

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106048

基于小型两栖机器人横向定深控制研制

任福深 范玉坤

(东北石油大学 大庆 163318)

摘要: 机器人(ROV)的位姿需要高端智能控制算法来进行系统的稳定控制,针对 ROV 姿态控制不能稳定控制的问题,进行对横向定深控制研究,对 ROV 系统机械结构设计以及推进器的结构分布,通过广义多自由度方程,在多重条件约束下,建立出横向定深控制模型,通过 Fluent 中 CFD 流体分析,得到在不同姿态运动控制状态的水动力系数,最终得到横向定深控制器、电机、推进器的传递函数,并通过对 PID 控制、模糊 PID 控制理论研究在 Simulink 库中搭建出深度控制的 PID 控制器和模糊 PID 控制器,最终进行实验验证,对 PID 控制器和模糊 PID 控制器的控制效果进行比较,仿真与实验结果表明横向定深控制模糊 PID 控制比 PID 控制效果更好,调节的超调量较小,调节时间缩短,响应收敛速度更快,深度控制在横向具有很好的稳定性以及抗击干扰能力。

关键词: 小型两栖机器人;横向定深控制;水动力系数;传递函数;PID 控制器;模糊 PID 控制器

中图分类号: TH113.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Development of lateral depth control based on small amphibious robot

Ren Fushen Fan Yukun

(Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Remote operated vehicle (ROV) needs high-end intelligent control algorithm to control the stability of the system. Aiming at the problem that the attitude control of ROV cannot be controlled stably, the lateral depth control is studied. The mechanical structure design of the ROV system and the structural distribution of the thrusters are analyzed by the generalized multi degree of freedom equation under multiple constraints, Through CFD fluid analysis in Fluent, the hydrodynamic coefficients in different attitude motion control states are obtained. Finally, the transfer functions of lateral depth controller, motor and propeller are obtained. Through the theoretical research of PID control and fuzzy PID control, the PID controller and fuzzy PID controller for depth control are built in Simulink library, Finally, the experiment is carried out to verify the control effect of PID controller and fuzzy PID controller. The simulation and experimental results show that the lateral depth control fuzzy PID control is better than PID control, the overshoot is smaller, the adjustment time is shorter, the response convergence speed is faster, and the depth control has good stability and antiinterference ability in the lateral direction.

Keywords: small amphibious underwater vehicle; bidirectional depth control; hydrodynamic coefficient; transfer function; PID control; fuzzy PID control

0 引言

随着石油行业的不断发展,人类在陆地石油资源逐渐匮乏,进而有陆地转向海洋,对于海上石油而言,随着近几十年的发展,机器人(remote operated vehicle, ROV)成为现代新兴机械,登上石油行业舞台。它不仅仅代替人类进行水下检测,而且也替人类进行水下管道修复,其安全与可靠性能较高,逐渐成为海洋石油必不可少的工具^[1]。水下机器人的行业逐渐完善起来,例如两栖机器人,它具有很强

的环境适应能力,可以面对大部分水下较恶劣的环境,并且作业范围广泛,而对于小型 ROV 来说,由于结构与体积比较小,适合人工放置和收回,这种 ROV 多用于水下复杂环境侦察、海上救援以及船舶、石油导管架上附着物的清理工作,执行人类在狭小空间下无法进行的任务和操作^[2]。在所有 ROV 操作过程中,其稳定和快速运动控制是在复杂环境下执行长时间的作业任务需要具备的能力,应对 ROV 姿态控制系统提出高水平的要求,能准确和精确去执行任务。但 ROV 的工作环境受到外界相应结构因素影响

会变得随机和不确定;另 ROV 在进行多自由度运动时,控制对象呈现高度非线性的状态,上述干扰因素对 ROV 的运动控制产生很大的影响,因此应建立合适的控制系统减少干扰因素产生的影响。这些干扰因素对 ROV 的运动状态产生很大的影响,因此需要智能控制算法使之变成稳定的控制系统。运动控制从广义上包括定深控制和定艏控制。在 ROV 定深控制方面,国内外学者已经有大量的文献进行研究。李璐琼等^[3]发现在纵向运动的定深控制中,运用高阶滑膜控制的方法能有效消弱低阶滑膜控制所带来的抖振现象。杨建华等^[4]运用变结构滑膜控制在不同航速下进行 ROV 深度控制,更好地验证了该控制方法在不同条件下具有很好的适应能力。刘畅等^[5]验证出全局滑膜定深控制的方法比传统滑膜控制器具有更好的品质和鲁棒性能。Bessa 等^[6]运用滑膜控制与自适应模糊控制相结合的方法实现 ROV 的深度控制,并用仿真证明了算法的有效性。可以从上述文献中得到如下结论:稳定的控制系统需要多种控制方法进行融合,单一的控制算法有其本身的弊端和优点,多个控制算法结合可以扬长避短,更好地削弱 ROV 在工作环境下所遇到的问题。

1 小型两栖 ROV 系统动力学模型

1.1 小型两栖 ROV 模型建立

该小型两栖 ROV 为实验室自主研发,如图 1 所示,它的尺寸长×宽×高为 390 mm×475 mm×350 mm,总体重量为 21.82 kg,系统结构主要为机械结构,该结构有上中下 3 层,上层为系统的浮力机构,主要材料为玻璃微珠,目的为了更好地控制在水中的平衡;中层为 ROV 框架,主要是为推进器提供安装环境,使其更好控制 ROV 的动力系统;在框架的前端安装有视觉系统,目的方便水下目标的精准定位;在视觉系统两侧安装有 2 个防水灯,目的为水下黑暗环境中视觉系统提供更高的清晰度;下层为履带装置,在履带装置上方安装有控制舱,目的是为控制系统提供信号传输以及提供各种设备模块的电源传输;直流减速电机分布在履带的最后端,成对称分布,该履带由双直流电机控制,更好提供履带的动力。在履带上方安装有钕铁硼永磁铁,目的为 ROV 在检测管道时,对管道产生垂直方向的吸附力,吸附力相当于推进器的推力,有效保证 ROV 可以贴近管道运动。

1.2 推进器结构分布

从图 2 中可知,分布有 4 个垂直推进器,用序号 3、4、5、

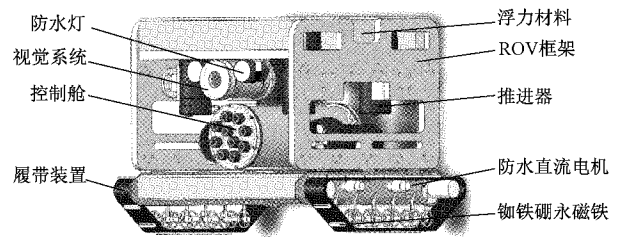


图 1 小型两栖水下机器人结构

6 表示,以 oz 轴为几何中心,呈现长方形分布,在垂直面可以完成潜浮、纵倾、摇艏 3 个方向自由度运动;分布 2 个水平推进器,用序号 1、2 表示,以 ox 轴为对称轴进行分布,在水平面可以完成进退、横摇、回转 3 个方向自由度运动。在 ROV 进行姿态运动控制时,每个自由度运动互相耦合,给其研究增加相应难度,因此在后文进行理论分析时,可以进行简化,忽略每个自由度运动之间的交叉耦合。定深运动是作为 ROV 姿态运动中重要的形式之一,也是后文所研究的主要内容,当只考虑定深运动时,通过上述系统合理的简化,ROV 本体需考虑力(重力、浮力、推力、水动力以及干扰力)以及力矩(重力矩、浮力矩、推力矩等)对 ROV 的影响,且 ROV 自然漂浮在水面之上,则垂直面推进器所受到的浮力微大于重力。当 4 个垂直推进器推力方向向上时,ROV 进行下潜运动;反之,当垂直推进器方向向下时,ROV 进行上浮运动。同时定深运动,需结合控制水平推进器,进行同一水平面的进退。

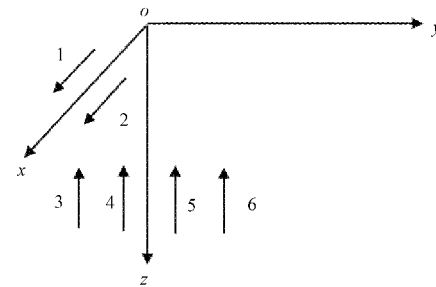


图 2 推进器结构分布

1.3 横向定深控制模型

在研究 ROV 的定深控制中,ROV 定深运动过程如图 3 所示,随着手柄对推进器控制,ROV 逐渐趋于设置深度,在此过程主要受到磁力计、加速度计和陀螺仪融合的 9 轴传感器和深度传感器的影响,会出现上下波动,其波动范

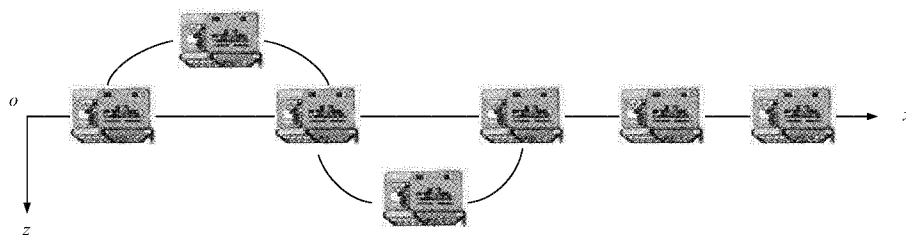


图 3 小型两栖 ROV 定深运动过程

围随着时间的调节,最终在设置深度附近收敛,最终在误差范围内,趋于稳定值,故 ROV 的定深控制受到深度和姿态角的共同影响。

本文是对 ROV 定深控制,假设 ROV 的质心位置与运动坐标系的原点重合, $x=y=z=0$,定深控制主要表现为垂直面控制,本文主要研究纵垂直面的运动,通过参考文献[7]六自由度方程简化,假设通过多重条件的约束,得到横垂直面的运动方程,为简化计算,需对其进行无因化处理。

纵垂直面定深控制时,纵移、摇艏的角速度以及角加速度均为 0。

$$\begin{cases} Y = m(\dot{v} + \omega q) \\ Z_2 = m(\dot{w} + vq) = \frac{\rho}{2}L^4 Z_q \dot{q} + \frac{\rho}{2}L^3 (Z'_w \dot{w} + \\ Z'_{wq} \frac{w^2}{|w|} |q|) + \frac{\rho}{2}L^2 (Z_{ww} |w| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | + \\ Z'_{ww} |w| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} w | + Z'_{vv} v^2) + Z_{else} \\ K = I_x \dot{p} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_2 为 ROV 在垂直面上所受的合外力; m 为 ROV 的质量; u, v, w 为 ROV 沿 ox 轴、 oy 轴、 oz 轴的速度; $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 为 ROV 沿 ox 轴、 oy 轴、 oz 轴的加速度; p, q, r 为 ROV 沿 ox 轴、 oy 轴、 oz 轴的角速度; $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ 为 ROV 沿 ox 轴、 oy 轴、 oz 轴的角加速度; I_x 为 ROV 沿 ox 轴的转动惯量。

在定深过程之中,该本体主要受到推进器的推力、水阻力、自身惯性力、重力、浮力等。

$$Z_{else} = Z_g + Z_f + T_2 \quad (2)$$

式中: Z_g 为 ROV 自身重力; Z_f 为 ROV 本体在水中受到的浮力; T_2 为推进器受到纵垂直面受到的推力。

将式(2)代入式(1)可知:

$$\begin{aligned} Z_2 = m(\dot{w} + vq) &= \frac{\rho}{2}L^4 Z_q \dot{q} + \frac{\rho}{2}L^3 (Z'_w \dot{w} + \\ Z'_{wq} \frac{w^2}{|w|} |q|) &+ (G - B) \cos\theta \cos\phi + T_2 \\ \frac{\rho}{2}L^2 (Z_{ww} |w| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | + &Z'_{ww} |w| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} w | + Z'_{vv} v^2) \end{aligned} \quad (3)$$

对于深度控制主要作用是垂直推进器的转速来控制推力的数值,进而控制小型两栖 ROV 的深度,ROV 本体 4 个垂直推进器保持 xoz 面对称,也保持 $yozy$ 面对称。在进行横向定深时,假设横移的速度保持恒定不变,该小型两栖 ROV 根据研究要求为 3 节海速,即 2 m/s,因 4 个垂直推进器在 xoy 面呈长方形分布,推进器的机电性能保持一致。推进器的质心到 o 点的距离保持相同,故得到的力和力矩相同,纵倾不会绕 ox 轴转动,故纵倾的速度、角速度均为 0,将假定条件代入式(3)可知:

$$T_2 = \dot{w}(m - \frac{\rho}{2}L^3 Z'_w) - (G - B) -$$

$$\frac{\rho}{2}L^2 (Z_{ww} |w| (4 + w^2)^{\frac{1}{2}} | + Z'_{ww} |w| (4 + w^2)^{\frac{1}{2}} w | + 4Z'_{vv}) \quad (4)$$

1.4 水动力系数

通过用 Fluent 中 CFD 进行纵向和横向水平直航状态进行水动力数值模拟仿真,对其多次试验进行估算,得到如下有因次水动力参数:

$$\begin{aligned} Z_{w|w|} &= -304.0916, Z_{ww} = -60.2753, \\ Z_w &= -253.6227, Z_{w|} = -98.8937, \\ Z_{vw} &= -47.6900, Z_0 = -120.3157 \end{aligned} \quad (5)$$

为其研究时减少复杂性,需要对其进行无因次处理,公式如下:

$$\begin{aligned} Z'_{w|w|} &= \frac{Z_{w|w|}}{0.5\rho L^2}, Z'_{ww} = \frac{Z_{ww}}{0.5\rho L^2}, Z'_w = \frac{Z_w}{0.5\rho L^2}, \\ Z'_{w|} &= \frac{Z_{w|}}{0.5\rho L^2}, Z'_0 = \frac{Z_0}{0.5\rho L^2}, Z'_{vw} = \frac{Z_{vw}}{0.5\rho L^2} \end{aligned} \quad (6)$$

将估算出的有因次水动力参数代入式(6)中得到无因次水动力各参数数值:

$$\begin{aligned} Z'_{w|w|} &= -4.0058, Z'_{ww} = -0.7940, Z'_w = -3.3410, \\ Z'_{w|} &= -1.3027, Z'_{vw} = -0.6282, \\ Z'_0 &= -1.5849, M'_0 = 0.0053 \end{aligned} \quad (7)$$

1.5 小型两栖 ROV 系统的传递函数

将上文中得到的无因次水动力各参数数值代入式(4),并进行拉氏变换,得到横向定深的传递函数。

$$120.83\dot{w}_1(s) + 101.31 = T_B(s) \quad (8)$$

取 $\dot{h} = w_1, \ddot{h} = \dot{w}_1$ 其中时间 t 为未知数,可知函数,并将其左右等式进行拉普拉斯变换可知:

$$G_1(s) = \frac{T_B(s)}{h(s)} = \frac{1}{120.83s^2 + 101.31} \quad (9)$$

式中: $G_1(s)$ 为横向定深控制的传递函数。

当电机在运转时,由于电机结构复杂,内部各部件受到力和力矩耦合性较强,为简化模型,将电机性能看做一阶惯性环节,由此可知电机的传递函数^[8]:

$$G_2(s) = \frac{K}{1 + Ts} \quad (10)$$

式中: K 是时间常数; T 是放大系数。两个参数都受出厂电机的固有属性有关,通过经验得到 $K = 120, T = 0.6$ 。将上述数值代入式(10)可知:

$$G_2(s) = \frac{120}{1 + 0.6s} \quad (11)$$

推进器的传递函数是常数环节为垂直推进器力矩:

机器人在定深运动时,假设垂直推进器转速大小、方向一致。因转速的平方与推力呈现正相关,为简化计算,应将推进器的非线性特性进行线性化,得到推力方程,其

中推进器的传递函数是通过采用小偏差线性化方法获得,最终传递函数为常数环节。

推进器推力方程与传递函数如下:

$$T_{\text{总}} = Cn = 4K_T \rho D^4 n_0 n \quad (12)$$

$$G_3(s) = C = 4K_T \rho D^4 n_0 \quad (13)$$

$$G_3(s) = 0.031 \quad (14)$$

由式(12)~(14)可知: $T_{\text{总}}$ 受到垂直推进器总推力; K_T 、 n_0 、 D 、 ρ 分别为推进器的推力系数、转速、螺旋桨直径、推进系数^[9]。

2 小型两栖 ROV 定深控制器设计

机器人定深控制的工作原理是通过设定深度与上位

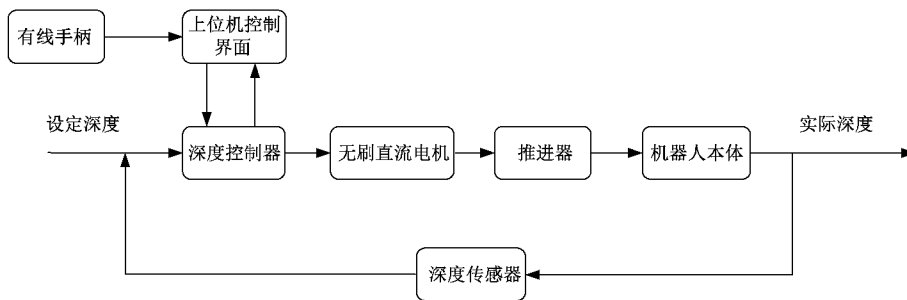


图 4 小型两栖 ROV 定深控制流程

机上面显示的实际深度进行对比,实际深度的获取通过有线手柄控制深度控制器,控制深度器的程序显示在上位机控制界面,并将设计参数传送到电机,电机通过控制信号转动,驱动垂直推进器到达指定转速,推进器通过桨叶产生推力,最终到达设定深度,在参数设计过程中需要特定传感器进行反馈,形成闭环回路,不断调节,最终趋于稳定,其控制流程如图 4 所示。在调节过程中实际深度与设定深度之间有一定的误差,该误差主要受到外界环境和机器人自身的影响,不可避免,应符合误差控制精度。

2.1 PID 定深控制器设计

PID 控制^[10-11]由 P (比例)、 I (积分)、 D (微分)3 个单元组成,它通过对输入时设定值与输出时实际值之间得到偏

差,输出值的控制是通过 P 、 I 、 D 3 个单元进行组合,实现对 ROV 本体实际深度的控制。PID 的控制算法表达式:

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (15)$$

相关文献[12-13]以及 ROV 实际深度调节经验可知,得到合适的 P 、 I 、 D 数值。

P (比例环节)是调节 ROV 系统的深度与实际设置深度之间的偏差值,在 P 不断增大过程中,ROV 本体在不断趋于设定的深度,但是上下波动严重。

I (积分环节)通过计算机对上位机传送到下位机深度传感器,进而到达深度控制范围之内,但 I 增大过程中,对深度的传送有延迟,影响 ROV 本体控制的稳定,ROV 要求精度大于正负,需要对 I 的数值进行调节,控制精度在

正负之内。

D (微分环节)可以上面两个环节进行弥补,ROV 系统上下波动严重以及精度控制问题,进行适量调节。

2.2 模糊 PID 定深控制器设计

模糊 PID 控制器^[14]就是在 PID 控制基础器上加入模糊控制,模糊控制是通过以往专家的经验而制定的控制规则。对于模糊 PID 控制,通过 ROV 设定深度偏差 E 和深度偏差率 EC 作为输入量,中间对原始输入经过模糊化、模糊推理以及去模糊化得到 P 、 I 、 D 的增量值,将原始 PID 数值与 P 、 I 、 D 的增量值结合,不断进行参数整定,得到整定后 P 、 I 、 D 数值,作为 ROV 定深控制的输出量。最终以推进器的转速作为控制量,控制 ROV 深度变化,使之具有良好的抗干扰能力和快速稳定能力,其控制原理如图 5 所示。

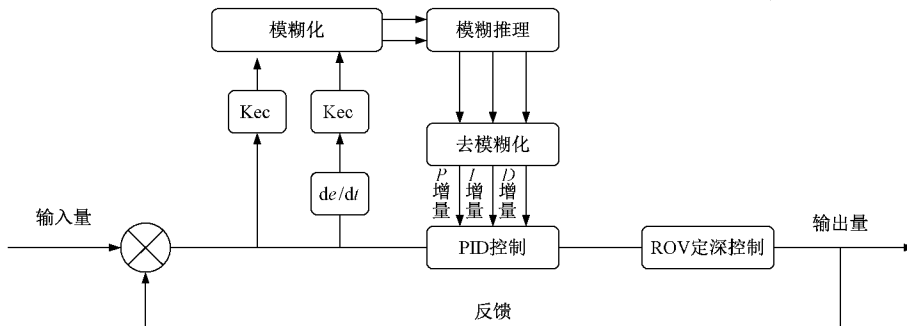


图 5 模糊 PID 控制结构原理

对于模糊 PID 控制器的建立有下列设定:

1) 采用 Mamdani 方法建立模糊规则,设置 ROV 输入

量的论域为 $[-3, 3]$, ROV 输出量的论域为 $[-3, 3]$ 。

2) 隶属度函数选择三角形,因三角形函数为线性化函

数,控制因素只有直线斜率,使控制器运行速度快且所需内存小^[15]。

3)考虑深度偏差和偏差率,控制器在调节 ROV 的稳定时,会在设定的零点处数值上下变化,因此得到系数有正负,以输入量和输出量的模糊语言变量设置为正大(NL)、正中(NM)、正小(NS)、零(O)、负小(PS)、负中(PM)、负大(PL)。

通过模糊语言变量,建立 P、I、D 增量模糊控制规则表,如表 1 所示。

ROV 系统在调整定深运动的偏差和偏差率时,考虑到外界因素和自身条件对其影响;而对于定深过程中,需要不断调整 P、I、D 数值之间耦合的关系,参照上述条件的影响,将巡检机器人进行多次试凑调节,同时查阅文献[16-19]的调节经验,得出合适的 K_p, K_i, K_d 的经验数值如下。

1)在深度开始调节的瞬间,与设置深度偏差会很大,

因需要克服外界力以及自身力对机器人本体的影响,为使垂直推进器快速地得到适合的转速,需增大 K_p 值,深度偏差率也很大,引起过饱和的情况,超出一 3~3 的输出论域范围, K_d 应取小值。另防止调节开始时机器人系统出现过大的超调量, K_i 也应取小值。

2)当深度偏差和偏差变化率在不断减少过程中,为减少 ROV 系统的超调量,防止超出输出论域范围,应适当增大 K_i 取值,适当减小 K_p 取值;当适当增大 K_d 取值,可以减小到达设置深度和角度的时间。

3)当到达设置深度附近时,偏差很小;为了更进一步增强机器人的稳定性能,应适当增大 K_p 和 K_i 的取值,有效减少系统的误差范围;另外为防止机器人在设定深度值上下波动,参考偏差变化率的影响,调节 K_d 取值,当影响小时,适当增大 K_d ,当影响大时,适当减小 K_d ,也更好提高系统抗干扰能力。

表 1 P、I、D 增量模糊控制规则

P、I、D 增量	E						
	NL	NM	NS	O	PS	PM	PL
NL	NL/NL/PL	NL/NM/PL	NM/NS/PM	NM/NS/PM	NS/O/PS	O/O/O	O/O/O
NM	NL/NM/PL	NL/NM/PL	NM/NS/PM	NS/O/PS	NS/O/PS	O/O/O	O/O/NS
NS	NM/NS/PM	NM/NS/PM	NM/NS/PM	NS/PS/PS	O/O/O	PS/O/NS	PS/O/NS
EC	O	NM/NS/PM	NM/NS/PM	NS/O/PS	O/O/O	PS/O/NS	PM/PS/NM
PS	NS/O/PS	NS/O/O	NS/O/O	PS/O/NS	PS/O/NS	PM/PS/NM	PM/PM/NM
PM	O/O/PS	O/O/O	PS/O/NS	PM/PS/NM	PM/PS/NM	PM/PS/PM	PL/PM/NL
PL	O/O/O	O/O/O	PS/PM/NM	PM/PS/NM	PM/PS/NM	PM/PM/NM	PL/PM/NL

3 MATLAB 中 Simulink 定深控制仿真

对于横向定深控制,设置速度为 2 m/s,不受姿态角的影响,假定设定深度是 1.5 m,在 MATLAB 中 Simulink 库建立仿真器,用横向 PID 控制器和模糊 PID 控制器进行定深控制,

仿真如图 6 所示。在搭建 PID 深度控制器过程中,也采用不断试验的方法得到初始 P、I、D 的数值为 $k_{p2}=1.3, k_{i2}=40, k_{d2}=15$;模糊 PID 深度控制器与 PID 深度控制器也采用相同的初始 P、I、D 数值,通过多次仿真,得到最终的量化因子 $k_{e2}=1.2, k_{er2}=2.4$ 和比例因子 $k_{p2}=0.01, k_{i2}=1.5, k_{d2}=3$ 。

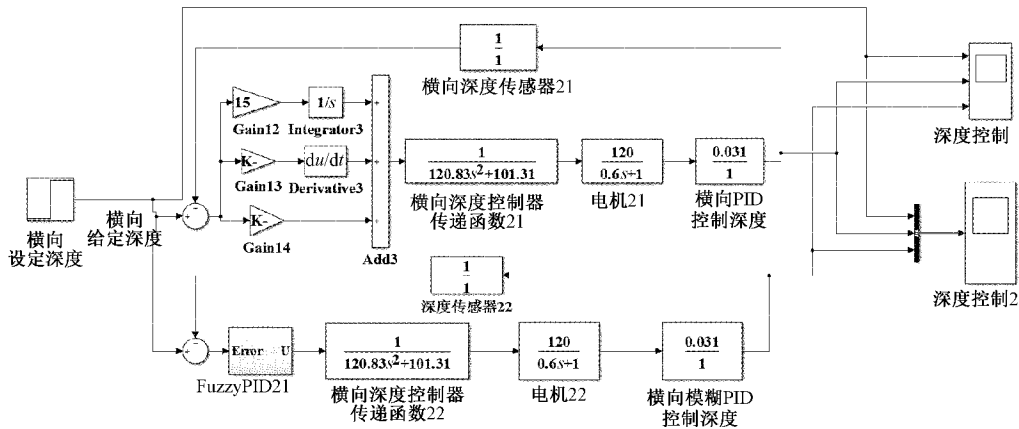


图 6 MATLAB 中横向定深控制仿真图

通过对横向 PID 和模糊 PID 控制器在同一条件下,得到横向定深控制仿真曲线结果,如图 7 所示,由仿真结果

可知,PID 控制器对于横向深度控制在最初的超调量为 30%,随着时间不断增大,超调量在不断减小,响应数值在

初始设置值 1.5 m 处不断波动,最后趋于设置值,其达到稳定时间为 25.2 s;对于模糊 PID 控制器来说,开始超调量为 10%,响应速度更快,到达稳定时间为 18.1 s。

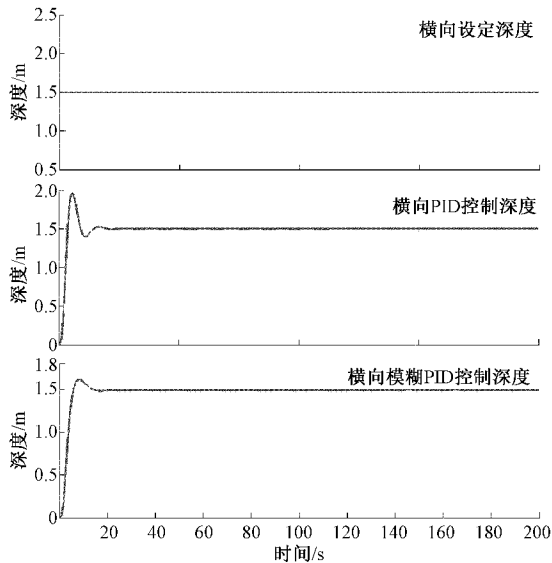


图 7 横向定深 1.5 m 控制仿真结果

当设定深度为 5 m 时,其他条件不变,由图 8 可知,其 PID 控制在加入模糊控制后,到达目标深度的时间明显提高,并且到达稳定深度的时间有显著缩短,控制定深得到的仿真曲线更加稳定,但是两者控制器对定深控制的原始超调量都有不断增大的趋势,PID 控制在加入模糊控制后,其超调趋势明显小于 PID 控制。

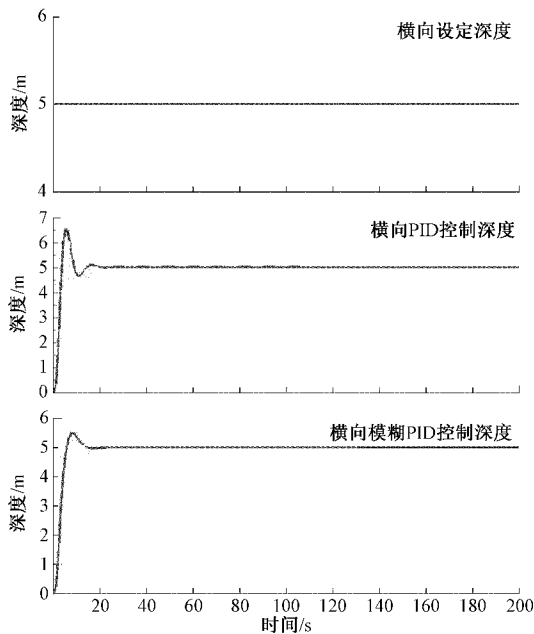


图 8 横向定深 5 m 控制仿真结果

通过上述两种控制器对 ROV 横向定深控制,由图 7~8 仿真结果得到结论,PID 控制在加入模糊控制后,无论是在动态控制方面还是在性能稳定方面都有显著的优势。

4 试验研究

为更好地验证机器人在水下姿态控制技术,现进行水下定深试验,图 9 为上位机深度控制界面,定深控制原理是在程序中设定原始深度,将设计控制方法的参数数据输入程序之中,通过有线手柄制定深控制按钮,并采集控制舱深度传感器的数据并将其保存,将得到的数据进行整理,绘制成曲线。

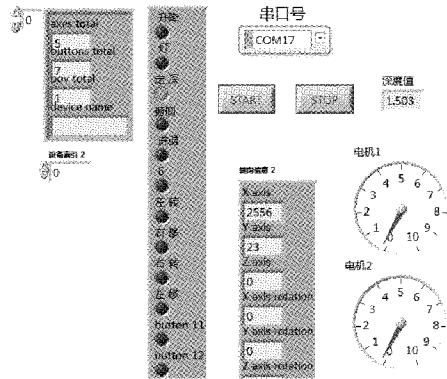


图 9 上位机定深控制界面

为验证两种控制器的控制效果,将机器人进行横向定深试验,如图 10 所示,由于运动环境是在水箱中,不会受到各种外界环境的影响,看作在静水中运动,水箱的高度不超过 3 m,将初始深度设置为 1.5 m,惯性测量单元对纵倾角控制设置为 0,并将上文两种控制器所得到的横向定深的初始参数数据输入到上位机控制程序中,对横向定深控制形成闭环回路,通过上位机界面中深度传感器数据进行实时接收,由于定深参数数据庞大,因此在表 2 中罗列出部分深度数据,最终将输出的定深数据进行曲线绘制,曲线如图 11~12 所示。

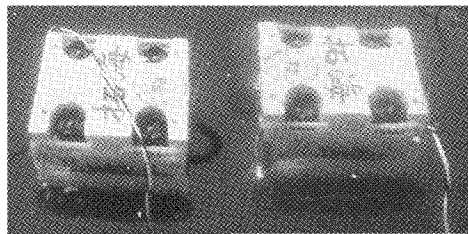


图 10 横向定深运动图

通过对机器人进行横向定深试验,从试验图上可以看出,在设置为 1.5 m 的条件下,模糊 PID 器最初响应的时间为 9.58 s,其最初的超调量控制为 5.3%,达到稳定的时间为 13.2 s,最终在设置值附近微小波动,在同一条件下,PID 控制器响应的时间为 14.88 s,最初的超调量为 10%,其稳定的时间为 22.36 s,同样在 1.5 m 处来进行微动。这就说明,PID 在加入模糊控制形成模糊 PID 控制后,在到达设置深度,所需要的时间明显少于 PID 控制,另外模糊

表2 深度传感器部分横向深度值

时间/s	横向深度值/m		时间/s	横向深度值/m		时间/s	横向深度值/m	
	PID	模糊PID		PID	模糊PID		PID	模糊PID
0	0.020	0.025	1.8	0.041	0.155 42	3.4	0.227 69	0.341 35
0.1	0.020	0.026	1.9	0.046	0.144 95	3.6	0.219 85	0.349 93
0.2	0.020	0.025	2.0	0.047	0.196 26	3.7	0.279 68	0.341 23
0.4	0.023	0.026	2.1	0.046	0.203 38	3.8	0.281 43	0.439 82
0.5	0.024	0.030	2.3	0.070	0.195 69	3.9	0.276 98	0.449 39
0.7	0.023	0.035	2.4	0.071	0.239 13	4.0	0.309 99	0.435 65
0.8	0.024	0.062	2.5	0.090	0.248 96	4.1	0.312 64	0.487 46
0.9	0.025	0.075	2.6	0.110 78	0.239 56	4.2	0.308 95	0.470 34
1.0	0.030	0.090	2.7	0.105 68	0.253 39	4.3	0.331 25	0.488 95
1.2	0.031	0.105 62	2.9	0.169 78	0.248 96	4.4	0.339 06	0.559 14
1.3	0.032	0.118 35	3.0	0.172 38	0.281 54	4.6	0.330 98	0.567 41
1.4	0.031	0.109 56	3.1	0.169 85	0.299 22	4.8	0.380 98	0.559 59
1.6	0.040	0.141 65	3.2	0.214 57	0.284 66	5.0	0.381 29	0.624 51

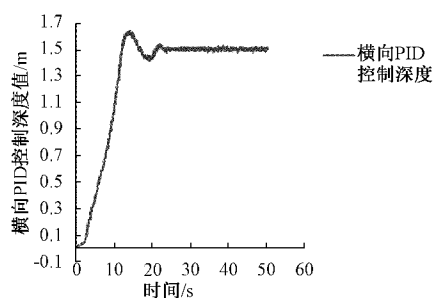


图 11 横向 PID 控制定深试验曲线

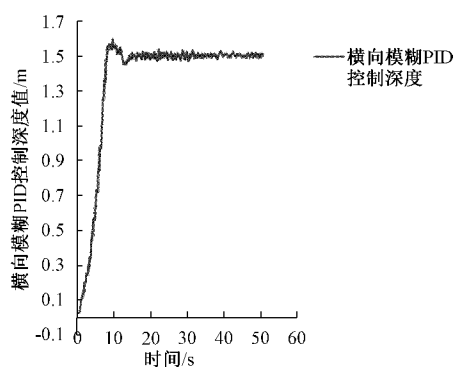


图 12 横向模糊 PID 控制定深试验曲线

PID 控制器比 PID 控制器在设定深度附近产生的波动较小,并且控制误差的范围小,更适合于 ROV 的定深姿态的稳定控制。

5 结 论

本文针对水下机器人在运动时,受到外界条件的影响,其运动姿态不能稳定控制的问题,尤其是在在定深控制方面,采用高端智能控制算法进行横向定深控制的改进。首先是对 ROV 系统结构设计以及 6 个推进器的分

布,得到适合本 ROV 的六自由度方程;其次在多重条件约束下,建立控制模型,并通过 Fluent 中 CFD 流体分析,得到各姿态运动状态的水动力系数,进而得到横向定深控制器、电机、推进器的传递函数,并通过对 PID 控制、模糊 PID 控制理论研究,在 Simulink 库中搭建出两种控制器定深控制模型图,最终进行实验验证,得出结论,模糊 PID 控制器响应时间短,超调范围小,且趋于稳定快,有效解决水下姿态稳定控制的问题,并对水下石油管道检测节约大量的时间,能够更加快速找到裂纹的位置,减少事故的发生。

本文仍有不足之处,比如本文实验是在特定干扰条件下进行的,由于水下还受到除特定条件外其他外界条件的作用,因此,对于其他外界条件在水下机器人的姿态稳定控制效果还有待测试和完善。

参考文献

- [1] 任福深,杨雨潇,王克宽,等. ROV 发展现状与其在海洋石油行业应用前景[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(6): 6-11.
- [2] 陈亮. 一种新型的水陆两栖球形机器人的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2012.
- [3] 李璐琼,张福斌,李勇强. 基于自治水下机器人纵向运动的滑模定深控制[J]. 电子设计工程, 2013, 10(4): 59-64.
- [4] 杨建华,田守业. 基于滑模理论的水下机器人定深控制算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(8): 43-45, 57.
- [5] 刘畅,徐国华,王冠学,等. 腹部作业型 ROV 的全局滑模定深控制[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(3): 11-17.
- [6] BESSA W M, DUTRA M S, KREUZER E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using

- an adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 28(3/4): 185-193.
- [7] 李美杰. 导管架检测 ROV 水动力数值计算及其特性分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [8] 王宇鑫. “海螺一型”ROV 控制系统结构与艏向控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [9] 祝庆庆. 海洋工程船动力定位系统推力分配及控位能力研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2013.
- [10] 许云兰. 基于改进 PID 控制的数控机床油温控制系统研究[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(8): 23-27.
- [11] 王重凯, 尹辉, 林鑫涌, 等. 水下机器人推进系统综述[J]. *珠江水运*, 2019, 14: 84-85.
- [12] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000: 277-278.
- [13] 何彦霖, 董明利, 孙广开. 复合式驱动小型两栖机器人水下运动控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(1): 219-225.
- [14] 刘洋, 行鸿彦, 侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(10): 46-52.
- [15] 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, 42(2): 20-23, 28.
- [16] 尹梦舒, 冯常. 基于模糊技术的水下机器人运动控制[J]. *微型机与应用*, 2015, 34(17): 75-77.
- [17] 冯冬青, 任雪梅. 模糊 PID 在网络控制系统中的仿真研究[J]. *自动化仪表*, 2013, 34(1): 61-63.
- [18] AKKIZIDIS I S, ROBERTS G N, RIDAO P, et al. Designing a fuzzy like PD controller for an underwater robot[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(4): 471-480.
- [19] MUSCATO G, PRESTIFLIPPO M. A fuzzy-PD for the position and attitude control of an underwater robot [C]. *Emerging Technologies and Factory Automation*. Catania, Italy: IEEE, 2005: 379-383.

作者简介

任福深, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为智能装备与精密测控。

E-mail: renfushen@126.com

范玉坤, 硕士研究生, 主要研究方向为水下机器人设计与运动控制。

E-mail: 595411469@qq.com