

作业型遥控水下运载器的多变量backstepping鲁棒控制

朱康武, 顾临怡

(浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对作业型遥控水下运载器(ROV)存在复杂外干扰、参数不确定性以及强非线性耦合的特性, 提出了作业型ROV的多变量backstepping控制方法. 使用Lyapunov稳定性分析方法, 证明了当存在系统参数不确定性和未知常值外干扰的情况时, 系统的局部渐近稳定性, 以及跟踪误差的局部渐近收敛性. 针对作业型ROV在动力定位时的特点, 得到了系统动力定位时的四自由度简化模型. 仿真结果表明, 所提出的多变量backstepping鲁棒控制器具有比常规PID控制器更好的控制品质和鲁棒性能.

关键词: backstepping控制; 多变量控制; 鲁棒控制; 动力定位; 作业型遥控水下运载器

中图分类号: TP249 **文献标识码:** A

Multivariable backstepping robust control for work-class remotely operated vehicle

ZHU Kang-wu, GU Lin-yi

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: To deal with complex disturbances, parameter uncertainties and strong nonlinear coupling in work-class remotely operated vehicles(ROVs), we propose a method for designing the multivariable backstepping robust controller. By using Lyapunov stability analysis, we prove the locally asymptotically stability of the controlled system and the locally asymptotically convergence of the tracking error, in the presence of parameter uncertainties and unknown constant disturbances. To simplify the realization of the controller, the system model is reduced to a 4-degrees of freedom(4-DOF) model by considering the characteristics of work-class ROVs in dynamic positioning. Simulation results validate that the multivariable backstepping robust controller surpasses traditional PID controller in control performances and robustness.

Key words: backstepping control; multivariable control; robust control; dynamic positioning; work-class remotely operated vehicle

1 引言(Introduction)

作业型遥控水下运载器(ROV)是进行海底资源开发、水下作业所必须的大型设备^[1]. 随着我国对远洋资源开发的深入, 迫切需要具有较强作业能力的大功率液压驱动作业型ROV.

与小型观测型ROV不同, 作业型ROV需要在机械手作业时尽量保证船体的稳定, 以实现高效率的作业. 而其工作环境存在着多种较复杂的未知干扰, 如海底暗流、浅海工作时的水面波浪干扰等. 所以作业型ROV的控制系统需要具有很好的抗干扰性能. 同时作业型ROV存在着很强的参数不确定性. 由于作业型ROV的体积较大, 无法像自治水下运载器(autonomous underwater vehicle, AUV)一样, 通过一系列水动力试验获得准确的水动力系数^[2], 并且由于其外型较复杂且随着作业任务的不同, 往往需要安装不同的设备, 甚至改变整体结构, 如更换作业底盘等. 此时系统参数会出现很大的变化. 而传统的作

业型ROV通常使用PID控制, 当系统参数发生较大变化时, 控制性能将会出现较明显的退化, 甚至造成不稳定. 因此作业型ROV的控制系统需要对参数不确定性具有较好的鲁棒性能.

对于水下运载器的鲁棒控制已有较多的研究成果. Yoerger与Slotine等人^[3,4]最早提出使用滑模变结构控制解决ROV的不确定性问题, 并成功的应用于Jason号ROV的位置控制中. FENG与Allen^[5]则将 H_∞ 控制理论应用在AUV的轨迹控制中. 自从Kanellakopoulos等人^[6]提出backstepping系统的设计方法后, 其已经成为处理参数不确定性问题的重要方法之一. 在水下运载器领域中, Li等人^[7]使用经典backstepping控制方法, 实现了AUV的深度控制, 并通过仿真证明了算法的有效性. 高剑等人^[8]采用积分backstepping控制方法解决了水下航行器轴向运动的跟踪控制问题.

在以上的研究中, 大多假设水下运载器的水平面

运动与垂直面运动在某些工况下是可以解耦的,进而得到简化模型,再针对某一个方向上的运动,进行控制算法的研究.对于AUV或者小型的观察型ROV,此种假设往往可以取得较好的控制效果,而对于作业型ROV,其具有比AUV更大的非线性耦合特性,并且在工作时常常需要在两个平面内同时进行较大的运动,很难确定哪个方向上的运动才是主要运动,从而很难将其某个方向上的运动忽略掉,因此其耦合作用不能忽略.

因此,针对作业型ROV所存在的复杂的未知干扰、较强的参数不确定性和强非线性耦合3个问题,系统地提出一种针对作业型ROV的多变量backstepping鲁棒控制方法.使用基于Lyapunov稳定性的backstepping控制方法解决由未知干扰和参数不确定性所带来的鲁棒性能问题.使用多变量设计方法将ROV的六自由度运动作为一个整体进行研究,在控制器设计时包含系统的非线性耦合特性.通过理论推导证明系统所具有的全局渐近稳定性以及对指令信号的全局渐近跟踪性能.并根据作业型ROV在动力定位时的特点,对模型进行适当简化,使算法更易于实际的使用和调试,最后通过仿真对比研究证明算法的有效性.

2 系统描述(System description)

作业型ROV的艇体及固定坐标参考系描述如图1所示.

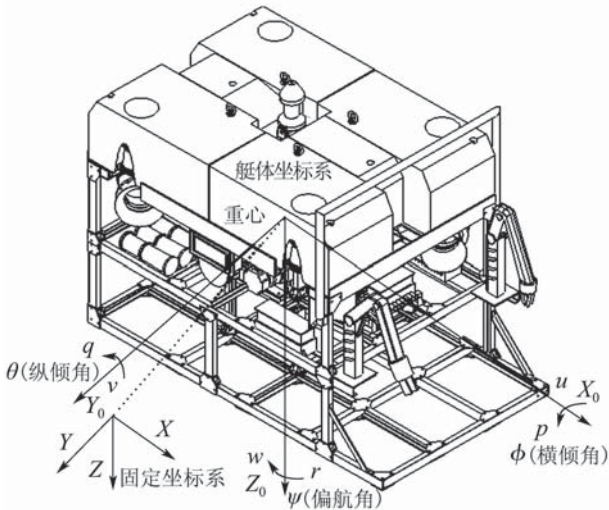


图1 固定坐标系与艇体坐标系定义

Fig. 1 Earth-fixed and body-fixed reference frames

根据文献[9],包含未知干扰项的六自由度非线性动力学模型为

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) + \Delta f = \tau, \quad (1)$$

其中: $\nu = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ 为ROV在艇体坐标系内的速度和角速度, $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ 为ROV相对于固定坐标系的位置和姿态角.为了获得尽量简单

的系统参数矩阵,需做以下假设.

假设1 将艇体坐标系设在ROV的重心处,且假设ROV具有3个对称面,则有

$$x_G = y_G = z_G = 0, \quad (2)$$

$$I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0, \quad (3)$$

并且忽略附加质量矩阵 M_A 中的非对角元素项,同时忽略高于二阶的阻尼项,从而得到如下的系统参数矩阵.

注1 作业型ROV的运动速度很低,且大多数具有多个对称面.并且在惯性矩阵中,非对角项元素要远远小于对角项元素.因此对角假设是合理的,并且在很多实际应用中,对角假设可以足够精确的描述系统的动力学特性^[9].

M 为包括附加质量的系统惯性矩阵, $M > 0$ 且 $M = M^T$,

$$M = M_{RB} + M_A = \text{diag}\{m_v - X_{\dot{u}}, m_v - Y_{\dot{v}}, m_v - Z_{\dot{w}}, I_x - K_{\dot{p}}, I_y - M_{\dot{q}}, I_z - N_{\dot{r}}\}, \quad (4)$$

$C(\nu)$ 为包括附加质量的科氏力和向心力矩阵:

$$C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m_v - Z_{\dot{w}})w & -(m_v - Y_{\dot{v}})v \\ -(m_v - Z_{\dot{w}})w & 0 & (m_v - X_{\dot{u}})u \\ (m_v - Y_{\dot{v}})v & -(m_v - X_{\dot{u}})u & 0 \\ 0 & (m - Z_{\dot{w}})w & -(m - Y_{\dot{v}})v \\ -(m - Z_{\dot{w}})w & 0 & (m - X_{\dot{u}})u \\ (m - Y_{\dot{v}})v & -(m - X_{\dot{u}})u & 0 \\ 0 & (I_z - N_{\dot{r}})r & -(I_y - M_{\dot{q}})q \\ -(I_z - N_{\dot{r}})r & 0 & (I_x - K_{\dot{p}})p \\ (I_y - M_{\dot{q}})q & -(I_x - K_{\dot{p}})p & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

阻尼矩阵 $D(\nu)$ 为

$$D(\nu) = -\text{diag}\{X_u + X_{u|u}|u, Y_v + Y_{v|v}|v, Z_w + Z_{w|w}|w, K_p + K_{p|p}|p, M_q + M_{q|q}|q, N_r + N_{r|r}|r\}. \quad (6)$$

重力产生的力和力矩向量 $g(\eta)$ 为

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ y_B B \cos \theta \cos \phi - z_B B \cos \theta \sin \phi \\ -z_B B \sin \theta - x_B B \cos \theta \cos \phi \\ x_B B \cos \theta \sin \phi + y_B B \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: W 为所受重力, B 为所受浮力.

Δf 为六自由度干扰力/力矩向量:

$$\Delta f = [\Delta f_u \ \Delta f_v \ \Delta f_w \ \Delta f_p \ \Delta f_q \ \Delta f_r]^T, \quad (8)$$

τ 为推进器产生的控制力/力矩向量:

$$\tau_{6 \times 1} = B_{6 \times n} u_{n \times 1} = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_w \ \tau_p \ \tau_q \ \tau_r]^T, \quad (9)$$

式中: $B_{6 \times n}$ 为推力分配矩阵, 由ROV推进器的布置方式决定; n 为推进器数量, $u_{n \times 1}$ 为各推进器的控制输入向量.

ROV的运动学方程为

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu, \quad (10)$$

式中坐标转换矩阵 $J(\eta)$ 为

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0 \\ 0 & J_2(\eta) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中:

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta \\ -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (13)$$

假设 2 为了保证 $J_2(\eta)$ 有意义, 需要对纵倾角 θ 做如下假设:

$$|\theta| < \frac{\pi}{2}. \quad (14)$$

3 多变量 backstepping 鲁棒控制器设计 (Multivariable backstepping robust controller design)

多变量backstepping鲁棒控制器设计目标为, 当存在未知常值干扰和系统参数不确定时, 系统能够渐近稳定, 并且渐近跟踪参考轨迹 η_d .

假设 3 参考轨迹 η_d 连续可微, 且二阶导数存在.

控制器的设计分为3步完成:

Step 1 首先定义新的误差变量

$$z_1 = \eta - \eta_d. \quad (15)$$

考虑如下的Lyapunov函数以保证跟踪误差的渐近稳定性:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^T z_1. \quad (16)$$

对上式求导得

$$\dot{V}_1 = z_1^T \dot{z}_1 = z_1^T (\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) = z_1^T J(\eta)\nu - z_1^T \dot{\eta}_d. \quad (17)$$

将 ν 作为虚拟控制量, 为了使 $\dot{V}_1 \leq 0$, 选择期望的虚拟速度为

$$\nu_v = -J^{-1}(\eta)K_1 z_1 + J^{-1}(\eta)\dot{\eta}_d, \quad (18)$$

式中 $K_1 = \text{diag}\{k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{16}\} > 0$ 为控制参数矩阵.

进而定义新的速度跟踪误差为

$$z_2 = \nu - \nu_v, \quad (19)$$

即

$$\nu = z_2 + \nu_v. \quad (20)$$

将式(20)代入式(17), 并根据式(18)得

$$\dot{V}_1 = z_1^T J(\eta)(z_2 + \nu_v) - z_1^T \dot{\eta}_d = -z_1^T K_1 z_1 + z_2^T J^T(\eta)z_1. \quad (21)$$

对式(18)求导得

$$\dot{\nu}_v = -\dot{J}^{-1}(\eta)K_1 z_1 - J^{-1}(\eta)K_1 \dot{z}_1 + \dot{J}^{-1}(\eta)\dot{\eta}_d + J^{-1}(\eta)\ddot{\eta}_d = J^{-1}(\eta)\dot{J}(\eta)J^{-1}(\eta)(K_1 z_1 - \dot{\eta}_d) - K_1 \nu + J^{-1}(\eta)K_1 \dot{\eta}_d + J^{-1}(\eta)\ddot{\eta}_d. \quad (22)$$

对式(19)进行求导, 并且根据式(1)得

$$\dot{z}_2 = \dot{\nu} - \dot{\nu}_v = M^{-1}(\tau - \Delta f - C(\nu)\nu - D(\nu)\nu - g(\eta) - M\dot{\nu}_v). \quad (23)$$

为了方便对系统参数不确定性进行处理, 选择如下的模型参数化方法:

$$M\dot{\nu}_v + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \phi(\nu, \dot{\nu}_v, \eta)\theta, \quad (24)$$

式中: $\phi(\nu, \dot{\nu}_v, \eta) \in \mathbb{R}^{6 \times m}$ 为已知函数矩阵, $\theta \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 为未知参数向量, 其中 m 为未知参数数量.

则

$$\dot{z}_2 = M^{-1}(\tau - \Delta f - \phi(\nu, \dot{\nu}_v, \eta)\theta). \quad (25)$$

Step 2 在这一步中将推导出控制律. 考虑如下的Lyapunov函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^T M z_2. \quad (26)$$

对上式求导得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2^T M \dot{z}_2 = -z_1^T K_1 z_1 + z_2^T J^T(\eta)z_1 + z_2^T (\tau - \Delta f - \phi\theta). \quad (27)$$

为使 $\dot{V}_2 \leq 0$, 取系统的控制输入为

$$\tau = -J^T(\eta)z_1 - K_2z_2 + \phi\hat{\theta} + \Delta\hat{f}, \quad (28)$$

式中 $K_2 = \text{diag}\{k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{25}, k_{26}\} > 0$ 为控制参数矩阵。

各推进器的输出推力为

$$u = B^+\tau, \quad (29)$$

式中 B^+ 为推力分配矩阵 B 的伪逆。

将式(28)代入式(27)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -z_1^T K_1 z_1 - z_2^T K_2 z_2 + z_2^T \phi(\hat{\theta} - \theta) + \\ & z_2^T (\Delta\hat{f} - \Delta f). \end{aligned} \quad (30)$$

定义参数及干扰估计误差向量为

$$\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta, \quad (31)$$

$$\Delta\tilde{f} = \Delta\hat{f} - \Delta f, \quad (32)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -z_1^T K_1 z_1 - z_2^T K_2 z_2 + z_2^T \phi\tilde{\theta} + z_2^T \Delta\tilde{f}. \end{aligned} \quad (33)$$

假设4 系统参数与外界干扰为常值或慢时变的, 即

$$\dot{\theta} = 0, \quad (34)$$

$$\Delta\dot{f} = 0. \quad (35)$$

注2 通常由于作业型ROV的运动速度很慢, 因此式(1)中的附加质量项的变化速度也会很慢。同时, 在深海中受到的干扰主要是海底暗流和脐带缆的拖曳力, 虽然都是时变的, 但变化速度较慢, 从而可以作为稳态干扰进行处理。因此该假设是合理的。

Step 3 这一步用来获得参数及外干扰估计的自适应律。选取如下的Lyapunov函数:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}^T K_3^{-1}\tilde{\theta} + \frac{1}{2}\Delta\tilde{f}^T K_4^{-1}\Delta\tilde{f}, \quad (36)$$

式中: $K_3 = k_3 I_{m \times m} > 0$, $K_4 = k_4 I_{6 \times 6} > 0$ 。

求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & \dot{V}_2 + \tilde{\theta}^T K_3^{-1}\dot{\tilde{\theta}} + \Delta\tilde{f}^T K_4^{-1}\Delta\dot{\tilde{f}} = \\ & -z_1^T K_1 z_1 - z_2^T K_2 z_2 + \tilde{\theta}^T (\phi^T z_2 + \\ & K_3^{-1}\dot{\tilde{\theta}}) + \Delta\tilde{f}^T (z_2 + K_4^{-1}\Delta\dot{\tilde{f}}). \end{aligned} \quad (37)$$

设计如下的自适应律:

$$\dot{\tilde{\theta}} = -K_3 \phi^T z_2, \quad (38)$$

$$\Delta\dot{\tilde{f}} = -K_4 z_2, \quad (39)$$

从而有

$$\dot{V}_3 \leq -z_1^T K_1 z_1 - z_2^T K_2 z_2 \leq 0. \quad (40)$$

由于其仅为半负定, 所以需要求得二阶导数

$$\ddot{V}_3 = -2z_1^T K_1 \dot{z}_1 - 2z_2^T K_2 \dot{z}_2. \quad (41)$$

以上推导可知 \ddot{V}_3 有界, 即 \dot{V}_3 一致连续。根据Barbalat引理^[10], 系统局部渐近稳定, 且

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} z_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\tilde{f} = 0. \quad (42)$$

得到以下定理。定理1对于满足假设1~4的作业型ROV的位置/姿态控制问题, 通过控制律(28)及自适应更新律(38)(39)的作用下, 能够保证系统局部渐近稳定, 且跟踪误差局部渐近收敛至0。

4 模型简化(Model reduction)

由以上分析可知, 使用提出的多变量backstepping设计方法, 可以较好的实现ROV的位置/姿态控制。但是需要同时进行估计的参数较多, 这会使控制器的实现较复杂。对于作业型ROV, 大多数工况下都无须使用位置闭环控制, 而是由经过训练的操作手直接控制ROV在各个方向上推力, 实现速度开环控制, 而位置/姿态闭环控制主要用于机械手作业时的动力定位。此时最关心的被控变量为 x, y, z 和 ψ 。由于作业型ROV具有足够的稳心高(浮心与重心的距离), 从而产生较大的扶正力矩, 所以通常横倾 ϕ 和纵倾 θ 的镇定是通过自身扶正力矩被动控制实现的。为了获得更好的动态稳定性能, 以及减小 ϕ 和 θ 对其它控制变量的影响, 将使用简单的PI控制器对横倾和纵倾进行闭环控制。通过这样的处理方法, 可以最大限度的减少所需要估计的参数数量。由仿真结果可知, 这样的控制器结构在保证理想控制性能的前提下, 大大降低控制器实现的复杂程度。

假设5 为了得到作业型ROV动力定位时的简化模型, 需要做以下假设:

$$x_B = y_B = 0, \quad (43)$$

$$\phi = \theta = p = q = 0. \quad (44)$$

注3 通常将作业型ROV的重心调整至浮心的垂直下方, 因此式(43)成立。由于足够的稳心高, 且使用PI控制器对 ϕ 和 θ 进行闭环控制, 所以即使在较强干扰的情况下, 式(43)(44)仍然近似成立。该假设的合理性在仿真结果中得到了验证。

根据以上假设, 可以将横倾和纵倾运动从六自由度非线性模型中解耦出来, 得到作业型ROV在动力定位时的四自由度非线性模型, 而并不改变系统的全局渐近稳定性和跟踪误差的全局收敛特性。

得到简化的四自由度非线性模型的参数矩阵为

$$M = \text{diag}\{m_v - X_{\dot{u}}, m_v - Y_{\dot{v}}, m_v - Z_{\dot{w}}, I_z - N_{\dot{r}}\}, \quad (45)$$

$$C(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -(m_v - Y_{\dot{v}})v \\ 0 & 0 & 0 & -(m_v - X_{\dot{u}})u \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (m_v - Y_{\dot{v}})v & -(m_v - X_{\dot{u}})u & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (46)$$

$$D(\nu) = -\text{diag}\{X_u + X_{u|u}|u, Y_v + Y_{v|v}|v, Z_w + Z_{w|w}|w, N_r + N_{r|r}|r\}, \quad (47)$$

$$g(\eta) = [0 \ 0 \ -(W - B) \ 0]^T. \quad (48)$$

位置转换矩阵简化为

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (49)$$

由式(24)可知

$$\phi(\nu, \dot{\nu}, \eta) = \begin{bmatrix} \dot{u}_v & -vr & -u & -|u|u & 0 & 0 \\ ur & \dot{v}_v & 0 & 0 & -v & -|v|v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -uv & uv & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dot{w}_v & -w & -|w|w & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{r}_v - r & -|r|r \end{bmatrix}, \quad (50)$$

$$\hat{\theta} = [m_v - X_{\dot{u}} \ m_v - Y_{\dot{v}} \ X_u \ X_{u|u} \ Y_v \ Y_{v|v} \ m_v - Z_{\dot{w}} \ Z_w \ Z_{w|w} \ W - B \ I_z - N_{\dot{r}} \ N_r \ N_{r|r}]^T, \quad (51)$$

$$\Delta \hat{f} = [\Delta \hat{f}_u \ \Delta \hat{f}_v \ \Delta \hat{f}_w \ \Delta \hat{f}_p \ \Delta \hat{f}_q \ \Delta \hat{f}_r]^T. \quad (52)$$

在仿真研究中将以此简化的系统模型设计多变量backstepping鲁棒控制器, 而用六自由度非线性模型建立仿真模型。

5 仿真研究(Simulation study)

为了验证算法的有效性, 以浙江大学正在研制的海王号深海运动试验平台为仿真对象, 进行仿真研究. 其外形结构如图1所示. 试验平台的主要参数见表1.

表1中 $\tau_{(\cdot)\max}$ 为该方向上推进器中所能提供的最大推力或扭矩. 由于液压驱动螺旋桨的响应速度远远小于ROV的时间常数, 因此忽略推进器的动态过程, 并且忽略推力分配环节. 选择控制参数为 $K_1 = 2I_{4 \times 4}$, $K_2 = 600I_{4 \times 4}$, 自适应参数 $K_3 = 5I_{4 \times 4}$, $K_4 =$

$400I_{4 \times 4}$, 参数估计的初始值为表1中相关参数的70%, 外干扰的估计初始值为0. 纵倾 ϕ 和横倾 θ 采用比PI控制, 参数为 $K_p = 1000I_{2 \times 2}$, $K_i = 1000I_{2 \times 2}$, 初始状态 $\eta_0 = \nu_0 = 0$, 指令信号 $\eta_d = [2 \text{ m} \ 2 \text{ m} \ 1 \text{ m} \ 0 \ 0 \ 0.3 \text{ rad}]^T$. 对于阶跃指令信号, 由于在0时刻 $\dot{\eta}_d$ 不存在, 同时为了改进跟踪性能, 必须增加前置滤波器 K_r 对指令信号进行滤波处理. 选择前置滤波器为

$$K_r = \frac{1}{4s + 1} I_{6 \times 6}. \quad (53)$$

表 1 海王号深海运动试验平台模型参数

Table 1 Model parameters of SEAKING deep-sea motion control test platform

参数	值	参数	值
m_v	2500 kg	K_p	-9810 kg · m ² /(s · rad)
W	24525 N	M_q	-19620 kg · m ² /(s · rad)
B	25020 N	N_r	-7848 kg · m ² /(s · rad)
z_B	-0.493 m	$X_{u u}$	-952 kg/m
I_x	440 kg · m ²	$Y_{v v}$	-1364 kg/m
I_y	1300 kg · m ²	$Z_{w w}$	-3561 kg/m
I_z	1250 kg · m ²	$K_{p p}$	-890 kg · m ² /rad ²
$X_{\dot{u}}$	-2140 kg	$M_{q q}$	-1876 kg · m ² /rad ²
$Y_{\dot{v}}$	-1636 kg	$N_{r r}$	-773 kg · m ² /rad ²
$Z_{\dot{w}}$	-3000 kg	$\tau_{u \max}$	7564 N
$K_{\dot{p}}$	-1664 kg · m ²	$\tau_{v \max}$	7564 N
$M_{\dot{q}}$	-4947 kg · m ²	$\tau_{w \max}$	1962 N
$N_{\dot{r}}$	-1524 kg · m ²	$\tau_p \max$	1960 N · m
X_u	-3610 kg/s	$\tau_q \max$	1470 N · m
Y_v	-3610 kg/s	$\tau_r \max$	9810 N · m
Z_w	-11772 kg/s		

为了验证控制算法对外干扰的抑制效果, 假设ROV在50s后受到常值外干扰影响, 六自由度干扰向量为

$$\Delta f = [2000 \text{ N} \ 2000 \text{ N} \ 500 \text{ N} \ 1000 \text{ N} \cdot \text{m} \ 1000 \text{ N} \cdot \text{m} \ 2000 \text{ N} \cdot \text{m}]^T. \quad (54)$$

作为对比, 同时使用PID控制器控制ROV在6个自由度上的位置/姿态. 使用临界比例度法整定PID控制器参数, $K_p = 2200I_{6 \times 6}$, $K_i = 2200I_{6 \times 6}$, $K_d = 528I_{6 \times 6}$.

仿真结果分别如图2、图3所示.

由仿真结果可知, 多变量backstepping控制器的控制品质优于PID控制器, 对外界干扰的抑制效果也要明显好于PID控制器. 虽然可以通过增加PID控制器中的微分项增加系统阻尼, 改善动态响应性能, 但过大的微分往往会放大测量噪声. 而多变量backstepping控制器不需要对测量信号进行微分, 只需要对指令信号求一阶导数和二阶导数, 这是因为算法中的 $\dot{\nu}_v$ 可以由式(22)求得. 因此, 不对测量信号进行微分也是该算法的优点之一.

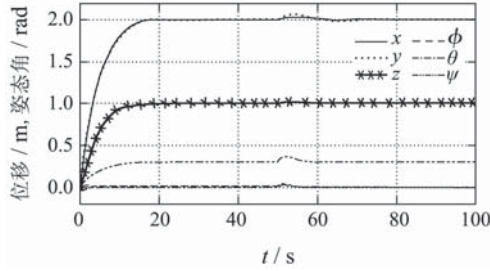


图2 外干扰条件下多变量backstepping控制器控制性能
Fig. 2 Performance of backstepping controller with disturbances

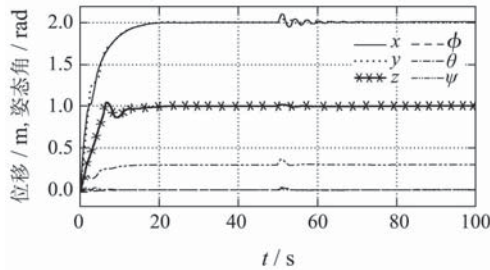


图3 外干扰条件下PID控制器控制性能
Fig. 3 Performance of PID controller with disturbances

为了验证当存在参数不确定时,控制器的控制性能.将系统各参数的值分别增加25%.控制效果如图4、图5所示.

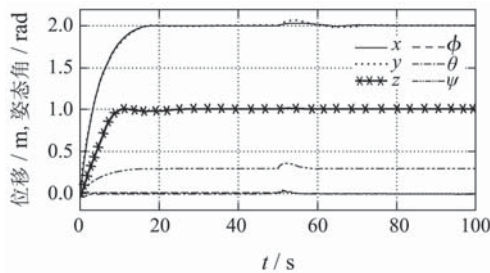


图4 参数不确定及外干扰条件下多变量backstepping控制器控制性能
Fig. 4 Performance of backstepping controller with parameter uncertainties and disturbances

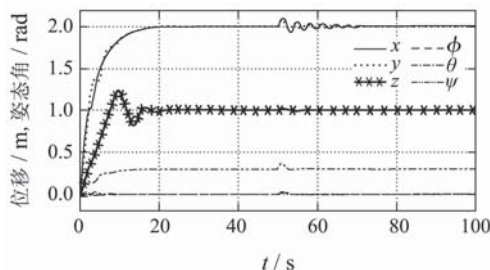


图5 参数不确定及外干扰条件下PID控制器控制性能
Fig. 5 Performance of PID controller with parameter uncertainties and disturbances

对比仿真结果可知,当存在参数不确定时,多变量backstepping控制器的控制性能几乎没有改变,而PID控制器的控制性能则出现了一定的退化.这说明多变量backstepping控制器对系统参数不确定性具有很好的鲁棒性能.

6 结论及今后工作(Conclusion and future work)

针对作业型ROV这种存在复杂外干扰、较强的参数不确定性和多变量非线性耦合的复杂系统的控制问题,基于backstepping控制思想,设计了多变量backstepping鲁棒控制器.通过Lyapunov稳定性理论严格证明了系统的局部渐近稳定性,以及跟踪误差局部渐近收敛至0.为了简化控制器设计,针对作业型ROV在动力定位时的特点,得到了简化的系统模型.仿真结果表明,与经典PID控制器相比,多变量backstepping控制器具有更好的控制品质,对系统参数不确定性和外干扰具有更好的鲁棒性.并且控制器调节参数较少,且不需要复杂的整定过程,因此便于工程实现.本论文给出了多变量backstepping控制器的设计理论和仿真结果,今后将通过在海王号深海运动试验平台上的湖试和海试结果验证其实际使用性能.

参考文献(References):

- [1] DAWE T C, STAKES D S, MCGILL R R, et al. Subsea instrument deployments: methodology and techniques using a work class remotely operated vehicle (ROV)[C] // *Proceedings of the 1998 Oceans Conference*. New York: IEEE, 1998: 1589 – 1593.
- [2] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. (SHI Shengda. *Submarine Maneuverability*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995.)
- [3] YOERGER D R, NEWMAN J B, SLOTINE J. Supervisory control system for the JASON ROV[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1986, 11(3): 392 – 400.
- [4] YOERGER D R, SLOTINE J. Robust trajectory control of underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1985, 10(4): 462 – 470.
- [5] FENG Z, ALLEN R. Reduced order H_∞ control of an autonomous underwater vehicle[J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 15(12): 1511 – 1520.
- [6] KANELLAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V, MORSE A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, 36(11): 1241 – 1253.
- [7] LI J H, LEE P M. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(6): 2165 – 2181.
- [8] 高剑, 赵宁宁, 徐德民, 等. 水下航行器轴向运动的自适应积分反演跟踪控制[J]. *兵工学报*, 2008, 29(3): 374 – 378. (GAO Jian, ZHAO Ningning, XU Demin, et al. Adaptive integral backstepping surge motion tracking control for an underwater vehicle[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(3): 374 – 378.)
- [9] FOSSEN T I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [10] SLOTINE J, LI W P. *Applied Nonlinear Control*[M]. Englewood, Cliffs: Prentice-Hall, 1991.

作者简介:

朱康武 (1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为水下运载器鲁棒控制, E-mail: zjuzkw@zju.edu.cn;

顾临怡 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为液压系统控制、深海装备、水下运载器控制, E-mail: lygu@zju.edu.cn.