

【制造技术】

水下电动机械手动力学分析及仿真^{*}

林江

(中国船舶重工集团公司第七一〇研究所,湖北 宜昌 443003)

摘要:运用牛顿-欧拉递推算法对机械手进行动力学分析,在此基础上运用单摆动杆水动力方程建立了机械手的水动力学模型,最后对其进行动力学仿真验证。

关键词:水下电动机械手;牛顿-欧拉法;水动力学模型;仿真

中图分类号:TH122

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)06-0052-04

随着海洋开发进程的加快,作为海洋开发载体的水下机器人受到人们的关注。自治水下机器人(AUV)是所有水下机器人中种类最多的一类,可进行无人、大范围、大深度、长时间的水下观察与测量,但如果要完成水下作业任务,则必须配备相应功能的水下机械手。目前水下机械手作为一种重要的作业工具,已经有相当成熟的技术,考虑AUV能耗、动力和效率因素,系统难以配备液压机械手,而装配电动机械手可以减少能量转换损失和实现较高的控制精度^[1-3]。在分析了水下机械手作业环境及作业性能的基础上,设计了AUV用水下电动机械手,并对其进行了动力学分析及仿真。

1 机械手总体结构

水下电动机械手结构如图1所示。

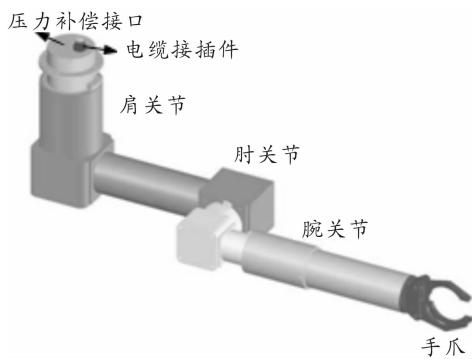


图1 水下电动机械手

水下电动机械手采用转动关节式结构,由3个旋转关节和一个抓取手爪组成。壳体形状采用圆筒型,这样既充分利用了内部空间,又减小了流体运动阻力;为实现大深度水下作业,采用内部充油方式,配置无刷直流电机和电位计以适用于充油工作条件;为减轻各关节处重量,改善

机械手可控性,驱动电机内置于关节与关节之间的连杆处;由于机械手内部空间有限,其控制器、驱动器以及电源都放置在机械手外部,通过水密接插件连接;为避免电缆在水下缠绕,将动力缆和信号缆全部配置在机械手内部,采用关节内部走线结构。

2 机械手动力学分析^[4-6]

2.1 机械手连杆坐标系

根据机械手结构,建立各连杆以及手爪坐标系如图2所示。

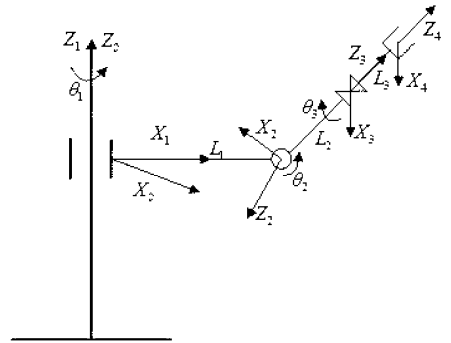


图2 机械手的D-H坐标系

利用D-H法则得到的机械手参数如图3所示。

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0°	0	θ_1
2	L_1	90°	d_2	θ_2
3	0	90°	L_2	θ_3
4	0	0°	L_3	0°

图3 机械手D-H坐标系参数

* 收稿日期:2010-04-02

作者简介:林江(1980—),男,硕士,助理工程师,主要从事水下载体结构设计研究。

可得各相邻连杆之间的变换矩阵为

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -L_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 牛顿-欧拉动力学递推算法

已知关节的转角位置、速度和加速度 $(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$, 根据机械手的质量分布信息和运动学知识, 就能计算出产生这一运动各关节所需的力矩。

在计算中, 我们用连杆坐标系 $\{0\}$ 作为基准坐标系, v_i 表示第 i 个连杆坐标系 $\{i\}$ 原点的线速度, ω_i 表示连杆坐标系 $\{i\}$ 的角速度, ${}^{i+1}P_{ci+1}$ 表示连杆 $i+1$ 的质心矢量, ${}^iP_{i+1}$ 表示连杆 $i+1$ 的坐标系原点在坐标系 $\{i\}$ 的矢量。

f_i = 连杆 $i-1$ 作用在连杆 i 上的力;

n_i = 连杆 $i-1$ 作用在连杆 i 上的力矩;

τ 表示驱动器发出的力。

相邻两连杆的转动变换 ${}^i_{i+1}R$ 为 ${}^i_{i+1}T$ 的前3行3列矩阵。

对所有关节都是转动的情况下, 牛顿-欧拉递推方程可综合写为

向外迭代计算: 从连杆0到连杆 n

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^i_{i+1}R^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}Z_{i+1}$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^i_{i+1}R^i\dot{\omega}_i + {}^i_{i+1}R^i\omega_i \times \dot{\theta}_{i+1}Z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1}Z_{i+1}$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^i_{i+1}R^i(\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + \omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + \dot{v}_i)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^i_{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{ci+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{ci+1}) + \dot{v}_{ci+1}$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1}\dot{v}_{ci+1}$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{i+1}I_{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}I_{i+1}\omega_{i+1})$$

向内迭代计算: 从连杆 $n+1$ 到连杆1

$${}^i f_i = {}^{i+1}R^{i+1}f_{i+1} + {}^i F_i$$

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}^{i+1}R^{i+1}n_{i+1} + {}^i P_{ci} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^{i+1}R^{i+1}f_{i+1}$$

$$\tau_i = {}^i n_i \cdot Z_i$$

根据机械手模型测量得到动力学方程推导过程中所需要的参数为

$$m_1 = 2.74 \text{ kg} \quad m_2 = 0.66 \text{ kg} \quad m_3 = 0.7 \text{ kg}$$

$$L_1 = 0.24 \quad L_2 = 0.19 \quad d_2 = 0.11 \quad L_3 = 0.21$$

$${}^1P_{c1} = \begin{bmatrix} 0.24 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad P_{c2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad P_{c3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.13 \end{bmatrix}$$

$${}^1I_1 = \begin{bmatrix} 0.008 & -0.003 & 0 \\ -0.003 & 0.017 & 0 \\ 0 & 0 & 0.022 \end{bmatrix}$$

$${}^2I_2 = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}$$

$${}^3I_3 = \begin{bmatrix} 0.004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.004 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0004 \end{bmatrix}$$

手爪最大抓取重量为 G , 故在手爪上的力为

$${}^4f_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin\theta_2 G \\ \cos\theta_2 G \end{bmatrix}; \quad {}^4n_4 = 0$$

机械手的基座是不转动的, 因而

$$\omega_0 = 0; \quad \dot{\omega}_0 = 0$$

考虑重力时, 有 ${}^0v_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$

代入 MATLAB 程序做符号运算, 得到机械手动力学方程

$$\tau = D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$$

$D(\theta)$ 是 3×3 的正定矩阵, 是 θ 的函数, 称为操作臂的惯性矩阵, $H(\theta, \dot{\theta})$ 是 3×1 的离心力和哥氏力向量, $G(\theta)$ 是 3×1 的重力矢量。

$$G(1,1) = 7.105\sin(\theta_2 + \theta_3) + 7.105\sin(\theta_2 - \theta_3) - 3.5525\cos(2\theta_2 - \theta_3) - 6.2475\cos(2\theta_2 + \theta_3) + 2.695\sin(2\theta_2) + 9.8\cos\theta_3$$

$$G(2,1) = 19.6\sin\theta_3\sin\theta_2 + 2.843943\sin\theta_2$$

$$G(3,1) = 0$$

$$D(1,1) = 0.3526 + 0.168\sin\theta_2 - 0.0413\cos(2\theta_2)$$

$$D(1,2) = 0.0319\cos\theta_2$$

$$D(1,3) = -0.0004\cos\theta_2 \quad D(2,1) = 0.0319\cos\theta_2$$

$$D(2,2) = 0.08328 \quad D(2,3) = 0$$

$$D(3,1) = -0.0004\cos\theta_2 \quad D(3,2) = 0$$

$$D(3,3) = 0.0004$$

$$H(1,1) = (0.08258\sin(2\theta_2) + 0.1682\cos\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + 0.0004\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3\sin\theta_2 - 0.0319\dot{\theta}_2^2\sin\theta_2$$

$$H(2,1) = (-0.08258\sin\theta_2\cos\theta_2 + 0.0841\cos\theta_2)\dot{\theta}_1^2 - 0.0004\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3\sin\theta_2$$

$$H(3,1) = 0.0004\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2$$

2.3 机械手水动力模型

借助平移运动圆柱体在静水中的水动力方程,将摆动臂分成 n 等份,推导出单摆动杆的水动力方程,包含拖曳力和附加质量力部分

$$dF_{hyd,i} = \frac{1}{2}\rho C_d V_{yi} |V_{yi}| D dl_i + \frac{1}{4}\rho C_m \pi D^2 dl_i \frac{dV_{yi}}{dt}$$

其中: C_d 为拖曳系数; C_m 为附加质量力系数; D 、 L 分别为摆动圆柱杆的直径和长度; V_{yi} 为摆动臂的第 i 等份处的线速度; l_i 为第 i 等份处所受力的作用点距离关节处的距离; dl_i 为第 i 等份长度理论值,各运动量的具体含义见图4所示。

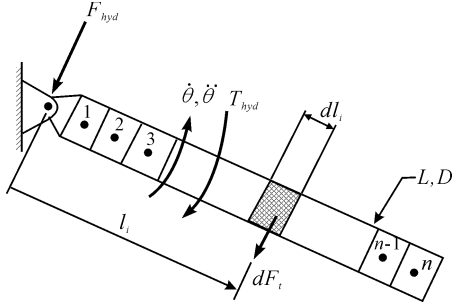


图4 单关节摆动机械手符号示意图

单摆动臂的水动力力矩可表达为

$$\tau_{hyd} = \sum_{i=1}^n l_i \times dF_{hyd}$$

利用上述单摆动臂水动力力矩的计算方法,针对本论文中所设计的机械手,将腕关节长度并入肘关节,对其肩关节和肘关节进行水动力计算,分别将两连杆进行 n 等分, dl_i 代表肩关节连杆处的微元, dl_j 代表肘关节连杆处的微元, ρ 为水密度, D_1 、 D_2 为连杆直径, C_{d1} 、 C_{d2} 、 C_{m1} 、 C_{m2} 分别对应肩部和肘部的拖曳系数和附加质量力系数。各参数示意如图5所示,参考前面所建立的机械手 $D-H$ 坐标系,得到两关节处的拖曳力矩和附加质量力矩。

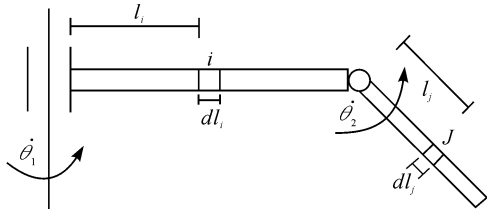


图5 机械手符号示意图

$${}^1\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} \theta_1 \sin \theta_2 \\ \theta_1 \cos \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad v_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2v_2 = \begin{bmatrix} \theta_1 d_2 \cos \theta_2 \\ -\theta_1 d_2 \sin \theta_2 \\ -L_1 \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad v_{1,i} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_i \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2v_{2,lj} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 d_2 \cos \theta_2 + l_j \dot{\theta}_2 \\ -\dot{\theta}_1 d_2 \sin \theta_2 \\ -L_1 \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_1 l_j \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$${}^1v_{2,lj} = {}^2R^2 v_{2,lj} = \begin{bmatrix} d_2 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 l_j \cos \theta_2 \\ L_1 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_1 l_j \sin \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 l_j \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$v_{y1,li} = l_i \dot{\theta}_1 v_{y2,lj} = \dot{\theta}_1 d_2 \cos \theta_2 + l_j \dot{\theta}_2$$

$$v_{y1,lj} = L_1 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_1 l_j \sin \theta_2$$

$$\tau_{shoulder,1} = \frac{1}{2}\rho C_{d1} D_1 \int_0^{l_1} v_{y1,lj} |v_{y1,lj}| dl_i + \frac{1}{2}\rho C_{d2} D_2 \int_0^{l_2} v_{y1,lj} |v_{y1,lj}| \cdot \sqrt{(L_1 + l_j \sin \theta_2)^2 + (l_j \cos \theta_2)^2} \cdot d(\sqrt{(L_1 + l_j \sin \theta_2)^2 + (l_j \cos \theta_2)^2})$$

$$\tau_{shoulder,2} = \frac{\pi}{4}\rho C_{m1} D_1^2 \int_0^{l_1} \frac{d(v_{y1,li})}{dt} l_i dl_i + \frac{\pi}{4}\rho C_{m2} D_2^2 \int_0^{l_2} \frac{d(v_{y1,lj})}{dt} \cdot \sqrt{(L_1 + l_j \sin \theta_2)^2 + (l_j \cos \theta_2)^2} \cdot d(\sqrt{(L_1 + l_j \sin \theta_2)^2 + (l_j \cos \theta_2)^2})$$

$$\tau_{elbow,1} = \frac{1}{2}\rho C_{d2} D_2 \int_0^{l_2} v_{y2,lj} |v_{y2,lj}| l_j dl_j$$

$$\tau_{elbow,2} = \frac{\pi}{4}\rho C_{m2} D_2^2 \int_0^{l_2} \frac{d(v_{y2,lj})}{dt} l_j dl_j$$

$\tau_{i,1}$ 和 $\tau_{i,2}$ 分别代表拖曳力矩和附加质量力矩。 s_2 、 c_2 分别表示 $\sin \theta_2$ 、 $\cos \theta_2$ 。

考虑机械手水动力力矩,得到此时机械手动力学方程封闭形式

$$\tau = D'(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + T(\theta, \dot{\theta})$$

$D'(\theta)$ 为包含附加质量力的惯性矩阵, $T(\theta, \dot{\theta})$ 为拖曳力矩。

3 仿真

根据加入拖曳力矩和附加质量力矩修正后的水下电动机械手动力学模型,采用PD加前馈控制算法对正弦信号跟踪进行仿真,各关节处驱动力矩如图6~图8所示。

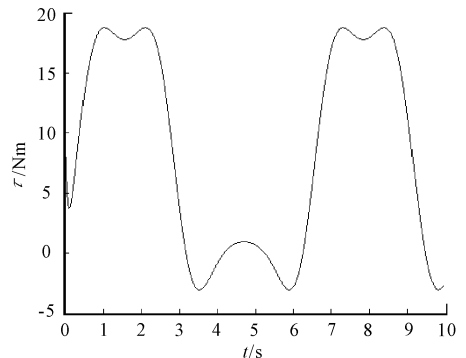


图6 肩关节力矩

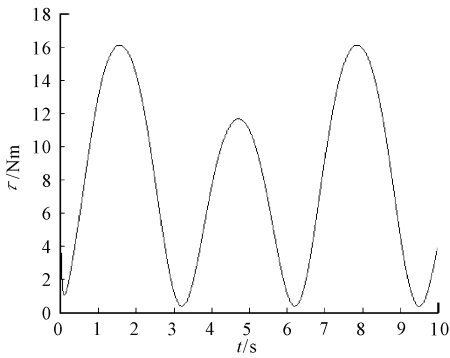


图7 肘关节力矩

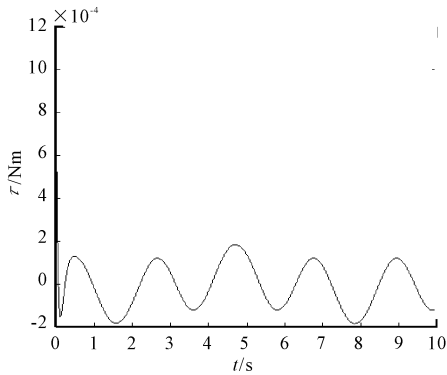


图8 腕关节力矩

学模型;在单关节摆动杆水动力方程的基础上,针对本文中设计的水下电动机械手,推算出两关节摆动杆的拖曳力矩和附加质量力矩,完善了水下机械手的动力学方程,并对其进行了仿真验证。机械手的动力学建模是机械手控制的基础,机械手的轨迹控制和力矩控制都需要建立机械手的动力学模型,这将为进一步研究水下电动机械手的控制打下基础。

参考文献:

- [1] 蒋新松,封锡盛.水下机器人[M].辽宁:辽宁科学技术出版社,2000.
- [2] 张铭钧.水下机器人[M].北京:海洋出版社,2000.
- [3] 孟庆鑫,张明均.水下机器人作业机械手的研究与发展[J].海洋技术,1995,14(4):108-111.
- [4] T. W. McClain, S. M. Rock. Experiment in the hydrodynamic modeling of an underwater manipulator[C]. In Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, 1996:463-469.
- [5] C. C. Lin, R. C. Chen, et al. Experiment Determination of the Hydrodynamic Coefficients of an Underwater Manipulator[J]. Journal of Robotic systems, 1999, 16(6):329-333.
- [6] T. N. Leabourne, S. M. Rock. Model development of an underwater manipulator for coordinated arm-vehicle control[C]. in OCEANS' 98 Conference Proceedings. 1998, 2:941-946.

(责任编辑 周江川)

4 结束语

设计了AUV用水下电动机械手,根据机械手坐标系D-H法则,运用牛顿-欧拉递推算法建立了机械手的动力

(上接第47页)

4.2 强化人员操作技能。一是缩短沟通时间、提高传输速度。在通信沟通时,要思维敏捷、精神集中,做到呼叫短、回答快、收听准;在信息传输时,做到及时加密,精简电文,发短信,通短报,提高报话人员的工作技能。二是灵活运用频率,实施巧妙周旋。在受对方干扰时,果断迅速实施大幅度、大范围的改频。还可以按规定的的时间和频率不规则的顺序实施改频,与敌方进行周旋。

参考文献:

- [1] 陈志伟,王宇法.对防空兵指控系统抗复杂电磁干扰的探讨[J].军队指挥自动化,2006(6):101-103.

(责任编辑 刘舸)

- [2] 田国宝.复杂电磁环境下导弹部队通信对抗问题研究[J].军事通信技术,2007(5):66-67.
- [3] 王仁贤,黄国亮.复杂电磁环境下边境防卫作战通信组织运用研究[J].军事通信技术,2007(5):70-71.
- [4] 陈志伟,王宇法,李德龙.地空导弹机动作战防空兵群抗复杂电磁干扰问题研究[J].军队指挥自动化,2007(3):25-27.
- [5] 王湘文.对Ad Hoc网络通信干扰效能评估研究[J].四川兵工学报,2009,30(5):80-82.
- [6] 唐克,杜涛,王存威.无线电通信干扰弹作战效能研究[J].兵工自动化,2009,28(7):63.