

## 具有PID反馈增益的自主水下航行器反步法变深控制

王宏健<sup>1</sup>, 陈子印<sup>1</sup>, 贾鹤鸣<sup>2</sup>, 李娟<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 本文针对海底地形测绘时自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)的变深控制问题, 提出具有PID增益调节的AUV深度控制方法, 基于反馈增益的反步法设计控制器, 避免了采用传统反步法导致控制器中存在虚拟控制量的高阶导数问题; 基于李雅普诺夫稳定性理论设计控制器参数消除了部分非线性项, 得到的控制器的线性部分为状态变量的线性组合, 具有PID控制器参数调节的形式; 针对存在建模不精确、外界干扰和测量噪声时的闭环系统鲁棒性进行分析, 保证了误差系统在扰动作用时的一致最终有界性. 最后通过仿真实验验证了本文设计的控制器的有效性.

**关键词:** 自主水下航行器; 变深控制; 反步法; 反馈增益; 鲁棒分析

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Backstepping method with PID gain tuning in diving control of autonomous underwater vehicle

WANG Hong-jian<sup>1</sup>, CHEN Zi-yin<sup>1</sup>, JIA He-ming<sup>2</sup>, LI Juan<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** To deal with the problem of diving control for an autonomous underwater vehicle (AUV) in oceanographic mapping survey, we propose a depth control method with PID gain tuning function. In designing the controller, the requirement of the higher order derivative of virtual control variable is eliminated by adopting the backstepping method based on the feedback gain instead of the traditional backstepping method. Part of nonlinear terms is removed in the design of controller parameters by using Lyapunov stability theorem, resulting in a linear controller which is composed of state variables with PID gain tuning function. Robustness analysis is performed on the system which is uniformly ultimately bounded in the presence of model uncertainties, external disturbances and measurement noises. Simulation results show the validity and the effectiveness of the proposed controller.

**Key words:** autonomous underwater vehicle(AUV); diving control; backstepping; feedback gain; robustness analysis

### 1 引言(Introduction)

海底地形的勘探和测绘对深海资源的开发具有重要意义<sup>[1]</sup>, 遥控式机器人(remote operated vehicle, ROV)已经成功应用于海上石油钻井平台, 相对于ROV, 自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)由于具有更高的机动性和更长的续航能力, 在海底地形、地貌的测绘和海底资源的勘探中起到重要作用. 随着工作深度的增加、复杂的海洋环境和外界海流的干扰, 对AUV变深控制器的设计提出了更高的要求<sup>[2]</sup>.

目前, 对于AUV的变深控制的研究大多采用基于线性模型的控制方法<sup>[3-6]</sup>, 根据不同的工作点对模型进行线性化处理, 设计一系列的控制器, 仅能保证在工作点邻域内系统的局部稳定性, 同时由于忽略模型不确定性的存在, 因此无法保证系统的全局

渐近稳定性. 由于AUV的数学模型无法精确已知<sup>[7]</sup>, Song等结合模糊理论设计滑模控制器, 基于实验数据对滑模切换规律进行选择, 但系统的控制性能和全局稳定性无法保证<sup>[8]</sup>; 汪伟等利用模糊神经网络对滑模控制器的增益进行在线调整, 由于采用梯度法设计自适应规律, 因此无法保证系统稳定意义下的参数收敛性<sup>[9]</sup>; 文献[10]提出了水下机器人神经网络直接自适应控制方法, 结合Lyapunov稳定性理论证明了系统在存在有界扰动和逼近误差条件下的一致稳定有界; Li等提出了基于神经网络的自适应深度控制方法, 利用神经网络对非线性函数的逼近特性对环境干扰作用和未建模动态进行在线补偿, 但由于采用传统的反步法设计控制器, 导致最终控制器形式中存在虚拟控制量的高阶导数, 使得控制器形式过于复杂<sup>[11-12]</sup>. 以上提出的深度控制器均未讨

论不同初始纵倾角下的深度控制效果,无法满足实际工程中的多工况应用需求。

本文提出基于反馈增益的反步法设计AUV的变深控制器,基于李雅普诺夫稳定性理论,通过控制器参数设计消除了部分非线性项,使得控制器具有PID增益调节的形式,设计的控制器参数易于调节和实现,避免了采用传统反步法设计深度控制器时,由于存在虚拟控制量的高阶导数导致控制器形式更为复杂的情况;针对存在建模不精确时系统的鲁棒性进行了分析,保证了闭环系统的稳定性和鲁棒性。

## 2 AUV垂直面建模(AUV model in diving plane)

忽略AUV横摇运动对垂直面运动的影响,得到简化的垂直面动力学方程,且AUV纵向速度由推力系统单独控制保持在稳定航速 $u_d$ 。

动力学方程:

$$\begin{cases} \dot{w} = \frac{1}{m_w}(m_{uq}uq + d_w), \\ \dot{q} = \frac{1}{m_q}(d_q + \tau_q), \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} m_w = m - Z_{\dot{w}}, m_{uq} = m - Z_{uq}, \\ m_q = I_y - M_{\dot{q}}, \\ d_w = Z_{uw}uw + (W - B)\cos\theta + mz_gq^2, \\ d_q = \\ M_{uw}uw + M_{uq}uq - mz_gwq + \\ (z_gW - z_bB)\sin\theta, \end{cases}$$

这里:  $[w \ q]^T$  为系统状态变量,分别表示AUV的垂直速度和纵倾角速度;  $m$ 和 $m_{(\cdot)}$ 表示AUV质量和附加质量;  $I_y$ 为AUV绕 $y$ 轴的转动惯量;  $Z_{(\cdot)}$ 和 $M_{(\cdot)}$ 均表示AUV的非线性阻尼水动力系数;  $z_g$ 和 $z_b$ 分别为载体坐标下垂直轴上重心和浮心的坐标位置,  $W$ 和 $B$ 分别表示AUV所受的重力和浮力;  $\tau_q$ 作为控制输入表示由AUV舰升降舵产生的纵倾力矩。

运动学方程:

$$\begin{cases} \dot{z} = -u\sin\theta + w\cos\theta, \\ \dot{\theta} = q. \end{cases} \quad (2)$$

假设AUV垂向运动速度 $w$ 相对于纵向速度 $u$ 很小,运动学方程可以简化为

$$\begin{cases} \dot{z} = -u\sin\theta, \\ \dot{\theta} = q, \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $[z \ \theta]^T$  为深度控制系统的输出,分别表示为AUV的下潜深度和纵倾角度。

## 3 控制器设计(Controller design)

控制目标:设计反馈控制器驱动AUV跟踪期望深度 $z_d$ ,并且保证深度跟踪误差渐近趋于零。

**Step 1** 选取Lyapunov函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}z_e^2, \quad (4)$$

其中 $z_e = z_d - z$ ,对式(4)两边求导,将式(3)代入,则上式变为

$$\dot{V}_1 = z_e\dot{z}_e = z_e(\dot{z}_d + u\sin\theta). \quad (5)$$

考虑跟踪深度信号为阶跃变化,所以 $\dot{z}_d = 0$ ,  $\ddot{z}_d = 0$ ,设计纵倾角虚拟控制量 $\alpha_1$ 为

$$\alpha_1 = -c_1z_e, \quad c_1 > 0, \quad (6)$$

则式(5)变为

$$\dot{V}_1 = -c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e^2 + u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e\theta_e, \quad (7)$$

其中:  $\theta_e = \theta - \alpha_1$ ,由于极限 $\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\sin\theta}{\theta} = 1$ 存在,且 $\forall \theta \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 满足 $\exists 0 < \frac{\sin\theta}{\theta} \leq 1$ 成立,所以 $c_1u\frac{\sin\theta}{\theta} > 0$ 成立。

**Step 2** 选取Lyapunov函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}p_1\theta_e^2, \quad (8)$$

其中 $p_1 > 0$ .对上式求导,将式(7)代入整理得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e^2 + u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e\theta_e + p_1\theta_e\dot{\theta}_e = \\ & -c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e^2 + p_1\theta_e(\dot{\theta}_e + \frac{1}{p_1}\frac{\sin\theta}{\theta}uz_e). \end{aligned} \quad (9)$$

由式(6)可得

$$\dot{\theta}_e = \dot{\theta} - \dot{\alpha}_1 = q + c_1u\sin\theta. \quad (10)$$

将上式代入式(9)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e^2 + p_1\theta_e(q + c_1u\sin\theta + \\ & \frac{1}{p_1}\frac{\sin\theta}{\theta}uz_e). \end{aligned}$$

进一步,由 $\theta = \theta_e + \alpha_1$ ,上式变为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e^2 + p_1\theta_e(q + c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}\theta_e + \\ & (\frac{1}{p_1} - c_1^2)\frac{\sin\theta}{\theta}uz_e). \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,由于 $c_1$ 和 $p_1$ 均为控制器待设计参数,因此不妨设计 $p_1 = \frac{1}{c_1^2}$ ,进而消除式(11)中的耦合项得到

$$\dot{V}_2 = -c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e^2 + p_1\theta_e(q + c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}\theta_e). \quad (12)$$

设计纵倾角速度虚拟控制量 $\alpha_2$ 为

$$\alpha_2 = -c_2\theta_e, \quad c_2 > 0, \quad (13)$$

则式(12)变为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1u\frac{\sin\theta}{\theta}z_e^2 - c_2p_1(1 - \frac{c_1u\sin\theta}{c_2\theta})\theta_e^2 + \\ & p_1\theta_eq_e, \end{aligned} \quad (14)$$

其中:  $q_e = q - \alpha_2$ , 设计参数满足  $c_2 > c_1 u$  条件成立, 使得  $1 - \frac{c_1 u \sin \theta}{c_2} > 0$  成立.

**Step 3** 结合式(8)构造Lyapunov函数:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} p_2 q_e^2, \quad (15)$$

其中  $p_2 > 0$ . 对式(16)求导, 将式(15)代入整理得

$$\dot{V}_3 = -c_1 u \frac{\sin \theta}{\theta} z_e^2 - c_2 p_1 \left(1 - \frac{c_1 u \sin \theta}{c_2}\right) \theta_e^2 + p_2 q_e \left[\dot{q} + c_2 (q + c_1 u \sin \theta) + \frac{p_1}{p_2} \theta_e\right]. \quad (16)$$

根据式(1)和式(17), 设计纵倾控制输入为

$$\tau_q = m_q \left[-c_3 q_e - c_2 (q + c_1 u \sin \theta) - \frac{p_1}{p_2} \theta_e\right] - d_q, \quad (17)$$

其中控制器参数  $c_3 > 0$ . 将式(18)代入式(17)得

$$\dot{V}_3 = -c_1 u \frac{\sin \theta}{\theta} z_e^2 - c_2 p_1 \left(1 - \frac{c_1 u \sin \theta}{c_2}\right) \theta_e^2 - c_3 p_2 q_e^2 \leq 0. \quad (18)$$

在满足条件  $\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ , 且设计控制器参数满足  $c_1 > 0$ ,  $c_2 > c_1 u$ ,  $c_3 > 0$ ,  $p_1 = \frac{1}{c_1^2}$ ,  $p_2 > 0$  条件时, 当且仅当  $(z_e, \theta_e, q_e) = (0, 0, 0)$  时,  $\dot{V}_3 = 0$ , 否则  $\dot{V}_3 < 0$ , 表示式(18)设计的控制输入能够使得由式(1)和式(3)构成的系统渐近稳定<sup>[13]</sup>.

进一步将式(18)中的中间变量替换为初始的状态变量得到

$$\tau_q = -k_1 q - k_2 \theta - k_3 z_e - (d_q + m_q c_1 c_2 u \sin \theta), \quad (19)$$

其中:

$$\begin{cases} k_1 = m_q (c_2 + c_3), \\ k_2 = m_q \left(c_2 c_3 + \frac{1}{c_1^2 p_2}\right), \\ k_3 = m_q \left(c_1 c_2 c_3 + \frac{1}{c_1 p_2}\right). \end{cases}$$

由式(20)可以看出, 控制器的形式可以表示为类似于PID控制的简单形式, 前3项为状态变量的线性函数, 仅在最后一项中包含非线性项, 对模型中的已知动态进行补偿, 控制器参数的调节规律可以参考PID控制器的经验进行调节, 控制器结构如图1所示.

为进一步验证本文设计控制器的有效性, 采用传统反步法设计变深控制器<sup>[13]</sup>, 取相应的控制量的误差形式如式(21)–(23), 具体推导过程略.

$$z_e = z_d - z, \quad (20)$$

$$z_2 = \sin \theta - \beta_1, \quad (21)$$

$$z_3 = q - \beta_2, \quad (22)$$

其中:

$$\beta_1 = -k_1 z_e, \quad (23)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\cos \theta} (\dot{\beta}_1 - u z_e - k_2 z_2), \quad (24)$$

其中  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > 0$  为控制器设计增益系数. 最终得到的控制输入为

$$\begin{aligned} \tau_q = & -m_q [(k_1 u + k_2 + k_3) q + (k_1 u + k_2) \cdot \\ & q \tan^2 \theta + (u + k_1 k_2) q z_e \sin \theta \sec^2 \theta + \\ & (u^2 + k_1 k_2 u + k_1 k_3 u + k_2 k_3) \tan \theta + \\ & (k_1 k_2 k_3 + k_3 u) z_e \sec \theta + \sin \theta \cos \theta + \\ & k_1 z_e \cos \theta - d_q]. \end{aligned} \quad (25)$$

由式(20)和式(26)比较可以明显看出, 与传统反步法相比, 本文提出的基于反馈增益的反步法设计的AUV深度控制器的形式更为简单且具有PID增益调节的功能.

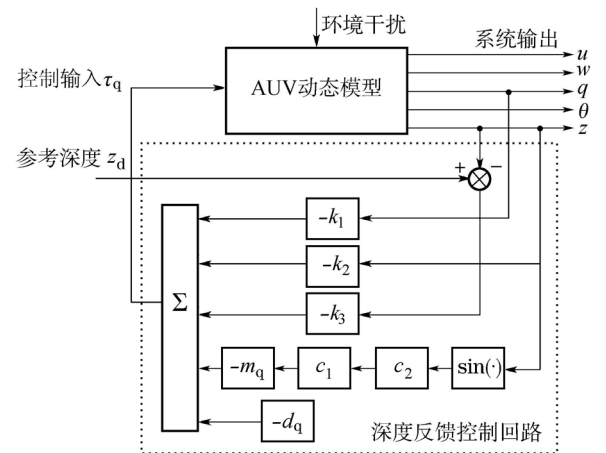


图1 AUV变深控制系统框图

Fig. 1 Structure diagram of AUV diving control system

#### 4 鲁棒性分析(Robustness analysis)

考虑对在控制器设计时忽略了垂向速度  $w$  和建模不精确时系统的鲁棒性进行分析, 保证闭环系统在有界信号输入作用下的稳定性, 采用如下模型对系统进行鲁棒分析:

$$\begin{cases} \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta, \\ \dot{\theta} = q, \\ \dot{q} = \frac{1}{m_q} (d_q + \tau_q) + \Delta_q. \end{cases} \quad (26)$$

对于建模不精确项  $\Delta_q$  假设满足如下边界条件:

$$|\Delta_q| \leq \gamma_\Delta + \gamma_w |w| + \gamma_q |q|, \quad (27)$$

其中:  $\gamma_\Delta > 0$ ,  $\gamma_w > 0$ ,  $\gamma_q > 0$ . 式(28)中  $\gamma_\Delta$  表示扰动作用的上界,  $\gamma_w$  和  $\gamma_q$  分别表示与  $w$  和  $q$  相关参数不确定性.

对于AUV垂向速度  $w$  为有界值, 且满足如下条件:

$$|w| \leq \bar{\gamma}_w + \bar{\gamma}_q |q|, \quad (28)$$

其中:  $\bar{\gamma}_w > 0, \bar{\gamma}_q > 0, \bar{\gamma}_w$ 表示 $w$ 相对于 $q$ 的滞后性,  $\bar{\gamma}_q$ 表示了 $w$ 和 $q$ 之间的比例关系.

对式(16)求导, 代入式(15)和式(27)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -c_1 u \frac{\sin \theta}{\theta} z_e^2 - c_2 p_1 \left(1 - \frac{c_1 u \sin \theta}{c_2 \theta}\right) \theta_e^2 - \\ & c_3 p_2 q_e^2 - z_e w \cos \theta - \frac{1}{c_1} \theta_e w \cos \theta + \\ & p_2 q_e \Delta_q - c_1 c_2 p_2 q_e w \cos \theta. \end{aligned} \quad (29)$$

对式(30)进行不等式放缩得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -d_1 z_e^2 - d_2 \theta_e^2 - d_3 q_e^2 + |w|(|z_e| \cos \theta| + \\ & \frac{1}{c_1} |\theta_e| \cos \theta| + c_1 c_2 p_2 |q_e| \cos \theta|) + \\ & p_2 |q_e| |\Delta_q|, \end{aligned} \quad (30)$$

其中:

$$\begin{aligned} d_1 = & c_1 u \frac{\sin \theta}{\theta}, \\ d_2 = & c_2 p_1 \left(1 - \frac{c_1 u \sin \theta}{c_2 \theta}\right), \quad d_3 = c_3 p_2. \end{aligned}$$

由 $q = q_e + \alpha_2$ 可得

$$|q| \leq |q_e| + c_2 |\theta_e|. \quad (31)$$

将式(28)–(29)和式(32)代入式(31)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -d_1 z_e^2 - d_2 \theta_e^2 - d_3 q_e^2 + l_1 |z_e| + l_2 |\theta_e| + \\ & l_3 |q_e| + n_1 |z_e| |\theta_e| + n_2 |z_e| |q_e| + \\ & n_3 |\theta_e| |q_e| + m_1 |\theta_e|^2 + m_2 |q_e|^2, \end{aligned} \quad (32)$$

其中:

$$\left\{ \begin{aligned} l_1 = & \bar{\gamma}_w |\cos \theta|, \quad l_2 = \frac{1}{c_1} \bar{\gamma}_w |\cos \theta|, \\ l_3 = & p_2 (\gamma_\Delta + \gamma_w \bar{\gamma}_w + c_1 c_2 \bar{\gamma}_w |\cos \theta|), \\ m_1 = & \frac{c_2}{c_1} \bar{\gamma}_q |\cos \theta|, \\ m_2 = & p_2 (\gamma_q + \gamma_w \bar{\gamma}_q + c_1 c_2 \bar{\gamma}_q |\cos \theta|), \\ n_1 = & c_2 \bar{\gamma}_q |\cos \theta|, \quad n_2 = \bar{\gamma}_q |\cos \theta|, \\ n_3 = & \\ & c_2 p_2 (\gamma_q + \gamma_w \bar{\gamma}_q + c_1 c_2 \bar{\gamma}_q |\cos \theta|) + \\ & \frac{1}{c_1} \bar{\gamma}_q |\cos \theta|. \end{aligned} \right. \quad (33)$$

由均值不等式得, 式(33)化为

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -\bar{d}_1 z_e^2 - \bar{d}_2 \theta_e^2 - \bar{d}_3 q_e^2 + l_1 |z_e| + \\ & l_2 |\theta_e| + l_3 |q_e|, \end{aligned} \quad (34)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{d}_1 = & d_1 - \frac{n_1}{2} - \frac{n_2}{2}, \\ \bar{d}_2 = & d_2 - m_1 - \frac{n_1}{2} - \frac{n_3}{2}, \\ \bar{d}_3 = & d_3 - m_2 - \frac{n_2}{2} - \frac{n_3}{2}. \end{aligned} \right. \quad (35)$$

由式(35)可得系统的收敛域为

$$\{(z_e, \theta_e, q_e) \mid |z_e| \leq \frac{l_1}{|\bar{d}_1|}, |\theta_e| \leq \frac{l_2}{|\bar{d}_2|}, |q_e| \leq \frac{l_3}{|\bar{d}_3|}\}. \quad (36)$$

由式(37)可得, 这里定性给出了存在模型不确定性如式(28)假设前提下控制系统的收敛域范围, 由于本文设计的控制器是针对标称模型设计的, 此时未考虑模型参数变化和环境影响, 而实际中AUV模型参数摄动不剧烈, AUV受到海流干扰作用较小, 即当 $\gamma_\Delta, \gamma_w$ 和 $\gamma_q$ 较小时, 总能通过调节控制器参数 $c_1, c_2, c_3, p_1, p_2$ , 保证系统收敛到原点较小邻域, 且收敛域的大小取决于控制器设计参数和对真实模型参数估计的精确程度.

### 5 仿真结果与分析(Simulation results and analysis)

采用MATLAB/Simulink搭建AUV的深度控制仿真系统如图2所示, 仿真实验对象为哈尔滨工程大学实验型AUV, 其外形尺寸为长4.5 m, 宽1.2 m, 高0.6 m, 质量为2535 kg, 采用实测水动力系数建立仿真数学模型. 根据式(20)设计AUV变深控制器, 选择控制器增益参数 $c_1 = 0.08, c_2 = 0.2, c_3 = 20, p_2 = 50$ ; AUV期望速度 $u_d = 1$  m/s. 设计以下3组仿真实验验证控制器性能: 1) 验证本文设计控制器在不同初始条件下的深度控制效果; 2) 存在建模不精确时, 比较本文设计控制器在不同控制器增益参数下的深度控制效果; 3) 存在外界扰动情况下, 对比本文设计的控制器与自适应PID控制器的变深控制效果.

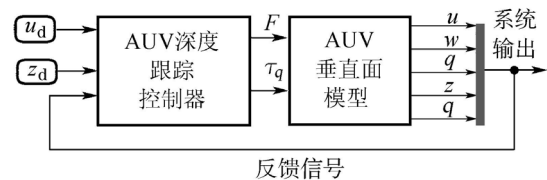


图2 AUV变深控制系统MATLAB/Simulink框图  
Fig. 2 Structure diagram of AUV diving control system in MATLAB/Simulink

#### 5.1 不同初始条件下 AUV 深度控制仿真结果 (Simulation results of AUV depth control with different initial conditions)

图3–6为AUV在不同初始深度和纵倾角条件下的深度响应曲线, 期望深度 $z_d = 15$  m, 从图3可以看出本文设计的非线性控制器能够适应不同的初始条件, 且满足控制指标要求, 同时对环境干扰具有抑制作用, 能够实现精确变深控制, 使得图4中的跟踪误差最终趋近于零; 图5为AUV控制力矩的变化曲

线, 当初始纵倾角较大时会导致控制力矩较长时间陷入饱和区, 产生反向作用控制力矩实现深度跟踪; 图6为AUV状态变量的变化曲线; 从第1组曲线看出垂向速度在变深运动过程中相比纵向速度较小, 在进行控制器设计时可以被忽略.

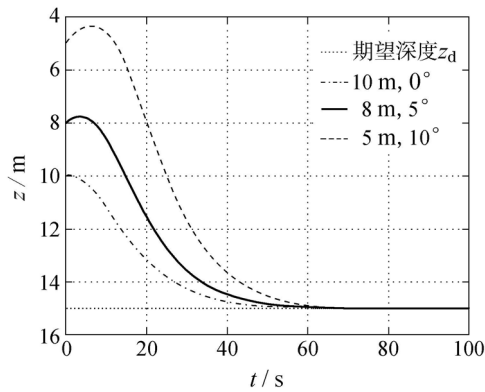


图3 AUV深度控制响应曲线  
Fig. 3 AUV depth control response

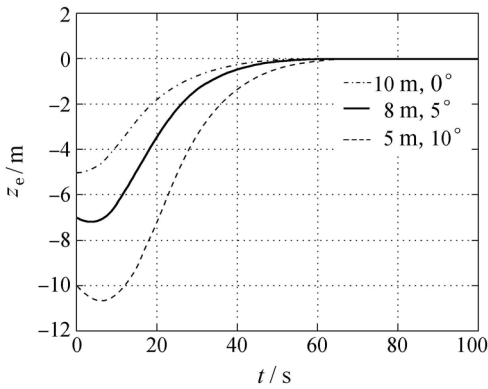


图4 AUV深度控制误差曲线  
Fig. 4 AUV depth control error curve

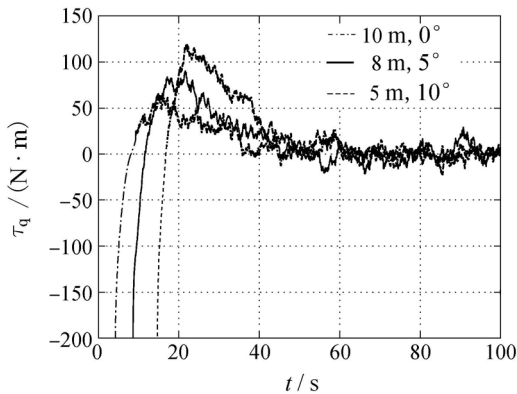


图5 AUV深度控制输入曲线  
Fig. 5 AUV depth control input

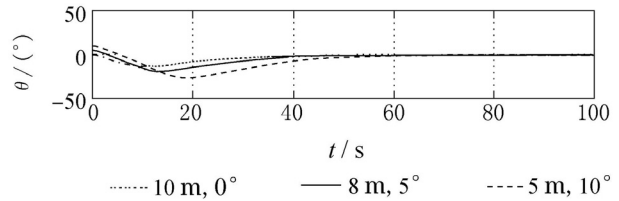
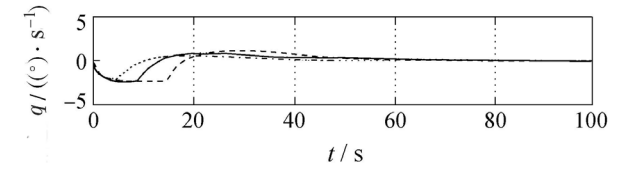
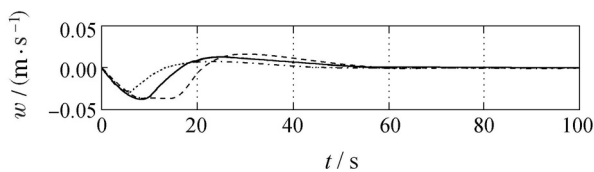


图6 AUV状态响应曲线

Fig. 6 AUV states response curve

### 5.2 不同控制增益下 AUV 深度控制仿真结果

(Simulation results of AUV depth control with different controller gains)

当估计模型参数与真实模型参数之间存在小于10%的参数不确定性时, 对比选择不同控制器增益参数时AUV的深度控制效果, 两组控制器增益参数如表1所示.

表1 AUV深度控制器增益参数

Table 1 Gain parameters of AUV depth controller

控制增益	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$p_2$
1	0.1	0.2	20	100
2	0.05	0.2	20	50

仿真结果如图7所示, 两组增益参数均能保证AUV控制器的深度跟踪性能, 选择第1组控制增益参数时, AUV深度跟踪响应具有一定的超调, 相应的控制力矩输出也具有较大幅值; 第2组控制增益参数使得AUV深度控制响应曲线的稳定时间较长, 但控制输出较平缓, 避免控制器输出过大; 图8为相应控制输入曲线.

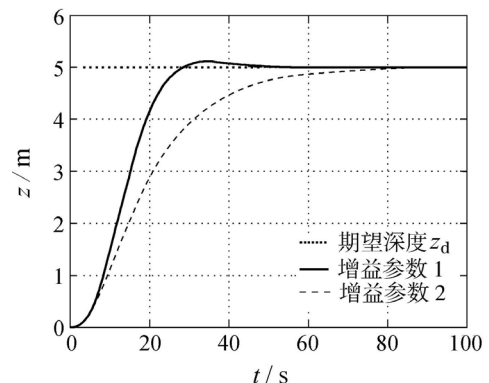


图7 AUV深度控制响应曲线

Fig. 7 AUV depth control response

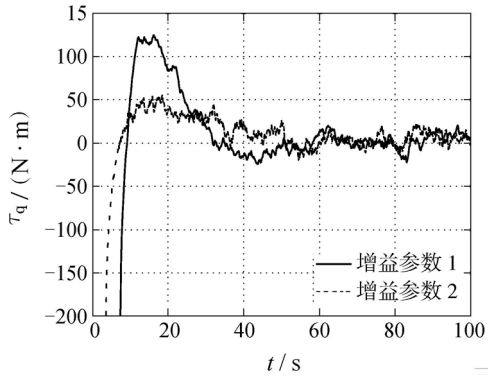


图 8 AUV深度控制输入曲线  
Fig. 8 AUV depth control input

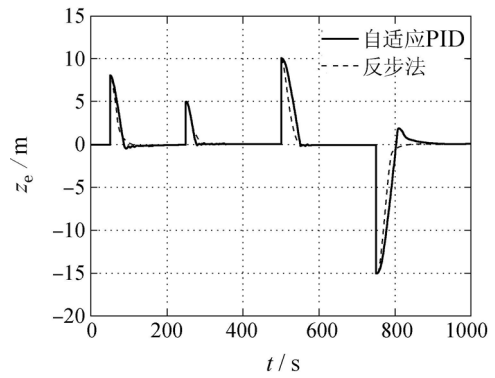


图 10 AUV变深控制误差曲线  
Fig. 10 AUV diving control error curve

### 5.3 AUV变深控制仿真结果(Simulation results of AUV diving control)

仿真初始条件 $[z \ \theta \ q \ w]^T = [2 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。为验证本文设计的控制器在期望深度变化和存在外界干扰时的控制性能,选取参考深度变化为(单位: m):

$$z_d = \begin{cases} 10, & 50 < t \leq 250, \\ 15, & 250 < t \leq 500, \\ 25, & 500 < t \leq 750, \\ 10, & 750 < t \leq 1000. \end{cases} \quad (37)$$

扰动作用项为 $\Delta_q = 2\varepsilon + 10|w| + 10|q|$ , 其中

$$\dot{\varepsilon} + T_E \varepsilon = \omega, \quad (38)$$

式中:  $\omega$ 为高斯白噪声, 时间常数 $T_E = 2$ 。

将本文设计的控制器与自适应PID控制器的变深控制效果进行对比, 仿真结果如图9–12所示, 从图9可以看出, AUV在固定工作点时采用PID控制器能够满足控制指标要求, 但当其受到环境干扰力作用时, 或工作点发生变化时的控制效果较差, 而本文提出的控制器能够实现精确变深控制; 图10为AUV变深控制误差曲线, 本文设计的控制器能够实现稳态误差收敛于零; 图11和图12分别为AUV变深控制输入曲线和AUV状态变量响应曲线。

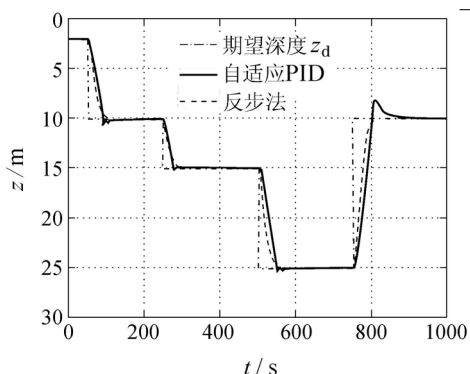


图 9 AUV变深控制响应曲线  
Fig. 9 AUV diving control response

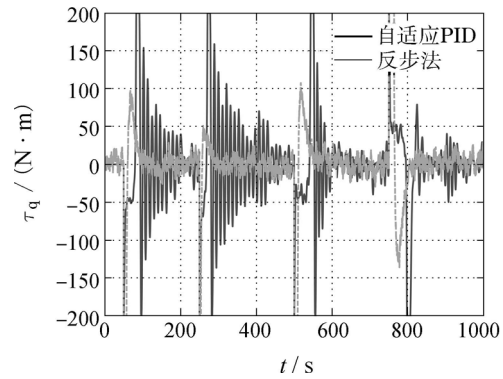


图 11 AUV变深控制输入曲线  
Fig. 11 AUV diving control input

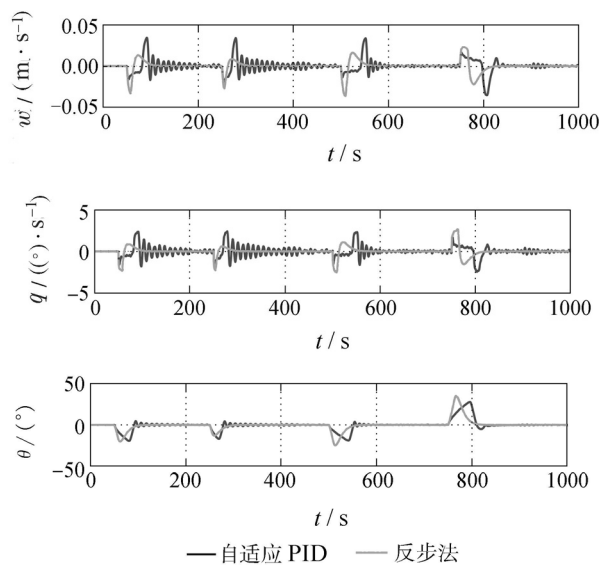


图 12 AUV状态响应曲线  
Fig. 12 AUV states response curve

## 6 结语(Conclusions)

本文采用基于增益反馈的反步法设计AUV变深控制器, 不同于传统反步法通过非线性项抵消获得虚拟控制量, 避免了控制器中含有虚拟控制量的高阶导数的形式, 得到的AUV变深控制器由线性项和非线性项两部分构成, 线性部分为状态变量的线性

组合形式, 类似于PID控制器的形式, 非线性项则在模型中已知的动态部分进行补偿. 控制器的参数调节可以参照PID控制器的调节策略, 符合工程应用; 对存在外界扰动和建模不精确时系统的鲁棒性进行了分析, 保证了深度控制系统的一致最终有界性; 最后, 通过仿真实验验证了控制器的有效性.

### 参考文献(References):

- [1] 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.  
(JIANG Xinsong, FENG Xisheng, WANG Ditang. *Unmanned Underwater Vehicle* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2000.)
- [2] 贾鹤鸣, 程相勤, 张利军. 基于离散滑模预测的欠驱动AUV三维航迹跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1452 – 1458.  
(JIA Heming, CHEN Xiangqin, ZHANG Lijun. Three-dimensional path tracking control for an underactuated AUV based on discrete-time sliding mode prediction [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(10): 1452 – 1458.)
- [3] ROBERTO C, PAPOULIAS O A, ANTHONY J H. Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane [J]. *Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(3): 152 – 160.
- [4] SILVESTRE C, PASCOAL A. Depth control of the INFANTE AUV using gain-scheduled reduced order output feedback [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(7): 883 – 895.
- [5] FENG Z, ALLEN R. Reduced order  $H_\infty$  control of an autonomous underwater vehicle [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 15(3): 1511 – 1520.
- [6] MUKUND N, SAHJENDRA N S. Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins [J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(3): 404 – 416.
- [7] LAPIERRE L. Robust diving control of an AUV [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(1): 92 – 104.
- [8] SONG F J, SAMUEL M S. Design of sliding mode fuzzy controllers for an autonomous underwater vehicle without system model [C] // *Proceedings of the 2000 Oceans MTS/IEEE Conference and Exhibition*. Providence, USA: IEEE, 2000, 2: 835 – 840.
- [9] 汪伟, 边信黔, 王大海. 基AUV深度的模糊神经网络滑模控制 [J]. 机器人, 2003, 25(3): 209 – 214.  
(WANG Wei, BIAN Xinqian, WANG Dahai. Fuzzy neural network sliding-mode control of auto depth for AUV [J]. *Robot*, 2003, 25(3): 209 – 214.)
- [10] 俞建成, 李强, 张艾群. 水下机器人的神经网络自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 9 – 13.  
(YU Jiancheng, LI Qiang, ZHANG Aiqun. Neural network adaptive control for underwater vehicles [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 9 – 13.)
- [11] LI J H, PAN M L. A neural network adaptive controller design for free-pitch-angle diving behavior of an autonomous underwater vehicle [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 52(1): 132 – 147.
- [12] LI J H, PAN M L. A neural network adaptive controller for autonomous diving control of an autonomous underwater vehicle [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2004, 2(3): 374 – 383.
- [13] KHALIL H K. *Nonlinear Systems* [M]. New York: Prentice Hall, 2002.

### 作者简介:

王宏健 (1971–), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为水下机器人智能控制, E-mail: cctime99@163.com;

陈子印 (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为水下机器人控制技术、非线性系统控制理论与应用, E-mail: chenzyin\_heu@163.com;

贾鹤鸣 (1983–), 男, 博士, 目前研究方向为非线性系统控制理论与应用, E-mail: jiaheminglucky99@126.com;

李娟 (1976–), 女, 副教授, 目前研究方向为水下机器人智能控制及计算机仿真, E-mail: lijuan041@163.com.