

# 全海深 ARV 浮力配平计算方法

陆 洋<sup>1,2</sup>, 唐元贵<sup>1,2</sup>, 王 健<sup>1,2</sup>, 陈 聪<sup>1,2</sup>, 闫兴亚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110169; 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:** 全海深 ARV (自主遥控水下机器人) 下潜至马里亚纳海沟, 机器人工作环境温度降低、海水压力增大, 会引起载体结构、补偿油体积变化。根据深渊海水密度、重力加速度和机器人体积的变化, 计算得到机器人浮力状态的变化量, 从而计算机器人浮力配平。通过公式推导并结合“海斗号”ARV 深潜数据和补偿油压缩实验数据, 得到全海深 ARV 浮力配平计算方法。其主要包括海水密度测算、马里亚纳海沟重力加速度测算、机器人结构和补偿油排水体积变化测算。计算得出在 11 000 m 深度实现浮力配平所需的压载为 8.9 kg。完成“海斗号”ARV 浮力配平, 保障机器人深渊工作环境浮力与重力匹配, 成功进行了多次马里亚纳海沟万米深潜。本文方法为全海深水下机器人浮力配平提供了理论计算依据。

**关键词:** 自主遥控水下机器人; 浮力匹配; 体积变化; 补偿油; 马里亚纳海沟

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2021)-01-0074-07

## A Calculation Method of ARV Buoyancy Trim at Full-Ocean Depth

LU Yang<sup>1,2</sup>, TANG Yuanguai<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1,2</sup>, CHEN Cong<sup>1,2</sup>, YAN Xingya<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** When a full-ocean depth ARV (autonomous and remotely-operated vehicle) dives to Mariana Trench, the vehicle structure and the volume of compensation oil will change due to the pressure increase and temperature fall of seawater in the working environment. Taking the abyssal seawater density, gravity acceleration and robot volume change into consideration, the change amount of the robot buoyancy state is calculated, so as to calculate the robot buoyancy trim. A calculation method of buoyancy trim for the full-ocean depth ARV is obtained through formula derivation, combining with the experimental data of *Hadal* ARV and the compression experiment data of compensation oil. It mainly includes seawater density calculation, Mariana trench gravity acceleration calculation, the volume change measurement of the robot and compensation oil. The ballast for buoyancy trim at 11 000 m depth is calculated to be 8.9 kg. The buoyancy trim of *Hadal* ARV ensures that the buoyancy and gravity match suitably in abyssal working environment. Several sea trials at Mariana Trench are conducted. The proposed method provides a theoretical calculation basis for buoyancy trim of the full-ocean depth underwater robots.

**Keywords:** autonomous and remotely-operated vehicle (ARV); buoyancy trim; volume change; compensation oil; Mariana Trench

## 1 引言 (Introduction)

海洋中深度大于 6500 m 的海域被称为“深渊”, 深渊区域大深度、超高压的工作环境对于水下机器人是十分严峻的挑战, 因此人类对深渊的认知还在初级阶段<sup>[1-2]</sup>。目前, 海洋深渊探索是水下机器人的一个重要发展方向。深渊水下机器人领域仅美国的 Nereus HROV (hybrid ROV)<sup>[3-4]</sup>、日本的 Kaiko ROV (remotely operated vehicle)<sup>[5]</sup> 和中国的“海斗号”ARV (autonomous and remotely operated vehicle) 在马里亚纳海沟完成过万米无人深潜<sup>[6-7]</sup>。

ARV 将 AUV (autonomous underwater vehicle) 和 ROV 的部分技术融为一体。ARV 的 ROV 工作模式与传统 ROV 相比, 作业范围增大、母船甲板系统简化、对母船支持要求降低但作业能力也相应减弱<sup>[8]</sup>。ARV 的 AUV 工作模式, 其特点为巡航作业时可进行实时监控, 一旦发现兴趣点, 即可切换为 ROV 模式进行机械手作业。

本文研究对象为全海深 ARV 即“海斗号”, 其最大工作深度为 11 000 m, 主要目标工作区域为深渊海沟, 拥有小范围巡航探测能力。水下机器人浮力状态会影响其航行效率、定点作业能力, 目前国

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0300800)。

通信作者: 唐元贵, tyg@sia.cn 收稿/录用/修回: 2020-02-14/2020-04-02/2020-04-03

内“蛟龙号”“深海勇士号”、日本的“深海 6500”、美国的“Alvin”，其浮力调节原理都是通过液压系统调节压舱水，这种浮力调节系统较为复杂，不适用于小型无人水下机器人。抛撒铅粒改变重力调节方式只能单向调节并且只能调节一次，因此未被广泛应用。目前水下机器人普遍采用吸排油或吸排水浮力调节，关键部件是高压泵，但目前没有产品能够在全海深 115 MPa 的压力下实现体积、重量、效率都适用于“海斗号”ARV。传统 AUV 计算水下机器人的压缩量以及不同深度下浮力的增加量，可以预估出工作深度所需的浮力配置，再通过海上试验的方式进行修正<sup>[9]</sup>。

“海斗号”ARV 与传统 AUV 浮力配平相比存在 3 点特殊性。首先为全海深范围，深度达到 11 000 m；其次 ARV 内部电子控制舱多为充油补偿舱体，计算载体结构体积压缩量以及浮力增加量时与传统 AUV 不同；最后 ARV 通过微细光纤可以与水面甲板单元实时通信，获得机器人实时数据，从而推断出机器人实际浮力状态。

## 2 ARV 浮力配平计算 (Calculation of the ARV buoyancy trim)

ARV 的浮力配平与深海工作环境有直接关系，大深度下海洋环境会改变“海斗号”ARV 的体积、载体平均密度以及重力加速度，并且不同区域、不同深度下海洋参数也会变化，例如海水密度、温度、盐度、压力等，两方面共同作用从而改变水下机器人的静力学状态。

### 2.1 ARV 浮力配平计算方法

浮力配平对水下机器人至关重要，ARV 中性浮力是航行和作业的效率最优点。“海斗号”ARV 采用推进器和旋转舵板一体化设计，当舵板垂直时，推进器只能提供垂向推力，因此浮力配平偏离越大，推进器需要提供垂直方向分量越大，机器人航行效率越低。本文研究浮力配平计算，因此仅考虑机器人垂直方向受力。

假设深渊海洋流动对载体垂向受力影响为 0，对载体垂直方向进行力学分析，得到垂向静力学平衡方程：

$$\tau_d = \mathbf{G}_d + \mathbf{F}_d + \mathbf{f}_d \quad (1)$$

其中， $\tau_d$  为  $d$  深度下机器人所需的合力，静止状态下水下机器人浮力配平， $\tau_d$  的期望值为 0； $G_d$  为  $d$  深度下载体所受重力， $F_d$  为  $d$  深度下所受推进器垂向推力，在水下机器人浮力配平时，载体推进器

$F_d$  设定为 0； $f_d$  为  $d$  深度下载体的浮力。由于机器人零部件繁多、材料结构形式多样，并且补偿舱内部补偿油体积压缩值是通过实验数据拟合计算得出的，因此计算偏差不可避免。

ARV 所受重力为

$$G_d = \sum_{a=1}^n m_a g_{\Phi d} \quad (2)$$

其中  $g_{\Phi d}$  是维度为  $\Phi$ 、深度为  $d$  时的重力加速度。

根据公式可以看出， $G_d$  与载体质量和重力加速度相关，载体零部件质量为固定值，不会随着位置而变化，ARV 重力分量与所在纬度和目标深度相关。水下机器人是由  $n$  个零部件组成，第  $a$  个零部件质量记作  $m_a$ ，则  $g_{\Phi d}$  就成为计算的关键。

$$f_d = \sum_{a=1}^n V_{aTd} \rho_d g_{\Phi d} \quad (3)$$

$\rho_d$  为深度为  $d$  时的海水密度， $V_{aTd}$  为第  $a$  个零部件在海水深度为  $d$  时的体积，ARV 零部件体积  $V_{aTd}$  与外部压力和温度相关。

ARV 载体平衡时，规定重力方向为正：

$$0 = \sum_{a=1}^n m_a g_{\Phi d} - \sum_{a=1}^n V_{aTd} \rho_d g_{\Phi d} \quad (4)$$

#### 2.1.1 海水密度测算

根据平衡方程可以看出，重力加速度、机器人零部件体积和海水密度是方程的 3 个变量，根据式 (4) 可以计算水下机器人所需压载配置。

根据水下机器人海试经验，密度变化对平衡方程影响权重最大，因此海水密度的准确计算对水下机器人至关重要。

通过测量海水温度、盐度、电导率可计算出海水密度，SEASOFT-Win32:SBE Data Processing 手册给出的密度计算公式为

$$\rho_i = \frac{A_0 + A_1 \cdot t_i + A_2 \cdot t_2 + A_3 \cdot t_3 + A_4 \cdot t_4 + A_5 \cdot t_5 + (B_0 + B_1 \cdot t_i + B_2 \cdot t_2 + B_3 \cdot t_3 + B_4 \cdot t_4) \cdot s_i + (C_0 + C_1 \cdot t_i + C_2 \cdot t_2) \cdot s_{32} + D_0 \cdot s_i \cdot s_i}{1 - \frac{kw + (FQ_0 + FQ_1 \cdot t_i + FQ_2 \cdot t_2 + FQ_3 \cdot t_3) \cdot s_i + (G_0 + G_1 \cdot t_i + G_2 \cdot t_2) \cdot s_{32} + (aw + (i_0 + i_1 \cdot t_i + i_2 \cdot t_2) \cdot s_i + J_0 \cdot s_{32}) \cdot p_i + (bw + (M_0 + M_1 \cdot t_i + M_2 \cdot t_2) \cdot s_i) \cdot p_i \cdot p_i}{P_i}} \quad (5)$$

### 2.1.2 重力加速度计算

ARV 做浮力配平计算时, 根据平衡方程,  $g_{\Phi d}$  可约去, 但  $g_{\Phi d}$  会影响 ARV 上浮抛载的质量计算. 上浮抛载是无动力上浮型水下机器人最重要的部件之一.

当 ARV 完成巡航及定点作业任务时, 通过机械手采集位于海底的深海样品, 因此其密度定大于海底海水密度, 采集后相对于水下机器人可视为负载. 目前 ARV 所采集样品的质量无法直接测量, 只能通过机械手负载能力、采样篮容积、视觉信息和深海岩石泥样密度, 综合预计估算出工作深度海水中样品负浮力为  $W$ .

设定上浮压载为  $B$ , 此时  $T$  为工作区域环境温度,  $d$  为工作海域深度, ARV 抛出上浮压载后平衡方程为

$$\begin{aligned} \tau_d &= \sum_{a=1}^{n-1} m_a g_{\Phi d} - \sum_{a=1}^{n-1} V_{aTd} \rho_d g_{\Phi d} + W \\ &= W - \frac{G_B}{g_{\Phi H}} g_{\Phi d} + V_{BTd} \rho_d g_{\Phi d} \end{aligned} \quad (6)$$

$G_B$  为 ARV 上浮压载在测量点所称的重量,  $g_{\Phi H}$  为测量点重力加速度,  $H$  为测量地所在海拔高度,  $\Phi$  为测量地所在纬度.

重力加速度受纬度、高度、地形方面影响, 陆地上重力加速度为

$$\begin{aligned} g_{\Phi 0} &= 9.806651 - 0.00265 \cos 2\Phi + \\ &\quad 6.3868 \times 10^{-5} \cos 2\Phi - 4.5 \times 10^{-5} \\ g_{\Phi H} &= g_{\Phi 0} - 3.086 \times 10^{-6} H + \\ &\quad 1.118 \times 10^{-6} (H - H') \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) 为张昆在 2011 年给出的陆地上重力加速度改进计算公式<sup>[10]</sup>, 其中  $H'$  是以测量点为中心、半径为 150 km 范围的平均海拔高程, 单位为 m; 常数项单位为  $\text{m/s}^2$ .

$g_{\Phi d}$  为深度为  $d$  的海域的重力加速度, 由于海洋深渊海域的地形目前尚无精确测量, 无从知晓其对重力加速度的影响, 只能通过已有数据进行估算. 首先通过海上重力加速度计算模型 DTU13<sup>[11]</sup> 进行海洋表面  $g'_{\Phi 0}$  重力加速度计算.

根据以上公式, 将中国科学院沈阳自动化研究所和马里亚纳海沟的经纬度、海拔高度代入即可得到表 2.

假设重力加速度与深海垂直深度成线性关系, 根据美国全国海洋学数据中心 (NODC) 马里亚纳海沟浅海重力加速度数据, 忽略海沟底部地形影

响, 假定海沟重力加速度与深度成正比, 即可推算出深海重力加速度,  $g_{\Phi d}$  重力加速度计算公式为

$$g_{\Phi d} = g'_{\Phi 0} \left( 1 - 2.263157810^{-7} \frac{d}{d^*} \right) \quad (8)$$

其中  $d^*$  为 1 m.

表 2 建造地与试验地的重力加速度

Tab.2 Gravitational accelerations at the construction site and test site

地点	海拔 $H$ /m	经纬、纬度	重力加速度 /( $\text{m/s}^2$ )
中国科学院沈阳自动化研究所	51	E123°25'31.18" N41°48'11.75"	9.799297
马里亚纳海沟海域	0	E142°35'20.04" N11°21'38.13"	9.77909

### 2.2 上浮压载质量设计

ARV 要求到达水面后载体顶部通讯设备露出海面, 便于发射信号以及进行人工搜索. 确保 ARV 到达水面后天线能完全露出水面, 此时所需要正浮力记作  $Q$ ,  $Q$  值可通过 ARV 在海面重力、浮力、重心浮心以及天线布局位置计算得出.

随着 ARV 上浮, 海水密度减小, 使载体浮力减小; 上浮过程中机器人所受压力减小, 使载体浮力增大. ARV 到达海面且未有零件露出水面时平衡方程为

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \sum_{a=1}^{n-1} m_a g_{\Phi 0} - \sum_{a=1}^{n-1} V_{a0} \rho_0 g_{\Phi 0} + W_0 \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} m_a g_{\Phi d} - \sum_{a=1}^{n-1} V_{aTd} \rho_d g_{\Phi d} + W + \sum_{a=1}^{n-1} \Delta_a \\ &= W + \sum_{a=1}^{n-1} \Delta_a - \frac{G_B}{g_{\Phi H}} g_{\Phi d} + V_{BTd} \rho_d g_{\Phi d} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $W_0$  为所采集的样品在海面时受到的垂向外力,  $\Delta_a$  为零件在海底与在海面所受外力之差,  $t$  为海面温度.

根据以上论述, 当  $\tau_0 = Q$  时, 根据海面平衡方程, 可计算出压载质量:

$$m_B = \frac{Q - \sum_{a=1}^{n-1} m_a g_{\Phi d} + \sum_{a=1}^{n-1} V_{aTd} \rho_d g_{\Phi d}}{g_{\Phi d} + \frac{(\beta_B \Delta T + (\Delta P / K_B)) \rho_d g_{\Phi d}}{\rho_B}} \quad (10)$$

其中  $\beta_B$  和  $K_B$  分别为上浮压载体积热膨胀系数和体积模量,  $\rho_B$  为标准环境下的压载密度,  $\beta_B$ 、 $K_B$ 、 $\rho_B$  都可查表得到.  $\Delta T$  为海底环境下工作温度与标准环境温度的差值,  $\Delta P$  为海底工作环境下压强与标准环境压强的差值. 标准环境指在 1 个标准大气压下温度为 23°C 的环境.

### 3 ARV 体积变化计算方法 (Calculation method of the volume change of ARV)

根据式 (4)(6)(9) 可以看出, 零部件体积变化对载体工作状态下的浮力平衡计算和上浮压载质量计算都至关重要。

#### 3.1 ARV 零部件分类

ARV 零部件体积变化主要受到压强与温度的影响。万米 ARV 下潜过程中, 机器人载体有充分的时间与海水进行热量交换, 因此假设 ARV 到达工作深度后, 其零部件温度与环境温度相同。

根据体积变化的计算方法, 可将全海深 ARV 零部件分为 3 类:

1) 实心固体, 例如全海深浮力材料、机器人龙骨框架合金、传感器连接件等。

2) 耐压舱体, 例如 CTD (温盐深剖面仪)、深度计、高度计、惯导耐压舱、声学设备耐压舱等。

3) 补偿舱体, 例如控制单元补偿舱、推进器补偿舱等。补偿舱是由壳体、内部电子元器件零件、电器绝缘油、补偿器构成, 其中电器绝缘油的体积变化是补偿舱体积变化的关键因素。

补偿舱内部除绝缘油外, 其零件体积变化计算方法与实心固体计算方式一致。

#### 3.2 实心固体和耐压舱体体积变化计算方法

ARV 包含  $i$  个密度均匀的零部件、 $j$  个耐压舱体、 $k$  种电器绝缘油, 因此 ARV 在工作环境下的排水体积为

$$\sum_{a=1}^n V_{aTd} = \sum_{a=1}^i V_{aTd} + \sum_{a=1}^j V_{aTd} + \sum_{a=1}^k V_{aTd} \quad (11)$$

耐压舱体的体积变化不仅受自身材料影响, 而且与结构形式相关, 耐压舱结构形式如图 1 所示。

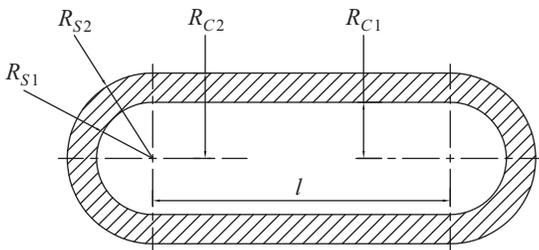


图 1 水下机器人耐压舱  
Fig.1 Pressure cabin of the underwater robot

潜水器耐压舱不外乎为球形、垂直端面圆柱形、球形端面圆柱体, 球形和垂直端面圆柱形可视为球形端面圆柱体在长度为 0 和球半径为 0 条件下的简化模型。

体积变化主要受温度差和压强差影响, 实心固体体积变化为

$$\sum_{a=1}^i V_{aTd} = \sum_{a=1}^i V_{a0}(\beta_a \Delta T_d + \Delta P_d / K_a) \quad (12)$$

其中,  $V_{a0}$  为标准环境下的零部件体积,  $\Delta T_d$  为  $d$  深度下海水环境与标准环境的温度差值,  $\Delta P_d$  为  $d$  深度下海水环境与标准环境的压强差值。

根据圆柱体和球体体积公式, 将第  $j$  个耐压舱标准环境下体积与深海工作环境下体积相减, 即可得到耐压舱体积减小量。

耐压舱体积计算公式为

$$\sum_{a=1}^j V_{aTd} = \sum_{a=1}^j (V_{a0} + 4\pi R_{as2}^2 \Delta R_{as2} + 2\pi R_{ac2} \Delta R_{ac2} + \pi R_{ac2}^2 \Delta l_a) \quad (13)$$

其中  $V_{a0}$  为标准状态下耐压舱的原始体积,  $\Delta R_{as2}$ 、 $\Delta R_{ac2}$ 、 $\Delta l_a$  分别为  $R_{as2}$ 、 $R_{ac2}$ 、 $l_a$  受到深海高压作用和低温作用的变化量。

$$\Delta R_{as2} = \frac{-R_{as2} \Delta P_d}{E_a (R_{as2}^3 - R_{as1}^3)} \left[ (1 - 2\mu) R_{as2}^3 + \frac{1 + \mu}{2} R_{as1}^3 \right] + \frac{\beta_a}{3} \Delta T_d (R_{as2} - R_{as1}) \quad (14)$$

$$\Delta R_{ac2} = \frac{-R_{ac2} \Delta P_d}{E_a (R_{ac2}^2 - R_{ac1}^2)} \left[ (1 - 2\mu) R_{ac2}^2 + (1 + \mu) R_{ac1}^2 \right] + \frac{\beta_a}{3} \Delta T_d (R_{ac2} - R_{ac1}) \quad (15)$$

$$\Delta l_a = \frac{-R_{ac2}^2 \Delta P_d}{E_a (R_{ac2}^2 - R_{ac1}^2)} (1 - 2\mu) l_a + \frac{\beta_a}{3} \Delta T_d l_a \quad (16)$$

将式 (14) ~ (16) 代入式 (13) 即可计算出工作环境下的耐压舱体积<sup>[9]</sup>。

#### 3.3 补偿油体积变化计算方法

水下机器人航行控制单元、避碰单元、推进单元、应急单元、控制电池、动力电池都放置在主动补偿舱内, 全部动力传动单元都通过补偿舱进行密封, 补偿舱系统约占 ARV 质量的 30%。因此电器绝缘油的体积变化对 ARV 整体浮力变化产生影响。

当压强增加、温度降低时, 补偿舱内部补偿油的体积减小。需要预先计算出减小的体积, 并按照一定安全系数确定油品补偿量, 从而保证补偿舱内外压平衡。补偿油是通过多种无硫基础油调制而成, 其弹性模量会随着液体压强的不同而变化。为揭示电器绝缘油体积与压强的关系, 进行电器绝缘油压缩试验, 借鉴 Tsubouchi 的试验方法, 通过高精度柱塞泵配合直线电阻计, 已知柱塞空腔面积,

即可得到不同压力下润滑油体变化量. 实验过程中每 5 MPa 为一单位进行升压, 待升压平稳后读取直线传感器数据, 根据柱塞空腔面积即可求出体积变化量, 从而计算出体积模量和补偿油压缩率.

ARV 所采用 Diala S4ZX-A 补偿油弹性模量和压缩率, 如图 2、图 3 所示, 图中红、蓝 2 条曲线分别为升压和降压阶段.

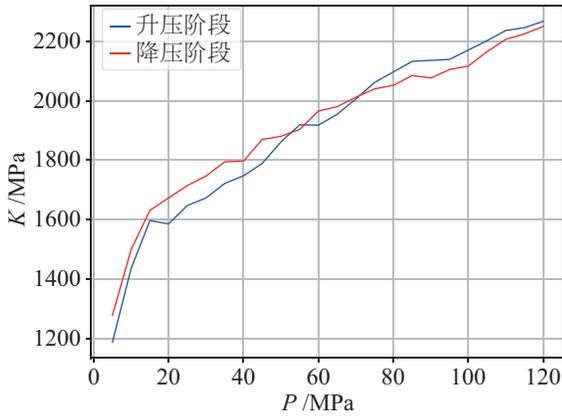


图 2 补偿油的割线弹性模量与压力的关系

Fig.2 Relationship between the secant elastic modulus and the pressure of the compensation oil

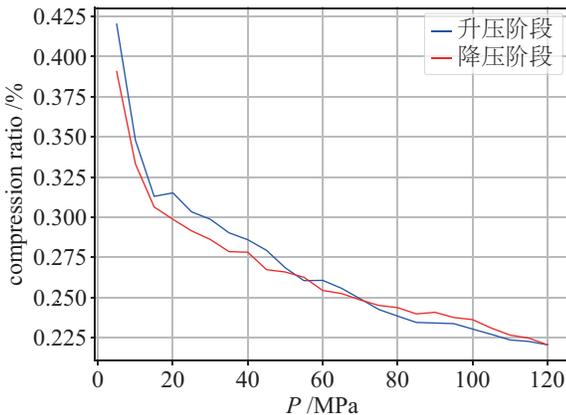


图 3 不同压力下 Diala S4ZX-A 补偿油的压缩率

Fig.3 Compression ratio of Diala S4ZX-A compensation oil under different pressures

根据实验数据可看出, 补偿油弹性模量随着压力增大而增大, 20 MPa 以下弹性模量随压力升高较快, 20 MPa 至 120 MPa 过程中斜率基本保持不变.

根据图 3 可以看出, 压缩率曲线随压力增大不断减小, 但由于压缩率变化小, 减小趋势不明显, 因此给出每 5 MPa 的压缩率.

随着压力增加, 每 5 MPa 的压缩率逐渐降低, 并且升压阶段与降压阶段不能完全重合. 环境压力为 120 MPa 时, 将绝缘油每段压缩率相加, 即可得到最大压缩率为 6.457%.

为计算工作环境下温度对电器绝缘油体积的影响, 需要测定环境温度与标准温度间的热膨胀系数. ASTM D1903 标准中的热膨胀实验计算方法<sup>[12-13]</sup>如式 (17) 所示:

$$\beta = \frac{\rho_l - \rho_h}{\rho_l \Delta T} \quad (17)$$

根据 ASTM D1903 标准, 电器绝缘油的热膨胀系数可通过测量不同温度下的密度得到, 温度间隔不大于 14°C、不小于 5°C, 并且都要小于 90°C.

根据以上公式, 计算 Diala S4ZX-A 补偿油在不同温度下的密度和热膨胀系数, 见表 2、表 3.

表 2 Diala S4ZX-A 补偿油的密度

Tab.2 The density of Diala S4ZX-A compensation oil

温度 /°C	2	15	28
密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	816.6	808.9	801

表 3 Diala S4ZX-A 补偿油的热膨胀系数

Tab.3 Thermal expansion coefficient of Diala S4ZX-A compensation oil

温度	2°C ~ 15°C	15°C ~ 28°C
热膨胀系数	0.000725°C <sup>-1</sup>	0.000751°C <sup>-1</sup>

根据 NODC (national oceanographic data center) 公开的“挑战者深渊”数据, 海底温度约 2°C, 海面表层温度约 28°C, 根据式 (18) 可计算出温度对电器绝缘油体积的影响.

$$\beta = \frac{\Delta V}{V \Delta T} \quad (18)$$

## 4 海试实验 (Sea trial)

### 4.1 “海斗号”实验

根据本文浮力配平计算方法完成“海斗号”水下机器人万米深潜配平计算.“海斗号”ARV 如图 4 所示, 质量为 264.5 kg. 通过本文上浮压载计算方法, 计算出目标深度为 10 900 m 时需要压载提供负浮力 8.9 kgf, 其中包括海面所需的 5.2 kgf 正浮力, 以及上浮下潜过程中浮力变化量 3.7 kgf.

“海斗号”ARV 的底面上安装有高度计, 首次下潜时悬挂 9 m 长的钢链条, 每米可提供 0.84 kgf 的负浮力. 根据浮力配平方程, 将“海斗号”ARV 的浮力状态配置为 +3.78 kgf, 也是浮力配平允许的最大误差. 即理论上距离地面 4.5 m 时, ARV 为悬停状态.“2016-TS-01-ARV03-9740m”潜次“海斗号”ARV 悬停静止时距底 2.95 m, 即工作深度下实际浮力测量与理论计算浮力偏差为 1.3 kgf.

图 5 为 2017 年“海斗号”水下机器人在马里亚纳海沟拍摄的着底视频截图, 根据视频, 微小海流对机器人本体扰动微小, 说明在计算 ARV 浮力配平时, 海洋流动对载体纵向受力影响为 0 的假设成立.



图 4 “海斗号” ARV  
Fig.4 Hadal ARV



图 5 “海斗号” ARV 着底视频截图  
Fig.5 Screenshot of Hadal ARV landing on the ocean floor

“海斗号”在“挑战者深渊”下潜、上浮过程中, 全程测量了垂直面海水的 CTD 数据, 温度、压力随深度的变化关系如图 6、图 7 所示.

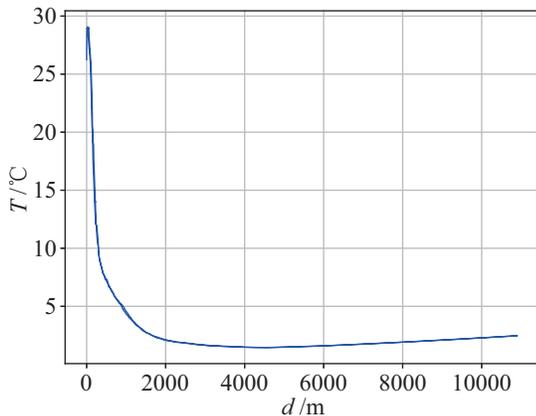


图 6 “挑战者深渊”海域温度与深度关系  
Fig.6 Temperature and depth at Challenger Deep

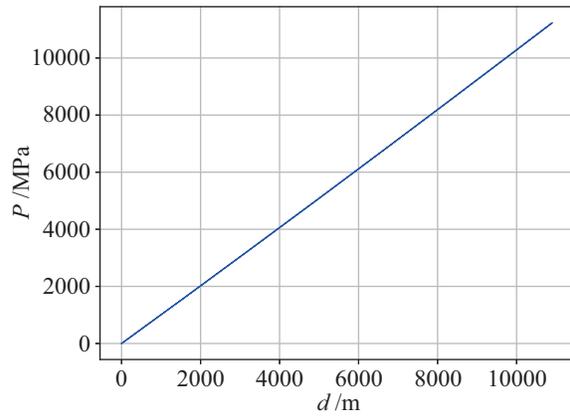


图 7 “挑战者深渊”海域压力与深度关系  
Fig.7 Pressure and depth at Challenger Deep

根据图 7 可以看出, 1500 m 以浅海域随着深度增加, 温度急剧下降, 1500 m~5000 m 深度温度缓慢下降, 5000 m 至“挑战者深渊”海底温度都在缓慢上升.

根据“海斗号”获得的温度与压力信息, 由式 (6) 计算得到  $\rho_d$  与  $d$  的关系, 如图 8 所示.

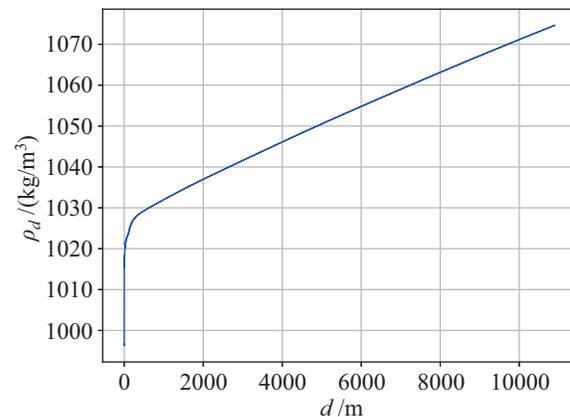


图 8 “挑战者深渊”海域密度与深度关系  
Fig.8 Density and depth at Challenger Deep

根据第 2、3 节可知, 海水温度、压强以及海水密度随深度变化是影响水下机器人浮力状态的重要因素, 其关于深度的函数是浮力配平计算的必要条件. 图 6~图 8 是“海斗号” ARV 在马里亚纳海沟海试时浮力配平过程的关键求解步骤.

根据“海斗号”获得的温盐深数据以及相关海水参数, 将 1992 年 NODC 公开的“挑战者深渊”数据进行替换, 以便准确地进行配平方程的计算.

“2016-TS-01-ARV01-3959m”“2017-TS-03-ARV01-10875m”“2018-TS-09-ARV01-9756m” 3 次下潜, 实际工作深度下的浮力与理论计算结果均存在偏差, 并且偏差小于可实际测量的最大值 3.78 kgf. “海斗号”在不同地点首次下潜都会存

在浮力配平误差, 主要原因有 2 个方面. 首先补偿舱内部, 电子元器件种类繁多, 无法逐一分解测量, 选取有机树脂与铜的质量比值时采用主控板处的比值作为全部电路的比值, 必然存在误差. 其次, 补偿舱内部电器绝缘油内部会溶解气体, 导致海试时补偿油体积弹性模型小于实验测试数据, 从而造成整体浮力配平偏差.

ARV 首次下潜需要根据机器人达到平衡状态时垂直推进器的推力进行浮力配平矫正, 从而完善浮力配平方程.

## 5 结论 (Conclusion)

本文给出了包含补偿舱的水下机器人的浮力配平方法, 根据配平方程可以看出海水参数以及水下机器人参数都会直接影响配平结果. 理论计算误差在实际工作深度下的浮力测量能力范围内, 并且“海斗号”ARV 参与“TS-01”“TS-02”“TS-09”3 次马里亚纳海沟海试, 完成 17 次深渊下潜, 通过理论计算可以指导“海斗号”ARV 实际工程应用, 因此浮力误差在可控范围内.

由于补偿舱内部结构物质复杂, 难以逐一区分进行计算, 并且配平计算与实际下潜结果存在误差, 因此首次下潜后的试验校准量应当算作平衡方程的一项, 今后将对试验矫正方法进行进一步研究.

## 参考文献 (References)

- [1] Jamieson A J, Fujii T, Mayor D J, et al. Hadal trenches: The ecology of the deepest places on Earth[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(3): 190-197.
- [2] Anonymous. NASA study finds Earth's ocean abyss has not warmed[J]. *Ocean News & Technology*, 2014(11): 23.
- [3] Bowen A D, Yoerger D R, Taylor C, et al. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle[J]. *Underwater Technology*, 2009, 28(3): 79-89.
- [4] Wang B, Wu C, Ge T. Control system of a novel underwater vehicle for global ocean science to the deepest ocean[C]//Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 7268-7272.
- [5] Mikagawa T, Aoki M. An outline of R/V Kaimei and recent activity of the multichannel seismic reflection survey system (MCS) and ROV Kaiko[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2001, 6(1): 42-49.
- [6] 唐元贵, 王健, 陆洋, 等. “海斗号”全海深自主遥控水下机器人参数化设计方法与试验研究[J]. *机器人*, 2019, 41(6): 697-705.  
Tang Y G, Wang J, Lu Y, et al. Parametric design method and experimental research on Haidou full-depth ocean autonomous and remotely-operated vehicle[J]. *Robot*, 2019, 41(6): 697-705.
- [7] 刘鑫宇, 李一平, 封锡盛. 万米级水下机器人浮力实时测量方法[J]. *机器人*, 2018, 40(2): 216-221.  
Liu X Y, Li Y P, Feng X S. Real-time measurement method of buoyancy of a full-ocean-depth underwater robot[J]. *Robot*, 2018, 40(2): 216-221.
- [8] Zhou H K, Yang F, Wang W H, et al. Research and application of an underwater detection robot with three level control mode of ROV/ARV/AUV[C]//3rd International Conference on Information Technology and Industrial Automation. Lancaster, USA: DEStech Publications, 2018: 604-609.
- [9] 姜言清, 李晔, 王友康, 等. 全海深水下机器人的重力和浮力计算[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(4): 481-486.  
Jiang Y Q, Li Y, Wang Y K, et al. Gravity and buoyancy analysis of full ocean depth autonomous underwater vehicle[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(4): 481-486.
- [10] 张昆. 新的重力加速度公式研究[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(3): 824-828.  
Zhang K. New gravity acceleration formula research[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(3): 824-828.
- [11] 张胜军. 利用多源卫星测高资料确定海洋重力异常的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.  
Zhang S J. Research on determination of marine gravity anomalies from multi-satellite altimeter data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [12] 张琦, 王会娟, 郭春梅, 等. 电气绝缘油热膨胀系数的研究[J]. *石油炼制与化工*, 2012, 43(10): 55-59.  
Zhang Q, Wang H J, Guo C M, et al. Research on the thermal expansion coefficient of electrical insulating oil[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2012, 43(10): 55-59.
- [13] ASTM International. Standard specification for mineral insulating oil used in electrical apparatus[S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2009.

## 作者简介:

- 陆 洋 (1989-), 男, 硕士, 助理研究员. 研究领域: 水下机器人载体设计, ARV 结构关键技术.
- 唐元贵 (1980-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 自主遥控水下机器人技术, 全海深水下机器人技术.
- 王 健 (1987-), 男, 硕士, 助理研究员. 研究领域: 水下机器人控制.