

文章编号: 1002-0446(2002)05-0385-04

## “CR-02”AUV 无动力下潜运动预报\*

刘正元<sup>1</sup> 李一平<sup>2</sup>

(1. 中国船舶科学研究中心 无锡 214082; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

**摘要:** 本文针对“CR-02”AUV 海试前的无动力下潜运动进行了预报. 该文在建立 AUV 无动力下潜运动数学模型基础上, 研究分析了其稳态运动的特点, 提出了下潜深度变化率和纵倾角是描述 AUV 无动力下潜运动的重要参数, 并获得了它们的解析表达式, 无需使用计算机, 就能快速、方便、准确地确定上述参数, 并选取适当的下潜压载, 以提高下潜速度, 减少下潜时间, 该方法具实际应用价值.

**关键词:** AUV; 建模; 海试; 解析研究

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## PREDICTION OF AUV “CR-02” SUBMERGE WITHOUT POWER

LIU Zheng-yuan<sup>1</sup> LI Yi-ping<sup>2</sup>

(1. China Ship Scientific Research Center Wuxi; 2. Shenyang Institute Of Automation chinese Academy of Sciences, Shenyang)

**Abstract** This paper is used for predicting “CR-02” AUV unpowered diving before the sea test. It's based on developing mathematical model for AUV unpowered diving motion, theoretical analysis of steady motion of AUV, presents the theoretical expression about diving pitch  $\theta$  and diving depth velocity  $u_z$ , those are important parameters used to describe diving motion and can be calculated quickly. Appropriate diving ballast can increase AUV diving speed and reduce diving time. This method has practical value.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle, modeling, sea test, analysis research

### 1 引言(Introduction)

“CR-02”6000 米自治水下机器人是一艘用于深海(6000 米)调查的 AUV(Autonomous Underwater Vehicle). 由于体积小, 携带的能源有限, 所以在从水面到深海作业区数千米海深的路程中, 不使用能源, 而采用“无动力下潜运动”的方式完成下潜过程. 所谓“无动力下潜运动”是指 AUV 在水面平衡(即重力与浮力基本平衡)的状态下, 在其艏部放置一个下潜压载(重物), 使 AUV 带有一个大纵倾角下潜, 整个下潜过程不使用能源.

本文在文献[1]研究的基础上, 针对“CR-02”AUV 先进行了湖试前的无动力下潜运动预报; 然后利用湖试结果对无动力下潜的数学模型进行检验, 证明有效后, 对“CR-02”AUV 下一步的海试进行无动力下潜运动预报, 并提出了加快下潜速度所选取下潜重物大小的建议, 供“CR-02”AUV 海试时参考.

同时, 确定了“CR-02”AUV 稳定运动的数学模型, 并进行了解析研究.

### 2 无动力下潜数学模型(Mathematical model for AUV unpowered diving motion)

#### 2.1 坐标系及符号表达

其中:

$x_0y_0z_0$ ——固定坐标系;

$xyz$ ——动坐标系;

$\psi\theta\gamma$ ——载体的偏航角、纵倾角、横倾角;

$q$ ——纵倾角速度(1/s)即  $\dot{\theta}$ ;

$X_u, X_w$ ——附连质量( $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ );

$\Delta B$ ——正浮力(kg);

$h$ ——浮心与重心之间的垂向距离(m);

$L$ ——载体特征长度(m);

$l_i$ —— $P_i$  相对坐标原点的作用距离(m);

- $l'_\alpha$ — 流体动力臂,  $l'_\alpha = -\frac{M'_w}{Z'_w}$ ;
- $m$ — 载体质量( $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ );
- $P_1$ — 下潜压载重物( $\text{kg}$ );
- $\rho$ — 海水密度( $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ );
- $C_x, C_z, X'_{uu}, Z'_w, Z'_q, M'_q, X'_u, Z'_w, M'_q, T$
- $K$ — 流体动力系数;
- $U$ — 载体速度( $\text{m/s}$ ),  $U = \sqrt{u^2 + w^2}$ ;
- $u, w$ —  $U$  分别在体轴  $x, z$  上的分量( $\text{m/s}$ );
- $U_z$ — 下潜深度变化率( $\text{m/s}$ ).

2.2 数学模型

对于 AUV 利用下潜压载重物而产生的下潜运动, 其数学模型为

$$\begin{aligned}
 & (m + X_u)\dot{u} + (m + Z_w)wq \\
 &= -P_1^* \sin\theta - \frac{1}{2}\rho L^2 U X'_{uu} u \\
 & (m + Z_w)\dot{w} - (m + X_u)uq \\
 &= P_1^* \cos\theta - \frac{1}{2}\rho L^2 U Z'_w w \\
 &+ [(mU) + \frac{1}{2}\rho L^3 U Z'_q]q \\
 & (I_y + M_q)\dot{\theta} - \frac{1}{2}\rho L^4 U M'_q \theta \\
 &= \frac{1}{2}\rho L^3 U M'_w w - mgh \sin\theta - P_1 l_h \cos\theta
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中:  $P_1^* = P_1 - \Delta B$

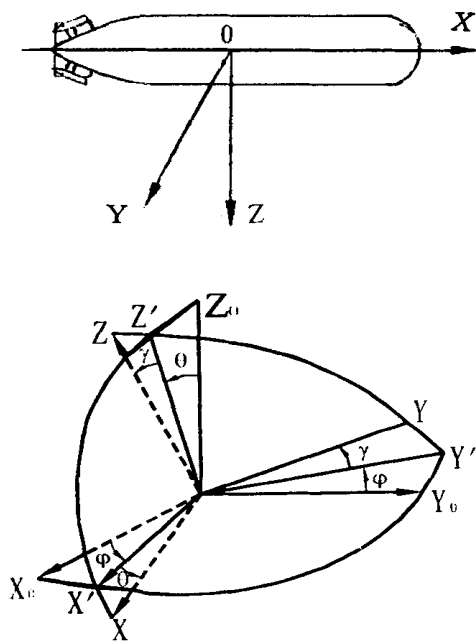


图1 坐标系  
Fig. 1 Coordinate

2.3 深度变化率  $U_z$  和纵倾角  $\theta$  的确定

由于“CR-02”AUV 作无动力下潜时, 要到达深海作业区, 需数千秒时间, 而非稳态运动只在刚开始下潜的几十秒钟内, 因而绝大部分时间“CR-02”AUV 均处在稳态运动的状态下. 由(1)式可知稳态运动的数学模型为

$$-\frac{1}{2}\rho L^2 U X'_{uu} u - P_1^* \sin\theta = 0 \tag{2}$$

$$-\frac{1}{2}\rho L^2 U Z'_w w - P_1^* \cos\theta = 0 \tag{3}$$

$$\frac{1}{2}\rho L^3 U M'_w w - mgh \sin\theta - P_1 l_h \cos\theta = 0 \tag{4}$$

由一般运动的运动学关系式可知: AUV 运动速度  $U$  在固定坐标系分量  $U_x, U_y, U_z$  与  $U$  在动坐标系上的分量  $u, v, w$  及欧拉角  $\psi, \theta$  之间的关系为

$$U_x = u \cos\theta \cos\psi - v \sin\psi + w \sin\theta \cos\psi \tag{5}$$

$$U_y = u \cos\theta \sin\psi - v \cos\psi + w \sin\theta \sin\psi \tag{6}$$

$$U_z = -u \sin\theta + w \cos\theta \tag{7}$$

从(7)式可知, 对于作螺旋式下潜的 AUV 来讲, 参数  $U_z$  (即深度变化率) 与偏航角  $\psi$  无关, 只与  $u, w, \theta$  有关, 所以运动参数  $U_z$  是 AUV 无动力下潜运动的一个重要参数. 它的大小与(2)~(4)式有关. 因此, 今选定  $U_z, \theta$  作为解析研究 AUV 无动力下潜运动的运动参数.

由文献[1]可知  $\theta, U_z$  有如下表达式

$$\text{tg}\theta = \frac{P_1^* l'_h - P_1 l_h}{mgh} \tag{8}$$

其中:  $l'_h = L l'_\alpha$ , 其它参数定义同前.

深度变化率  $U_z$  为

$$U_z = \sqrt{\frac{P_1^*}{A}} \left| \frac{1}{1+K^2} \right|^{3/2} \left| \frac{1}{C_z} \right| + \left| \frac{-K^3}{C_x} \right| \tag{9}$$

其中:  $A = \frac{1}{2}\rho L^2$ ;

$$K = \text{tg}\theta;$$

$$C_x = \frac{R_x}{\frac{1}{2}\rho L^2 u^2}, R_x \text{--- } x \text{ 方向阻力};$$

$$C_z = \frac{R_z}{\frac{1}{2}\rho L^2 w^2}, R_z \text{--- } z \text{ 方向阻力};$$

其余见(8)式.

3 湖试前的预报及湖试后的检验 (Prediction before lake-test and prove after take-test)

3.1 湖试前的预报

针对“CR-02”AUV 的湖试, 我们于湖试前对其无动力下潜运动进行了预报. 其中:  $t_1$  取 1.123

假定: 下潜压载  $P_1$  (空气中重) = 6、8、10、15、18 (kg)

剩余浮力  $\Delta B = 5.0\text{kg}、3.0\text{kg}$

稳心高  $h = 0.005\text{m}、0.0075\text{m}、0.012\text{m}$

估算结果如下(“CR-02”AUV 湖试, 无动力下潜预报):

表 1  $\Delta B = 5.0\text{kg}$  时估算结果 (Table 1  $\Delta B = 5.0\text{kg}$  Calculate result)

H (m)	0.005					0.0075					0.012				
$P_1$ (kg)	6	8	10	15	18	6	8	10	15	18	6	8	10	15	18
$\theta$ (°)	- 47	- 51	- 55	- 61	- 64	- 36	- 40	- 43	- 51	- 54	- 24	- 27	- 30	- 37	- 41
$Z_{60}$ (m)	11	34	48	77	91	9	27	40	67	81	6	20	29	52	65

表 2  $\Delta B = 3.0\text{kg}$  时估算结果 (Table 2  $\Delta B = 3.0\text{kg}$  Calculate result)

H (m)	0.005					0.0075					0.012				
$P_1$ (kg)	6	8	10	15	18	6	8	10	15	18	6	8	10	15	18
$\theta$ (°)	- 40	- 45	- 50	- 58	- 62	- 30	- 34	- 38	- 47	- 51	- 20	- 23	- 26	- 34	- 38
$Z_{60}$ (m)						26.6	43.1	60.8	117.8	157.1					

表中:  $\theta$  为纵倾角(°)

$Z_{60}$ 为“CR-02”AUV 从水面开始无动力下潜 60 秒时的深度.

3.2 湖试后的检验

根据湖试记录结果, 知:

$$\theta_s(\text{稳态值}) \approx - 25^\circ \quad (10)$$

$$U_z \approx 0.3\text{m/s} \quad (11)$$

当  $P_1 = 5\text{kg}$ ,  $h = 0.0075\text{m}$ ,  $\Delta B = 2.4\text{kg}$  时, 利用

(8)与(9)二式计算结果得

$$\theta_{\text{计}} = - 25.4^\circ \quad (12)$$

$$U_{z\text{计}} = 0.32\text{m/s} \quad (13)$$

图 2 为本次试验获得的“CR-02”AUV 无动力下潜曲线. 从曲线中可以看出, “CR-02”AUV 在无动力下潜阶段, 纵倾角为- 50°, 然后逐渐减小, 最后稳定在- 25°附近. 计算结果与湖试结果比较见表 3.

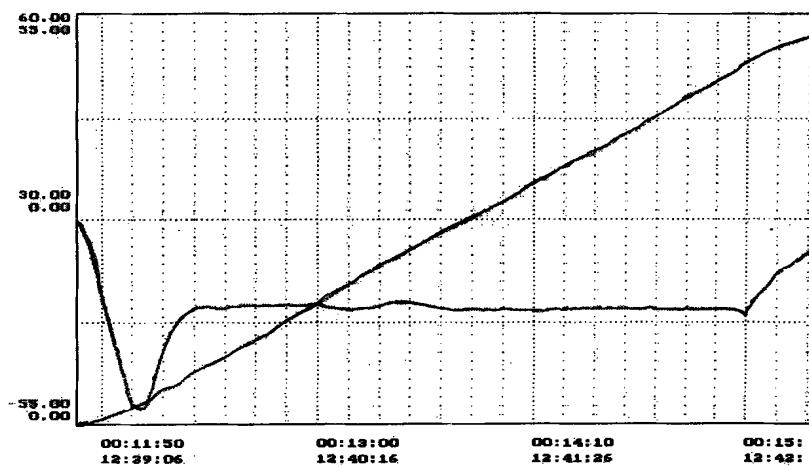


图 2 “CR-02”AUV 无动力下潜曲线

Fig. 2 Graph of “CR-02”AUV unpowered diving

表 3 计算结果与湖试结果比较

Table 3 Compare lake-test result with calculate result

	计算值	测试结果
$\theta$	- 25.4°	≈ - 24.2°
$U_z$	0.32m/s	≈ 0.326m/s

比较(10)~(13)式可知纵倾角  $\theta$  与深度变化率  $U_z$  的计算结果与湖试记录结果一致. 从而证明利用(8)与(9)二式预报的“CR-02”AUV 无动力下潜运动有较好的可信度.

#### 4 “CR-02” AUV 海试无动力下潜运动预报 (Predicting of “CR-02” AUV unpowered diving before the sea test)

今取下潜压载  $P_1$  分别为: 12kg、18kg、24kg、36kg;

剩余浮力  $\Delta B$  分别为 3kg、5kg;

稳心高为  $h_1 = 0.003\text{m}$ 、 $h_2 = 0.006\text{m}$ 、 $h_3 = 0.008\text{m}$ 、 $h_4 = 0.009\text{m}$ 、 $h_5 = 0.012\text{m}$  五种;

预报结果如下:

表 4 当  $h_1 = 0.003\text{m}$  时估算结果

Table 4  $h_1 = 0.003\text{m}$  calculate result

$\Delta B$ (kg)	3.0				5.0			
$P_1$ (kg)	12	18	24	36	12	18	24	36
$\theta$ (°)	66.6	72.5	76.1	80.1	69.6	74.3	77.3	80.8
$U_z$ (m/s)	1.3	1.7	2.1	2.7	1.1	1.6	2.0	2.6

表 5 当  $h_2 = 0.006\text{m}$  时估算结果

Table 5  $h_2 = 0.006\text{m}$  calculate result

$\Delta B$ (kg)	3.0				5.0			
$P_1$ (kg)	12	18	24	36	12	18	24	36
$\theta$ (°)	49.1	57.8	63.7	70.9	53.5	60.7	65.7	72.0
$U_z$ (m/s)	1.0	1.5	1.9	2.6	0.96	1.4	1.9	2.5

表 6 当  $h_3 = 0.008\text{m}$  时估算结果

Table 6  $h_3 = 0.008\text{m}$  calculate result

$\Delta B$ (kg)	3.0				5.0			
$P_1$ (kg)	12	18	24	36	12	18	24	36
$\theta$ (°)	41.0	50.0	56.7	65.3	45.4	53.3	59.0	66.6
$U_z$ (m/s)	0.9	1.4	1.8	2.5	0.9	1.4	1.8	2.5

表 7 当  $h_4 = 0.009\text{m}$  时估算结果

Table 7  $h_4 = 0.009\text{m}$  calculate result

$\Delta B$ (kg)	3.0				5.0			
$P_1$ (kg)	12	18	24	36	12	18	24	36
$\theta$ (°)	37.6	46.6	53.5	62.5	42.0	49.9	55.9	64.1
$U_z$ (m/s)	0.84	1.3	1.7	2.4	0.79	1.3	1.7	2.4

表 8 当  $h_5 = 0.012\text{m}$  时估算结果

Table 8  $h_5 = 0.012\text{m}$  calculate result

$\Delta B$ (kg)	3.0				5.0			
$P_1$ (kg)	12	18	24	36	12	18	24	36
$\theta$ (°)	30.0	38.4	45.4	55.2	34.0	41.7	48.0	57.1
$U_z$ (m/s)	0.69	1.1	1.5	2.2	0.66	1.1	1.5	2.2

#### 5 结论(Conclusion)

对于利用公式(8)与(9)二式来预报“CR-02” AUV 无动力下潜运动的稳态值纵倾角  $\theta(t)$  和深度变化率  $U_z$  时, 作如下说明:

(1) 参数  $\theta$ 、 $U_z$  与  $P_1$ 、 $\Delta B$ 、 $h$ 、 $M'_w$ 、 $Z'_w$ 、 $C_x$ 、 $C_z$ 、 $l$  有关, 一旦后者确定了, 前者就可利用公式(8)、(9)一一对应确定. 但由于  $\Delta B$ 、 $h$  要由当时实物水下工作时的状况而定, 准确确定难度较高. 因此, 计算值会与实际值存在一定差异.

(2) 对于“CR-02” AUV 海试预报结果, 在海试时作为选取合适的下潜压载  $P_1$  时的参考. 增大  $P_1$ , 减小  $\Delta B$  可提高下潜时深度变化率  $U_z$ , 从而加快了下潜时间.

#### 参考文献 (References)

- 1 L Zhengyuan, X Qinan, L Tao, C Jinping. Analytical Formulation of AUV Unpowered Diving. Proc of the 2000 International Symposium on UT. 23- 26 May, 2000 Tokyo, JAPAN

作者简介:

刘正元 (1938-), 男. 研究领域: 船舶水动力, 水下机器人控制系统.

李一平 (1963-), 女. 研究领域: 船舶水动力, 水下机器人控制系统.