

## 深海ROV伺服控制方法研究及其仿真

魏延辉, 陈巍, 杜振振, 曾建辉

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对深海水下机器人(ROV)处于深海环境中受到外界干扰的伺服控制这一问题, 首先建立推进器推力分配结构, 推导出作用在ROV本体上相应的实际推力; 然后依据PID原理和模糊规则, 构造模糊PID控制器, 实现ROV消除外界干扰恢复静止稳定状态的伺服控制; 最后通过仿真实验表明了所构造的模糊PID控制具有较好的动态性能和稳态性能, 显示出良好的伺服控制性能。

**关键词:** 水下机器人; 推力分析; 静止稳定; 模糊PID控制; 仿真

**中图分类号:** TP242.2

**文献标志码:** A

### Servo control method of ROV and simulation

WEI Yan-hui, CHEN Wei, DU Zhen-zhen, ZENG Jian-hui

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: WEI Yan-hui, E-mail: wyhhit@163.com)

**Abstract:** Aiming at the problem that the servo control method of a remotely operated underwater vehicle(ROV) working under the deep sea which is disturbed by external factors, the thrust forces' allocation structure of the propellers is established, and the applied forces of the thrusters on the ROV are deduced. Then, according to the principles of PID and rules of fuzzy logic control, the fuzzy PID controller is built to realize the servo control for the ROV to eliminate the external disturbance so as to restore its stationary state. Finally, it is concluded that the fuzzy PID controller owns better dynamic and steady-state properties, which shows the good performance of the servo control through the simulation experiment.

**Keywords:** remotely operated underwater vehicle; thrust forces analysis; stationary stability; fuzzy PID control; simulation

### 0 引言

海洋中蕴藏着丰富的矿产、生物和金属等资源<sup>[1-2]</sup>, 水下机器人(ROV)因其环境适应性好、作业效率高优点广泛应用于海洋资源开发、海底调查和打捞作业等领域。ROV作业活动需要进行人为干预和控制, 对于其伺服控制, 多运用不同的控制方法控制推进器, 从而通过推力分配实现相应控制目标<sup>[3-5]</sup>。ROV处于平稳状态下经受外界干扰的伺服控制是水下机器人关键技术之一<sup>[6-7]</sup>。

为了保持水下作业机器人维持相对稳定的作业状态, Allen等<sup>[8]</sup>使用PID控制完成AUV的定艏和定深控制。针对ROV的脐带缆长度发生变化, Prabhakar等<sup>[9]</sup>应用PD控制实现了ROV的深度控制。同时, 文献

[10-11]使用PID控制器实现了ROV的深度控制。虽然上述研究以相对简单的方式实现了较好的控制性能, 但是仍然无法避免常规PID的不足。因此, 可以通过改进常规PID控制方法实现更好的控制性能。近年来, 关于水下机器人控制的研究有诸多进展。范士波等<sup>[12]</sup>实现了深海开架潜水器轨迹跟踪; 朱康武等<sup>[13]</sup>实现了ROV多变量鲁棒输出反馈控制; 俞建成等<sup>[14]</sup>提出了基于广义动态模糊神经网络的水下机器人直接自适应控制; 魏延辉等<sup>[15]</sup>进行了AUV稳定性控制问题的研究。以上研究为水下机器人的控制研究提供了新的思路和方向。

本文以深海ROV为研究对象, 将PID控制与模糊控制优点相结合, 构成模糊PID控制对ROV进行

收稿日期: 2014-07-15; 修回日期: 2015-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205074, 61473095); 国家科学技术部国际科技合作项目(2014DFR10010); 中央高校基本科研业务费项目(HEUCF041505); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20112304120007); 国防基础科研项目(A0420132202).

作者简介: 魏延辉(1978—), 男, 讲师, 博士, 从事机器人控制、可重构机器人的研究; 陈巍(1991—), 男, 硕士生, 从事水下机器人控制的研究。

控制. 通过对 ROV 处于相对静止状态下施加干扰进行仿真, 结果表明了模糊 PID 控制具有实现 ROV 维持静止稳定状态伺服控制的适用性.

## 1 深海 ROV 推力分析

### 1.1 深海 ROV 推进器分布

对于深海 ROV, 其在海底工作环境条件下主要受到 3 大外界干扰: 1) 执行海底作业时, 机械臂动作干扰 ROV 整体稳定性; 2) 用于通讯和收发指令信息的铠装脐带缆出现一定范围晃动, 导致 ROV 本体出现不稳定状态; 3) 深海环境下, ROV 本体受到洋流或者恶劣海况的干扰而影响作业稳定性. 因此, 可以通过 ROV 上推进器推力协调分配, 减弱或者消除上述外界干扰, 从而使本体保持稳定静止状态.

深海 ROV 推进器推力分布如图 1 所示. 其中: 水平面推进器的推力输出实际作用在 ROV 上, 分别记为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ ; 垂直方向上推进器的推力输出实际作用在 ROV 上, 分别记为  $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$ ; 推进器  $i$  自身输出推力数值记为  $f_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ).

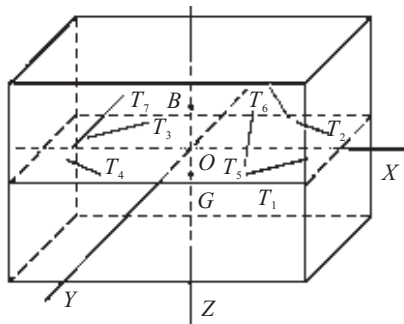


图 1 深海 ROV 推进器分布

### 1.2 推力分析模型建立

假设  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  与  $X$  轴正向夹角均为  $\alpha$ ,  $T_5$ 、 $T_6$  与  $Y$  轴正向夹角均为  $\beta$ ,  $T_7$  与  $X$  轴负向夹角为  $\gamma$ . 为简要说明, 以推进器 1 的推力分析为例建立推进器推力模型, 并设 ROV 本体坐标系为  $O$ - $XYZ$ , 推进器 1 坐标系为  $O$ - $X_1Y_1Z_1$ , 两个坐标系均为右手系, 具体关系如图 2 所示.

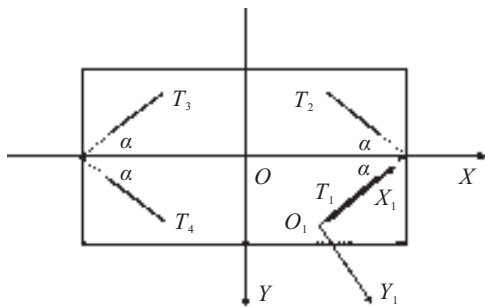


图 2 推进器分析

ROV 本体坐标系到推进器 1 坐标系姿态变换为

$$P_0^1 =$$

$$R(X, \gamma_1 + \Delta\gamma_1)R(Y, \beta_1 + \Delta\beta_1)R(Z, \alpha_1 + \Delta\alpha_1). \quad (1)$$

其中

$$R(X, \gamma_1 + \Delta\gamma_1) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma_1 + \Delta\gamma_1) & \sin(\gamma_1 + \Delta\gamma_1) \\ 0 & -\sin(\gamma_1 + \Delta\gamma_1) & \cos(\gamma_1 + \Delta\gamma_1) \end{bmatrix},$$

$$R(Y, \beta_1 + \Delta\beta_1) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1) & 0 & -\sin(\beta_1 + \Delta\beta_1) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta_1 + \Delta\beta_1) & 0 & \cos(\beta_1 + \Delta\beta_1) \end{bmatrix},$$

$$R(Z, \alpha_1 + \Delta\alpha_1) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & 0 \\ -\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

特别地, 在理想状态下, 即  $\alpha_1 = \alpha$ ,  $\beta_1 = \gamma_1 = 0$ ,  $\Delta\alpha_1 = \Delta\beta_1 = \Delta\gamma_1 = 0$  时, 姿态变换阵为

$$P_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

可以得到推进器 1 作用在 ROV 本体上的推力矢量表达式为

$$T_1 = P_1^0 \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_1^0 = (P_0^1)^{-1}, \quad (2)$$

其中  $f_1$  为推进器 1 的自身推力.

同理, 可以求得余下 6 个推进器作用在 ROV 上的推力  $T_i$  ( $i = 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ) 矢量表达式如下:

$$T_i = P_i^0 \cdot \begin{bmatrix} f_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_i^0 = (P_0^i)^{-1}. \quad (3)$$

其中:  $f_i$  为推进器  $i$  的自身推力大小,  $P_i^0$  为推进器  $i$  坐标系到 ROV 本体坐标系姿态变换阵.

### 1.3 推进器功能及其补偿

为实现 ROV 完成相关作业的可靠性, 使其本体在深海中可以保持一个相对静止稳定的状态, 需要通过推进器进行推力分配,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  提供的推力可以实现对 ROV 受到的进退、侧移、艏向角 3 个自由度干扰外力的抵消和补偿,  $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$  的推力分配与组合可以抵抗 ROV 受到的横摇、纵倾和深度方向的干扰外力.

为实现各个自由度解耦, 需求出推力  $T_i$  和力矩  $M_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ) 在各个轴向的分量, 并满足合力和合力矩平衡, 从而保持相对稳定状态. 通过调整

$f_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ) 实现各个自由度单自由度解耦, 有

$$T_i = [T_{ix} \ T_{iy} \ T_{iz}]^T = [k_{ix}f_i \ k_{iy}f_i \ k_{iz}f_i]^T, \quad (4)$$

$$M_i = r_i \times T_i =$$

$$[(k_{iy}z_i - k_{iz}y_i)\mathbf{i} + (k_{iz}x_i - k_{ix}z_i)\mathbf{j} +$$

$$(k_{ix}y_i - k_{iy}x_i)\mathbf{k}]f_i =$$

$$[M_{ix} \ M_{iy} \ M_{iz}]^T =$$

$$[k_{iMx}f_i \ k_{iMy}f_i \ k_{iMz}f_i]^T, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^7 T_{ix} = \sum_{i=1}^7 T_{iy} = \sum_{i=1}^7 T_{iz} = 0, \\ \sum_{i=1}^7 M_{ix} = \sum_{i=1}^7 M_{iy} = \sum_{i=1}^7 M_{iz} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

其中: 由于各个推进器安装角均在推进器安装完成后固定, 由式(3)可知,  $k_{ix}$ 、 $k_{iy}$ 、 $k_{iz}$  为固定系数, 是  $T_i$  分别在  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴的分量系数;  $r_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$  为 ROV 本体坐标系  $O$ - $XYZ$  原点到推进器  $i$  中轴垂线交点在  $O$ - $XYZ$  坐标系中的坐标, 推进器安装完毕后, 其数值不发生变化;  $k_{iMx}$ 、 $k_{iMy}$ 、 $k_{iMz}$  为  $M_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ) 分别在  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴分量系数。

以 ROV 受到干扰力  $T_{rao}$  作用为例说明推力补偿, 该情况下可能产生干扰力矩  $M_{rao}$ 。要实现 ROV 抵抗外界干扰, 需满足下式:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^7 T_{ix} + T_{raox} = \sum_{i=1}^7 M_{ix} + M_{raox} = 0, \\ \sum_{i=1}^7 T_{iy} + T_{raoy} = \sum_{i=1}^7 M_{iy} + M_{raoy} = 0, \\ \sum_{i=1}^7 T_{iz} + T_{raoz} = \sum_{i=1}^7 M_{iz} + M_{raoz} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

其中: 干扰力矩矢量表示为

$$M_{rao} = [M_{raox} \ M_{raoy} \ M_{raoz}]^T,$$

干扰力矢量表示为

$$T_{rao} = [T_{raox} \ T_{raoy} \ T_{raoz}]^T.$$

由式(4)和(5)可知, 通过调整推进器自身推力  $f_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ), 使其满足式(7)条件, ROV 本体便可以完成推力补偿。

## 2 深海 ROV 伺服控制

模糊 PID 控制具有独特的优点, 主要用来实现难以建模或者非线性较强的系统的控制<sup>[16-18]</sup>。由于深海 ROV 具有强耦合和非线性的特点<sup>[19-20]</sup>, 利用模糊 PID 对 ROV 依据模糊概念和复合推理规则进行控制, 使其具有处于姿态、位置、深度相对静止的状态的伺服控制能力。

### 2.1 模糊 PID 控制原理

PID 控制器以闭环系统的目标输入和实际系统输出的误差量作为控制量, 通过对误差量进行比例、积分、微分环节处理, 得到控制器输出的控制量, 进而消除误差。在 ROV 控制系统中, PID 控制可以表示为

$$\tau_P = K_P e(t) + \int_0^t K_I e(\lambda) d\lambda + K_D \dot{e}(t). \quad (8)$$

其中:  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  分别为 PID 控制器的比例、积分、微分系数,  $\tau_P$  为推进器推力输出,  $e(t)$  为  $t$  时刻目标状态量与实际状态量偏差值。

模糊 PID 控制主要包括 PID 控制器、模糊控制器和被控系统。PID 控制作为基本控制算法, 应用模糊控制根据偏差量和偏差变化率实时输出  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$ , 在原有 PID 基础上对 PID 参数进行整定, 实现更好的控制性能。

### 2.2 深海 ROV 模糊 PID 伺服控制系统

#### 2.2.1 输入输出量选取

深海作业型 ROV 静止伺服控制系统模糊 PID 控制器考虑到实际情况, 设定实际输入为 ROV 位置偏差、位置偏差变化率、姿态角偏差、姿态角偏差变化率。处于稳定状态的 ROV 受到外界干扰时, 静止位姿量会有变化, 误差范围较小。实际输入输出基本论域如下:

输入量偏差  $E$  和偏差一阶导数  $EC$  模糊论域为

$$E = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

$$EC = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\};$$

输出量  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  模糊论域为

$$\Delta K_P = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

$$\Delta K_I = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

$$\Delta K_D = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}.$$

模糊控制器输入量和输出量模糊语言变量为 NB(负大), NM(负中), MS(负小), ZE(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}。

#### 2.2.2 模糊控制规则表获取

利用 Matlab 提供的 Fuzzy Logic 获得模糊 PID 控制的控制规则表, 模糊 PID 控制器输入变量与输出量的隶属度函数选取如图 3 所示, 图 3 中, 用  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  表示  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$ 。

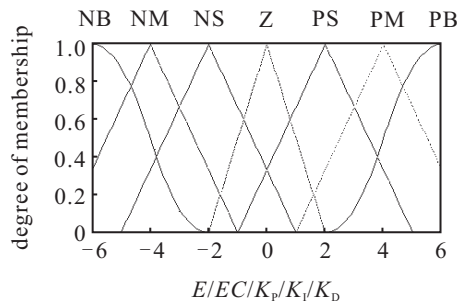


图3 输入与输出隶属度函数曲线

### 2.2.3 模糊PID控制器参数调整

模糊PID控制器参数调整表可以实时地根据偏差和偏差变化率调用参数调整值对PID参数进行修正,得到

$$\begin{cases} K_P = K_P^0 + a\Delta K_P, \\ K_I = K_I^0 + b\Delta K_I, \\ K_D = K_D^0 + c\Delta K_D. \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $K_P^0$ 、 $K_I^0$ 、 $K_D^0$  为初始PID参数;  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  为模糊控制器实际输出的参数调整值,  $a$ 、 $b$ 、 $c$

为参数调整因子.

## 3 仿真实验

### 3.1 仿真环境搭建

假设ROV的自重为80 kg,外形尺寸为0.8 m × 0.6 m × 0.6 m; 4个水平面内的推进器最大推力均为900 N, 3个垂直面内安装的推进器最大推力均为800 N, 推进器安装角  $\alpha$  为45°,  $\beta$  和  $\gamma$  均为80°, 并假设安装无其他偏差.假设ROV输入位置偏差范围[-0.5, 0.5] m; 位置偏差变化率范围[-0.1, 0.1] m/s; 姿态角偏差范围[-0.5, 0.5] rad; 姿态角偏差变化率范围[-0.01, 0.01] rad/s.

对ROV的6个自由度作如下规定:  $x$ 轴轴向(进退)、 $y$ 轴轴向(侧移)、 $z$ 轴轴向(深度)、横摇角、纵倾角、艏向角; 各自由度之间已经实现单自由度解耦. 构建如图4所示的伺服控制仿真环境, 静止状态伺服控制参考指标只考虑ROV位置和姿态, 仿真过程中, 在各自由度加入不同的外界干扰.

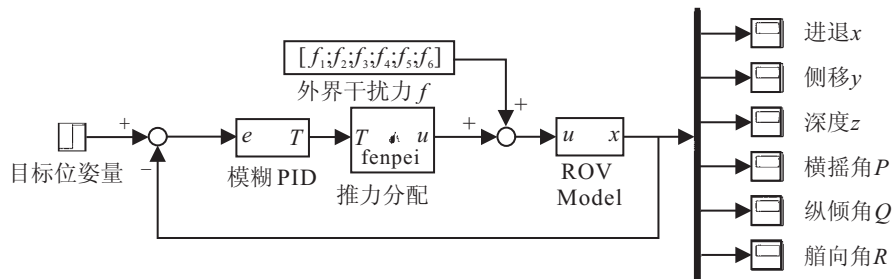


图4 模糊PID控制仿真环境

### 3.2 ROV单自由度干扰仿真

首先选取单个自由度进行仿真实验. 以  $x$  轴轴向(进退)伺服控制为例, 对仿真系统  $x$  轴轴向(进退)设定目标静止进退位置为5 m, 沿  $x$  轴施加图5所示扰动力, 得到ROV沿  $x$  轴进退方向动态和稳态性能曲线, 如图6所示.

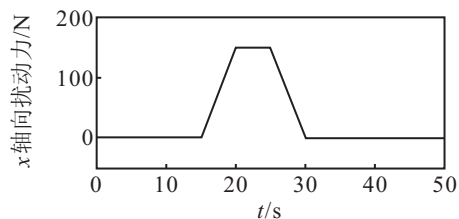


图5 扰动输入信号形式

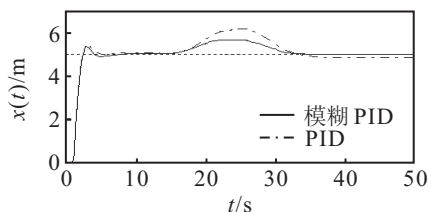


图6 ROV进退动态及稳态响应曲线

仿真结果表明, 模糊PID相比于普通PID具有更强的抗干扰能力, 并且应对外界干扰的响应速度更快.

模糊PID根据采集到的系统偏差和偏差变化率对PID初始参数进行整定, 得到新的PID参数并应用于系统中, 其初始参数值、整定后的参数值关系和普通PID参数整定结果对比如图7所示. 图7中: 实线为模糊PID, 虚线为PID. 施加外界干扰后,  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  的模糊调整均为单峰值, 即调节方向一致, 这种现象的发生恰好验证了所设计模糊控制规则的有效性. 同理, 可以得到余下自由度类似的干扰实验结果.

### 3.3 ROV六自由度干扰仿真

鉴于6个自由度已实现解耦, 故6自由度实验中关于模糊PID控制器受到干扰后的响应和参数整定过程与单个自由度的仿真实验相似, 不予重复讨论, 本节主要说明推进器推力分配的过程及其实现抵抗外界干扰的快速性、准确性和可靠性.

仿真过程中, 对6个自由度分别加入不同的外界干扰, 干扰信号如图5所示, 梯形外界干扰力时

间设置如表 1 所示, 以观察在外界干扰下, 六自由度 ROV 位姿量与推进器实际作用在 ROV 上的推力变化过程.

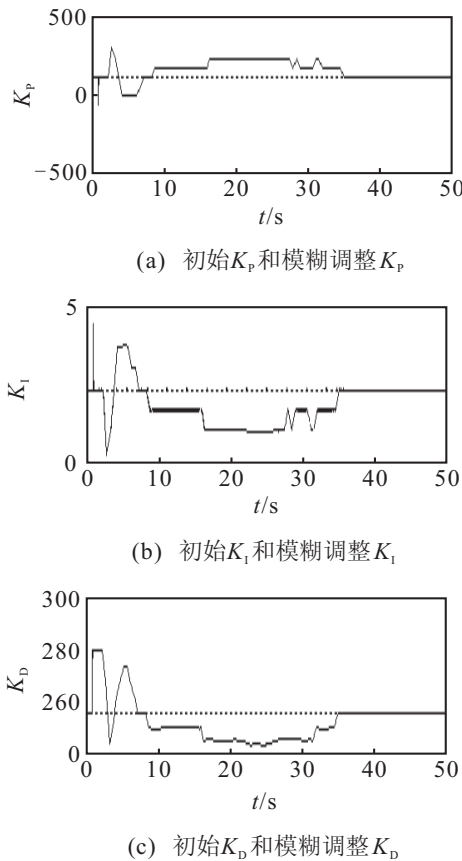


图 7 PID 参数整定对比

表 1 各自由度外界干扰动力参数

自由度	梯形顶点时间节点	斜边斜率	最大干扰
进退 5 m	15 s/20 s/25 s/30 s	30/-30	150 N
侧移 5 m	20 s/25 s/30 s/35 s	30/-30	150 N
深度 5 m	15 s/20 s/25 s/30 s	50/-50	250 N
横摇角 0 rad	20 s/25 s/30 s/35 s	10/-10	50 N·m
纵倾角 0 rad	25 s/30 s/35 s/40 s	5/-5	25 N·m
艏向角 0.5 rad	25 s/30 s/35 s/40 s	5/-5	25 N·m

模糊 PID 控制器的输出为深海作业型 ROV 所需要的推进器实际作用在 ROV 本体上的推力合力, 当 ROV 受到如表 1 所示的外界干扰后, 控制器将推力依据能量最优原则进行推力分配, 调整  $f_i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)$  的大小, 从而根据关系式得到水平面实际作用推力分配曲线和垂向推力分配, 如图 8 和图 9 所示. 推进器实际作用推力始终跟随偏差变化进行调整.

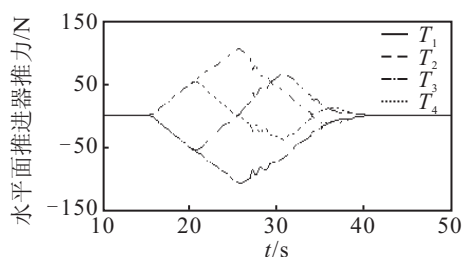


图 8 水平面推力分配

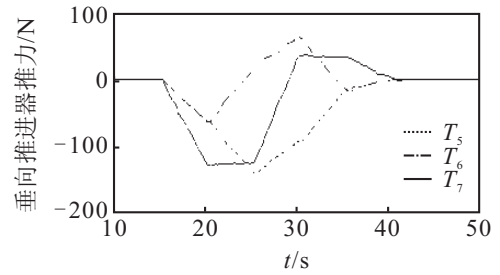


图 9 垂向推力分配

由图 8 和图 9 可见: 当 ROV 在沿  $x$  轴或  $y$  轴受到外界干扰作用时, 模糊 PID 实时地控制各个推进器推力对 ROV 进行控制, 使得各个推进器实际作用在 ROV 上推力满足  $-T_1 = -T_2 = T_3 = T_4$ , 从而保证 ROV 不会产生侧移合力及摇艏力矩或者进退合力; 在  $z$  轴向施加外界干扰, 且没有其他自由度干扰时, 满足  $T_7 = 2T_5 = 2T_6$ ; 当横摇角方向开始受到干扰力矩作用时, 仍然满足  $T_7 = T_5 + T_6$ , 不会产生纵倾; 纵倾角方向受到外界干扰时,  $T_5$  缓慢减小,  $T_6$  缓慢增大,  $T_7$  恢复的速度快于没有干扰的速度.

实验表明, 模糊 PID 控制方法对六自由度 ROV 静止稳定状态下位姿控制起到了良好的效果, 该伺服控制方法可以根据外界干扰进行响应, 在保证各个自由度解耦的前提下, 及时准确地作出推力调整, 快速地使 ROV 恢复静止稳定状态.

#### 4 结 论

本文针对深海 ROV 伺服控制方法进行分析与研究, 得到如下结论:

1) 根据深海 ROV 总体结构中推进器的空间分布关系, 建立相应的坐标系, 从而推导出推进器本身输出推力与其作用在 ROV 本体上推力的变换关系. 在此基础上简要分析了各个推进器的功能作用, 并进行推进器解耦与补偿的理论分析与关系式推导, 为 ROV 受到干扰后进行推力分配的研究奠定基础.

2) 通过设立模糊规则, 进行隶属度函数等方面的设计, 并且综合考虑经典 PID 控制器和模糊控制的优缺点, 组合构成模糊 PID 控制器以实现深海 ROV 受到外界干扰后恢复稳定状态的伺服控制.

3) 给定具体的 ROV 参数指标和外界干扰力, 通过仿真实验实现对深海 ROV 解耦的单个自由度外界干扰模糊 PID 响应过程以及六个自由度受到干扰后进行推力分配过程的分析, 验证了模糊 PID 控制对于深海 ROV 维持静止稳定状态伺服控制的良好性能.

#### 参考文献(References)

[1] 封锡盛, 李一平, 徐红丽. 下一代海洋机器人——写在人类创造下潜深度世界记录 10912 米 50 周年之际[J]. 机器人, 2011, 33(1): 113-118.

- (Feng X S, Li Y P, Xu H L. The next generation of unmanned marine vehicles dedicated to the 50 anniversary of the human world record diving 10912 m[J]. Robot, 2011, 33(1): 113-118.)
- [2] 朱心科, 金翔龙, 陶春辉, 等. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. 机器人, 2013, 35(3): 376-384.  
(Zhu X K, Jin X L, Tao C H, et al. Discussion on development of ocean exploration technologies and equipments[J]. Robot, 2013, 35(3): 376-384.)
- [3] Soylu S, Buckham B J, Podhorodeski R P. A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(16): 1647-1659.
- [4] Akmal M, Yusoff M, Arshad M R. Active fault tolerant control of a remotely operated vehicle propulsion system[J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 622-628.
- [5] Inoue T, Katsui T, Murakami H, et al. Preliminary research on the thruster assisted crawler system for a deep sea ROV[C]. OCEANS'09 IEEE Bremen: Balancing Technology with Future Needs. Bremen: IEEE, 2009: 1-5.
- [6] 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: 30-31.  
(Jiang X S, Feng X S, Wang D T. Unmanned underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2000: 30-31.)
- [7] 徐玉如, 肖坤. 智能海洋机器人技术进展[J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 518-521.  
(Xu Y R, Xiao K. Technology development of autonomous ocean vehicle[J]. Acta Automatic Sinica, 2007, 33(5): 518-521.)
- [8] Allen B, Stokey R, Austin T, et al. REMUS: A small, low cost AUV; system description, field trials and performance results[C]. Proc of MTS/IEEE Oceans. Halifax: IEEE, 1997: 994-1000.
- [9] Prabhakar S, Buckham B. Dynamics modeling and control of a variable length remotely operated vehicle tether[C]. Proc of MTS/IEEE Oceans. Washington DC: IEEE, 2005: 1255-1262.
- [10] Tehrani N H, Heidari M, Zakeri Y, et al. Development, depth control and stability analysis of an underwater remotely operated vehicle(ROV)[C]. The 8th IEEE Int Conf on Control and Automation. Xiamen: IEEE, 2010: 814-819.
- [11] Zanolini S M, Conte G. Remotely operated vehicle depth control[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(4): 453-459.
- [12] 范士波, 连琰, 任平. 基于水动力试验的深海开架式潜水器三维轨迹跟踪控制平台设计[J]. 船舶力学, 2012, 16(12): 1408-1416.  
(Fan S B, Lian L, Ren P. 3D trajectory tracking control platform design for deep sea open-framed remotely operated vehicle based on hydrodynamics test[J]. J of Ship Mechanics, 2012, 16(12): 1408-1416.)
- [13] 朱康武, 顾临怡, 马新军, 等. 水下运载器多变量鲁棒输出反馈控制方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(8): 1397-1406.  
(Zhu K W, Gu L Y, Ma X J, et al. Studies on multivariable robust output feedback control for underwater vehicles[J]. J of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(8): 1397-1406.)
- [14] 俞建成, 张艾群, 王晓辉, 等. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(8): 840-846.  
(Yu J C, Zhang A Q, Wang X H, et al. Direct adaptive control of underwater vehicles based on fuzzy neural networks[J]. Acta Automatic Sinica, 2007, 33(8): 840-846.)
- [15] 魏延辉, 彭富国, 盛超, 等. 自主式水下机器人运动稳定性控制方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 127-132.  
(Wei Y H, Peng F G, Sheng C, et al. Control method of the stability of AUV[J]. J of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(2): 127-132.)
- [16] Sharma R, Rana K P S, Kumar V. Performance analysis of fractional order fuzzy PID controllers applied to a robotic manipulator[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(9): 4274-4289.
- [17] Duan Xiaogang, Li Hanxiong, Deng Hua. Robustness of fuzzy PID controller due to its inherent saturation[J]. J of Process Control, 2012, 22(2): 470-476.
- [18] Ren Yaoqing, Duan Xiaogang, Li Hanxiong, et al. Multi-variable fuzzy logic control for a class of distributed parameter systems[J]. J of Process Control, 2013, 23(3): 351-358.
- [19] Azis F A, Aras M S M, Rashid M Z A, et al. Problem identification for underwater remotely operated vehicle(ROV): A case study[J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 554-560.
- [20] Avila J P J, Donha D C, Adamowski J C. Experimental model identification of open-frame underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2013, 60: 81-94.

(责任编辑: 郑晓蕾)