

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2014.0455

## 深海 AUV 下潜过程浮力变化研究

武建国, 徐会希, 刘 健, 王晓飞

(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)

**摘要:** 由于深海 AUV 的潜深大, 其下潜过程中温度、压力和盐度变化都较大, 这些参数的变化会显著地造成下潜过程中的浮力的变化, 从而极大地影响 AUV 航行性能. 针对该问题, 首先对影响浮力的主要因素进行了独立研究, 得到了各因素和浮力变化之间的关系; 然后将各因素的影响进行综合, 并结合海上试验数据, 得到了 6000 m 级 AUV 潜龙一号下潜深度和浮力变化的定量关系. 研究表明: 压力对浮力变化的影响最大, 浮力随着压力增加呈线性增加; 温度对浮力变化的影响 (和初始下潜的水面温度有关) 次之, 且其关系是非线性的; 盐度对浮力变化的影响最弱, 且其对浮力变化的影响随着潜深的增加而减小. 海上试验证明了分析结果的正确性, 可有效提高 AUV 配平效率.

**关键词:** 浮力变化; 深海 AUV; 热膨胀; 体积压缩

**中图分类号:** TP242.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0446(2014)-04-0455-06

### Research on the Buoyancy Change of Deep-sea Autonomous Underwater Vehicle in the Diving Process

WU Jianguo, XU Huixi, LIU Jian, WANG Xiaofei

(The State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** The buoyancy of deep-sea AUV (autonomous underwater vehicle) changes significantly because of the increasing diving depth caused variation of temperature, salinity and pressure. The buoyancy change will greatly affects the sailing performance of the AUV. Aiming at this issue, the main factors influencing the buoyancy are analyzed independently, and the relationship between each factor and the buoyancy change is given. Then using the analysis results of each factor and combined the data of the sea trial of the 6000 m depth rating AUV *Qianlong I*, the buoyancy changes with variance diving depths are calculated quantificationally in diving process for *Qianlong I*. The calculation results indicated that: The pressure has the primary impact on the buoyancy change, the buoyancy increasing linearly with pressure; the influence of the temperature on the buoyancy change (related to the sea surface temperature) is secondary, and the relationship is nonlinear; the salinity had the least impact on the buoyancy change, and the influences on the buoyancy change reduced with the increase of diving depth. The correctness of the analysis results are proved by the sea trial, and the efficiency of the AUV balancing can be effectively improved.

**Keywords:** Buoyancy change; deep-sea AUV; thermal expansion; volume compression

## 1 引言 (Introduction)

深海自治水下航行器 (AUV) 是一种复杂的水下工作平台<sup>[1]</sup>, 它是一个国家海洋开发与探测发展水平的重要标志. 国外较著名的大潜深 AUV 有美国 WHOI 开发的 ABE, 4500 m 级潜深的 SENTRY AUV, 后者具有更高的航行机动能力, 其开发的目的是用于替代 ABE<sup>[2-3]</sup>, 但后者应用中仍需要很长的配平时间; REMUS6000, BLUEFIN-21 和 Auto-Sub6000 都是高性能的深海 AUV<sup>[4-7]</sup>. 但是, 由于下潜过程中浮力会发生变化, AUV 使用过程中会

花很大的精力进行航行配平操作, 这一方面影响了深海 AUV 的使用效率, 另一方面也降低了使用的安全性.

CR-01 和 CR-02<sup>[8-9]</sup> 是我国最早开发的 6000 m 级海洋调查和开发工具, 主要用于深海锰结核区海底探测, 具有近海底地形地貌和浅底层剖面测量、近海底照相、水文参数测量等功能<sup>[8]</sup>, 并具有复杂海底自主航行和自主避障能力. 在深海海底石油与天然气、天然气水合物、大洋多金属结核和热液硫化物矿床等海洋矿产资源以及海洋生物资源的探测

方面具有广阔的应用前景,但是由于下潜过程浮力变化的原因,CR-01和CR-02使用时配平过程长,实际应用较少。

“潜龙一号”是中国科学院沈阳自动化研究所,在CR-01和CR-02基础上研发的,具有上述两代航行器相同的功能。针对深海AUV下潜过程的温度、盐度和压力变化会造成航行器浮力变化的问题,通过推导各因素对浮力的影响,得到浮力随下潜深度变化的规律,为大潜深AUV下潜过程的配平提供了理论依据。潜龙一号单次配平即可下潜成功,实用性极大地提高。

## 2 影响因素及分析 (Influencing factors and analysis)

AUV下潜过程中的浮力变化主要是AUV与海水的物理参数不一致引起的,如体积压缩率和温度收缩率。引起海水密度变化的原因主要包含温度、深度和盐度,而AUV的排水体积主要取决于下潜过程压力和温度的变化。

### 2.1 温度对浮力的影响

#### 2.1.1 温度对海水密度的影响

海水是一种成分复杂的混合溶液,平均而言1000g海水中含各类盐类约为35g。海水中主要的盐类含量差别很大,氯化物含量最高,占88.6%,其次是硫酸盐,占10.8%。其中,氯化钠的含量占各类盐类总量的77.75%<sup>[10]</sup>。

2%和4%的纯氯化钠盐溶液及纯水在常压下温度和密度的变化如图1<sup>[11]</sup>。图中,氯化钠溶液及纯水的密度随着温度变化采用二项式进行拟合,三种溶液的拟合R平方值均为0.999。采用拉格朗日线性插值,由4%和2%氯化钠溶液可得到3.5%氯化钠溶液在不同温度下的密度变化,如图1所示。

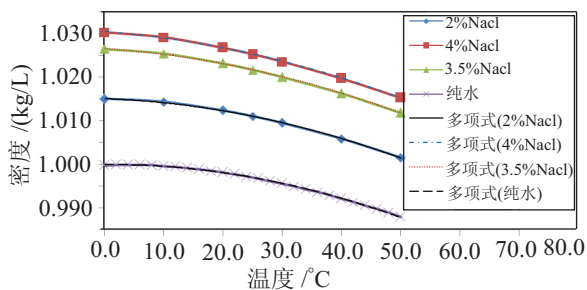


图1 NaCl溶液密度随温度变化关系

Fig.1 Density v.s. temperature of the NaCl solution

由图1可知,不同密度的氯化钠溶液及纯水随温度变化的趋势完全相同,其密度和温度之间的关系都可采用二次多项式进行描述。可以推断,海水

密度随温度的变化主要是由水的热胀冷缩性质引起的,和海水盐分相关性不大。为方便,本文以3.5%纯氯化钠溶液数据来替代海水。

通过拟合,溶液密度和温度的二次多项式如下:

$$\rho = at^2 + bt + c \quad (0 < t < 50) \quad (1)$$

其中, $\rho$ 为密度,kg/L; $t$ 为温度,°C, $t_0$ 表示水表面的初始温度; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为系数。依据浓度为3.5%的氯化钠溶液密度和温度的关系,海水密度和温度之间的关系可近似描述为

$$\rho_t = -4 \times 10^{-6}t^2 - 9 \times 10^{-5}t + 1.026 \quad (0 < t < 50) \quad (2)$$

按照式(1),下潜过程中温度降低 $\Delta t = t_0 - t$ 后,海水密度变化量可表述为

$$\Delta\rho_t = \rho_t - \rho_0 = a\Delta t^2 - (2at_0 + b)\Delta t \quad (3)$$

由式(3)可见,密度的变化量不仅和温度变化量有关,还和水面初始温度有关。由图1可知,在10°C~50°C区间,海水密度和温度近似成线性关系。为简化运算,方便工程实际应用,采用线性规律对上述溶液密度随温度的变化关系进行拟合:

$$\Delta\rho_t = -4 \times 10^{-6}\Delta t^2 + (8 \times 10^{-6}t_0 + 9 \times 10^{-5})\Delta t \quad (4)$$

对于3.5‰浓度氯化钠溶液,线性拟合R平方值均大于0.984,用来近似表述海水随温度的变换,具有较高的精度:

$$\rho_t = -3.4525 \times 10^{-4}t + 1.029 \quad (10 < t < 50) \quad (5)$$

按照式(5)的拟合关系,下潜过程中温度降低 $\Delta t$ 后,海水密度变化量可表述为

$$\Delta\rho_t = 3.4525 \times 10^{-4}\Delta t \quad (6)$$

#### 2.1.2 温度对AUV排水体积的影响

深海AUV由浮力材料、金属材料和有机材料几类组成。其中,浮力材料和金属结构件占AUV体积的绝大部分。一般,在航行器下潜过程中,最大温度变化范围为30°C~1°C,在这个范围内,这两种材料由于温度变化造成的热胀冷缩效应是线性的,则AUV下潜过程中,排水体积变化与温度减小量 $\Delta t$ 之间的关系为

$$\Delta V_i = V_0 - V_t = \sum 3\alpha_i \Delta t V_i \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (7)$$

其中, $\Delta V$ 为温度降低造成航行器总排水体积的减小量, $m^3$ ; $\alpha_i$ 为组成AUV的第*i*种材料体积随温

度变化的收缩率, 无量纲;  $V_i$  为该种材料在 AUV 上所占的体积,  $m^3$ ;  $\Delta t$  为温度变化量. 若将 AUV 看作是由 1 种材料组成的整体, 则有

$$\Delta V_i = 3\alpha_v \Delta t V_0 \quad (8)$$

2.1.3 温度对浮力的综合影响

综合温度对海水密度和对 AUV 排水体积两方面的影响, 在其它影响因素不变的条件下, 由于温度变化造成的 AUV 在下潜过程中的浮力变化为

$$\Delta B = B - B_0 = g(\Delta \rho_t V_0 - \rho_0 \Delta V_t - \Delta \rho_t \Delta V_t) \quad (9)$$

潜龙一号浮力材料的温度收缩率为  $\alpha_{BUO} = 2.4 \times 10^{-5}$ , 结构框架和耐压舱的材料均为铝合金, 温度收缩率为  $\alpha_{AL} = 2.2 \times 10^{-5}$ ; 浮力材料体积约为  $1.0 m^3$ , 铝合金体积约为  $0.35 m^3$ . 为排除测量受波浪等不确定因素的影响, 本文初始密度  $\rho_0$  规定为 40 m 深处的水密度. 南海试验测得  $t_0$  为  $25.35^\circ C$ ,  $\rho_0$  为  $1023.58 kg/m^3$ . 将上述参数代入式 (9) 可得潜龙一号在不同温度变化下的浮力变化量, 如图 2 所示. 下潜到水下 4100 m 时, 温度变化量为  $23^\circ C$ , 此时单纯由温度引起的浮力增加量为 44 N. 海水的初始温度越高, 温度变化对浮力的改变量就越大. 图 3 为海水温度和下潜深度的关系. 由图 3

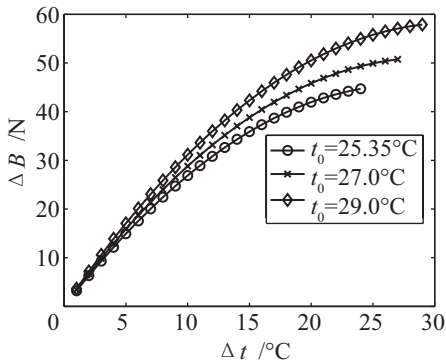


图 2 温度变化量与浮力变化量的关系  
Fig.2  $\Delta B$  v.s.  $\Delta t$

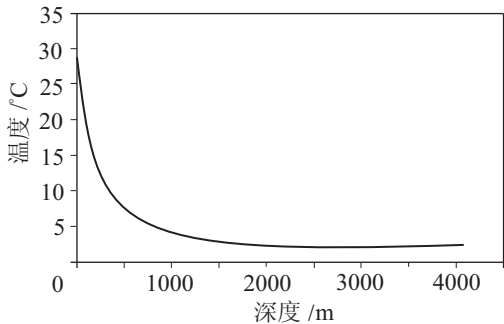


图 3 温度随下潜深度的变化  
Fig.3 temperature v.s. diving depth

可知, 海水的温度在下潜初期变化较为剧烈, 而随着下潜深度的增加, 海水温度变化逐步减小. 故 AUV 在下潜过程中, 温度对 AUV 的变化主要体现在下潜的初期, 当下潜深度超过 1000 m 时, 由于温度变化很小, 所引起的浮力变化就很小了.

2.2 盐度对浮力的影响

2.2.1 盐度对海水密度的影响

海水盐度是指 1000 g 海水中所含溶解的盐类物质的总量, 称为盐度 (绝对盐度). 为简化研究, 用氯化钠溶液代替海水进行盐度与密度关系的分析, 如图 4 所示 [11].

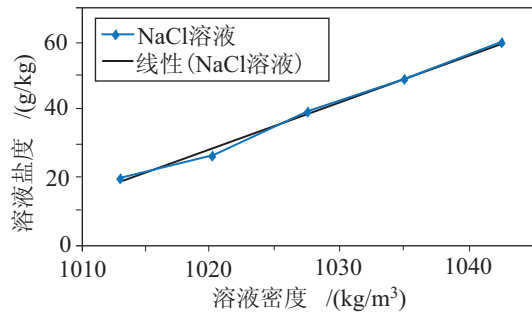


图 4 NaCl 溶液密度与盐度的关系  
Fig.4 Density v.s. salinity of the NaCl solution

由图 4 可以看出, 在一定盐度范围内, 氯化钠溶液的盐度和密度之间近似成正比例关系. 海水的盐度越高, 其密度越大. 依据氯化钠溶液盐度和密度的关系, 可近似得到海水的密度和盐度的表达式为

$$\rho = 709S + 1000.0 \quad (10)$$

其中,  $S$  为盐度 ( $\text{‰}$ ). 故 AUV 在盐度越大的海水中航行时其浮力就越大.

2.2.2 盐度对 AUV 排水体积的影响

由于组成深海 AUV 的材料一般不吸水或者吸水系数很低, 在其它因素不变的情况下, 认为 AUV 在不同盐度的海水中体积不发生变化, 其浮力和海水的盐度变化关系不大, 这里假设盐度对航行器的排水体积没有影响.

2.2.3 盐度对浮力的综合影响

综合盐度对海水密度和 AUV 排水体积两方面的影响, 在不考虑其它影响因素的条件下, 由于盐度变化, 造成深海 AUV 浮力变化的表达式为

$$\Delta B = 709\Delta SgV_0 \quad (11)$$

南海试验期间, 潜龙一号下潜过程中的盐度变化不大, 如图 5 所示. 若将平均盐度  $35\text{‰}$  作为基准, 整个下潜过程盐度变化最大量为  $0.5\text{‰}$ . 根据

式 (11) 可知, 由于盐度变化, 潜龙一号从水面下潜到 4100 m 浮力增加为 5.2 N.

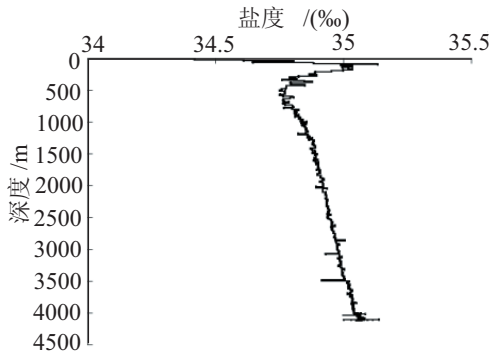


图 5 南海试验海区测量盐度随深度变化的情况

Fig.5 Salinity values tested at different depths in the South China Sea

### 2.3 压力对浮力的影响

#### 2.3.1 压力对海水密度的影响

一般情况下, 认为液体是不可压缩的, 但当压力很大时, 其体积压缩效应就不可忽略. 本文采用纯水替代海水去研究海水的压缩特性. 按照水的体积模量, 则在不考虑温度和盐度变化基础上, 海水在压强变化  $\Delta P$  后密度和密度变化量为

$$\rho_p = \rho_0 / (1 - \beta_w \Delta P) \quad (12)$$

$$\Delta \rho_p = \rho_0 \beta_w \Delta P / (1 - \beta_w \Delta P) \quad (13)$$

$$\Delta P = \rho_j g h \quad (14)$$

其中,  $\rho_0$  为表面海水密度;  $\beta_w$  为海水体积压缩率,  $\text{Pa}^{-1}$ ;  $\rho_j$  为航行器所处水域上方的平均密度, 可以近似用海水的平均密度代替;  $h$  为航行器的航行深度, m.

假设 AUV 体积不变, 海水密度 (随着深度增大而增大) 变化导致的 AUV 的浮力变化量为

$$\Delta B = \rho_0 g V_0 \Delta P \frac{\beta_w}{1 - \beta_w \Delta P} \quad (15)$$

设海水的压缩系数  $\beta_w$  近似等于水的系数, 为  $4.62 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1} \sim 4.25 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ [12]. 对于深海 AUV, 由于  $\Delta P$  的最大量级为  $10^6 \text{Pa}$ , 因此  $\beta_w \Delta P$  远远小于 1. 故式 (15) 可简化为

$$\Delta B = \rho_0 g V_0 \Delta P \beta_w \quad (16)$$

#### 2.3.2 压力对 AUV 排水体积的影响

AUV 在大深度航行过程中会受到很大水压作用, 由于材料在高压下的压缩性, 其受到压缩后体积会有所减小. 深海 AUV 一般由 2 类压缩性质不同的结构组成. 一类是由实心材料组成的结构, 如

浮力材料块和框架结构等, 一般为均质各向同性材料; 另一类则是耐压壳体结构, 一般由高强铝合金制造.

对于第 1 类结构, 根据材料的体积模量定义, 其受压后的体积变化量为

$$\Delta V_{1p} = \sum \beta_i \Delta P V_i \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (17)$$

其中,  $\Delta V_{1p}$  为压力造成第 1 类结构排水体积的变化量;  $\beta_i$  为组成航行体的第  $i$  种材料体积压缩率;  $V_i$  为该种材料在航行体上所占的体积;  $\Delta P$  为压强变化量, Pa, 见式 (14).  $\beta_i$  可采用式 (18) 计算得到:

$$\beta_i = 3 \times \frac{1 - 2\mu}{E} \quad (18)$$

其中,  $\mu$  为泊松比,  $E$  为弹性模量. 潜龙一号框架采用的铝合金材料 5A06, 其  $\mu = 0.33$ ,  $E = 68 \text{GPa}$ . 采用的浮力材料的泊松比  $\mu$  的范围为  $0.29 \sim 0.31$ ,  $E$  的范围为  $2500 \text{MPa} \sim 2700 \text{MPa}$ , 本文取  $\mu = 0.3$ ,  $E = 2500 \text{MPa}$ .

对于第 2 类耐压壳体结构, 其受压后体积压缩量不仅和构成该壳体的材料有关, 还和壳体的具体结构形式有关. 潜龙一号的耐压壳体为中间圆柱体和两端半球封头的结构形式, 其结构形式和参数如图 6 所示.

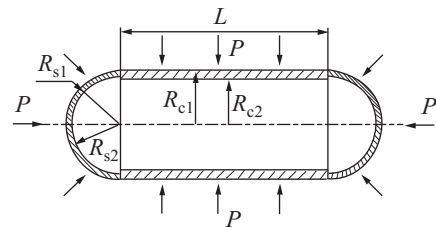


图 6 耐压壳体形式

Fig.6 Structure of the pressure hull

圆柱形耐压壳体的排水体积如式 (19) 所示. 由于每个耐压壳体结构包含 1 个圆柱体和 2 个半球体, 2 个半球壳体的体积为 1 个球体体积, 故耐压壳体的封头排水体积可按照球体体积计算公式 (20) 得到.

$$V_c = \pi R_{c1}^2 L \quad (19)$$

$$V_s = \frac{4}{3} \pi R_{s1}^3 \quad (20)$$

由式 (19)、(20) 可知, 在外压作用下, 两种几何体的参数  $R_{c1}$  和  $R_{s1}$  在压力影响下的缩小量为  $\Delta R_{c1}$  和  $\Delta R_{s1}$ , 则两几何体的体积的缩小量分别为

$$\Delta V_c = \pi (2 \cdot R_{c1} \cdot \Delta R_{c1} \cdot L + R_{c1}^2 \cdot \Delta L) \quad (21)$$

$$\Delta V_s = 4\pi R_{s1}^2 \cdot \Delta R_{s1} \quad (22)$$



由材料单向线性压缩量特性和壳体轴向和径向受力特性, 可得:

$$\Delta R_{c1} = -\frac{R_{c1} \cdot P}{E(R_{c1}^2 - R_{c2}^2)} \times [(1 - 2\mu) \cdot R_{c1}^2 + (1 + \mu) \cdot R_{c2}^2] \quad (23)$$

$$\Delta L = -\frac{R_{c1}^2 \cdot P}{E \cdot (R_{c1}^2 - R_{c2}^2)} \times (1 - 2\mu) \times L \quad (24)$$

$$\Delta R_{s1} = -\frac{R_{s1} \cdot P}{E(R_{s1}^3 - R_{s2}^3)} \times [(1 - 2\mu) \cdot R_{s1}^3 + \frac{1 + \mu}{2} \cdot R_{s2}^3] \quad (25)$$

式中:  $R_{c1}$  为圆柱体耐压舱外半径,  $R_{c2}$  为圆柱体耐压舱内半径,  $L$  为圆柱耐压壳体长度,  $R_{s1}$  为球体封头外半径,  $R_{s2}$  为球体封头内半径,  $\Delta R_{c1}$  为圆柱体耐压舱外半径压缩量,  $\Delta L$  为圆柱体长度压缩量,  $\Delta R_{s1}$  为球体封头外半径压缩量. 对于潜龙一号采用的高强铝合金 7075, 泊松比和弹性模量分别为  $\mu = 0.33$ ,  $E = 70 \text{ GPa}$ .

综合式 (21) 和 (22), 耐压壳体受到压力后产生的压缩量可表述为

$$\Delta V_{2p} = \sum (\Delta V_{ci} + \Delta V_{si}) \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (26)$$

其中  $\Delta V_{ci}$  和  $\Delta V_{si}$  分别表示第  $i$  个耐压壳体的圆柱体体积压缩量和球封头体积压缩量. 在大潜深航行过程中, AUV 的总体排水体积缩小量  $\Delta V_p$  为

$$\Delta V_p = \Delta V_{1p} + \Delta V_{2p} \quad (27)$$

若将航行器看作是由 1 种材料制作的实体, 则在压力的作用下存在等效的整体压缩率系数  $\beta_v$ , 且压缩体积为

$$\Delta V_p = \beta_v \Delta P V_0 \quad (28)$$

### 2.3.3 压力对浮力的综合影响

结合下潜深度对海水和航行器两方面的影响, 由下潜压力的变化造成的 AUV 浮力变化量为

$$\Delta B = B - B_0 = g(\Delta \rho_p V_0 - \rho_0 \Delta V_p - \Delta \rho_p \Delta V_p) \quad (29)$$

潜龙一号的浮力材料体积约为  $1.0 \text{ m}^3$ , 铝合金结构件体积约为  $0.070 \text{ m}^3$ , 具有 2 个外径为  $0.305 \text{ m}$  的电池舱, 1 个外径  $0.270 \text{ m}$  和 1 个外径  $0.296 \text{ m}$  的控制舱以及 3 个外径  $0.178 \text{ m}$  的电动机控制及应急舱, 还包括 1 个外径为  $0.120 \text{ m}$  的避碰舱. 依据式 (2) 和相关计算式, 可计算出当温度、盐度不变时, 浮力变化量随下潜压力变化的情况, 如图 7 所示.

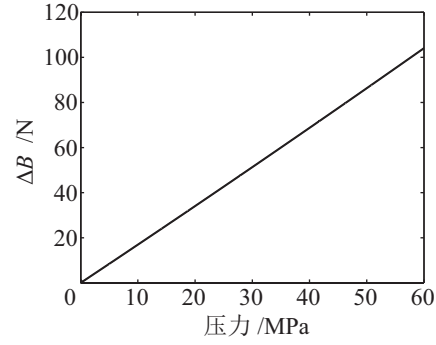


图 7 浮力变化量  $\Delta B$  和下潜压力的关系  
Fig.7 Buoyancy change  $\Delta B$  v.s. diving pressure

由图 7 可以看出, 潜龙一号的浮力增加量和压力变化成线性关系, 压力越大其浮力增加量越大. 为此, 下潜至  $4100 \text{ m}$  和  $5100 \text{ m}$  时浮力较在水面时增加了  $70.48 \text{ N}$  和  $88.1 \text{ N}$ . 由上述分析可知, 在大深度下潜过程中, 由压力引起的浮力增大是一个主要因素.

### 2.4 深度对浮力的影响

综合下潜深度对温度、盐度和压力的影响, 可得下潜深度对浮力变化的影响为

$$\Delta B = (\Delta \rho_t V_0 - \rho_0 \Delta V_t - \Delta \rho_t \Delta V_t) + 709 \Delta S g V_0 + g(\Delta \rho_p V_0 - \rho_0 \Delta V_p - \Delta \rho_p \Delta V_p) \quad (30)$$

若认为潜龙一号为复合材料制成的一个整体, 其体积随温度和压力变化的缩小量按照式 (8) 和式 (2) 计算, 则其浮力变化量可表示为

$$\Delta B = \rho_0 g V_0 \Delta t (\alpha_w - \alpha_v) + \rho_0 g V_0 \Delta P (\beta_w - \beta_v) - \rho_0 g V_0 (\alpha_w \alpha_v \Delta t^2 - \beta_w \beta_v \Delta P^2) + 709 \Delta S g V_0 \quad (31)$$

将潜龙一号的相关数据代入式 (31), 并结合试验海区的水文参数, 可得到潜龙一号在试验海区浮力变化量与下潜深度的关系, 如图 8 所示.

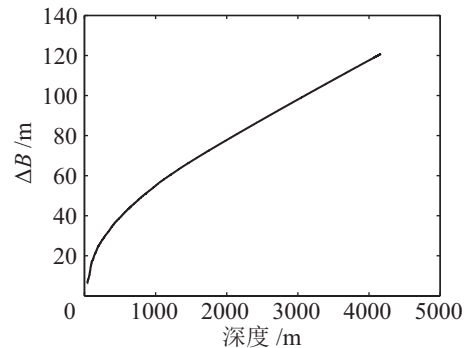


图 8 下潜深度和浮力变化量  $\Delta B$  关系  
Fig.8 Buoyancy change  $\Delta B$  v.s. diving depth

综合温度、盐度和深度对潜龙一号下潜深度的影响, 在下潜至  $4100 \text{ m}$  和  $5100 \text{ m}$  时其浮力增加量为  $119.7 \text{ N}$  和  $137.3 \text{ N}$ .

### 3 海试及结果分析 (Sea trials and the results analysing)

潜龙一号于 2013 年 4 月 20 日至 5 月 2 日期间在中国南海进行了海上试验。试验区域海深约为 4200 m, 共进行了 7 次下潜试验。在海试取得较为令人满意的结果后, 又在 2013 年 10 月的 29 次大洋科考中进行了试验性应用, 海域水深约为 5200 m, 实际下潜最大深度为 5080 m。其有效性和可靠性得到了进一步的验证。

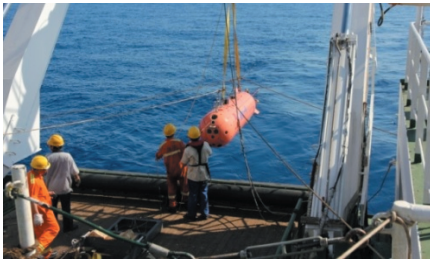


图 9 潜龙一号海试照片

Fig.9 Photo of Qianlong I in the sea trial

在两次海试过程中, 以水面下 40 m 的密度为基准密度  $\rho_0$ , 对航行器进行了配平。通过配平, 分别在 4100 m 和 5100 m 增加了 13.2 kg 和 15.2 kg 铅块后, 浮力状态和水面下 40 m 时的浮力状态基本相同。试验结果和计算结果吻合得非常好, 验证了上述计算的正确性。

将两次海试的试验数据代入式 (31) 可求得潜龙一号作为一个整体的热膨胀系数  $\alpha_v = 0.125 \times 10^{-3}$ , 体积压缩系数  $\beta_v = 2.89 \times 10^{-10}$ 。

### 4 结论 (Conclusion)

AUV 大深度潜浮过程的浮力变化会对其航行性能产生极大影响, 甚至会导致任务的失败和航行器的丢失。本文针对影响航行器浮力变化的 3 个主要因素, 结合潜龙一号的具体参数, 对 AUV 下潜过程的浮力变化进行了研究, 得到结论如下:

(1) 温度对浮力的影响是非线性的, 且和水面的初始温度有关。初始温度越高, 温度变化对浮力变化影响越大。

(2) 由于下潜过程盐度变化不大, 故盐度对深海 AUV 的影响相对较小, 且随着下潜深度的增加, 盐度的变化会进一步减缓。

(3) 压力对深海 AUV 的浮力影响较大且浮力增加和深度增加呈线性关系。

(4) 潜龙一号在南海下潜 4100 m 时, 由于温度、盐度和深度引起的浮力变化分别为 44 N、5.2 N 和 119.7 N。两次海试的配平数据和本文计算数据非常

吻合, 证明了本文提出的浮力变化量计算方法的正确性。

### 参考文献 (References)

- [1] Yuh J. Underwater robotics[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 932-937.
- [2] Wagner J K S, McEntree M H, Brothers L L, et al. Cold-seep habitat mapping: High-resolution spatial characterization of the Blake Ridge Diapir seep field[J]. Deep-Sea Research Part II, Topical Studies in Oceanography, 2013, 92(sup.): 183-188.
- [3] Henthorn R, Caress D W, Thomas H, et al. High-resolution multibeam and subbottom surveys of submarine canyons, deep-sea fan channels, and gas seeps using the MBARI mapping AUV[C]//OCEANS 2006. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [4] Sharp K M, White R H. More tools in the toolbox: The naval oceanographic office's remote environmental monitoring units (REMUS) 6000 AUV[C]//OCEANS 2008. Piscataway, IEEE, 2008: 1-4.
- [5] Purcell M, Gallo D, Packard G, et al. Use of REMUS 6000 AUVs in the search for the Air France Flight 447[C]//OCEANS 2011. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [6] Opderbecke J, Laframboise J M. AUVs for oceanographic science at IFREMER, project progress and operational feedback[C]//OCEANS 2007. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1-5.
- [7] McPhail S. Autosub6000: A deep diving long range AUV[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(1): 55-62.
- [8] 刘正元, 李一平. CR02 AUV 无动力下潜运动预报 [J]. 机器人, 2002, 24(5): 385-388.  
Liu Z Y, Li Y P. Prediction of AUV CR02 submerge without power[J]. Robot, 2002, 24(5): 385-388.
- [9] 李硕, 燕奎臣, 李一平. 6000 m AUV 深海试验研究 [J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 1-6.  
Li S, Yan K C, Li Y P. Deep-sea test of 6000m AUV[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(4): 1-6.
- [10] 郭琨. 海洋手册 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984.  
Guo K. Marine handbook[M]. Beijing: China Ocean Press, 1984.
- [11] 北京石油化工工程公司. 氯碱工业理化常数手册 [M]. 北京: 化工工业出版社, 1988.  
Beijin Petroleum Chemical Engineering Company. Chlor-alkali industry physicochemical constants manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [12] 张康达, 洪起超. 压力容器手册 [M]. 北京: 劳动人事出版社, 1987.  
Zhang K D, Hong Q C. Pressure vessel handbook[M]. Beijing: China Labor and Social Security Press, 1987.

### 作者简介:

武建国 (1980-), 男, 博士, 副研究员。研究领域: 自治水下机器人, 水下对接系统, 水下滑翔机。

徐会希 (1975-), 男, 硕士, 副研究员。研究领域: 自治水下机器人。

刘健 (1962-), 男, 硕士, 研究员。研究领域: 自治水下机器人, 水下机器人控制。