

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208987

# 一种船舶清洗 ROV 姿态控制方法研究与实现

武少波 冯晓东 杨文涛

(北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)

**摘要:** 为了减少因海生物附着形成污底对船舶航行造成的阻力,提高船舶的运输效率,研究设计了一种基于六推进器的船舶清洗 ROV。首先对该机器人进行了相应软硬件方案设计,且依据实际应用需求选择了机器人驱动与测量元件,进而使用 Solidworks 三维机械制图软件完成了 ROV 结构外形设计,同时对 ROV 样机进行了结构组装与系统测试。在此基础上,为了提高船舶清洗 ROV 姿态控制过程的性能指标,提出一种改进型变积分 PID 控制算法,根据偏差量的变化将整个姿态控制过程规划为不同阶段,通过调节积分项的开关量系数以满足不同阶段的需求;最后通过 MATLAB 仿真软件对改进型 ROV 姿态控制系统进行仿真并完成实际水池实验,通过设定不同目标角度测试控制系统的性能。结果表明,该算法比传统单闭环与双闭环 PID 控制算法具有更短的过渡时间及更加优良的稳定性,是一种稳定高效的 ROV 姿态控制方式。

**关键词:** ROV;船舶清洗机器人;软硬件设计;姿态控制系统设计;改进 PID

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.1050

## Research and implementation of attitude control method for underwater ship hull cleaning ROV

Wu Shaobo Feng Xiaodong Yang Wentao

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to reduce the resistance caused by the adhesion of Marine organisms to the ship sailing and improve the transport efficiency of the ship, a underwater ship hull cleaning ROV based on six thrusters is designed. Firstly, the corresponding software and hardware scheme of the robot was designed, and the driving and measuring components of the robot were selected according to the actual application requirements. Then, the structure of the ROV was designed using Solidworks 3D mechanical drawing software, and the structure assembly and system test of the ROV prototype were carried out. At the same time, in order to improve the performance index of ROV attitude control process of ship cleaning, an improved variable integral PID control algorithm is proposed. According to the change of the amount of deviation, the whole attitude control process is planned into different stages, and the switching coefficient of the integral term is adjusted to meet the needs of different stages. Finally, the improved ROV attitude control system was simulated and tested by MATLAB simulation software. The results show that the algorithm has shorter transition time and better stability than the traditional single closed loop and double closed loop PID control algorithm, and it is a stable and efficient ROV attitude control mode.

**Keywords:** ROV; the underwater ship hull cleaning robot; software and hardware design; design of attitude control system; improved PID

## 0 引言

随着全球贸易的飞速发展,各个国家对船舶的使用也越来越多,由于船身需要长期浸泡在海水中,将会导致浸入海水的船体部分附着大量海生物,例如藤壶等,这将对船舶性能产生极大的危害<sup>[1]</sup>,所以应用于船舶清洗的遥控式有

缆无人潜水器(remote operated vehicle, ROV)受到了国内外的广泛关注<sup>[2]</sup>。在 ROV 的运动控制中其姿态控制则是至关重要的,是保证 ROV 在作业过程中维持预计艏向、完成船体贴壁等任务的关键技术,简洁高效的姿态控制算法能够显著提高 ROV 的作业效率。在实际应用中姿态控制系统的设计难点在于,ROV 水下运动具有非线性、时变性

收稿日期:2022-02-09

的特点,同时各个自由度运动之间的耦合关系复杂<sup>[3]</sup>,加之海浪干扰,更使 ROV 的控制存在不稳定因素。

国内外该领域大量研究学者针对 ROV 姿态控制进行了相关研究。文献[4]提出了一种将反演法与滑模控制相结合的轨迹跟踪与姿态控制方法,取得了较为优越的仿真效果;文献[5]提出了一种基于模糊 PD-PI 的姿态控制方法,将 ROV 工作阶段采用模糊控制划分,增强了姿态控制系统的抗干扰能力;文献[6]将滑模自适应控制运用于 AUV 的纵倾角跟踪问题,很好的提高了控制系统的稳定性;另外,也有相关研究学者应用常规 PID 算法进行 ROV 姿态控制<sup>[7]</sup>,常规 PID 控制器虽然算法成熟,鲁棒性好,但是也有一定缺点,例如对系统参数和环境变化适应性不够良好。综上所述,目前大多数 ROV 控制算法仅限于仿真层面,而目前应用较为广泛的 PID 控制则有着控制精度不足的缺点,在干扰较大时无法满足应用要求。

为解决 ROV 姿态控制问题,本文提出了一种改进型变积分 PID 控制算法,使 ROV 控制系统能够很好适应不同的工况,该方法拥有良好的动态性能和控制精度,各项性能指标较优,取得了很好的控制效果。

## 1 ROV 系统设计

### 1.1 ROV 外形设计技术指标

为测试船体清洗 ROV 姿态控制效果,本文设计了 ROV 样机作为研究对象测试算法性能,此 ROV 在空气中的总重约为 17.58 kg,长 0.70 m、宽 0.50 m、高 0.40 m,重心与浮心之间的稳心高度约为 0.08 m。ROV 的主体由耐压电子舱与开架式金属框架组成,主体框架用于固定浮体模块、配重块与水下推进器等设备。此 ROV 具有 5 个自由度的运动方式,其水平方向装配了左右两个水下推进器,布置于 ROV 尾部同一平面上,用以控制其在水平面内完成前进后退与转艏运动;垂直方向装配了 4 个推进器,分别布置于 ROV 横剖面对角线上,用以控制其在垂直面内完成潜浮、纵倾与横滚运动,ROV 结构外形如图 1 所示。

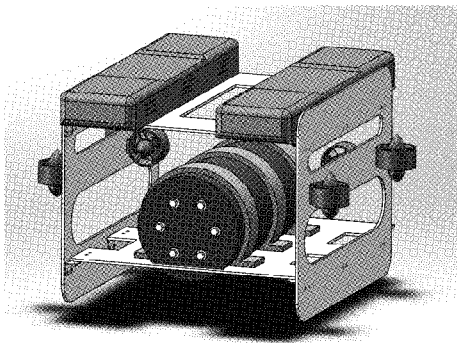


图 1 ROV 结构示意图

为了提高小型 ROV 整体的稳定性,ROV 框架采用开架式结构设计,这种形式非常便于框架的后期加工与装配,同时考虑到水压载荷较小的情况,耐压电子舱采用圆柱体

结构<sup>[8-9]</sup>。同时将耐压电子舱装配在主体框架的下底面,并用金属圆箍进行固定防止耐压电子舱发生旋转,而提供 ROV 首要浮力的浮体模块则布置于金属框架的上表面,以此提高 ROV 整体浮心与重心之间的距离,从而增大 ROV 自身的回复力矩<sup>[10]</sup>。

### 1.2 ROV 软硬件系统设计

#### 1) 硬件系统设计架构

本文设计的基于 STM32 单片机的 ROV 硬件控制系统主要由陆上操控系统与水下作业系统构成,本节基于模块化的思想,又将水下作业系统分为姿态采集系统、处理器下位机系统与运动执行系统,具体系统设计方案如图 2 所示。

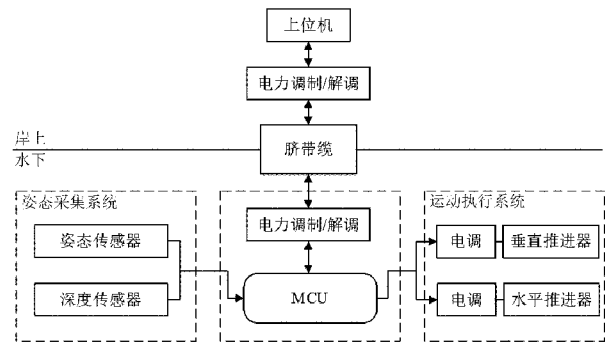


图 2 ROV 硬件系统结构

(1)姿态采集系统由三轴加速度计、MPU6500 陀螺仪、AK8963 磁力计与 MS5837 深度传感器组成,4 者将 ROV 实时姿态及深度原始数据反馈至主处理器,进而由主处理器将接收的传感器原始数据进行融合解算得到 ROV 实时深度值与姿态信息<sup>[11]</sup>,最后通过 UDP 协议将姿态深度值通过电力载波模块与脐带缆传送到上位机进行显示。

(2)处理器系统由 STM32F407 主处理器和处理器上位机系统组成,主处理器在接收上位机命令或算法输出信息后发送相应命令,由 MCU 定时器引脚输出 6 路 PWM 波形到运动执行系统的水下推进器,从而驱动 ROV 完成各种复杂的运动控制。

(3)运动执行系统由 6 个与无刷电调相匹配的水下推进器构成。本文中 ROV 电调选用好盈天行者 40 A 无刷双向电调,工作时周期设置为 20 ms,接受脉宽范围是 800~2 200  $\mu\text{s}$ ,中位是 1 500  $\mu\text{s}$ ,脉宽大于 1 500  $\mu\text{s}$  时推进器正向旋转,脉宽小于 1 500  $\mu\text{s}$  时推进器反向旋转,当脉宽达到 800  $\mu\text{s}$  与 2 200  $\mu\text{s}$  时分别为正反转最大转速。水下推进器则是选用 T60 双向水下推进器,电机值为 860 kV,正转最大推力为 21 N,反转最大推力为 19 N。

#### 2) 软件设计架构

本系统在 Freertos 实时操作系统的基础上进行 ROV 软件开发。在整个机器人系统使用过程中,根据探索需求分为多个任务,每个任务需要设置一定的优先级和堆栈资源,由嵌入式操作系统根据优先级来分配每个任务所需的系统资源并进行相应调度。

根据本系统的基础探索要求,设置了 5 个主要任务,系统总框图如图 3 所示。在控制过程中,ROV 通过以太网获取上位机控制数据,并且将控制数据转化动作单元的控制

命令,机器人会根据命令来完成相应动作,同时传感器任务会将当前自身传感器获取的数据进行接收解算并通过以太网发送回上位机,从而完成多样化的探索任务。

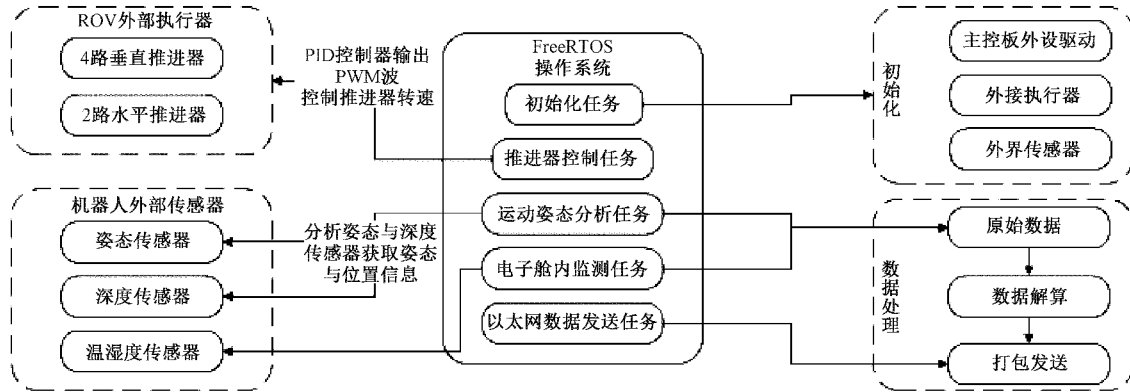


图 3 ROV 软件系统结构

### 1.3 上位机软件设计

ROV 上位机软件通过 Microsoft Visual Studio 平台为用户带来简洁清晰的控制界面,该软件具有 UDP 通信功能,能够满足 ROV 的控制与调试需求且拥有良好可靠的人机交互特性。应用通过 API 接口的方式与 ROV 下位机进行数据交互以实现各类控制功能,同时上位机软件面板能够详细显示并保存 ROV 各项数据,包括本体欧拉角、深度与报警等信息,其控制界面如图 4 所示。

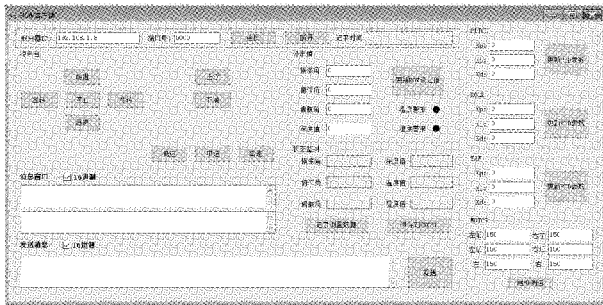


图 4 ROV 上位机控制面板

## 2 ROV 运动模型建立

船体清洗 ROV 在水中姿态调整时受力情况较为复杂,所以需要对 ROV 的运动学规律进行研究,为 ROV 控制系统的设计提供依据。在本节中建立了 ROV 六自由度运动学和动力学的数学模型,为下文传递函数的推导与计算机仿真提供可靠的理论基础。

### 2.1 ROV 随动坐标系定义

要实现水下机器人的运动控制,首先应该建立一个合适的参考坐标系,并且明确定系与动系之间的坐标变换关系<sup>[12-13]</sup>。如图 5 所示,本文根据右手定则建立两种坐标系,分别为地理坐标系  $E-\xi\eta\zeta$  (也可以称为定系,固定于地球上的惯性坐标系)与随动坐标系  $O-xyz$  (也可称为动

系,固定在 ROV 本体上的坐标系)<sup>[14]</sup>,其中箭头方向为正方向。

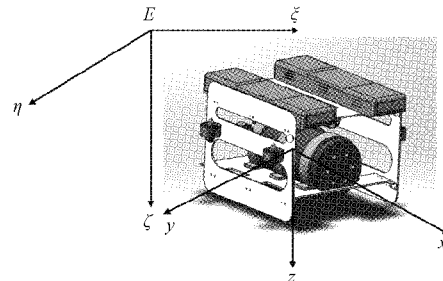


图 5 ROV 参考坐标系示意图

设 ROV 在随动坐标系中以  $O$  点为坐标原点的运动速度为  $V$ ,角速度为  $\Omega$ ,受力为  $F$ ,力矩为  $M$ 。在  $Ox$  轴、 $Oy$  轴、 $Oz$  轴上的各个分量如表 1 所示。

表 1 ROV 运动参数的物理意义

矢量	$Ox$ 轴	$Oy$ 轴	$Oz$ 轴
速度 $V$	$u$	$v$	$w$
角速度 $\Omega$	$p$	$q$	$r$
力 $F$	$X$	$Y$	$Z$
力矩 $M$	$K$	$M$	$N$

设横滚角为  $\varphi$ ,右倾为正,俯仰角为  $\theta$ ,上仰为正,艏向角为  $\Psi$ ,右偏为正。则 ROV 在地理坐标系中运动参数的物理意义如表 2 所示。

### 2.2 ROV 推力分布

ROV 是通过脐带缆来获取动力的,直流无刷电机驱动的螺旋桨推进器是本文研究 ROV 的动力来源,所以推进器的分布位置对 ROV 运动控制非常关键,而对推进器系统模型的建立对 ROV 的操纵与控制性能更是有着极其重要的影响。

表 2 地理坐标系运动参数的物理意义

参数	$\xi$ 轴	$\eta$ 轴	$\zeta$ 轴
原点坐标	$\xi_0$	$\eta_0$	$\zeta_0$
姿态角	$\varphi$	$\theta$	$\psi$
速度 $\mathbf{V}$	$\mathbf{V}$	$\mathbf{V}$	$\mathbf{V}$
角速度 $\boldsymbol{\Omega}$	$\boldsymbol{\Omega}_\xi$	$\boldsymbol{\Omega}_\eta$	$\boldsymbol{\Omega}_\zeta$
力 $\mathbf{F}$	$\mathbf{F}_\xi$	$\mathbf{F}_\eta$	$\mathbf{F}_\zeta$
力矩 $\mathbf{M}$	$\mathbf{M}_\xi$	$\mathbf{M}_\eta$	$\mathbf{M}_\zeta$

本文所研究的 ROV 推进器布置如图 6 所示。

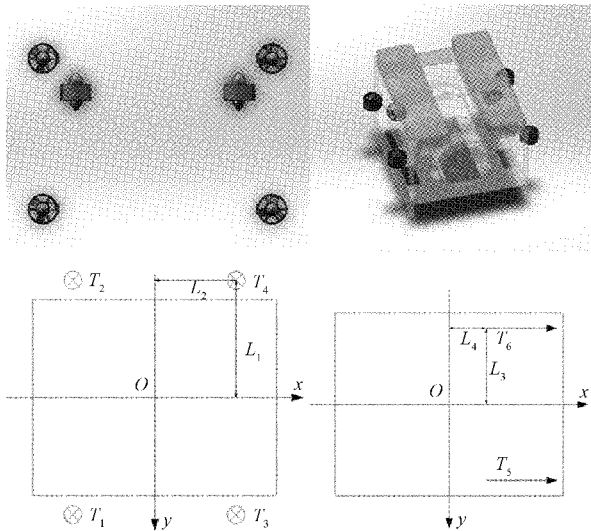


图 6 ROV 推进器分布示意图

在随动坐标系水平面上布置 4 个水下推进器  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$ , 推进器与随动坐标系的  $x$  坐标轴呈  $\alpha$  角, 4 个推进器分别对称于  $x$  与  $y$  轴布置; 在垂直方向上布置两个推进器, 推进器  $T_5$  和  $T_6$  布置在尾部的同一平面上同样对称于  $x$  轴布置, 且与  $y$  坐标轴呈  $\beta$  角, 由此可实现 ROV 的多自由度运动。

根据上文数据可推导出 ROV 推进器产生的力和力矩项矩阵如式(1)所示。

$$\boldsymbol{\tau}_{DF} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\alpha & \cos\alpha \\ \cos\beta & -\cos\beta & \cos\beta & -\cos\beta & -\sin\alpha & \sin\alpha \\ \sin\beta & \sin\beta & \sin\beta & \sin\beta & 0 & 0 \\ -L_1 & L_1 & -L_1 & L_1 & 0 & 0 \\ -L_2 & -L_2 & L_2 & L_2 & 0 & 0 \\ L_4 \cos\beta & L_4 \cos\beta & L_4 \cos\beta & L_4 \cos\beta & L_3 & -L_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5 \quad T_6]^T \quad (2)$$

本文研究的 ROV 参数为:

$L_1 = 27.6 \text{ mm}$ ;  $L_2 = 19.0 \text{ mm}$ ;  $L_3 = 19.0 \text{ mm}$ ;  $L_4 = 93.5 \text{ mm}$ ;  $\alpha = 0^\circ$ ;  $\beta = 90^\circ$ 。

所以, ROV 水下推进器推力及其产生的力矩项矩阵可表示为式(3):

$$\boldsymbol{\tau}_{DF} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_5 + T_6 \\ 0 \\ T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \\ -L_1 T_1 + L_1 T_2 - L_1 T_3 + L_1 T_4 \\ -L_2 T_1 - L_2 T_2 + L_2 T_3 + L_2 T_4 \\ L_3 T_5 - L_3 T_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $T_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  表示为第  $i$  个推进器。

### 2.3 ROV 运动学方程

#### 1) 坐标变换

对于线速度, 由随动坐标系到地理坐标系的转换矩阵  $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$  如式(4)所示。

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \cos\psi \sin\theta \sin\varphi - \sin\psi \cos\varphi & \cos\psi \sin\theta \cos\varphi + \sin\psi \sin\varphi \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \sin\theta \sin\varphi + \cos\psi \cos\varphi & \sin\psi \sin\theta \cos\varphi - \cos\psi \sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\varphi & \cos\theta \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于欧拉角速度, 由随动坐标系到地理坐标系的转换矩阵  $\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$  为:

$$\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\varphi \tan\theta & \cos\varphi \tan\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi \sec\theta & \cos\varphi \sec\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于线速度, 由地理坐标系到随动坐标系的转换矩阵为  $\mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2)$ , 由于  $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$  为正交矩阵, 可得式(6):

$$\mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{J}_1^T(\boldsymbol{\eta}_2) \quad (6)$$

对于角速度, 由地理坐标系到随动坐标系的转换矩阵  $\mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2)$  为:

$$\mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \cos\theta \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

综上所述, 水下机器人由随动坐标系到地理坐标系的运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

而由地理坐标系到随动坐标系的运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1^T(\boldsymbol{\eta}_2) & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

#### 2) ROV 六自由度运动方程

一般情况下, ROV 六自由度方程由 3 个平移运动方程与 3 个旋转运动方程构成, 根据牛顿第二定律, 可得 ROV 的平移运动方程为:

$$\mathbf{F}_\Sigma = \left[ \frac{d\nu}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \nu + \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{R}_g + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_g) \right] \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{R}_g$  为随动坐标系原点  $O$  到重心  $g$  的距离。

同理, ROV 的转动满足欧拉方程, 满足下式:

$$\mathbf{M}_\Sigma = I \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times (I\boldsymbol{\Omega}) + m\mathbf{R}_g \times \left( \frac{d\nu}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \nu \right) \quad (11)$$

将以上两式分别代入运动与转动方程式可得随动坐标系下 ROV 六自由度运动方程为:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr + wq) - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) - z_G(pr + \dot{q}) = X \\ m(\dot{v} - wq + ur) - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) - x_G(qp + \dot{r}) = Y \\ m(\dot{w} - uq + vp) - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rp + \dot{p}) = Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - I_{xz}(\dot{r} + pq) + I_{yz}(r^2 - q^2) - I_{xy}(pr - \dot{q}) + \\ m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} + ru - pw)] - K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - I_{xy}(\dot{p} + qr) + I_{xz}(p^2 - r^2) - I_{yz}(qp - \dot{r}) + \\ m[z_G(\dot{u} - rv + qw) - x_G(\dot{w} + pv - qu)] = M \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - I_{yz}(\dot{q} + rp) + I_{yx}(q^2 - p^2) + I_{xz}(pr - \dot{p}) + \\ m[x_G(\dot{v} - pw + ru) - y_G(\dot{u} + qw - rv)] = N \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $m$  为 ROV 质量;  $x_G, y_G, z_G$  为 ROV 的重心坐标;  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}$  为 ROV 的转动惯量。

考虑到本文采用的随动坐标系与 ROV 惯性主轴重合,且随动坐标系原点与 ROV 重心重合,于是能够得知  $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0, x_G = y_G = z_G = 0$  可以得到简化的如式(13)的运动方程:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr + wq) = X \\ m(\dot{v} - wq + ur) = Y \\ m(\dot{w} - uq + vp) = Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr = K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp = M \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq = N \end{cases} \quad (13)$$

### 2.4 ROV 动力学模型

由于 ROV 在实际的工程作业中并不需要特别快的行驶速度,所以可以理想化忽略科氏力的作用<sup>[15]</sup>;本文研究 ROV 主要有前行后退、上浮下潜、横滚、俯仰及转艏五个自由度的运动方式,为了方便仿真运算,所以可将其运动方式分解为简单的单自由度运动,以此去简化 ROV 模型,并且认为各自由度之间不存在相互影响的情况,交叉耦合性较小;基于以上受力分析,将随动坐标系原点  $O$  取在 ROV 重心处,可将动力学模型进一步简化为:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{F}_T = \boldsymbol{\tau} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为质量及惯性矩阵,  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  为流体阻力矩阵,  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  为重力及浮力向量,  $\mathbf{F}_T$  为推进器推力。

## 3 ROV 运动仿真与性能验证

由于船体清洗机器人工作环境为较为复杂的水下环境,再加上其船体贴壁过程中会受到急流等因素的干扰,所以 ROV 姿态控制系统的灵敏度极为重要,根据上文所搭建的 ROV 系统模型,提出了一种改进型变积分 PID 控制器,并在 MATLAB 中验证了所设计控制器的有效性。

### 3.1 ROV 姿态控制系统传递函数

依据上文求得运动方程可知实际 ROV 运动系统有着强耦合的特点,这给 ROV 运动控制研究造成了一系列问

题。因此,为验证控制算法的有效性并提高 ROV 进行实际实验的可靠性,应对 ROV 系统传递函数进行计算并在 MATLAB 中进行仿真运算。

#### 1) 推进系统传递函数

在运动控制研究中,一般可将 ROV 推进器电机的简化为惯性环节<sup>[17]</sup>,其传递函数为:

$$G_{K(s)} = \frac{K_M}{(1 + T_M s)} \quad (15)$$

其中,  $K_M$  为电机的传递系数,  $T_M$  为电机机械时间常数。因为推进器是典型的非线性系统,为了后续模型建立和仿真实验的方便,需进行线性化处理,推进器的推力表达式为:

$$T = Cn \quad (16)$$

$$C = 2K_T \rho D^4 n_0 \quad (17)$$

其中,  $K_T$  为推进器推力系数;  $n_0$  为电机额定转速。由此,可推导出推进器传递函数为:

$$G_{\rho(s)} = C \quad (18)$$

通过实际实验等测量计算,查询相关资料,可得推进系统传递函数为式:

$$G_{M(s)} = \frac{0.3}{(1 + 1.86s)} \quad (19)$$

#### 2) 运动系统传递函数

(1) 艏向运动控制模型: ROV 仅做转艏运动时,即在水平面完成定点转向运动,重心位置不变,不涉及进退与横移运动,  $\mathbf{u} = \mathbf{v} = 0$ , 此时其转艏运动方程为:

$$(I_z - N_r)\dot{r} = N_r r + N_\beta \quad (20)$$

经拉氏积分变换,可得 ROV 作转艏运动时艏向角与所受推力间的传递函数:

$$G_{\phi(s)} = \frac{1}{(I_z - N_r)s^2 - N_r s} \quad (21)$$

(2) 横摇运动控制模型: ROV 仅做横摇运动时,重心位置不变,不涉及进退与横移运动,  $\mathbf{u} = \mathbf{v} = 0$ , 此时其横摇运动方程为:

$$(I_x - K_\beta)\dot{r} = K_\beta r + N_\beta \quad (22)$$

经拉氏积分变换,可得 ROV 作横摇运动时横滚角与所受推力间的传递函数:

$$G_{\phi(s)} = \frac{1}{(I_x - K_\beta)s^2 - K_\beta s} \quad (23)$$

经实际测量与 Solidworks 软件仿真并查阅相关参考资料,可得 ROV 的相关参数如表 3 所示。

表 3 ROV 水动力相关参数

$m/\text{kg}$	$L/\text{m}$	$I_x$	$I_z$
17.58	0.575	2.772	0.892
$K_\beta$	$K_\rho$	$N_r$	$N_\beta$
-0.776	-0.273	-1.498	-0.057

将 ROV 运动传递函数与电机传递函数相结合可以得

到ROV系统的开环传递函数,其中艏向运动控制系统传递函数为:

$$G_{\psi^{(s)}} = G_{M^{(s)}} G_{\varphi^{(s)}} = \frac{0.3}{1.764s^3 + 3.735s^2 + 1.498s} \quad (24)$$

横摇运动控制系统传递函数为:

$$G_{\varphi^{(s)}} = G_{M^{(s)}} G_{\varphi^{(s)}} = \frac{0.3}{5.664s^3 + 4.489s^2 + 0.776s} \quad (25)$$

### 3.2 常规PID控制算法

常规PID控制框图如图7所示。

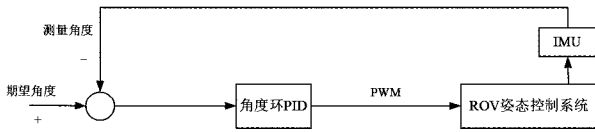


图7 单闭环PID控制框图

其中:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (26)$$

PID控制器(比例-积分-微分)有着稳定可靠的优点,其数学模型为:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (27)$$

式中: $K_p$ 为比例项系数, $K_p/T_i$ 为积分项系数 $K_i$ , $K_d T_d$ 为微分项系数 $K_d$ 。这3个系数的调节对PID控制器性能起到极其关键的作用<sup>[16]</sup>。

### 3.3 双闭环PID控制算法

双闭环串级PID控制器是在常规单闭环PID控制器的基础结构上进行嵌套,增强系统的抗干扰性与鲁棒性,双闭环PID控制器的控制框图如图8所示。

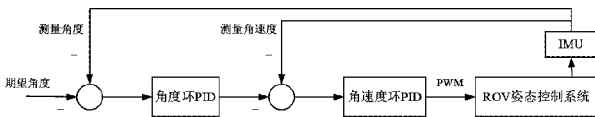


图8 双闭环PID控制框图

以ROV的横滚角控制为例,以期望角度为角度参考值给定输入,与实际量测值构成控制偏差,经过角度外环PID运算可以得到ROV角度环输出,再根据角速度值偏差经过角速度内环PID控制器运算可以得到ROV角速度环输出,将内外环输出结果进行融合传递给ROV姿态控制系统,从而通过调整水下推进器的转速完成相应的控制目标。IMU将实时监测的角度值、角速度值分别反馈给外环与内环从而求出相应偏差值,完成闭环控制,从而获得更加理想的控制效果<sup>[17-19]</sup>。

### 3.4 改进型变积分PID控制算法

在常规的PID控制中,积分单元I的主要作用是持续累计并输出控制量来消除误差,确保被控量在稳态时对设定值无静态误差跟踪,由于在运动控制系统中,ROV推进

器系统的突然启动与急停以及姿态突变的情况时有发生,在较短周期内系统产生的较大误差会对ROV控制系统产生不良的后果,可能导致系统积分叠加甚至于达到饱和状态,使得受控量远远超出设定值等危险状况,造成诸如系统超调量过大、产生系统震荡等状况,以至于导致硬件系统过压过流损坏的后果,这在运动控制领域是绝对不允许的。而一般PID控制器对积分项的要求是当系统被控量与给定值误差大时,需要削弱或消除积分作用;反之则应提升积分单元对控制系统的作用,所以积分系数的选取是至关重要的,当积分系数取值过大或过小都会对控制系统产生不良影响,所以为优化控制系统,需要根据偏差值去实时修正积分项的累加速率<sup>[20]</sup>。

在常规的积分分离PID控制器中,积分单元对控制系统的影响只有有或无两种选择,当被控量与给定值偏差较大时,将 $\alpha$ 置0,消除积分项对整个系统的影响,采取纯PD控制;当被控量接近给定值时,将 $\alpha$ 置1,恢复积分项对整个系统的影响,采取常规的PID控制,控制算法公式如下所示。

$$u(t) = K_p e(t) + \alpha \sum_{i=0}^k e(t) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad (28)$$

而在进行ROV姿态控制实验的过程当中,根据被控量与设定值之间的偏差采取多区间控制时,即将积分项的开关量系数与偏差相对应,以此将整个姿态调整过程进行划分,控制效果会明显得到改善。当采取多区间控制时,开关量系数 $\alpha$ 将在相应设定范围内进行自动匹配,偏差较大时,开关量系数相应减小,积分累加速率趋于平缓,积分作用明显弱化;偏差较小时,开关量系数相应增大,积分累加速率持续上升,积分作用显著提高补偿静态误差。在实际应用中可以根据控制系统的工况进行仿真或者实验从而确定 $\alpha$ 的取值,也可以根据PID参数调节经验直接给定,改进型变积分PID控制框图如图9所示。

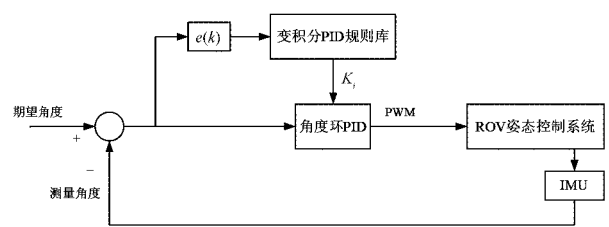


图9 改进型变积分PID控制框图

本文据实际实验数据分析计算得6个区间,区间划分结果如下所示:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & |e(t)| > 90 \\ 0.2, & 30 < |e(t)| \leq 90 \\ 0.4, & 20 < |e(t)| \leq 30 \\ 0.6, & 10 < |e(t)| \leq 20 \\ 0.8, & 5 < |e(t)| \leq 10 \\ 1, & |e(t)| \leq 5 \end{cases} \quad (29)$$

### 3.5 仿真性能检验与对比

在船体清刷 ROV 贴壁的过程中,需要对艏向角与横滚角进行控制从而完成相应的动作,所以本文将艏向角与横滚角的控制精度作为 ROV 的两个较为重要的性能指标,用以完成改进型变积分 PID 控制系统的 MATLAB 仿真运算。根据上文建立 ROV 系统模型,采用 MATLAB 中的控制工具箱进行控制器设计,并使用 Simulink 完成相应模型的搭建,同时将前文所设计的改进型变积分 PID 写入到控制模块中,加以调用后进行计算机仿真运算。验证控制器对该型 ROV 的有效性,同时又与常规的单闭环与双闭环 PID 控制进行对比,在对比之中,分析各自系统的优势与不足,优化 ROV 姿态控制系统。

#### 1) 仿真性能检验

本文分别对单闭环 PID 算法,双闭环 PID 算法与改进型变积分 PID 控制算法进行了 MATLAB 仿真运算,并进行了算法性能对比。首先调节单位阶跃曲线使得 3 种控制器得到相应的最优状态,当横滚角给定为  $15^\circ$  时对应的角度变化曲线如图 10 所示,通过数据分析可得传统单环 PID 与双闭环 PID 控制器得超调量较大,分别达到 15.7% 与 9.5%,调整时间分别为 43.6 s 与 27.3 s。改进后的变积分 PID 控制器超调量为 2.3%,且调整时间降为 7.9 s。说明改进型变积分 PID 在阶跃响应时有更快的响应速率和更好的跟踪性能,因此得出改进型变积分 PID 算法的控制性能明显优于传统单环 PID 与双闭环 PID 的控制性能。

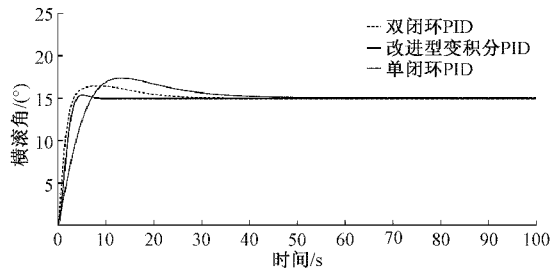


图 10 横滚角给定  $15^\circ$  仿真曲线对比

当横滚角给定值设置为  $45^\circ$  时,各控制算法响应曲线如图 11 所示,依然能够看出改进型变积分 PID 控制器的性能更好。

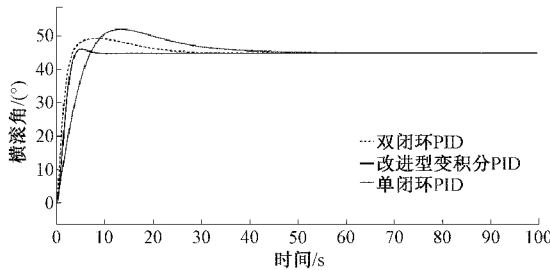


图 11 横滚角给定  $45^\circ$  仿真曲线对比

如图 12 所示,当艏向角给定值设置为  $45^\circ$  时,能够发现在转动角度相同的情况下,改进型变积分 PID 控制下的

ROV 转艏运动的调节时间更短,响应速度快,虽然仍有超调情况出现,但超调量比常规单闭环与双闭环 PID 控制分别减小了 6% 与 4.5%。根据数据分析可得改进型变积分 PID 控制在艏向角调整阶段的各项性能指标要优于常规单闭环 PID 控制与双闭环 PID。

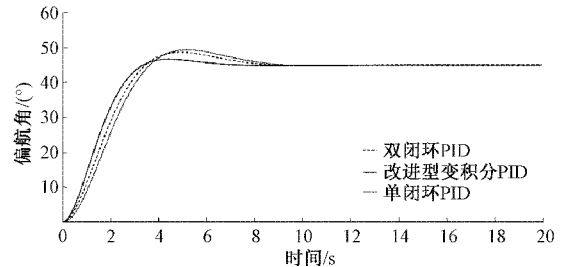


图 12 艏向角给定  $45^\circ$  仿真曲线对比

#### 2) 系统验证

为了测试所设计 ROV 控制系统的真实控制性能,建立了图 13 所示的水下环境并完成了多组实验测试。其次,为了验证控制系统对 ROV 的实际控制性能,分别给定艏向角  $50^\circ$  和横滚角  $15^\circ$  作为目标值,测试 ROV 改进型变积分 PID 控制系统的响应能力,实验角度变化曲线如图 14 和 15 所示。

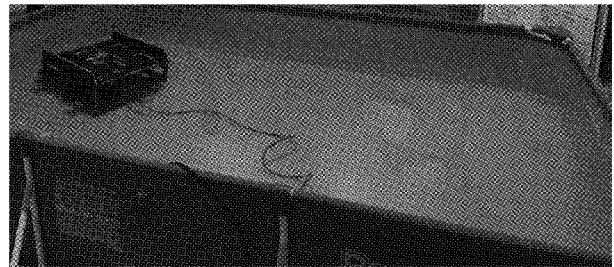


图 13 实验环境图

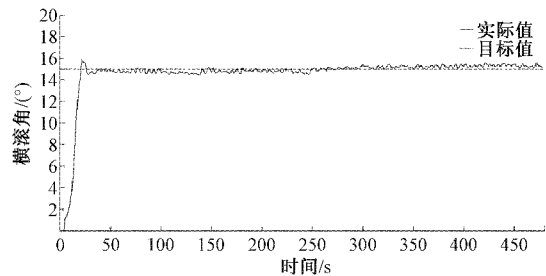


图 14 横滚角实际轨迹图

在横滚角响应实验中,ROV 初始横滚角为  $0^\circ$ ,随后给定横滚角目标值为  $15^\circ$ ,横滚角数值从初始值  $0^\circ$  开始逐渐递增,并在目标值  $15^\circ$  附近完成姿态保持,过渡时间较短且没有出现明显的超调量,同时稳态误差不超过  $1^\circ$ ,控制效果良好。

在艏向角响应实验中,ROV 初始艏向角为  $0^\circ$ ,随后给定艏向角目标值为  $50^\circ$ ,艏向角数值从  $0^\circ$  附近逐渐增加到  $50^\circ$ ,过渡时间同样较短且没有出现明显的超调量,并且稳

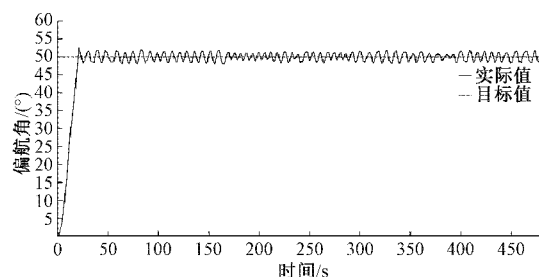


图 15 偏航角实际轨迹图

态误差不超过  $2^\circ$ 。所以根据上述实验结果可得改进型变积分 PID 控制器在 ROV 姿态控制方面拥有良好的控制性能。

#### 4 结 论

本文以船舶清洗 ROV 的姿态控制为核心,完成基于 STM32 的 ROV 软硬件系统设计,并且分别对其物理模型,数学模型与简化动力学模型进行了简介;同时设计了一种改进型变积分 PID 控制器,并且分别测试了其对于艏向角与横滚角的控制性能,根据姿态偏差量的变化将 ROV 姿态调整过程划分成不同阶段。当 ROV 工作状态改变时,控制器的积分项输出也随之进行相应的匹配调整,从而得到最优的控制性能。因此,本文提出的改进型变积分 PID 有效提高了 ROV 姿态调整过程的各项性能指标,控制精准程度较高,且系统参数意义明确,能够有效提高运动控制效率。

#### 参考文献

- [1] 林兴月. 水下船体表面清刷机器人结构设计与控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
- [2] TOLSTONOGOV A Y, KOZHUSHKO A E, CHEMEZOV I A, et al. The concept of the unmanned surface vehicle for the observation-class ROV[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2021, 666(3): 032003.
- [3] 牛啸辰,王俊雄,苏伟,等. 输入饱和的水下机器人反演滑模控制技术[J]. 舰船科学技术,2020,42(19):90-93.
- [4] 綦声波,尹保安,苏志坤. 基于模糊 PID 的小型 ROV 定深运动控制仿真[J]. 现代电子技术,2020,43(2):20-23,28.
- [5] 陈严,张禹,赵瑞影,等. 基于模糊 PD-PI 方法的 ROV 艏向控制系统设计[J]. 计算机应用与软件,2019,36(12):106-110.
- [6] 陈巍,魏延辉,曾建辉,等. AUV 纵倾角动态面滑模自适应控制[J]. 火力与指挥控制,2016,41(6):73-76.

- [7] 付嘉忻. 基于 PID 控制的水下无人监测平台研制[D]. 北京:北京林业大学,2020.
- [8] 董亚龙. 小型水下机器人位姿检测及控制系统研究[D]. 上海:上海海洋大学,2018.
- [9] 孙双龙. 一种开架式水下机器人的设计与实现[D]. 南京:南京信息工程大学,2020.
- [10] 卞子玮. 可翻转式带缆水下机器人(ROV)的总体设计和水动力学性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2017.
- [11] 卢艳军,陈雨荻,张晓东,等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(9):281-288.
- [12] 刘合伟. 作业型 ROV 动力定位控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [13] 周卫祥. 深海作业型 ROV 建模方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [14] 庞永杰,王庆云,李伟坡,等. 螺旋桨及其运行对潜艇操纵性水动力影响的模型试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2017,38(1):109-114.
- [15] 张光义,曾庆军,戴晓强,等. 水下安全检测与作业型机器人控制系统[J]. 中国舰船研究,2018,13(6):.
- [16] DONG M, LI J, CHOU W. Depth control of ROV in nuclear power plant based on fuzzy PID and dynamics compensation[J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(3): 811-821.
- [17] 真可知,齐正. 基于改进 PID 控制算法的加热炉炉温控制系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2020,39(7):62-67.
- [18] 刘勇智,李杰,鄒成龙. 开关磁阻电机最优分数阶  $PID_{\mu}$  控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(1):105-110.
- [19] 赵坤,张伟. 积分分离 PID 算法在直流电机中的研究应用[J]. 物联网技术,2016,6(2):65-66,70.
- [20] 黄健. 变速积分 PID 在 AUV 航向姿态控制中的应用[J]. 自动化技术与应用,2014,33(5):44-48,60.

#### 作者简介

武少波,硕士研究生,主要研究方向为 ROV 控制系统与嵌入式软件开发。

E-mail:wsb19961227@163.com

冯晓东(通信作者),高级工程师,主要研究方向为先进检测技术、智能控制设备与 ROV 控制系统等。

E-mail:fengxd@mail.buct.edu.cn

杨文涛,硕士研究生,主要研究方向为 ROV 水下定位与惯性导航的研究。

E-mail:719797505@qq.com