

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.07.007

液压推进型水下机器人的运动控制方法研究*

田烈余¹, 周 锋², 张培豪³, 陈宗恒¹

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 浙江晶盛机电股份有限公司, 浙江 上虞 312300; 3. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要:针对液压推进型水下机器人的定向控制问题,对液压推进器的比例滞环、机器人多自由度运动模型、控制器设计等方面进行了研究,提出了液压推进器转速PI控制与ROV定向PID控制相结合的控制方法;在Matlab/Simulink中建立了海马号水下机器人的六自由度动力学模型,并设计了带螺旋桨转速PI闭环的定向控制器;该定向控制器包括控制手柄输入、定向PID控制器、推力分配及合成矩阵、螺旋桨转速PI控制器等,利用仿真试验模型对控制器进行了抗干扰测试。仿真结果表明:所提出的复合PID控制器可显著减小由于液压推进器推力不一致引起的定向角度控制误差,具有比常规PID控制器更好的控制性能。

关键词:液压推进器;PID控制;转速闭环;运动控制

中图分类号:TH137;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)07-0694-04

Motion control method of underwater vehicle with hydraulic thrusters

TIAN Lie-yu¹, ZHOU Feng², ZHANG Pei-hao³, CHEN Zong-heng¹

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangdong University, Guangzhou 510760, China;
2. Zhejiang Jingsheng M&E Co., Ltd., Shangyu 312300, China;
3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Aiming at the heading control problems of underwater vehicle with hydraulic thrusters, the proportional hysteresis, the multi-degree-of-freedom model of the robot, the design of the controller and so on were studied. A control method combining the thruster speed PI control and the heading PID control was proposed. The 6 degree of freedom model of Hama ROV was established in Matlab/Simulink, and a heading controller with the thruster speed PI loop was designed. This heading controller includes control handle input, a heading PID controller, thrust distribution and synthesis matrix, propeller rotation PI controllers. The simulation model was used to test the anti-interference performance of the controller. The simulation results indicate that this combined PID controller can decrease the angle error caused by the thrust imbalance of the thrusters, and has better control performance compared with normal PID controller.

Key words: hydraulic thrusters; PID control; speed loop; motion control

0 引 言

ROV(remotely operated vehicle)作为海洋科学考察、资源开发及水下工程等领域的重要作业工具,其运动控制仍是国内外研究热点之一^[1]。而液压推进型ROV由于其功率密度大和调速性能好,广泛应用于水

下大功率作业。对于ROV的运动控制方法研究,目前已有许多重要成果。TEHRANI^[2]使用PID控制器实现了“DENA”ROV的深度控制;HOU和CHEAH^[3]采用PD控制器实现了多个水下机器人的编队控制;此外,也有学者将PID控制方法与其他控制方法结合,如TANG等^[4]将PID控制算法与非线性模糊补偿结合,

收稿日期:2017-11-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2008AA092301)

作者简介:田烈余(1981-),男,山东临沂人,硕士,工程师,主要从事水下机器人方面的研究。E-mail: tianlieyu23@163.com

在 ROV 定深控制时成功抑制了超调;MA 等^[5]引入蚁群算法对 PID 参数进行在线优化,实现了 ROV 的定深、定高和定向控制。

然而大多 ROV 控制算法以研究电推进器为主,针对液压推进器的控制研究较少。液压推进控制系统与电机控制相比,非线性特点更为显著。比例电磁阀的磁滞现象以及液压参数波动(油温和压力等)的存在使液压推进器的开环控制性能相对较差。多个推进器的不一致容易使 ROV 在定向控制中产生较大控制偏差,对潜器的运动和作业能力产生较大影响。

本文将提出一种将液压推进器转速 PI 控制与 ROV 艏向 PID 控制相结合的控制方法。

1 水下机器人运动学建模

海马号 ROV 的固定坐标系和艇体坐标系(运动坐标系)如图 1 所示。

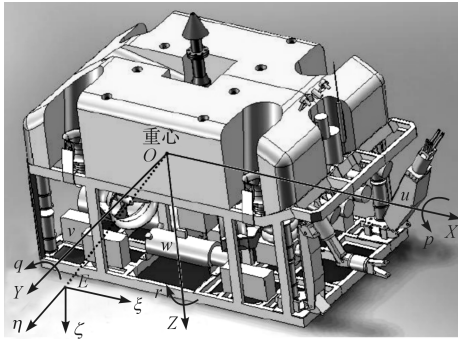


图1 海马号 ROV 的固定坐标系和艇体坐标系

在固定坐标系下,可将 ROV 的六自由度位置/姿态描述成向量 $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$;在艇体坐标系下,可将 ROV 速度和角速度描述成向量 $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$,将其受力和力矩描述成向量 $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ ^[6-7]。ROV 在艇体坐标系下的状态向量 ν 可通过欧拉角变换转换至固定坐标系,其表达式如下:

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (1)$$

式中: $J(\eta)$ —坐标转换矩阵。

在艇体坐标系中,ROV 运动的动力学方程可采用基于 Fossen 大纲非线性模型表示^[8]:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + \Delta f \quad (2)$$

式中: M 为质量惯性矩阵; $C(\nu)$ —科氏力和向心力矩阵; $D(\nu)$ —水动力阻尼矩阵; $g(\eta)$ —重力和浮力产生的力和力矩向量; τ —推进系统产生的控制力和力矩; Δf —未知干扰力/力矩向量。

海马号有 8 个液压推进器,其中 4 个水平推进器为矢量布置,4 个垂直推进器推力方向与 XY 平面夹 75 度角,推进系统产生的推力可表示为向量 $u = [u_1, u_2,$

$u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8]^T$ 。由于液压型 ROV 本身质量大且浮心位于重心上,在横倾和纵倾方向有足够大的复原力矩,故 ROV 控制系统较多采用简化四自由度模型^[9-10]。故 ROV 所受力和力矩向量 τ (忽略横倾角和纵倾角控制)可表示为:

$$\tau' = Bu = [B_1, B_2]u \quad (3)$$

其中:

$$\tau' = [X, Y, Z, N]^T$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \sin\alpha & \sin\alpha & -\sin\alpha & -\sin\alpha \\ \cos\alpha & -\cos\alpha & \cos\alpha & -\cos\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ l & -l & l & -l \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\beta & -\cos\beta & -\cos\beta & \cos\beta \\ -\sin\beta & -\sin\beta & -\sin\beta & -\sin\beta \\ d\cos\beta & -d\cos\beta & d\cos\beta & -d\cos\beta \end{bmatrix}。$$

式中: α —水平推进器推力方向与 X 轴夹角; β —垂直推进器推力方向与 XY 平面的夹角; d —垂直推力与 Y 轴的作用距离; l —水平推力与重心间的作用距离。

2 运动控制器设计

ROV 的定向控制原理如图 2 所示。

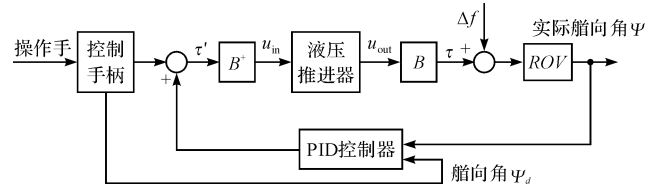


图2 ROV 的定向控制原理

期望艏向角 ψ_d 由操作手给定,通过 PID 控制器可得到一个输出转矩 τ' ,再经过推力分配矩阵 B^* 得出每个推进器的输入力大小。常规 PID 控制器在液压推进器上采用开环控制,并不考虑磁滞现象等的影响,因此由推进器不一致产生的控制误差不能忽视。

为解决控制输入 u_{in} 与推进器推力输出 u_{out} 间由电磁滞环带来的不一致问题,可将转速 PI 控制器应用于每个螺旋桨控制。

考虑到螺旋桨推力与转速平方成正比(推力比例系数为 C_f),本研究以水平螺旋桨 u_1 为例,设计其控制结构如图 3 所示。

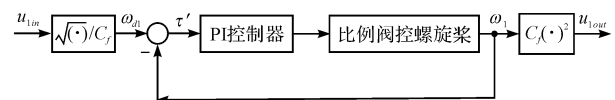


图3 水平螺旋桨的 PI 控制器

3 仿真研究

本研究在 Matlab/Simulink 中建立 ROV 运动控制仿真模型,如图 4 所示。

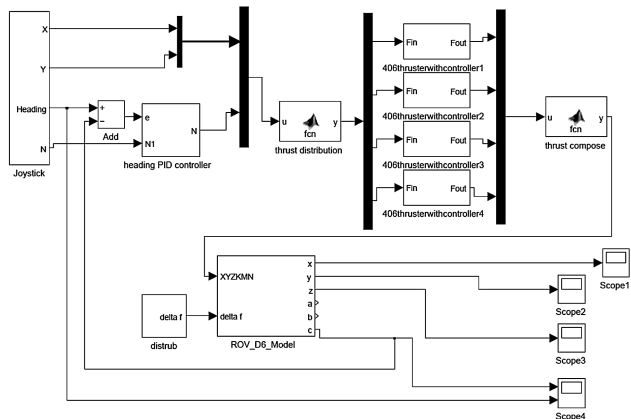


图 4 ROV 运动控制的仿真模型

该模型主要由控制手柄输入、定向 PID 控制器、推力分配及合成矩阵、螺旋桨和 ROV 六自由度模型组成。其中,控制手柄为四自由度模型,ROV 定向 PID 控制器为单输入单输出控制器。

为减小电磁滞环等干扰的影响,本研究在 ROV 推进器模型中增加了图 2 所示的 PI 控制器以精确控制转速及推力。为增加仿真对比,常规 PID 控制的推进器模型采用推进器开环比例控制,同时在阀控螺旋桨模型中增加了随机的 20 kgf 幅值的推力干扰。

仿真主要参数如表 1 所示。

表 1 ROV 控制仿真参数

参数	数值
长 L/m	3.1
宽 B/m	1.8
高 H/m	2.0
空气中质量 $/kg$	4 187.5
Ox 轴转动惯量 $I_x/(kg \cdot m^2)$	2 038
Oy 轴转动惯量 $I_y/(kg \cdot m^2)$	3 587
Oz 轴转动惯量 $I_z/(kg \cdot m^2)$	3 587
重心位置 $(x_G, y_G, z_G)/m$	(0,0,0)
浮心位置 $(x_B, y_B, z_B)/m$	(0,0,-0.39)
纵向水动力系数 X_u/kg	-3 179
纵向水动力系数 $X_u/(kg \cdot s^{-1})$	-1 347
纵向水动力系数 $X_{u u} /(kg \cdot m^{-1})$	-1 924
横向水动力系数 Y_v/kg	-4 546
横向水动力系数 $Y_v/(kg \cdot s^{-1})$	-2 401
横向水动力系数 $Y_{v v} /(kg \cdot m^{-1})$	-2 381
艏摇水动力矩系数 $N_r/(kg \cdot m^2)$	-3 614
艏摇水动力矩系数 $N_r/(kg \cdot m^2 \cdot s^{-1})$	-5 694
艏摇水动力矩系数 $N_{r v} /(kg \cdot m^2 \cdot s^{-1})$	-2 033
推进器推力系数 $C_F/(N \cdot s^2 \cdot rad^{-2})$	0.30
推进器最大转速 $\omega_{max}/(rad \cdot s^{-1})$	104.6
推进器近似一阶模型时间常数 T_p/s	0.05

ROV 的控制手柄输入在仿真过程中仍保持 $\tau' = [4\ 000, 0, 0, 0]^T$, 艏向 PID 控制器设定值为 0(控制器参数 $K_p = 6\ 000, K_i = 0, K_d = 2\ 500$)。同时增加了干扰向量 $\Delta f = [0, 0, 0, 0, 0, 1\ 000]^T$, 作用时间在 10 s ~ 12 s 内, 一阶滤波常数为 1 s。

艏摇干扰力矩如图 5 所示(干扰向量作用时间较短, 一阶滤波后峰值约 860 Nm)。

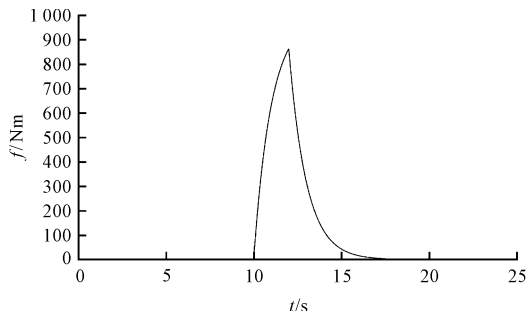


图 5 ROV 定向控制的艏摇干扰力矩

ROV 水面定向运动时的偏航角仿真结果对比(普通 PID 和复合 PID 控制器)如图 6 所示。

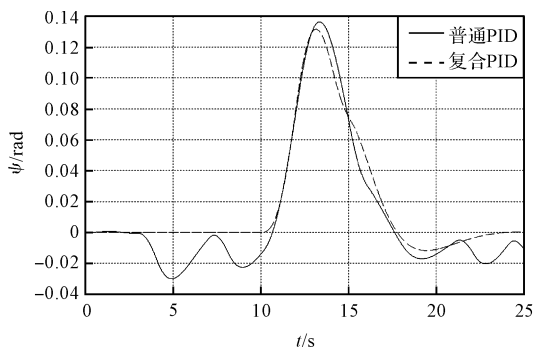


图 6 ROV 定向控制的偏航角仿真结果

艏左水平推进器转速仿真结果对比如图 7 所示。

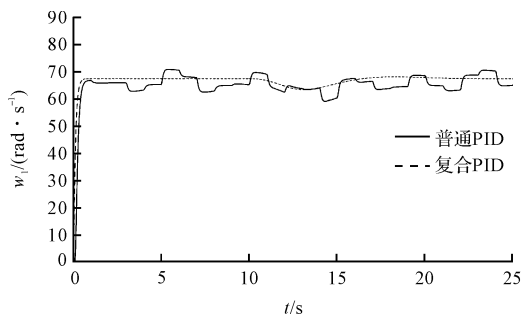


图 7 ROV 定向控制的艏左水平推进器仿真结果

由仿真曲线可知:复合 PID 控制器在干扰扭转作用时偏航角变化波动更小,并且在干扰消失后能快速恢复至设定值。这主要是由于转速控制闭环使螺旋桨转速有更好的稳态精度及更快的响应时间。

ROV 原地转艏 90° 和 180° 的阶跃响应仿真结果分别如图(8,9)所示。

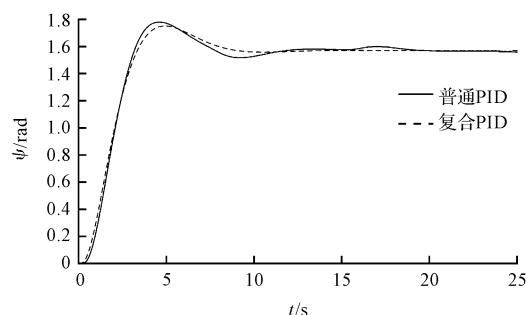


图8 ROV 转艏 90 度阶跃仿真结果

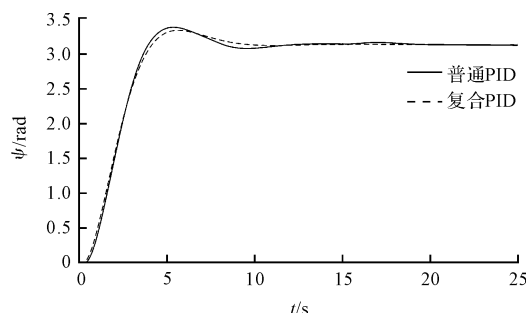


图9 ROV 转艏 180 度阶跃仿真结果

由图可知:两种控制器稳态精度和响应速度相差不多,但复合PID控制器有更小的超调量。

4 结束语

ROV 液压推进器比例滞环和转速控制精度误差会引起定向控制产生较大的角度偏差,改善推进器本身的控制特性是解决该方法之一。因此本文在 Matlab/Simulink 中建立了海马号水下机器人的六自由度动力学模型,并设计了带螺旋桨转速 PI 闭环的复合 PID 定向控制器以改善推进器固有特性。

仿真结果表明:与常规 PID 控制器相比,本文所提出的复合 PID 控制器有更好的控制性能,可显著减小由液压推进器推力不一致以及外界干扰引起的偏航角波动,提高定向控制精度,在 ROV 转艏控制时偏航角具有更小的超调量。

参考文献 (References):

- [1] YE L I, PANG Y J, CHEN Y, et al. A hull-inspect ROV control system architecture [J]. 中国海洋工程:英文版, 2009, 23(4):751-761.
- [2] TEHRANI N H, HEIDARI M, ZAKERI Y, et al. Development, depth control and stability analysis of an underwater remotely operated vehicle (ROV) [C]. 2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation, Xiamen: IEEE, 2010.
- [3] HOU S P, CHEAH C C. PD control scheme for formation control of multiple autonomous underwater vehicles [C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Singapore:IEEE, 2009.
- [4] TANG Zhi-jie, PENG Yan, LUO Jun. A novel ROV depth control based on LSM fitting predictor and fuzzy compensation [C]. 2010 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Chengdu: IEEE, 2010.
- [5] MA Zhi-jie, PANG Yong-jie, JIANG Chan-juan, et al. Research on the optimization of PID control of remotely operated underwater vehicle [C]. 2011 International Conference on Computer Science and Service System, Nanjin: IEEE, 2011.
- [6] 周 锋. 深海 ROV 液压推进系统的稳定性和控制方法研究 [D]. 杭州:浙江大学机械工程学院, 2015.
- [7] 单俊峰, 罗占涛, 柳 华. 液压阀泄漏量的测试方法研究 [J]. 液压气动与密封, 2017(1):31-33.
- [8] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [9] 朱康武, 顾临怡. 作业型遥控水下运载器的多变量 back-stepping 鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1441-1446.
- [10] CAO J, YIN H, LIU C, et al. A fuzzy controller based on incomplete differential ahead PID algorithm for a remotely operated vehicle [J]. Ocean Systems Engineering, 2013, 3(3):237-255.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

田烈余,周 锋,张培豪,等. 液压推进型水下机器人的运动控制方法研究[J]. 机电工程, 2018, 35(7):694-697.

TIAN Lie-yu, ZHOU Feng, ZHANG Pei-hao, et al. Motion control method of underwater vehicle with hydraulic thrusters [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(7):694-697.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>