

AUV 近水面悬浮解耦控制系统设计及仿真

杨永鹏, 赵玉新, 郝燕玲, 杜航原

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)近水面悬浮解耦控制算法。在系统解耦的基础上通过两套独立的执行机构(水舱)分别实现 AUV 近水面悬浮时深度和纵倾角度控制。对海洋环境因素进行干扰力建模,在考虑各种环境干扰力作用的情况下通过仿真测试控制器性能,并与之前的仿真结果进行对比。定性分析海洋环境要素对 AUV 运动控制器性能的影响,讨论在 AUV 控制器设计中考虑环境要素变化的必要性。仿真实验证明,提出的 AUV 悬浮解耦控制器在单纯考虑波浪干扰的情况下能够取得令人满意的控制效果。

关键词: 自主式水下航行器; 悬浮; 解耦控制; 环境因素

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.03.26

Decoupling control system for AUV hovering nearsurface

YANG Yong-peng, ZHAO Yu-xin, HAO Yan-ling, DU Hang-yuan

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A decoupling controller is designed for the hovering autonomous underwater vehicle (AUV). The expected submergence depth and trim angle are respectively achieved by two separate implementing agencies through the designed decoupling algorithm. The environmental disturbances such as the interference caused by the density changing of the sea water is taken into the simulation through the force modeling of them, and the performance of the controller is compared with the results of the simulations in the ideal environment. The affection of the environmental factors to the controller is analyzed qualitatively to discuss the necessity to consider the environmental factors during the designing of the controller for the AUV movements. The simulation results demonstrate the satisfactory performance of the designed controller working in the environment where there is no disturbance or only the wave inference is considered.

Keywords: autonomous underwater vehicle (AUV); hovering; decoupling control; environmental factor

0 引言

自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)在海底地形探察、海底资源探测、深潜救生等实际应用中,常常需要在无航速状态下保持其潜深和姿态。AUV 在航行状态停车后,对其深度和姿态进行控制系统称为悬浮控制系统。由于真实海洋环境是复杂、时变且鲜有规律可循的,且不同维度的 AUV 运动之间存在不同程度的耦合作用,所以 AUV 水下运动是存在高度不确定性和非线性过程。在常规的 AUV 运动控制系统设计过程中,对 AUV 运动建模通常对其运动状态和工作环境进行假设,并忽略运动与周围环境干扰之间的耦合影响,导致在这种模型基础上设计的 AUV 运动控制器在真实的海况中难以获得良好的控制效果,严重的甚至会危及 AUV 自身的安全。

伴随着 AUV 应用需求的增长及世界各国 AUV 数量

的增加,AUV 水下运动控制领域的研究也备受关注,而 AUV 垂直面运动控制的研究更是成为研究的热点。文献[1]最先把自适应滑模控制应用到 AUV 的垂直面运动控制领域,但这种控制方法并未考虑时间最优化和系统鲁棒性之间的矛盾。文献[2]提出了一种滑动模态模糊纵倾控制器,实现了对一系列潜器垂直面纵倾角度的有效控制,然而在未考虑升沉运动与俯仰运动之间耦合的情况下设计的这种控制器在实际应用中难以有令人满意控制效果。文献[3]尝试通过选择适当的模糊隶属函数的收缩和扩张因子来保证 AUV 垂直面运动控制系统的稳定性以及鲁棒性。在设定的海浪环境下,该控制器对系统不确定性表现出良好的适应性。在国内,文献[4]提出了一种 AUV 水下运动联合控制系统,其中垂直面控制系统采用了自主递阶设计思想,该方法能够较为全面地考虑不同维度运动之间的耦合。文献[5]提出了基于神经网络自适应 PID 控

制策略的潜器运动控制器设计方法,但上述两种算法运算复杂,计算量大,造成控制实时性较差。文献[6]等改进了滑动算法,利用改进后的滑动控制器设计 AUV 空间运动控制系统,得到的控制器对 AUV 航行时所受到的各种干扰有较强的抑制作用。文献[7]通过构造 AUV 垂直面运动逆系统模型,设计模型参考逆控制系统来消除近水面波浪对 AUV 垂直面运动的干扰。文献[8]在不对垂直面纵倾角度加以限制的情况下,设计了 AUV 自适应反演控制器,仿真结果表明该方法优于传统比例积分微分 (proportion-integral-derivative, PID) 控制器。

本文在 AUV 六自由度标准运动方程的基础上,针对在深度和纵倾两个维度存在严重耦合的 AUV 水下悬浮运动过程的特点,设计 AUV 近水面悬浮解耦控制系统,将两个维度的运动解耦成两个独立的分系统,通过控制两套独立的 AUV 浮力调整装置和纵倾均衡装置实现 AUV 深度和纵倾姿态的变更和保持。最后,在模拟的真实海况环境中,在考虑海浪作用的基础上,分别在无干扰的理想环境和考虑近水面波浪力以及海水密度随深度变化因素的两种情况下检验所设计的 AUV 近水面悬浮解耦控制系统的工作效果。

1 AUV 悬浮控制器设计

1.1 AUV 悬浮运动建模假定

在 AUV 垂直面运动建模的基础之上,根据潜器悬浮操纵运动的受力特性,对 AUV 悬浮运动建模可作如下基本假定:

(1) AUV 悬浮状态并非相对海底或大地坐标系绝对无航速,而是相对海水静止的无航速运动,因而其固定坐标系的原点是相对于海水无航速的。潜器的空间位置也不予以控制,允许其随海水漂流。

(2) AUV 悬浮运动是移动速度限制于垂直面,转动角速度垂直于垂直面的运动,并且在大多数情况的悬浮艇操纵过程中,潜器的纵倾角度很小,因而其载体坐标系与固定坐标系的转换适用欧拉角度法。

(3) AUV 悬浮操纵时,其垂向潜浮运动是个运动幅度较小且运动速率较低的缓慢运动,这主要是因为其加速度的产生依赖浮力调节水舱以一定速率注水随时间的积分。

(4) 对 AUV 悬浮操纵控制精度作出要求:一般对于悬浮于水下 30~120 m 深度范围的潜器,要求其控制精度为:深度控制误差 $\Delta H < 3$ m;纵倾调节误差 $\Delta\theta < 0.3^\circ$ 。

1.2 AUV 悬浮运动数值模型

在上述建模假定的基础之上,对 AUV 垂直面运动方程进行合理简化就可以得到 AUV 悬浮运动基本数学模型如下式所示

$$\begin{cases} m\dot{w} = \frac{1}{2}\rho L^2 \cdot (Z'_{uw}w^2 + Z'_{w|w}|w| |w|) + \frac{1}{2}\rho L^3 \cdot \\ Z'_{w|q}|w| |q| + \frac{1}{2}\rho L^4 \cdot Z'_{q|q}|q| |q| + Z_d + Z_u \\ I_y \dot{q} = \frac{1}{2}\rho L^3 \cdot (M'_{uw}w^2 + M_{w|w}|w| |w|) + \\ \frac{1}{2}\rho L^4 \cdot M'_{w|q}|w| |q| + \frac{1}{2}\rho L^5 \cdot M'_{q|q}|q| |q| + \\ M_\theta \cdot \theta + M_d + M_u \end{cases} \quad (1)$$

式中, Z_d 、 M_d 分别表示 AUV 在垂直方向上所受到的干扰力和干扰力矩; Z_u 代表浮力调节装置输出的控制浮力; M_u 表示纵倾均衡装置产生的均衡控制力矩。

由式(1)得到 AUV 悬浮控制系统的状态方程描述如下(这里表示为有因次形式)

$$\begin{cases} \dot{w} = \frac{Z_{uw}}{m}w^2 + \frac{Z_{w|w}}{m}|w| |w| + \frac{Z_{w|q}}{m}|w| |q| + \\ \frac{Z_{q|q}}{m}|q| |q| + \frac{Z_d}{m} + \frac{Z_u}{m} \\ \dot{q} = \frac{M_{uw}}{I_y}w^2 + \frac{M_{w|w}}{I_y}|w| |w| + \frac{M_{w|q}}{I_y}|w| |q| + \\ \frac{M_{q|q}}{I_y}|q| |q| + \frac{M_\theta}{I_y} \cdot \theta + \frac{M_d}{I_y} + \frac{M_u}{I_y} \\ \dot{H} = w \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (2)$$

根据某 AUV 相应的实际水力参数为例,代入式(2)中,得到仿真用 AUV 悬浮运动数值模型如下

$$\begin{cases} \dot{w} = 0.00639w^2 - 0.01263w|w| + \\ 1.7894w|q| + 33.208q|q| + \frac{1}{m}(Z_d + Z_u) \\ \dot{q} = 3.2005 \times 10^{-4}w^2 + 208798 \times 10^{-3}w|w| - \\ 0.1144w|q| - 2.8556q|q| - \\ 2.9224 \times 10^{-3} \cdot \theta + \frac{1}{I_y}(M_d + M_u) \\ \dot{H} = w \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (3)$$

1.3 环境干扰力建模

1.3.1 海水密度变化干扰量

不同海域水平海水密度分布以及同一海域不同时间的海水密度分布通常都会存在一定差异。海水密度的变化通常与海水盐度、温度和压力的变化有很直接的关系。由于海水密度的区域性分布不均匀,导致 AUV 在不同海域航行时所受到的浮力存在差异。根据经验,可以总结得到作用到 AUV 上的浮力由于不同海域海水密度差异而产生的变化可以描述为:水下全排水量为 ∇_0 的 AUV 从海水密度为 ρ_0 的海域过渡到密度为 ρ_1 的新海域时,艇体所受的浮力变化量为

$$Z_d = (\rho_1 - \rho_0) \cdot \nabla_0 \quad (4)$$

1.3.2 近水面波浪力建模

AUV 近水面悬浮时,处于航行停车这一弱稳定状态,因而相对其他航行状态 AUV 受到海洋波浪力的作用更加明显。处于近水面状态的 AUV 主要受到一阶波浪力和二阶波浪力的影响。其中一阶波浪力是一种高频周期力,幅值较大,作用于艇体使艇体所受到的压力不对称,即通常所讲的一阶波浪力(矩)。二阶波浪力(波吸力)同一阶波浪力相比,幅值较小,周期很长,且随潜深呈指数平方衰减,并且实践经验表明当潜深 H 与艇长 L 的比值 $H/L \geq 0.6$ 时,可

以不考虑二阶波浪力的影响^[9-10]。AUV 悬浮作业时的工作潜深一般都满足上述深度条件,所以本文在研究 AUV 近水面悬浮时,只考虑一阶波浪力的影响,忽略二阶波浪力的作用。另外,有研究^[11-12]表明,水下 AUV 的垂向运动几乎不受短波海浪的影响,而在长峰波海浪中,垂向运动所受到的扰动则极为剧烈。因此本文采用二元长峰波不规则海浪模型

$$\zeta_a(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \zeta_{ai} \cos(\omega_i t + \epsilon_i) \quad (5)$$

式中, ζ_{ai} 为第 i 个单元规则波的幅度; ω_i 为第 i 个单元规则波的角频率; ϵ_i 为第 i 个单元规则波的相位角,是一个 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机数。

实验中选取有义波高 $H_{1/3} = 4$ m 的波浪谱进行波浪模拟,采用等间隔法将该波浪谱离散化^[8],频率间隔设为 $\Delta\omega = 0.01$,波浪频段为 $0 \sim 2.5$ 之间,这样可以得到 250 个频率点 ω_i ,代入式(5)中,得到长峰波随机海浪的模拟结果,如图 1 所示。

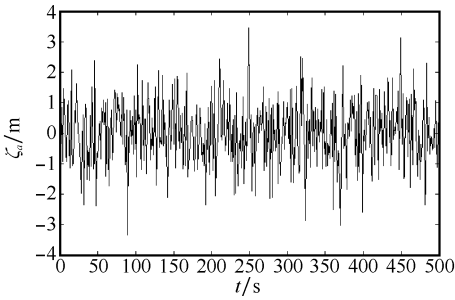


图 1 长峰波随机海浪实时仿真

根据散射传递函数(scattering transfer function, STF)方法^[9],可以近似计算出 AUV 水下航行时所受到的垂向和纵向的波频波浪力和力矩^[7]

$$\begin{cases} \frac{F_3^{(1)}}{\zeta_a} = \rho \int_L (f_3 + h_3) \cdot d\xi + \rho \left(\frac{U}{i\omega}\right) h_3^A \\ \frac{F_5^{(1)}}{\zeta_a} = -\rho \int_L \left[\xi(f_3 + h_3) + \left(\frac{U}{i\omega}\right) h_3 \right] \cdot d\xi - \rho \left(\frac{U}{i\omega}\right) X_A h_3^A \\ f_3 = g e^{-ik_x \cos \beta} \int_{C_x} N_3 e^{-ik_y \sin \beta} e^{kz} dl \\ h_3 = \omega_0 e^{-ik_x \cos \beta} \int_{C_x} (iN_3 - N_2 \sin \beta) e^{-ik_y \sin \beta} e^{kz} \varphi_3 dl \end{cases} \quad (6)$$

式中, $F_3^{(1)}$ 为垂向波频波浪力; $F_5^{(1)}$ 为纵向波频波浪力矩; f_3 是剖面傅汝德-克雷洛夫力函数值; h_3 表示沿艇体纵向各剖面的绕射函数; h_3^A 代表 h_3 在尾剖面处的值,单位为 m^2/s^2 ; ω 代表遭遇圆频率,单位为 rad/s ; ω_0 是波浪圆频率,单位为 rad/s ; ζ_a 表示规则波波幅,单位为 m ; X_A 是 AUV 在尾剖面处的纵坐标值,单位为 m ; N_j 代表剖面轮廓计算点处的方向余弦; dl 是沿横剖浸湿同线 C_x 的弧长积分元,单位为 m ; φ_3 表示具有 C_x 外形的剖面在相应潜深作垂荡时的二维振荡辐射势,单位为 m^2/s 。

1.4 AUV 悬浮状态解耦控制器设计

AUV 悬浮解耦控制系统结构如图 2 所示。

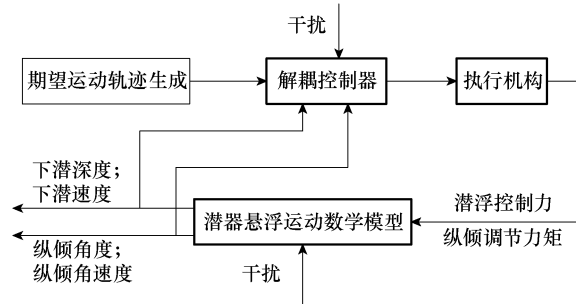


图 2 AUV 悬浮解耦控制系统结构框图

选择相应的系统状态变量 x , 输出变量 y 以及控制输入 u 将式(1)表示的 AUV 悬浮运动模型改写成状态空间形式

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [\omega \ q \ H \ \theta]^T \\ y &= [y_1 \ y_2]^T = [H \ \theta]^T \\ u &= [u_1 \ u_2]^T = [Z_u \ M_u]^T \end{aligned} \quad (7)$$

根据微分几何控制理论,通过输入输出状态反馈线性化的方法实现 AUV 悬浮操纵运动模型在升沉和俯仰两个维度上的完全解耦。为了充分考虑潜器悬浮操纵运动模型存在的不确定性,将其分解成标称部分和不确定部分两部分,则式(1)表示潜器悬浮操纵运动数学模型可以改写成如下的状态方程形式

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \Delta f(x) + g \cdot u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{bmatrix} \frac{Z_{u\omega\omega}\omega^2 + Z_{\omega|\omega|}\omega|\omega| + \frac{Z_{u|q|}\omega|q| + \frac{Z_{q|q|}q|q|}{m}}{m} \\ \frac{M_{u\omega\omega}\omega^2 + \frac{M_{\omega|\omega|}\omega|\omega| + \frac{M_{u|q|}\omega|q| + \frac{M_{q|q|}q|q| + \frac{M_\theta}{I_y} \cdot \theta}{I_y}}{I_y} \\ \omega \\ q \end{bmatrix} \\ \Delta f(x) &= \begin{bmatrix} \Delta f_1(x) \\ \Delta f_2(x) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d/m \\ M_d/I_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 1/m & 0 \\ 0 & 1/I_y \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$u = \begin{bmatrix} Z_u \\ M_u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad y = [H \ \theta]$$

首先不考虑 AUV 悬浮运动模型的不确定干扰项 $\Delta f(x)$, 得到运动模型标称部分的状态方程表达^[10]

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g \cdot u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (9)$$

根据微分几何方法^[13-14],计算上述标称系统的相对阶,

可得

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_j^1 h_1(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_j^1 h_1(\mathbf{x}) \\ L_{g_1} L_j^2 h_2(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_j^2 h_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/m & 0 \\ 0 & 1/I_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

因为系统输出矩阵 $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ 在定义域内非奇异,因此可以通过系统输出 $\mathbf{y}=[H, \theta]^T$ 进行连续微分,至有显式的系统输入 \mathbf{u} 出现为止的方式,实现该标称系统完全的解耦和输入-输出状态线性化^[15-16]

$$\ddot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \ddot{H} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_j^2 h_1(\mathbf{x}) \\ L_j^2 h_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{g_1} L_j^1 h_1(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_j^1 h_1(\mathbf{x}) \\ L_{g_1} L_j^2 h_2(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_j^2 h_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u} \quad (11)$$

将系统的状态方程式(8)中各向量的具体表达代入式(11)可得

$$\ddot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \ddot{H} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{ww}}{m} \omega^2 + \frac{Z_{w|w|}}{m} \omega |\omega| + \frac{Z_{w|q|}}{m} \omega |q| + \frac{Z_{q|q|}}{m} q |q| \\ \frac{M_{\omega\omega}}{I_y} \omega^2 + \frac{M_{w|w|}}{I_y} \omega |\omega| + \frac{M_{w|q|}}{I_y} \omega |q| + \frac{M_{q|q|}}{I_y} q |q| + \frac{M_\theta}{I_y} \cdot \theta \end{bmatrix} + \mathbf{A}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u} \quad (12)$$

在式(11)中,定义 $\begin{bmatrix} L_j^2 h_1(\mathbf{x}) \\ L_j^2 h_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \mathbf{B}(\mathbf{x})$,则可得到,对于标称系统而言,选择系统的控制输入 \mathbf{u} 为

$$\mathbf{u} = [\mathbf{A}(\mathbf{x})]^{-1} \cdot (-\mathbf{B}(\mathbf{x}) + \mathbf{v}) \quad (13)$$

式中, $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$ 为待定的等价控制输入,则原系统在非线性控制规律 \mathbf{u} 作用下,可以变换为

$$\ddot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{H} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据 AUV 悬浮运动时对其性能指标的要求,设计期望输出为

$$\mathbf{y}_r = \begin{bmatrix} y_{r1} \\ y_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (15)$$

系统的跟踪误差向量为

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{21} \\ e_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - y_{r1} \\ y_1^{(1)} - y_{r1}^{(1)} \\ y_2 - y_{r2} \\ y_2^{(1)} - y_{r2}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

于是解耦后得到的线性系统可以表示为如下的误差动态方程形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{e} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{v} \\ \mathbf{y}_e = \mathbf{C} \cdot \mathbf{e} \end{cases} \quad (17)$$

式中, \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 分别为相应的 Brunovsky 矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

系统输出为 $\mathbf{y}_e = \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{21} \end{bmatrix}$,由于系统误差动态方程 (\mathbf{A}, \mathbf{B})

能控,则存在如下系统反馈阵使得矩阵 $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$ 的特征根均为负实部^[17]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

为了使系统的输出跟踪误差呈指数收敛状态,保证闭环系统的状态稳定,构造如下的控制信号 \mathbf{v}

$$\mathbf{v} = \mathbf{Y}_d - \mathbf{K} \cdot \mathbf{e} = \begin{bmatrix} y_{r1}^{(2)} \\ y_{r2}^{(2)} \end{bmatrix} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{e} \quad (20)$$

最后将 \mathbf{v} 代入式 $\mathbf{u} = [\mathbf{A}(\mathbf{x})]^{-1} \cdot (-\mathbf{B}(\mathbf{x}) + \mathbf{v})$,得到悬浮解耦系统的实际控制输入 \mathbf{u} 。则 AUV 悬浮操纵运动模型在控制规律 \mathbf{u} 的作用下,可以解耦为如下式所示的深度控制子系统和纵倾姿态控制子系统的形式

$$\begin{cases} \ddot{H} = \ddot{H}_r - k_{11} \cdot (H - H_r) - k_{12} \cdot (\dot{H} - \dot{H}_r) + Z_d/m \\ \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_r - k_{21} \cdot (\theta - \theta_r) - k_{22} \cdot (\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) + M_d/I_y \end{cases} \quad (21)$$

令 $e_H = H - H_r$, $e_\theta = \theta - \theta_r$,则式(21)可表示为误差方程形式

$$\begin{cases} \ddot{e}_H + k_{12} \cdot \dot{e}_H + k_{11} \cdot e_H - Z_d/m = 0 \\ \ddot{e}_\theta + k_{22} \cdot \dot{e}_\theta + k_{21} \cdot e_\theta - M_d/I_y = 0 \end{cases} \quad (22)$$

2 仿真实验设计及结果分析

2.1 仿真实验设计

2.1.1 AUV 初始状态及控制目标设计

设定 AUV 在进行悬浮之前的初始航速为 6 kn,初始深度为 30 m,初始纵倾为 0° ,下达悬浮命令,指令深度为 33 m,指令纵倾为 8° 。分别在理想环境(无限深广静水中)和模拟真实海况(考虑海浪以及海水密度变化)两种情况下进行悬浮实验。

2.1.2 干扰力模拟

在模拟海况中近水面波浪力的计算基于 1.2.2 节中近水面波浪建模工作,将得的单位波幅作用下垂荡波浪力和纵摇波频波浪力矩,代入不规则海浪作用下 AUV 所受一

阶波浪力和力矩的计算式(23)中,可以得到 5 级海况,有义波高 $H_{1/3}=4\text{ m}$ 时,AUV 在水下 30 m 处悬浮运动时所受到的干扰力和干扰力矩

$$\begin{cases} F_w(t) = \sum_{i=1}^N (F_3^{(1)} / \zeta_a) \cdot \sqrt{2 \int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} S(\omega) d\omega} \cos(\omega_i t - \epsilon_i) \\ M_w(t) = \sum_{i=1}^N (F_5^{(1)} / \zeta_a) \cdot \sqrt{2 \int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} S(\omega) d\omega} \cos(\omega_i t - \epsilon_i) \end{cases} \quad (23)$$

海水密度数据取自海洋环境数据库中北纬 43.2° ,东经 123.0° ,8 月份海水密度统计数据,并利用 spline 插值算法进行插值,然后应用到海水密度变化干扰力模型中。

2.2 实验结果

仿真试验在仿真软件 Simulink 中进行,根据系统输出的收敛状况,设定仿真时间为 400 s,实验结果如下。

2.2.1 理想环境中悬浮控制器控制效果

在未解耦状态下,通过两套独立的执行机构,无论是手动还是通过常规的控制方法控制 AUV 悬浮时,深度控制和纵倾姿态控制会相互干扰,而由图 3、图 4 可以看出理想环境中,在解耦控制器作用下,AUV 在 150 s 左右深度控制和纵倾角度调节分别达到稳态,且基本无稳态误差,说明本文设计的解耦控制器完成了解耦目的,且在深广静水环境下可以很好地完成 AUV 悬浮操纵。

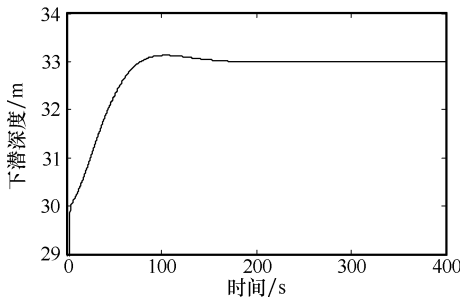


图 3 潜深度 H 响应曲线

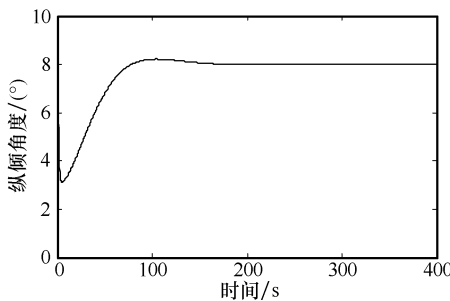


图 4 纵倾姿态角 θ 响应曲线

2.2.2 模拟真实海况中悬浮控制器控制效果

图 5、图 6 代表了 AUV 在近水面环境下,考虑波浪力影响和海水密度变化影响时悬浮控制器的工作表现。对比考虑环境信息变化前后的下潜深度和纵倾角度控制仿真结果可以发现:后者在下潜深度和纵倾角度方面都出现了一定的稳态误差(下潜深度稳态误差 0.3 m,纵倾角度稳态误

差 0.2°),且动态性能变差,出现了频率较高的震荡过程。由图 7、图 8 可知,发现在考虑环境信息的变化后,由执行机构产生的潜浮控制力和纵倾调节力矩的振荡频率非常大,这将严重的损害控制器件的使用寿命,同时水箱的高频率反复注、排水将大大增加 AUV 自身的噪音,影响 AUV 自身的隐蔽性,缩短声纳系统的探测距离。

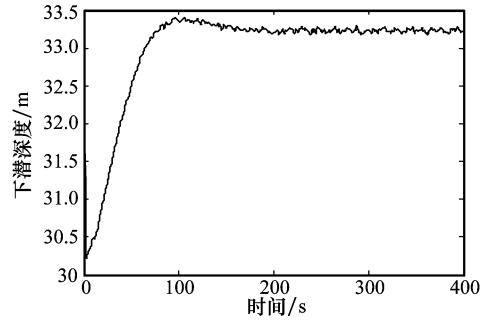


图 5 下潜深度 H 响应曲线

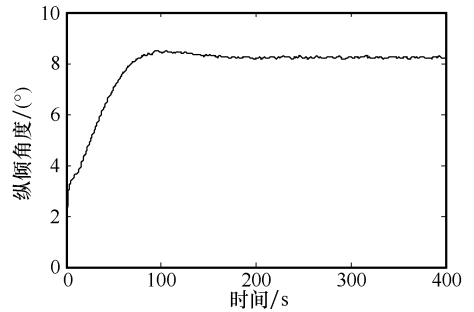


图 6 纵倾姿态角 θ 响应曲线

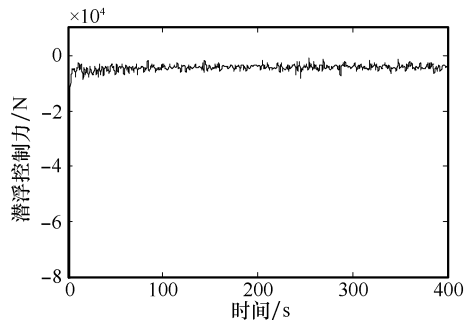


图 7 浮力调节 Z_u 响应曲线

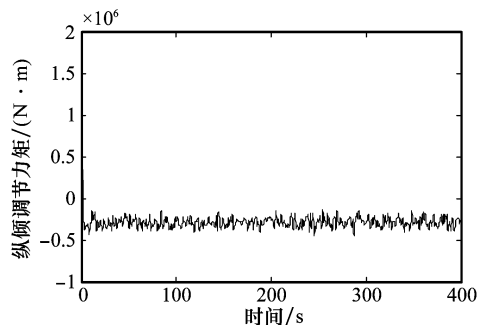


图 8 纵倾调节力矩 M_w 响应曲线

3 结 论

针对 AUV 悬浮过程中两个被控维度之间存在强耦合的状况设计了 AUV 悬浮操纵解耦控制器。仿真实验表明,设计的解耦算法在理想环境下可以很好地实现设计的解耦目的;对影响 AUV 近水面工作的海洋环境因素进行了建模,通过仿真模拟悬浮控制器在近水面波浪力和海水密度变化干扰下的工作表现,定性说明了在 AUV 运动控制器设计中考虑环境干扰因素的必要性。

参考文献:

- [1] Cristi R, Healey A J, Papoulias F A. Dynamic output feedback by robust observer and variable structure control[C]// *Proc. of the American Control Conference*, 1990:2649-2653.
- [2] Song F J, Smith S M. Design of sliding mode fuzzy controllers for an autonomous underwater vehicle without system model[C]// *Proc. of the IEEE Oceans Conference Record*, 2000:835-840.
- [3] Guo J, Chiu F C, Huang C C. Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2003,30(16):2137-2155.
- [4] 牟军,许汉珍. 潜器操纵运动的变结构控制[J]. 华中理工大学学报,1997,25(6):33-36. (Mu J, Xu H Z. Variable structure control for the maneuvering of a submarine[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1997,25(6):33-36.)
- [5] 程启明,万德钧,黄林. 基于神经网络自适应 PID 控制的船舶操纵研究[J]. 电子测量与仪器学报,1998,12(2):32-36. (Cheng Q M, Wan D J, Huang L. The study of ship maneuvering based on neural network adaptive PID control[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 1998,12(2):32-36.)
- [6] 赵国良,季鲁慧,从望. 潜器空间运动的滑模控制[J]. 控制理论与应用,1994,11(3):351-355. (Zhao G L, Ji L H, Cong W. Sliding mode controller for submarines[J]. *Control Theory & Applications*, 1994,11(3):351-355.)
- [7] 齐宵强. 潜器悬浮运动模型及控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008. (Qi X Q. Motion model and control methods of underwater vehicle hovering system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.)
- [8] 刘宇. 基于自适应反演方法的自主水下航行器控制[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(3):638-642. (Liu Y. Autonomous underwater vehicle control based on adaptive backstepping method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011,33(3):638-642.)
- [9] Hu J P, Yu Y X, Zhu L S. Research on wave forces acting on the unit length of a vertical breakwater by tests and a numerical model[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, 18(5):512-519.
- [10] Kim K H, Choi H S. Analysis on the controlled nonlinear motion of a test bed AUV-SNUUV I[J]. *Ocean Engineering*, 2007,34(8-9):1138-1150.
- [11] 王鹤,王文武,孙枫,等. 干扰力作用下潜器近水面运动的仿真[J]. 系统仿真学报,2003,15(1):84-87. (Wang Y, Wang W W, Sun F, et al. Simulation of submarine near-surface motion under disturbance force[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2003,15(1):84-87.)
- [12] Fochesato C, Grilli S, Dias F. Numerical modeling of extreme rogue waves generated by directional energy focusing[J]. *Wave Motion*, 2007,44(5):395-416.
- [13] Liu S K, Papanikolaou A, Zaraphonitis G. Prediction of added resistance of ships in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2011,38(4):641-650.
- [14] 陈勇,董新民,薛建平,等. 舵机动态系统耦合补偿控制分配策略[J]. 仪器仪表学报,2010,31(7):1496-1501. (Chen Y, Dong X M, Xue J P, et al. Coupling compensation control allocation of dynamic actuator system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010,31(7):1496-1501.)
- [15] Isidori A. *Nonlinear control systems*[M]. New York: Springer Press, 1989: 234-281.
- [16] Slotine J J E, Li W. *Applied nonlinear control*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991: 23-48.
- [17] Fu Y, Chai T, Su C Y, et al. Intelligent decoupling control of nonlinear multivariable systems[C]// *Proc. of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, 2007:1350-1355.