersible; buoyancy regulation system; low power consumption; control strategy

随着人类认知海洋、开发海洋的逐步加快,研制大潜深、长航程的潜器成为研究热点^[1-2]。自主水下航行器、自主沉浮剖面观测浮标(以下简称“剖面浮标”)、载人深潜器和水下滑翔机^[3]等重要的海洋探测平台正得到广泛的关注和研究。浮力调节系统是潜器的重要组成部分,可用来补偿潜器浮力变化和驱动潜器运动^[4]。浮力调节系统可分为变容积式和变重力式两种。变容积式不改变潜器自身重量而改变潜水器的排水体积,使其浮力状态发生变化^[5],美国 ALVIN 号载人深潜器、日本 URASHIMA 号载人深潜器和中国 COPEX 号浮标^[6]等均采用变容积浮力调节系统。变重力式不改变潜器自身排水体积而改变潜器自身重量,使其浮力状态发生变化^[5],美国新 ALVIN 号、俄罗斯和平一号、日本 Shinkai 6500 号以及中国的 7 km 载人深潜器蛟龙号等均采用此方式^[6]。无论是变容积式浮力调节系统还是变重力式调节系统,单位距离的功耗是影响其长航程的核心问题,单纯的增加电池容量不能从根本上解决此问题,因此,研究浮力调节系统的低功耗控制策略,对减小潜器的驱动功耗,实现远航程深海科学考查、资源探测和海洋军事战略具有重要研究意义和应用价值^[7]。

变重力式浮力系统是由电机带动液压泵实现海水在密闭水舱和外部海水之间的流动,变容积式浮力系统是由电机带动液压泵实现液压油在内外油囊之间的流动,这两种方式均是由电动机带动液压泵转动做功,能耗模型是相同的。因此,可以将常用的变体积浮力调节系统作为对象,研究其在剖面浮标驱动中的低功耗控制策略问题。

剖面浮标根据设定程序在海洋中自主运动,通过搭载科学测量仪器采集海洋剖面的温度、电导率、溶解氧和硝酸盐等物理海洋要素和生物化学要素^[8-10]。目前,世界上主流的剖面浮标如 Deep SO-LO、Deep APEX、Deep NINJA 和 Deep ARVOR 等,其浮力调节装置相比于测试设备消耗了大量的功耗,因此研究低功耗的调节策略具有重要的使用价值。Petrzick 等采用连续低排量替代一次性大排量的调节方式,在 APEX-Deep 浮标中验证了该方式可降低总功耗^[11]。该方法实质上是将高背压的

泵调节问题转化为渐变低背压的泵调节问题,对高效低功耗的调节方式具有重要的启示作用。Kobayashi 等在浮标定速上浮控制研究中,通过计算发现 Deep NINJA 上浮速度在 0.08 m/s 以上时功耗会降低^[12],但未给出最低功耗控制策略。陈鹿等在综合考虑海水密度变化的前提下,提出分阶段启动电机的策略^[13]。每次电机启动 30 s,然后关闭电机,待浮标上浮速度小于 0.1 m/s 时再次启动电机,电机工作时间和速度阈值均为经验值。虽然以上控制策略对降低功耗有一定的作用,但是均没有给出浮标上浮的功耗模型及最低功耗的控制策略。Agrawal 和 Sumantr 等对变重力式浮力调节(unmanned underwater vehicle,UUV)的运动过程进行了模拟研究^[14-15],对建立潜器运动过程功耗模型具有借鉴意义。然而,这些运动过程均未考虑到海水密度变化对 UUV 浮力的影响。对于剖面浮标而言,海水密度变化对浮力调节系统的影响不可忽略。

基于此,在考虑海水密度变化的条件下,本文建立了电机速度闭环控制模型,获得了电机功耗与输入转矩的关系式,结合柱塞泵的海水压强与输入转矩的关系式,推导出浮力调节系统上浮功耗方程式。该方程式在忽略壳体变形影响下求解,可获得不同启动次数的调节功耗,从而可以求取最低功耗的系统调节参数。

1 剖面浮标运动过程

剖面浮标采用变体积式浮力驱动方式,其运动过程^[16]包括待命一下沉—漂流—再次下沉—上浮—传输数据 6 个阶段,如图 1 所示。

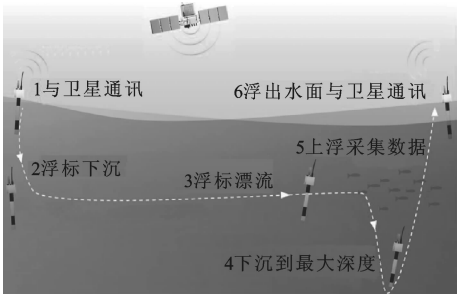


图 1 剖面浮标运动示意图

剖面浮标的具体运动过程如下。

(1)浮标水面漂浮阶段。此时浮力等于自身重力,当接收到下潜指令后开始下沉。

(2)浮标下潜阶段。电机带动泵将一定体积的液压油由外油囊抽入内油囊,浮标排水体积减少,浮力小于自身重力。随着深度增加海水密度逐渐增加,浮标浮力逐渐增加,当下降到一定深度时,浮力和重力基本相等,浮标悬停漂流。

(3)浮标深潜阶段。电磁阀和电动机再次打开,将液压油继续抽入内油囊,浮标排水体积减少,浮力小于自身重力,浮标下降至最大深度,浮力重力重新达到平衡。

(4)浮标上浮阶段。电机带动液压泵将液压油从内油囊抽至外油囊,浮标体积增大,开始上浮。排油体积最大时,液压泵停止工作。

(5)浮标通信阶段。剖面浮标到达水面,通过卫星向岸基中心发送测量数据,完成一个周期的测量。

由于剖面浮标在上浮过程中海水压强较大,电机驱动液压泵的能量消耗占整个测量周期中能量消耗的比重大,因此,需要重点研究上浮阶段的低功耗运动策略。

2 浮力驱动系统分析

剖面浮标浮力驱动系统常采用电动机驱动液压泵调节外油囊的体积,从而驱动浮标实现上浮或下潜运动,因此,要分析浮标上浮过程功耗需要分析不同压强下泵需要的输入转矩和不同扭矩下电机的功耗。

2.1 柱塞泵

剖面浮标最大下潜深度为 4 km,最深处海水产生的压强约为 40 MPa。因此,剖面浮标采用瑞士 BIERI 柱塞泵(型号 AKP103)作为浮力调节系统的液压泵,其最大工作压强为 50 MPa。该柱塞泵的输入功率为

$$P = \frac{pV_g nk}{\eta_t 60 \times 10^3} \quad (1)$$

式中: p 为工作压强; V_g 为泵流量,取 0.1 L/min; n 为转速; η_t 为总效率,取 0.8; k 为计算系数,取 1.05。

柱塞泵的输入转矩为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P60}{2\pi n} \quad (2)$$

式中: ω 为柱塞泵配流盘转速。

根据式(1)和式(2)可得输入转矩与海水压强的关系为

$$T = \frac{pV_g k}{20\pi\eta_t} \quad (3)$$

图 2 为泵压强与泵流量关系曲线。由图 2 可知,该柱塞泵转速为 1 000 r/min 时,排量随着压强增加而略微减小。为了方便计算忽略压强对泵流量的影响,即假设额定转速下泵排量为定值,将泵流量数值代入式(3)得

$$T = 2.1 \times 10^{-2} p \quad (4)$$

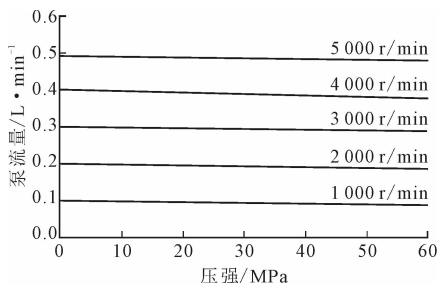


图 2 泵压强与泵流量的关系

柱塞泵转速为 1 000 r/min 时,若压强差为 40 MPa,则所需的输出转矩约为 0.83 N·m,压强与输出转矩的关系如图 3 所示。

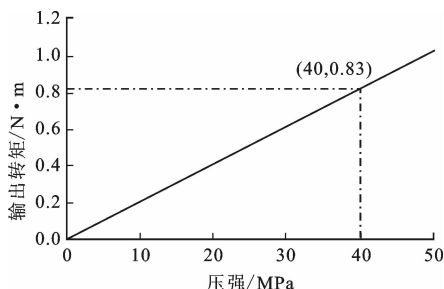


图 3 泵压强与电机输出转矩的关系

2.2 电机

浮力调节系统中电机选择 maxon-RE50 无刷直流电机,额定转速为 2 500 r/min。电机与柱塞泵之间连接减速器。通常,减速器传动效率较高可忽略减速器的功耗损失,因此,可认为电机的输出转矩与泵的输入转矩相等。根据上面的分析可知,泵所需的最大转矩为 1 N·m,因此无刷电机的最大输出转矩为 0.4 N·m。

采用 Matlab/Simulink 仿真平台搭建无刷直流电机速度 PI 闭环控制仿真模型^[17],仿真模型如图 4 所示。根据电机的规格参数,仿真模型中电机电感设置为 7.2×10^{-5} H,电阻设置为 0.103 Ω ,转矩常数设置为 3.85×10^{-2} N·m/A。根据压强与输入转矩的关系,设置不同的输出转矩,可以模拟电机启动至额定转速运行的过程,获得运行过程的电机转速、泵转速和功耗等数据。经过试验发现,PI 控制

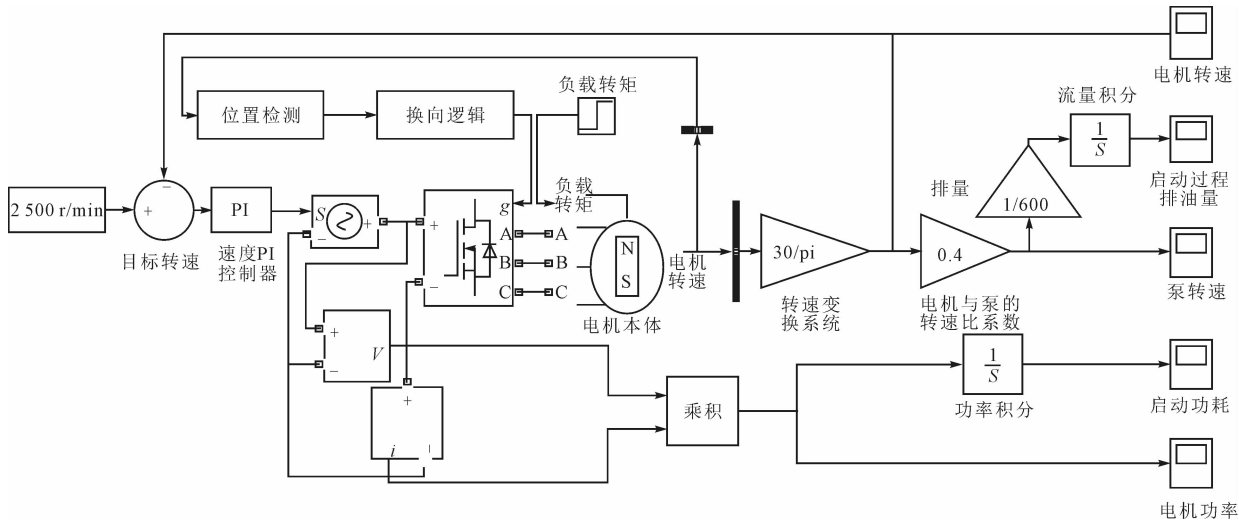


图 4 无刷直流电机 Simulink 仿真图

器积分和比例常数分别为 0.018 和 0.001 时电机的速度响应快、超调量小。在此参数下,电机启动 2 s 后达到额定转速,此过程的功耗称为启动功耗,其后的运行功耗称为额定功耗。在仿真系统中,无刷直流电机负载的取值范围为 0~0.4 N·m,取值间隔为 0.05 N·m,从而得到不同负载转矩下的启动功耗和稳定运行功率,如图 5 和图 6 所示。

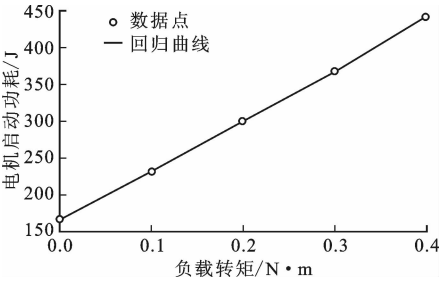


图 5 负载转矩与电机启动功耗曲线

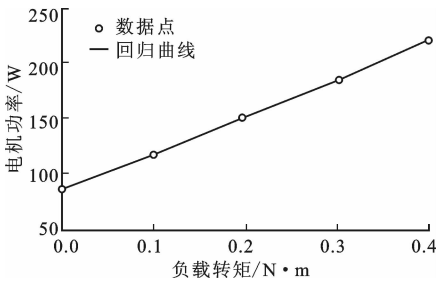


图 6 负载转矩与电机功率曲线

通过对负载转矩和启动功耗的数据点进行回归分析,发现两者程近似线性关系,电机启动功耗的表达式为

$$W_s = 666.7T + 166.7 \tag{5}$$

式中: T 为电机负载转矩。

通过对负载转矩和稳定运行功率的数据点进行

回归分析,发现两者程近似线性关系,电机稳定运行功率的表达式为

$$P_e = 333.3T + 83.3 \tag{6}$$

3 上浮过程功耗

在电机和柱塞泵分析的基础上,可以获得特定压强下抽出一定体积液压油需要的功耗。采用多次定量调节的策略,因此,可以建立整个上浮过程的总功耗模型。假设上浮时泵每次往外油囊抽出的液压油体积为

$$v = V/n \tag{7}$$

式中: V 为压油的总体积,取 720 mL; n 为抽油次数。

在每次调节完成时浮标所受的浮力大于自身重力,浮标上浮。上浮过程中海水密度随深度减小而减小,浮标所受浮力变小。当浮力等于重力时,浮标受力平衡,在水阻力的作用下停止运动,此时电机再次启动,重复上述过程直到浮出水面。

由于每次柱塞泵向外油囊抽入液压油的时间较短,假设在每一次抽油的过程中,浮标位置不变,海水压强保持不变,因此,不需要考虑浮标的运动过程而只需要考虑每次抽油前浮标的静止位置和状态即可。

南中国海水密度与深度的关系^[10]大体呈线性变化,如图 7 所示。200 m 以上海水密度随海水深度关系为

$$\rho = 0.004\ 804h + 1\ 026.54 \tag{8}$$

式中: h 为海水的深度。

式(8)可以变换为

$$h = 208.15\rho - 213\ 675.5 \tag{9}$$

当浮标重力与浮力平衡时,浮标悬停漂流,此

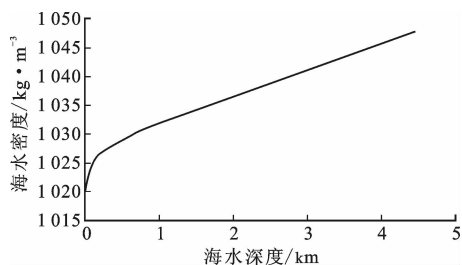


图7 中国南部海水密度曲线

时,浮标受力平衡,即

$$mg = \rho(h)gV_a \quad (10)$$

式中: m 为浮标的总质量; g 为重力加速度; $\rho(h)$ 为海水的密度; V_a 为浮标的总体积,包括浮标球体体积和外气囊的体积。

浮标所受到的海水压强为

$$p = \rho(h)gh \quad (11)$$

由式(9)~(11),可得

$$p = \frac{10^{-3}nmg}{nV_0 + (i-1)V} \left[\frac{2.08nm}{nV_0 + (i-1)V} - 2136.76 \right] \quad (12)$$

式中: i 为当前调节的次数; V_0 为浮标壳体体积。

将式(12)代入式(4),得

$$T_i = \frac{2.1 \times 10^{-6}nmg}{nV_0 + (i-1)V} \left[\frac{2.08nm}{nV_0 + (i-1)V} - 2136.76 \right] \quad (13)$$

式中: T_i 为第*i*次调节过程泵输入转矩。

已知 $V_0 = 0.02725 \text{ m}^3$, $V = 0.00073 \text{ m}^3$, 将其代入式(13),得

$$T_i = \frac{68488.94n^2}{[37.85n + (i-1)]^2} - \frac{1776.18n}{37.85n + (i-1)} \quad (14)$$

每次抽油功耗 W_i 分为启动功耗 W_s 和额定运转功耗 W_n 两部分, W_n 为第*i*次正常工作电机功率和时间得乘积,时间为每次应抽取的油量除以泵流量(启动过程很快,这里忽略启动过程抽油量),即 $t = 720/n(100/60) = 432/n$ 。因此,每次调节电机的功耗

$$W_i = (666.7T_i + 166.7) + \frac{(333.3T_i + 83.3)432}{n} \quad (15)$$

把式(14)代入式(15),可得

$$W_i = 666.7 \left[\frac{68488.94n^2}{(37.85n + (i-1))^2} - \frac{1776.18n}{37.85n + (i-1)} \right] + 166.7 + 432 \left(333.3 \left[\frac{68488.94n}{(37.85n + (i-1))^2} - \right. \right.$$

$$\left. \frac{1776.18}{37.85n + (i-1)} \right] + 83.3/n \} \quad (16)$$

浮标上浮过程的总功耗为

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (17)$$

4 结果与分析

假设 n 取值范围为 1 至 40, 计算各种调节次数的总功耗, 抽油次数与总功耗的关系如图 8 所示。从图中可以看出, 抽油次数与电机总功耗呈非线性关系。传统调节策略的抽油次数为 1, 此时电机的总功耗最大, 总功耗为 163 428 J。当抽油次数为 16 次时, 电机的总功耗最少, 总功耗为 84 545 J。最低功耗比单次调节功耗减少 78 883 J, 理论上节约能量 48.3%。

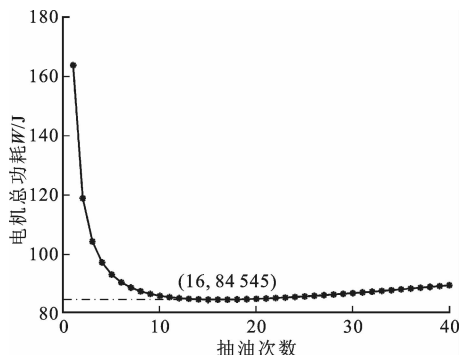


图8 抽油次数与电机功耗图

随着抽油次数的增加电机的总功耗先呈下降趋势, 这是因为随着调节次数增多, 抽油位置会不断的上升, 抽油的环境压强逐渐降低, 高背压大排量被调整为低背压小排量, 因此上浮功耗逐渐降低; 随着调节次数继续增加, 功耗又逐渐增加, 这是因为过多启动电机时, 电机启动功耗会比正常工作功耗的比重大, 即有用功相对减少, 所以超过最低点之后次数增加总功耗会变大。

5 结论

本文以变体积浮力调节系统驱动的剖面浮标为实例, 研究其上浮过程低功耗调节策略。通过建立电机功耗模型和泵排量特性模型, 获得了浮标上浮过程功耗方程, 通过对功耗方程进行求解, 得到上浮过程最优调节次数, 当上浮调节次数为 16 时, 总功耗最低。该控制策略将适用于采用浮力调节系统驱动的潜器, 如水下 AUV、水下滑翔机、剖面浮标以及载人潜水器等, 对减小潜水器的驱动功耗, 实现远航程深海科学考查、资源探测和海洋军事战略具有

重要研究意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 陈经跃, 刘银水, 吴德发, 等. 潜水器海水液压浮力调节系统的研制 [J]. 液压与气动, 2012(1): 79-83.
CHEN Jingyue, LIU Yinshui, WU Defa, et al. The development of a buoyancy adjustment system for submersibles [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(1): 79-83.
- [2] ZHENG Rong, WANG Yu, WU Jianguo. AUV buoyancy regulating device design and simulation analysis [C]// Applied Mechanics and Materials. Zurich, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2014: 150-157.
- [3] 杨燕, 孙秀军, 王延辉. 浅海型水下滑翔机技术研究现状分析 [J]. 海洋技术学报, 2015, 34(4): 7-14.
YANG Yan, SUN Xiujun, WANG Yanhui. Analysis of technical research on underwater glider in shallow sea [J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(4): 7-14.
- [4] 高世阳, 崔汉国, 张奇峰, 等. 深海油囊式浮力调节系统的研制 [J]. 液压与气动, 2016(10): 75-80.
GAO Shiyang, CUI Hanguo, ZHANG Qifeng, et al. The development of a deep-sea oil bladder type buoyancy adjustment system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016(10): 75-80.
- [5] 孙庆刚, 郑荣, 安家玉, 等. 基于浮力调节系统的 AUV 定深悬浮控制 [J]. 海洋技术学报, 2017, 36(6): 33-37.
SUN Qinggang, ZHENG Rong, AN Jiayu, et al. Depth dependent levitation control of AUV based on buoyancy regulating system [J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(6): 33-37.
- [6] 严安庆, 方学红, 杨邦清. 浅谈潜水器浮力调节系统的研究现状 [J]. 水雷战与舰船防护, 2009, 17(2): 55-59.
YAN Anqing, FANG Xuehong, YANG Bangqing. Primary discussion on status quo of UUV buoyancy adjustment system [J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2009, 17(2): 55-59.
- [7] TANGIRALA S, DZIELSKI J. A variable buoyancy control system for a large AUV [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 32(4): 762-771.
- [8] MANLEY J E, WEIRICH J B. Deep frontiers: technology for ocean exploration [J]. Sea Technology, 2005, 46(4): 10-15.
- [9] 许建平. 阿尔戈全球海洋观测大探秘 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 1-6.
- [10] 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 Lu, PAN Binbin, CAO Zhengliang, et al. Research status and prospect of automatic profile buoy [J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(2): 1-9.
- [11] PETZRICK E, TRUMAN J, FARGHER H. Profiling from 6,000 meters with the APEX-deep float [J]. Sea Technology, 2014, 55(2): 27-32.
- [12] KOBAYASHI T, AMAIKE K I, WATANABE K, et al. Deep NINJA: a new profiling float for deep ocean observation [C]// Proceeding of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: ISOPE, 2012: 454-461.
- [13] 陈鹿, 崔维成, 潘彬彬. 深海剖面测量浮标节能研究 [J]. 中国造船, 2017, 58(3): 128-135.
CHEN Lu, CUI Weicheng, PAN Binbin. Research on energy saving of deep sea profile measurement buoy [J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(3): 128-135.
- [14] AGRAWAL A, PRASAD B, VISWANATHAN V, et al. Dynamic modeling of variable ballast tank for spherical underwater robot [C]// 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 58-63.
- [15] SUMANTR B, KARSITI M N, AGUSTIAWAN H. Development of variable ballast mechanism for depth positioning of spherical URV [C]// IEEE International Symposium on Information Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [16] SERGE L R, VINCENT D, XAVIER A, et al. "Deep-Arvor": a new profiling float to extend the Argo observations down to 4 000 m depth [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2016, 33(5): 1039-1055.
- [17] VARSHNEY A, DWIVEDI B. Performance analysis of a BLDC drive under varying load [C]// IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-4.

(编辑 刘杨)