

6 自由度水下机器人动力学分析与运动控制*

边宇枢 高志慧 负超

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

摘要: 对 6 自由度水下机器人的动力学与运动控制进行研究。首先考虑重力、浮力、推力以及水动力的影响, 建立水下机器人的动力学模型, 对机器人的复杂水下动力学行为进行描述。在此基础上, 根据解出加速度法设计非线性控制器, 包括内外两个控制回路。其中外控制回路根据机器人实际轨迹与期望轨迹之间的偏差进行负反馈控制, 内控制回路根据机器人动力学特性引入非线性补偿, 把机器人转化为一个更易于控制的线性系统, 从而准确实现对理论轨迹的跟踪。最后对水下机器人跟踪目标进行运动控制仿真。从仿真结果可以看出, 利用该方法可以使水下机器人具有良好的轨迹跟踪能力。

关键词: 水下机器人 运动控制 动力学 解出加速度法

中图分类号: TP242.2

0 前言

水下机器人能够在水下执行多种作业, 因此不仅有着广泛的军事用途, 而且还是开发海洋资源的重要工具。近年来, 水下机器人的研究倍受重视, 已成为发达国家军事海洋技术研究的前沿。由于水下环境复杂, 影响运动的因素较多, 因此如何设计机器人的运动控制系统是一个十分复杂的问题^[1]。目前, 在对水下机器人的运动控制进行研究时, 多数从控制的角度出发提出多种方法, 对机器人的运动偏差从外部进行纠正与补偿, 使该问题得到一定程度的解决^[2-3]。但是, 为了更有效地提高机器人的整体运动性能, 还同时需要对机器人的复杂水下动力学行为进行深入研究。从现有的相关研究看, 通常把机器人的动力学行为简化到若干典型平面中, 然后再分别对机器人在典型平面内的运动进行控制^[4-5]。显然, 这对于控制水下机器人的复杂运动是不够的。

本文从动态控制的角度出发, 综合考虑重力、浮力、推力和水动力的影响, 建立了比较完整的 6 自由度水下机器人的动力学模型。在此基础上根据解出加速度法设计非线性控制器, 引入非线性补偿, 把机器人转化为一个更易于控制的线性系统, 从而准确实现对轨迹的跟踪。

1 机器人运动坐标系及坐标变换

为便于研究水下机器人的运动、建模与控制, 需要建立两个正交坐标系, 分别为大地坐标系和局部坐标系。其中, 大地坐标系以发射点为原点, Ox 轴、 Oy 轴在水平面内, Oz 轴沿铅垂方向竖直向下, 如图 1 所示。为便于描述刚体运动, 在水下机器人上建立如图 2 所示的局部坐标系。该坐标系的原点与机器人的重心重合, $O'x'$ 轴沿水下机器人的纵轴方向, $O'y'$ 轴垂直 $O'x'$ 轴并指向右舷方向, $O'z'$ 轴垂直于 $O'x'$ 轴与 $O'y'$ 轴组成的平面, 其方向按右手定则判定。

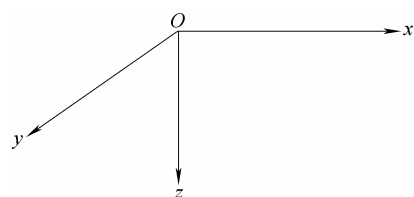


图 1 大地坐标系

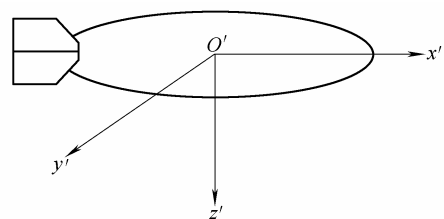


图 2 局部坐标系

在建立坐标系的基础上, 可以得出局部坐标系到大地坐标系的速度、角速度转换矩阵分别为

* 国家自然科学基金 (50075008) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划, 2001AA421200) 资助项目。20060709 收到初稿, 20070131 收到修改稿

$$T_v = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\theta & -\cos\phi\sin\varphi + \cos\varphi\sin\phi\sin\theta & \sin\varphi\sin\phi + \cos\varphi\cos\phi\sin\theta \\ \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\phi + \sin\varphi\sin\phi\sin\theta & -\cos\varphi\sin\phi + \cos\phi\sin\varphi\sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$T_\omega = \begin{pmatrix} 1 & \tan\theta\sin\phi & \tan\theta\cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 ϕ ——机器人的横滚角

θ ——机器人的纵倾角

φ ——机器人的偏航角

水下机器人速度示意图如图 3 所示, 其中 $\mathbf{u}' = (u \ v \ w)^T$ 为局部坐标系原点的速度在该坐标系中的描述; $\boldsymbol{\Omega} = (p \ q \ r)^T$ 为局部坐标系原点的角速度在该坐标系中的描述。

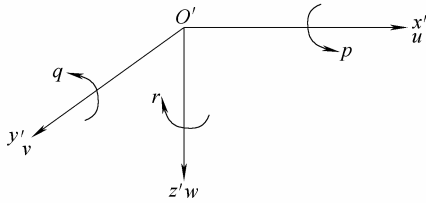


图 3 水下机器人速度示意图

2 机器人受力分析

为了设计水下机器人的控制系统, 首先需要建立机器人的动力学模型。在水下运动的机器人系统是一个非线性的动力学系统, 需要确定的参数较多, 由于技术和测试条件的限制, 有些参数无法准确测定或者无法测定。为了控制的需要, 有必要对系统进行必要的简化, 而只考虑对系统性能起主要作用的影响因素, 这里主要考虑重力、浮力、推力和水动力对机器人的影响。

2.1 重力和重力矩

水下机器人受到地球的引力作用, 由此产生的力和力矩要反映到局部坐标系中去, 可表示为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \boldsymbol{\tau} \end{pmatrix}_G = \mathbf{G}(-\sin\theta \ \cos\theta\sin\phi \ \cos\theta\cos\phi \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad (3)$$

式中 \mathbf{G} ——重力, 这里取重心与坐标原点重合, 故不产生重力矩

2.2 浮力和浮力矩

水下机器人在水中受到浮力作用, 由此产生的力和力矩要反映到局部坐标系中去, 可表示为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \boldsymbol{\tau} \end{pmatrix}_B = -\mathbf{B} \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \\ z_b\cos\theta\sin\phi - y_b\cos\theta\cos\phi \\ x_b\cos\theta\cos\phi + z_b\sin\theta \\ -y_b\sin\theta - x_b\cos\theta\sin\phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 \mathbf{B} ——水浮力

$(x_b \ y_b \ z_b)^T$ ——浮心在局部坐标系中的坐标

2.3 推动力和推动力矩

水下机器人所受推动力和推动力矩与推力器的布置有关, 推力器的布置又与水下机器人的结构、线型、尺度及运动要求有关, 属于结构设计范畴。这里暂不涉及结构设计, 只给定各推力器的布置。要求水下机器人实现 6 自由度的运动, 考虑到每对推力器可以取相同或相反的推力方向, 因此安装三对推力器就可以实现 6 自由度的运动, 参见图 4。图 4 中以箭头表示推力器, 其中推力器 T_1 、 T_2 位于 $Ox'y'$ 平面并且相对于 x' 轴对称, 实现绕 z' 轴的转动及沿 x' 轴的平动; 推力器 T_3 、 T_4 位于 $Oy'z'$ 平面并且相对于 y' 轴对称, 实现绕 x' 轴的转动及沿 y' 轴的平动; 推力器 T_5 、 T_6 位于 $Ox'z'$ 平面并且相对于 z' 轴对称, 实现绕 y' 轴的转动及沿 z' 轴的平动。

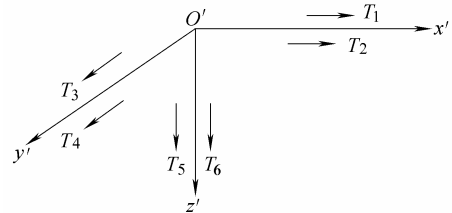


图 4 实现 6 自由度运动的推力器布置

2.3.1 推力器产生的推动力

设第 i 个推力器的螺旋桨转速为 n_i , 螺旋桨直径为 D_i , 第 i 个推力器的推力系数为 K_{Ti} , 第 i 个推力器产生的推力为 F_{Ti} , 水的密度为 ρ 。则有^[5]

$$F_{Ti} = \rho n_i^2 D_i^4 K_{Ti} \quad (5)$$

2.3.2 推力器产生的合力与合力矩

设沿 x' 、 y' 、 z' 轴方向上的合力分别为 $T_{x'}$ 、 $T_{y'}$ 、 $T_{z'}$, 作用于 x' 、 y' 、 z' 轴的合力矩分别为 K_T 、 M_T 、 N_T , 计算如下

$$T_{x'} = F_{T1} + F_{T2} \quad (6)$$

$$T_{y'} = F_{T3} + F_{T4} \quad (7)$$

$$T_{z'} = F_{T5} + F_{T6} \quad (8)$$

$$K_T = R_{T3}F_{T3} + R_{T4}F_{T4} \quad (9)$$

$$M_T = R_{T5}F_{T5} + R_{T6}F_{T6} \quad (10)$$

$$N_T = R_{T1}F_{T1} + R_{T2}F_{T2} \quad (11)$$

式中 R_{Ti} ——第 i 个推进器和与之平行的坐标轴之间的垂直距离

2.4 水动力和力矩

机器人在水中会受到水动力作用, 由此产生的力和力矩要反映到局部坐标系中。设水流在大地坐标系下的速度为 $u'_f = (u_f \ v_f \ w_f)^T$, 水流的速度在局部坐标系与大地坐标系之间的变换关系为

$$u'_f = (u_f \ v_f \ w_f)^T = T_v^{-1} (u_f \ v_f \ w_f)^T \quad (12)$$

式中 u'_f ——水流在局部坐标系下的速度
水流相对于机器人的速度 u'_r 可表示为

$$u'_r = (u_r \ v_r \ w_r)^T = u' - u'_f \quad (13)$$

2.4.1 水流阻力和阻力矩

水流阻力与水下机器人相对水流速度的平方成正比^[5]。设沿 x' 、 y' 、 z' 轴线方向的水流阻力分别为 $F_{x'}$ 、 $F_{y'}$ 、 $F_{z'}$, 它们可分别由式(14)~(16)计算

$$F_{x'} = 0.5\rho C_d S_{x'} |u_r| u_r \quad (14)$$

$$F_{y'} = 0.5\rho C_d S_{y'} |v_r| v_r \quad (15)$$

$$F_{z'} = 0.5\rho C_d S_{z'} |w_r| w_r \quad (16)$$

式中 ρ ——水密度
 C_d ——无因次阻力系数, 对于大多数水下机器人, $C_d=0.8\sim 1.0$
 $S_{x'}$, $S_{y'}$, $S_{z'}$ ——水下机器人分别垂直于 x' 、 y' 、 z' 轴的横断面面积

水流产生的阻力矩与机器人角速度平方成正比, 由试验测得阻力矩系数($K_{x'}$ 、 $K_{y'}$ 、 $K_{z'}$)后, 可以求得流体对水下机器人产生的阻力矩在 x' 、 y' 、 z' 轴上的投影分别为 $K_{x'}|p|p$ 、 $K_{y'}|q|q$ 、 $K_{z'}|r|r$ 。

2.4.2 附加质量

水下机器人在流体中加速运动时, 对周围的流体也产生作用力, 使之产生加速度, 在其周围环绕的做加速运动的流体质量称为附加质量。为了研究方便, 这里近似认为水下机器人是前后左右对称的, 则机器人沿三个轴向的附加质量只与各自轴线方向的加速度和角加速度有关。其中, 沿 x' 、 y' 、 z' 轴线方向产生的附加质量分别为 m_u 、 m_v 、 m_w , 沿 x' 、 y' 、 z' 轴旋转方向的附加质量分别为 m_p 、 m_q 、 m_r , 它们可由试验测得。

3 机器人动力学模型的建立

基于上述坐标系的建立和受力分析, 根据牛顿第二定律和动量矩定理, 可以推导求得水下机器人

动力学方程的矩阵表示形式

$$M(h)\ddot{h} + N(h, \dot{h}) = I(h)F \quad (17)$$

式中

$$\dot{h} = (u \ v \ w \ p \ q \ r)^T$$

$$\ddot{h} = (\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{w} \ \dot{p} \ \dot{q} \ \dot{r})^T$$

$$F = (T_{x'} \ T_{y'} \ T_{z'} \ K_T \ M_T \ N_T)^T$$

$$N(h, \dot{h}) = (N(1) \ N(2) \ N(3) \ N(4) \ N(5) \ N(6))^T$$

$$N(1) = F_{x'} - (m + m_u)[(qw_1 - v_1r) - (qw - vr)]$$

$$N(2) = F_{y'} - (m + m_v)[(ru_1 - w_1p) - (ru - wp)]$$

$$N(3) = F_{z'} - (m + m_w)[(pv_1 - u_1q) - (pv - uq)]$$

$$N(4) = K_{x'}|p|p + (z_b \cos\theta \sin\phi - y_b \cos\theta \cos\phi)B -$$

$$m y_b (pv_1 - u_1q) + m z_b (u_1r - pv_1)$$

$$N(5) = K_{y'}|q|q + (x_b \cos\theta \cos\phi + z_b \sin\theta)B +$$

$$m x_b (pv_1 - u_1q) - m z_b (w_1q - v_1r)$$

$$N(6) = K_{z'}|r|r - (y_b \sin\theta + x_b \cos\theta \sin\phi)B -$$

$$m x_b (ru_1 - w_1p) + m y_b (w_1q - v_1r)$$

$$M(h) = \begin{pmatrix} m_u + m & & & & & \\ & m_v + m & & & & \\ & & m_w + m & & & \\ & & & m_p + I_x & & \\ & & & & m_q + I_y & \\ & & & & & m_r + I_z \end{pmatrix}$$

$I(h)$ ——单位矩阵

m ——水下机器人的质量

求解动力学方程就可以得到机器人在局部坐标系中描述的运动规律(即 u 、 v 、 w 、 p 、 q 、 r), 然后转换到大地坐标系下得到机器人在大地坐标系中描述的运动规律

$$\dot{x} = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\varphi})^T = T(u \ v \ w \ p \ q \ r)^T \quad (18)$$

$$T = \begin{pmatrix} T_v & \theta \\ \theta & T_\omega \end{pmatrix} \quad (19)$$

式中 \dot{x} , \dot{y} , \dot{z} ——机器人在大地坐标系中沿三个轴向的速度

4 用于控制的动力学模型

水下机器人的动力学方程是在局部坐标系中建立的, 而轨迹规划及控制都是在大地坐标系中描述的, 因此为了研究水下机器人的控制, 需要将机器人在大地坐标系中描述的运动参数及控制参数转换到在局部坐标系中描述。

定义水下机器人在大地坐标系中的位置参数及姿态参数分别为

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2)^T \tag{20}$$

$$\mathbf{x}_1 = (x \quad y \quad z)^T \tag{21}$$

$$\mathbf{x}_2 = (\phi \quad \theta \quad \varphi)^T \tag{22}$$

根据式(18)可以得到水下机器人在局部坐标系和大地坐标系之间的速度、加速度、角速度和角加速度的变换关系为

$$\mathbf{u}' = \mathbf{T}_v^{-1} \dot{\mathbf{x}}_1 \tag{23}$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{T}_\omega^{-1} \dot{\mathbf{x}}_2 \tag{24}$$

$$\mathbf{u}' = \mathbf{T}_v^{-1} \ddot{\mathbf{x}}_1 \tag{25}$$

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}} = \mathbf{T}_\omega^{-1} (\ddot{\mathbf{x}}_2 - \boldsymbol{\alpha}_c) \tag{26}$$

式中, $\boldsymbol{\alpha}_c$ 通过 \mathbf{T}_ω 求导可得。

将式(23)~(26)代入到式(17)可得

$$\mathbf{F} = \mathbf{I}(\mathbf{h})^{-1} \left\{ \mathbf{M}(\mathbf{h})\mathbf{T}^{-1} \left[\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_1 \\ \ddot{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\alpha}_c \end{pmatrix} \right] + \mathbf{N}(\mathbf{h}, \dot{\mathbf{h}}) \right\} \tag{27}$$

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_v^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_\omega^{-1} \end{bmatrix} \tag{28}$$

这样, 式(17)、(27)组成了水下机器人的控制基础。

5 控制系统的设计

在对水下机器人进行动力学分析的基础上, 进一步研究机器人的运动控制。由于机器人的动力学模型是一个多变量强耦合的非线性系统, 因此需要合理设计控制器, 把机器人转化为更加易于控制的系统。

机器人在水中运动的过程中, 由于初始位置存在偏差或者水流干扰等影响, 实际运动轨迹经常与期望轨迹之间存在偏差。控制系统必须纠正这些偏差, 使机器人的实际运动能够跟踪期望轨迹。

根据以上分析, 设计如图 5 所示的控制系统, 包括一个内控制回路和外控制回路。外控制回路根据机器人实际轨迹与期望轨迹间的偏差进行负反馈控制, 可以采用比例微分控制。内控制回路的作用是根据机器人动力学特性进行动态补偿, 使得经内控制回路作用后的机器人变为一个更易于控制的系统, 化为一个解耦的线性系统。

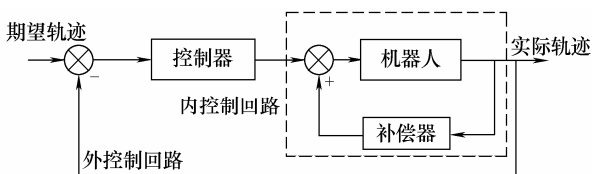


图 5 控制系统设计图

通过轨迹规划得到水下机器人在大地坐标系中的理论位置参数及姿态参数, 可表示为

$$\mathbf{x}_d = (\mathbf{x}_{d1} \quad \mathbf{x}_{d2})^T \tag{29}$$

$$\mathbf{x}_{d1} = (x_d \quad y_d \quad z_d)^T \tag{30}$$

$$\mathbf{x}_{d2} = (\phi_d \quad \theta_d \quad \varphi_d)^T \tag{31}$$

定义水下机器人的位置误差为 $\mathbf{e}_p = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{d1}$, 则有 $\dot{\mathbf{e}}_p = \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{x}}_{d1}$; $\ddot{\mathbf{e}}_p = \ddot{\mathbf{x}}_1 - \ddot{\mathbf{x}}_{d1}$ 。

水下机器人的实际姿态可以表示为 ${}^0R_n = (\mathbf{n} \quad \mathbf{O} \quad \mathbf{a})$, 期望姿态为 ${}^0R_{nd} = (\mathbf{n}_d \quad \mathbf{O}_d \quad \mathbf{a}_d)$ 。根据解出加速度法, 定义机器人的姿态误差为^[6]

$$\mathbf{e}_o = \frac{1}{2} (\mathbf{n} \times \mathbf{n}_d + \mathbf{O} \times \mathbf{O}_d + \mathbf{a} \times \mathbf{a}_d) \tag{32}$$

对式(32)求导, 可得

$$\dot{\mathbf{e}}_o = \dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{d2} \tag{33}$$

$$\ddot{\mathbf{e}}_o = \ddot{\mathbf{x}}_2 - \ddot{\mathbf{x}}_{d2} \tag{34}$$

此时, 水下机器人的位置误差与姿态误差以及误差的速度和加速度可以分别表示为

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_p \\ \mathbf{e}_o \end{pmatrix} \quad \dot{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{e}}_p \\ \dot{\mathbf{e}}_o \end{pmatrix} \quad \ddot{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{e}}_p \\ \ddot{\mathbf{e}}_o \end{pmatrix}$$

为了将水下机器人化为一个更易于控制的系统, 内控制回路根据动力学特性进行补偿, 使得

$$\mathbf{F} = \mathbf{I}(\mathbf{h})^{-1} \left\{ \mathbf{M}(\mathbf{h})\mathbf{T}^{-1} \left[\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{d1} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{d2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\alpha}_c \end{pmatrix} \right] + \mathbf{N}(\mathbf{h}, \dot{\mathbf{h}}) \right\} \tag{35}$$

这样受控水下机器人方程为

$$\mathbf{I}(\mathbf{h})^{-1} \left\{ \mathbf{M}(\mathbf{h})\mathbf{T}^{-1} \left[\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{d1} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{d2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\alpha}_c \end{pmatrix} \right] + \mathbf{N}(\mathbf{h}, \dot{\mathbf{h}}) \right\} = \mathbf{F} = \mathbf{I}(\mathbf{h})^{-1} \left\{ \mathbf{M}(\mathbf{h})\mathbf{T}^{-1} \left[\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_1 \\ \ddot{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\alpha}_c \end{pmatrix} \right] + \mathbf{N}(\mathbf{h}, \dot{\mathbf{h}}) \right\} \tag{36}$$

消去非线性项后, 式(36)等价于一个解耦的线性系统

$$\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_1 \\ \ddot{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{d1} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{d2} \end{pmatrix} \tag{37}$$

对上述线性定常系统引入偏置的比例微分控制

$$\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_1 \\ \ddot{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{d1} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{d2} \end{pmatrix} + \mathbf{K}_d \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{d1} - \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_{d2} - \dot{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} + \mathbf{K}_p \begin{pmatrix} \mathbf{e}_p \\ \mathbf{e}_o \end{pmatrix} \tag{38}$$

将误差定义代入式(37), 可得系统闭环方程为

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = \mathbf{0} \tag{39}$$

式中 $\mathbf{K}_d, \mathbf{K}_p$ ——调节参数矩阵, 均为正定阵

通过适当调节 \mathbf{K}_d 和 \mathbf{K}_p 可以获得理想的误差衰减规律, 从任何初始条件出发, 总有 $(\dot{\mathbf{e}} \quad \mathbf{e}) =$

(0 0), 实现了全局稳定的轨迹跟踪。

为了得到控制规律的完整表达式, 将式(38)代入式(27)可得

$$F = I^{-1}(h) \left\{ M(h)T^{-1} \left[\begin{pmatrix} \ddot{x}_{d1} \\ \ddot{x}_{d2} \end{pmatrix} + K_d \begin{pmatrix} \dot{x}_{d1} - \dot{x}_1 \\ \dot{x}_{d2} - \dot{x}_2 \end{pmatrix} + K_p \begin{pmatrix} e_p \\ e_o \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_c \end{pmatrix} \right] + N(h, \dot{h}) \right\} \quad (40)$$

根据以上设计的控制器, 采用 MATLAB 进行仿真。由代数方程式(40)可求得力 F , 将 F 代入水下机器人动力学方程, 求解微分方程(27)即可求得水下机器人在大地坐标系中的实际位置 x 。

6 机器人动力学仿真分析

根据以上建立的动力学模型和控制系统, 采用 MATLAB 和 SIMULINK 对水下机器人以恒定速度跟踪期望轨迹进行了仿真分析。水下机器人简化为直径 0.5 m、长 6 m 的均质圆柱体, 水流在 x 轴、 y 轴、 z 轴三个方向的速度均为 0.1 m/s, 假设浮心与重心重合。

假设目标以 8 m/s 的速度从坐标(10,10,10)处沿 x 方向匀速直线运动, 水下机器人从坐标原点以 10 m/s 的速度追踪目标, 机器人的理论轨迹采用直接瞄准法进行规划^[7]。为了验证控制系统的性能, 假设水下机器人实际出发位置与理论位置不重合, 定义 e_x 、 e_y 、 e_z 为 3 个坐标的偏差, $e_x=1$ m、 $e_y=1$ m、 $e_z=1$ m, 即: 水下机器人从位置(1,1,1)处出发。 K_d 、 K_p 为对角阵, 对角阵元素分别为 10 和 100, 仿真步长为 0.01 s。图 6~8 分别为 x 、 y 和 z 方向的偏差变化曲线。从图中可以看出, 水下机器人的实际轨迹与理论轨迹在 x 轴、 y 轴和 z 轴三个方向上的偏差趋近于零, 从而验证了水下机器人的动力学模型是正确的, 控制方法是可行的。

7 结论

从运动控制的角度出发, 综合考虑重力、浮力、推力和水动力的影响, 建立了比较完整的 6 自由度水下机器人的动力学模型, 在此基础上利用解出加速度法设计了非线性控制器对水下机器人的路径跟踪进行控制。从控制的仿真结果可以看出: 用文中方法对水下机器人的运动实施控制, 可以使机器人具有较强的抗干扰能力, 准确实现对时变理论轨迹的跟踪。

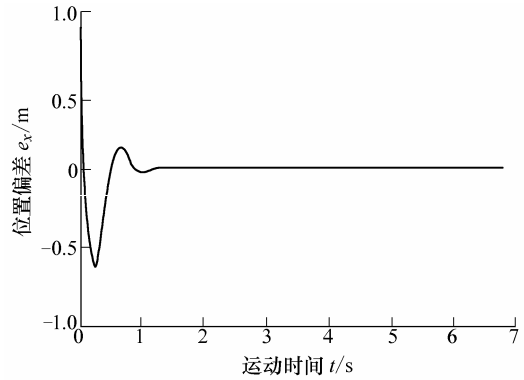


图 6 x 方向偏差变化曲线

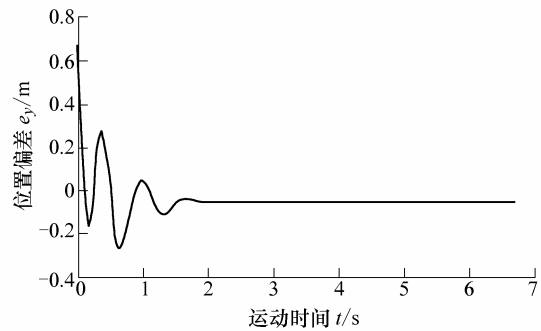


图 7 y 方向偏差变化曲线

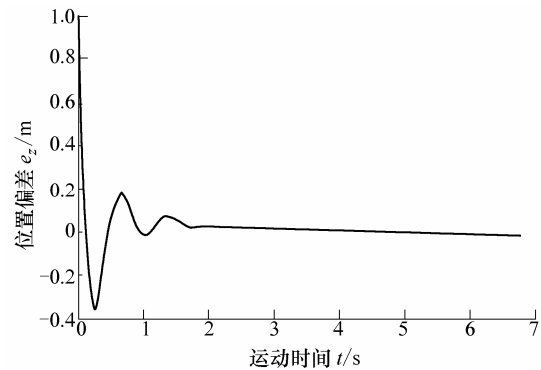


图 8 z 方向偏差变化曲线

参 考 文 献

- [1] YUH J. Design and control of autonomous underwater robots: a survey[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(1): 7-24.
- [2] ZHAO Side, YUH J. Experimental study on advanced underwater robot control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(4): 695-703.
- [3] SAKAQAMI N, INOUE M, KAWAMURA S. Theoretical and experimental studies on iterative learning control for underwater robots[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2003, 13(2): 120-127.
- [4] 陈伟. 水下无人潜器回收导引和控制技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
- [5] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳:

辽宁科技出版社, 2000.

- [6] LUH J Y S, WALKER M W, PAUL R P C. Resolved acceleration control of mechanical manipulators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1980, 25(3): 468-474.
- [7] 《鱼雷力学》编著组. 鱼雷力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

DYNAMIC ANALYSIS AND MOTION CONTROL OF 6-DOF UNDERWATER ROBOT

BIAN Yushu GAO Zhihui YUN Chao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: Dynamic analysis and motion control of the 6-DOF underwater robot are researched. Firstly, considering the comprehensive influence caused by factors such as the gravity, buoyancy, driving forces, hydrodynamic forces, etc., dynamic

equations of the underwater robot are established, which can describe the complicated underwater dynamic behavior of the robot. Then, in order to track the desired trajectory accurately, a nonlinear controller, which includes an outer loop and an inner loop, is designed using resolved acceleration method. In the outer loop, negative feedback is used to correct the deviation between the actual path and desired path. In the inner loop, based on the robot's dynamic properties, the nonlinear compensation is imported to simplify the robot system to a linear system and make it easier to control. Finally, simulations of the underwater robot tracking an object are taken. Simulation results show that the method can provide satisfactory tracking ability for underwater robots.

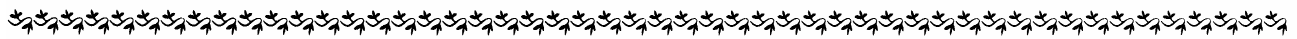
Key words: Underwater robot

Motion control Dynamics

Resolved acceleration method

作者简介: 边宇枢, 男, 1971 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机器人动力学与控制技术。

E-mail: bian_bys@buaa.edu.cn



(上接第 86 页)

Abstract: A Couette rheometer with flow visualization and pressure control is made by using the techniques of high-precision machining and dynamic sealing. With the rotating outer cylinder and static inner cylinder, the rheometer can realize stable and uniform simple shear flow of the shear rate up to $10^5/s$. Utilizing the well-known viscosity-temperature formula, the viscosities of water and silicone oils at high shear rates measured by this rheometer agree well with that obtained by the commercial rotational rheometer at low shear rates and

various temperatures. At a certain shear stress, cavitation occurred for fresh water and two silicone oils with low and medium viscosities. Strong dependence of the onset of shear cavitation on the amount of dissolved gas is observed.

Key words: Couette flow High shearing

Rheometer Cavitation

作者简介: 郭关柱, 男, 1973 年出生, 博士研究生。主要从事专用液压、专用高压气动技术及流体强剪切空化的研究。

E-mail: guoquanzhu@sohu.com