

小型自治水下机器人运动控制系统研究*

吴宝举^{1,2} 李硕^{1,2} 李一平¹ 王晓辉¹

(¹国家机器人学 重点实验室 沈阳 110016)(²中国科学院 研究生院 北京 100039)

Research of a control system for autonomous underwater vehicles

WU Bao-ju^{1,2} LI Shuo^{1,2} LI Yi-ping^{1,2} ,WANG Xiao-hui¹

(¹State Key Laboratory of Robotic ,Shenyang 110016 ,China)

(²Graduate School of the Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100039 ,China)

【摘要】以主推加舵控制的小型自治水下机器人为研究对象，建立了水下机器人的数学模型并进行了分析。根据机器人结构的特点，对模型进行了必要的简化。设计了机器人的运动控制系统。通过湖试验证控制器的性能。

关键词 动力学模型 水动力 操纵性

【Abstract】A small autonomous underwater vehicle controlled by thruster and rudders is introduced. A mathematical model of the vehicle is derived and disused. According to weak coupling simplified model , the autopilot control system is designed. Its abilities for voyage have been confirmed by tests.

Key words Dynamics Hydrodynamic Manipulation

中图分类号 :TH16 ,TP242 文献标识码 :A

1 引言

随着海洋开发、探测的需求越来越强，水下机器人成为全世界研究的热门课题。小型自治水下机器人具有低成本、小型化、操作灵活等特点成为近年来国内外研究的热点。以沈阳某研究所水下机器人研究中心开发的某型水下机器人为研究对象，该小型自治水下机器人近似鱼雷状的流线型外形，采用舵桨联合操纵方式。它具有开放式、模块化的体系结构和多种控制方式(自主/半自主/遥控)，自带能源。这种小型水下机器人可在大范围、大深度和复杂海洋环境下进行海洋科学研究和深海资源调查，具有更广泛的应用前景。在控制系统的设计过程中充分考虑了系统的稳定性和操纵性。控制器具有足够的鲁棒性来克服建模误差，以及水动力参数变化。

2 机器人模型

建立的坐标系，如图 1 所示。图中 $E-\xi\eta\zeta$ —惯性坐标系 $D-xyz$ —载体坐标系。因为机器人在航行时速度不高(<4 节)，可以对机器人模型进行线性化及一些简化。载体坐标系原点取于载体浮心处，在此坐标系下，载体在三个方向上的受力及运动量表达为：力 $F=[X, Y, Z]^T$ 力矩 $M=[K, M, N]^T$ 速度 $V=[u, v, w]^T$ 角速度 $\omega=[p, q, r]^T$

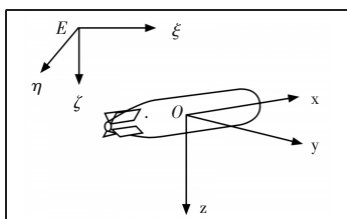


图 1 惯性和载体坐标系

在图 1 定义的惯性坐标系和运动坐标系中，机器人的空间运

动向量表达为：

$$\eta_1=[x, y, z]^T; \eta_2=[\varphi, \theta, \psi]^T$$

$$v_1=[u, v, w]^T; v_2=[p, q, r]^T$$

式中：向量 η_1 —机器人在惯性坐标系中的位置； η_2 —其在惯性坐标系中的姿态； φ —横滚角； θ —俯仰角； ψ —航向角； v_1 —机器人在载体坐标系中的线速度 (V)； v_2 —其在载体坐标系中的转动角速度 (ω)。载体的运动学方程如下：

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J(\eta_1) & 0 \\ 0 & J(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$J(\eta_1) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $s \cdot c \cdot t$ 分别— $\sin(\cdot)$ $\cos(\cdot)$ 和 $\tan(\cdot)$ 。

根据牛顿第二定律可以建立机器人平动方程，即

$$m[\ddot{u} - vr + wq - x_c(q^2 + r^2) + y_c(pq - \dot{r}) + z_c(pr + \dot{q})] = \Sigma x \quad (4)$$

$$m[\ddot{v} - wp + ur - y_c(r^2 + p^2) + z_c(qr - \dot{p}) + x_c(qp + \dot{r})] = \Sigma y$$

$$m[\ddot{w} - uq + vp - z_c(p^2 + q^2) + x_c(rp - \dot{q}) + y_c(rq + \dot{p})] = \Sigma z$$

同样，运用欧拉运动方程，对机器人旋转运动进行分析，忽略 x_G^2, y_G^2, z_G^2 等小量，可以得到载体在三个方向上的力矩方程，表达如下：

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_G(\dot{w} - up + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = \Sigma k$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = \Sigma m \quad (5)$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = \Sigma n$$

* 来稿日期 2009-08-15 * 基金项目：中国科学院创新基金(03F6060601)

式中 方程等号右端为作用于机器人的外力(矩) 表示成矢量形式如下:

$$F = F_q + F_g + F_b + F_f + F_r \tag{6}$$

下标 q g b f r 分别表示惯性力(矩)、重力(矩)、浮力(矩)、非惯性流体动力(矩)、控制器舵力(矩)和螺旋桨推力(矩)。执行机构用向量 u 表示 $u = [\delta(t) \delta_r(t) n(t)]$

式中 δ_i —垂直舵偏角 δ_r —水平舵偏角 n —推进器旋转速度。机器人在水中基本呈中性,否则,水平舵偏角将增加阻力,增加能源损耗。

水下机器人非线性动力学模型可表示成紧凑的形式

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = B(v)u \tag{7}$$

式中 M —6x6 的惯性矩阵包括水动力附加质量 $C(v)$ —科氏力和向心力矩阵 $D(v)$ —水动力阻尼矩阵 $g(\eta)$ —扶正力和力矩 $B(v)$ —6x3 的控制矩阵。我们把水下机器人分解为速度、航向、深度三个子系统,状态变量表示为:

- (1)速度控制系统 $v(t)$
- (2)航向控制系统 $r(t)$ $\varphi(t)$
- (3)深度控制系统 $w(t)$ $q(t)$ $\theta(t)$ $z(t)$

横滚角 $\phi(t)$ 忽略不记。它可以通过设计合适的稳心高来修正,它同时用于抑制推进器的力矩。对于中性的潜水器,稳心高 \overline{BG}_z 和稳定状况的横滚角关系为 $\phi_0 = \arcsin(PW\overline{BG}_z w_p)$ P 代表推进器功率, $W = mg$ 是重力, w_p 是推进器旋转角速度。

水动力参数的测量采用文献[4]的方法并做了必要的修正在此不再累述。

3 运动控制系统设计

把水下机器人运动分解为弱耦合的水平面运动和垂直面运动。航向控制器负责控制航向,深度控制器负责深度和高度控制,速度控制器负责航速控制。水下机器人的运动控制系统设计必须考虑控制系统的稳定性和鲁棒性。鲁棒性主要用来弥补其建模的不确定性和运行环境的多变性。

3.1 航速控制器

忽略其他自由度的作用,纵向运动等式是:

$$m\dot{u} = X \tag{8}$$

式中 X —外部作用力 m —潜水器质量。包括线性和二次阻尼(X_u 和 X_{uu}) X 可表达成

$$X = X_u \dot{u} + X_{uu} u + X_{bu} |u|u + T_{bu} |n|n + T_{un} |n|u \tag{9}$$

式中 X_u —水动力附加质量 T_{bu} 和 T_{un} —推进器系数。从(8)(9)可以观察到推进器转速和前进速度 u 之间有一定的关系。

推进器的输入是转速 n ,其输出是推力 T 推力器的数学描述为:

$$T = (1-t)K_p n^2 D^4 \tag{10}$$

式中 t —推力减额 K_p —螺旋桨的推进系数(无因次) p —海水密度(千克/米³) n —螺旋桨的转速(转/秒) D —螺旋桨直径(米) T —实际推力(牛顿)。

机器人配置一个由直流电机驱动的主推进器。机器人航速由 DVL(多普勒测速仪)测量,速度控制系统调节电机转速进而调节机器人速度。

设计了一个 PD 控制器,增益常数为 K_p ,微分常数为 K_D ,

$$C_c(s) = \frac{u(s)}{u_d(s) - u(s)} = K_p + K_D s \tag{11}$$

调节控制器的参数保证 u 跟踪期望的航速 u_d 。

3.2 航向控制器

水下机器人在侧移和偏航动力学可简化为:

$$m\dot{v} + mu_0 r = Y \quad I_z \dot{r} = N \tag{12}$$

式中 u_0 —固定的前进速度。对于小的横滚和纵倾角,

$$\dot{\phi} = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} q + \frac{\cos\phi}{\cos\theta} r \approx r$$

线性化水动力附加质量、阻尼和舵产生

$$Y = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_\delta \delta_r$$

$$N = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_\delta \delta_r \tag{13}$$

由于 v 和 r 比较小忽略二次项系数。等式(11)(12)(13)可表示成紧凑的形式:

$$\begin{bmatrix} m - Y_v & -Y_r & 0 \\ -N_v & -N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_r + mu_0 & 0 \\ -N_v & -N_r & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \tag{14}$$

整理成状态空间形式 $\dot{x} = Ax + b\delta_r$, 在此 $x = [v \ r \ \varphi]^T$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \tag{15}$$

a_{ii} 和 b_{ii} 的定义是很明显的。

航向角 φ 由电子罗盘测量。偏航角速率 r 由角速率传感器测量。设计 PID 控制器。控制律是

$$\delta_r = K_p(\varphi_d - \varphi) - K_d r + K_I \int (\varphi_d - \varphi) dt \tag{16}$$

式中 K_p K_d K_I —比例、微分和积分系数。

控制器参数用极点配置法和跟轨迹选择。

为了抑制高频干扰(包括潜水器接近水面时的波浪)测量结果要数字低通滤波。期望航向也要低通滤波目的是获得平滑的机动过程变化量。

3.3 深度控制器

在升沉和纵倾方向简化的刚体运动等式由:

$$m(\dot{w} - u_0 q) = Z \quad I_y \dot{q} = M \tag{17}$$

如同水平面模型,外部力和力矩表示为水动力附加质量、线性阻力和驱动面偏角。另外,稳心高引起的扶正力矩也要建模。

$$Z = Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} + Z_w w + Z_q q + Z_\theta \theta$$

$$M = M_w \dot{w} + M_q \dot{q} + M_w w + M_q q - mg(z_c - z_B) \sin\theta + M_\delta \delta_s \tag{18}$$

$$\approx M_w \dot{w} + M_q \dot{q} + M_w w + M_q q - W\overline{BG}_z \theta + M_\delta \delta_s$$

在稳定状态我们有 $\theta_0 = q_0 = \dot{\phi}_0 = 0$ 这表明有如下关系:

$$\dot{\theta} = q \quad \dot{z} = -\theta u_0 + w \tag{19}$$

等式(17)(18)(19)可以写成:

$$\begin{bmatrix} m - Z_w & -Z_q & 0 & 0 \\ -M_w & I_y - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_w & mu_0 - Z_q & 0 & 0 \\ -M_w & -M_q & \overline{BG}_z W & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & u_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_\delta \\ M_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \tag{20}$$

表示成状态空间模型

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -u_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (21)$$

仿真和海试表明深沉速度 w 在下潜过程中是很小的 (小于 0.1m/s)。这表明线性模型(20)可演化为:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M}{I_y - M_q} & \frac{-BG_z w}{I_y - M_q} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -u_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M_{\delta}}{I_y - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (22)$$

这个模型非常适合控制设计。传递函数 $\theta(s)/\delta_s(s)$ 和 $Z(s)/\delta_s(s)$ 如下:

$$\frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{K_{\theta}}{s^2 + 2\zeta_{\theta}w_{\theta}s + w_{\theta}^2}$$

$$\frac{Z(s)}{\delta_s(s)} = \frac{u_0\theta(s)}{s\delta_s(s)} \quad (23)$$

增益常数 $K_{\theta} = M_q / (I_y - M_q)$, 自然频率 w_{θ} 和阻尼系数 ζ_{θ} 定义为

$$w_{\theta} = \sqrt{\frac{BG_z W}{I_y - M_q}}$$

$$\zeta_{\theta} = \frac{-Mq}{2\sqrt{BG_z w(I_y - M_q)}} \quad (24)$$

深度控制器有三个被测量。深度由压力传感器测量,倾角用电子罗盘测量,角速率用角速率传感器测量。深度控制器双闭环结构,内环为纵倾角控制,外环为深度控制,外环的输出值为内环的设定值:

$$\delta_i(s) = K_{Zi}(z_d - z) + K_{Zi} \int (z_d - z) dt - K_{\theta} \theta - K_{\theta\dot{\theta}} \dot{\theta} \quad (25)$$

选择 K_{θ} , $K_{\theta\dot{\theta}}$ 使闭环纵倾角稳定,接下来调节 K_{Zi} , K_{Zi} 控制深度。

4 实验验证

为验证小型自治水下机器人的控制性能,我们进行了湖上试验。试验内容包括:推进与能源系统实验、自治航行控制试验、应急系统试验。由于该型机器人在试验阶段没有携带航速测量设备,所以航速控制系统没有进行闭环试验,仅对推进系统做了测试。

(1)螺旋桨转速控制试验结果,如图2所示, $n=1300\text{rpm}$,达到期望航速=4节。

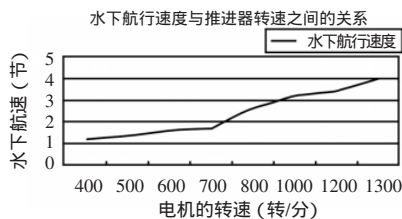


图2 推进器性能试验

(2)航向控制

水平面定向定深航行试验是指在深度不变的情况下,潜水器可以在不同方向上以各种速度进行航行,由此对潜水器在水平面内的航行控制特性进行试验。

航向控制器的表现,如图3所示,航向角由(42~98)°。我们观察到改变过程花费了10s。可以获得更快的控制,但是鲁棒性在自动驾驶系统设计时是最重要的。垂直舵探测曲线,如图4所示。

(3)深度控制

机器人下潜到4m,如图5所示。航行过程中机器人横滚小于2°,在下潜和上浮过程中纵倾角小于30°。纵倾角变化曲线,如图6所示。水平舵控制曲线,如图7所示。

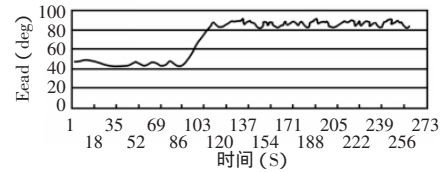


图3 航向阶跃变化曲线

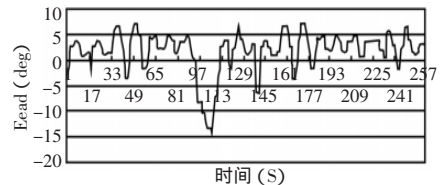


图4 垂直舵控制曲线

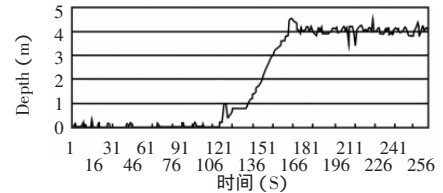


图5 深度阶跃变化曲线

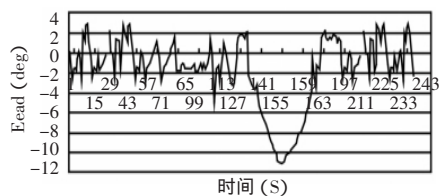


图6 纵倾角变化曲线

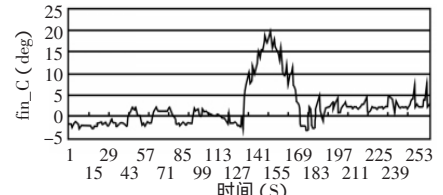


图7 水平舵控制曲线

5 结论

介绍的小型自治水下机器人以单主推和舵组合的方式操纵航行,可实现自主定深定向航行。基于简化模型设计了航行控制系统,湖上试验结果证明该控制系统具有良好的性能。

参考文献

- 1 甘永, 王丽荣等. 水下机器人嵌入式基础运动控制系统[J]. 机器人, 2004, 26(3)
- 2 金元郁. 改进的广义预测控制的稳定性分析[J]. 自动化学报, 1992, 18(4): 487-493
- 3 蒋新松, 封锡盛等. 水下机器人. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000(11): 293-297
- 4 陈厚泰. 潜艇操纵性. 北京: 国防工业出版社, 1981(6): 68
- 5 T.T.C.Tsang and D.W.Clarke. Generalized Predictive Control with Input Constraints IEE Proceedings—Control Theory and Applications [C], 1988, 135(6): 51-460
- 6 J. A. Rossiter B. Kouvantakis and J. R. Gossner. Stable Generalized Predictive Control in the Presence of Constraints and Bounded Disturbances [C]. Proceedings of the Europe Control Conference. Rome, 1995: 3241-3246
- 7 胡寿松. 自动控制原理. 北京: 国防工业出版社, 1994(5): 114