

文章编号:1006-2467(2019)09-1084-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.09.010

近水面低速工况下的潜航器深度复合控制

庄 鹏, 冯正平, 毕安元, 郑天海, 潘万钧, 赵 硕

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院; 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 由于低速航行时舵效较低, 潜航器水平控制面产生的升力不足以抵消其在近水面时所受的波吸力扰动, 所以引入压载水机构改进深度控制系统的性能, 从而使其具有过驱动特征. 本文提出了适用于这种过驱动控制系统的复合控制策略, 其中前馈控制器输入为由扰动观测器估计的不平衡力, 输出为压载水质量; 反馈控制器输入为深度偏差, 输出为水平舵偏转角. 水下压载试验结果表明, 扰动观测器可以精确地估计潜航器所受的不平衡力. 水池自航试验结果表明, 基于复合控制策略的潜航器深度控制系统具有较好的控制性能.

关键词: 潜航器; 波吸力; 扰动观测器; 深度控制; 复合控制

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

Depth Composite Control of Low Speed Underwater Vehicle Near Surface

ZHUANG Peng, FENG Zhengping, BI Anyuan
ZHENG Tianhai, PAN Wanjun, ZHAO Shuo

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering; Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Due to low effectiveness of both bow and stern planes at low speeds, the near-surface suction force experienced by an underwater vehicle can hardly be counteracted by lifting forces generated by the control surfaces. To improve the performance of depth control system, therefore, a variable water ballast mechanism is introduced and thus leads to an over-actuated characteristic. A composite control scheme is proposed for such an over-actuated control system. The input of the feedforward controller is the disturbance force, which is estimated by the disturbance observer, and the output of the feedforward controller is the mass of ballast water. Besides, the input of the feedback controller is the depth error and the output of the controller is the deflection angle of control surfaces. The results of underwater tests show that the disturbance observer can accurately estimate the unbalanced force on the underwater vehicle, and the self-propelled water tank tests also show that depth control system of underwater vehicle based on composite control strategy has good control performance.

Key words: underwater vehicle; wave-suction force; disturbance observer; depth control; composite control

收稿日期:2017-12-25

作者简介:庄 鹏(1993-),男,江苏省溧阳市人,硕士生,研究方向为潜航器运动控制.

通信作者:冯正平,男,副教授,电话(Tel.):021-34207984;E-mail:zfeng@sjtu.edu.cn.

在近水面工况下,潜航器会受到较强的波浪扰动力.波浪对潜航器的扰动力主要可以分为两类:一阶波浪力和二阶波浪力.一阶波浪力有高频、高振幅、零均值等特点,所以执行机构无法快速抵消也不必去抵消它的扰动作用^[1-3].二阶波浪力是由多个频率的波的衍射而产生,其中各个单频率波的衍射都会产生一个大小稳定的方向向上的力和一个变化的力^[2, 4-5].因此在遭遇波浪时潜航器主要受到来自于二阶波浪力的作用,并且二阶波浪力在一段时间内可以被看作一个定常的力.为了保证潜航器在任务结束之后能够快速返回水面,因此在空载状态下潜航器的浮力必须大于其本身的重力,这部分合力被称为剩余浮力.二阶波浪力和剩余浮力可以被统称为潜航器受到的不平衡力.低速航行的潜航器通过调节水平舵舵角所能产生的垂直作用力较小,可能无法抵抗这些不平衡力.综上所述,为了抵抗不平衡力,潜航器必须引入可调节水舱、垂向推进器等其他执行机构参与控制,从而使潜航器深度控制系统具有过驱动特征,这样就可利用冗余的控制输入产生的垂向作用力来抵消不平衡力^[6-7].

为了实现自治水下机器人的悬停控制,Tangirala 等^[8]基于变浮力系统,利用比例微分形式的控制算法判定阀门及定量泵的开关即变浮力系统控制算法,从而实现零航速下 AUV 的深度控制.但其仿真和实验结果,可以看出该方法的深度控制精度较低,深度控制效果不明显.Font 等^[6]基于吹排气系统产生压差的基本原理控制压载水舱,即可变压载水系统,在此基础上使用滑动模态控制算法设计了零航速下潜航器的深度控制系统;Chen 等^[9]同样基于可变压载水系统,利用 L1 自适应控制设计了可变压载水系统控制算法,进而实现潜航器的深度控制,他们能够实现较高精度的深度控制效果,但硬件较为复杂并且占用空间较大.

悬停控制旨在实现零航速下的潜航器深度控制,而本文要解决的问题是低航速近水面工况下的潜航器深度控制.为了避免复杂设备引起的空间浪费并且提升潜航器在近水面低航速工况下的深度控制性能,本文在传统反馈控制系统的基础上增加了基于压载水流量开关控制的前馈控制通道,从而形成一个复合控制系统.在复合控制系统中,前馈控制器的输入为潜航器所受的不平衡力,输出为压载水舱质量调节指令;反馈控制器的输入为深度误差,输出为水平舵偏转指令.该方法综合利用水舱设备和水平控制面的控制作用,可以为潜航器深度控制提供冗余的控制输入.

1 问题的提出

在水下运动过程中,由于潜航器自身纵倾恢复力矩的作用较大,其纵倾角始终处于较小的范围之内,所以潜航器的垂荡运动方程可以简化为

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= w \\ (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} &= (Z_w + Z_{w|w|}|\dot{w}|)\dot{w} + \\ &\quad mfg + Z_a\delta_a + Z_f\delta_f + F_w - B_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: z 为深度; w 为垂向速度; g 为重力加速度; $Z_{\dot{w}}$ 为潜航器附加质量力系数; Z_w 和 $Z_{w|w|}$ 为阻尼力系数; δ_f 和 δ_a 分别为艏艉水平舵舵角; Z_f 和 Z_a 分别为前后水平舵升力系数; m 为潜航器质量; m_f 为压载水舱含水质量; B_0 为压载水舱空载时的潜航器剩余浮力; F_w 为波浪扰动力.

基于计算流体力学软件计算得到某潜航器的水动力学系数等模型参数,如表 1 所示,表中 L 为潜航器长度.

表 1 潜航器主要参数
Tab. 1 Parameters of underwater vehicle

参数	取值
m/kg	367.00
$Z_{\dot{w}}/\text{kg}$	-481.60
$Z_w/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	-6.00
$Z_{w w }/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	-396.00
$Z_a/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-32.64
$Z_f/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-41.44
L/m	4

式(1)中的水平舵升力系数可以表示为^[2]

$$\left. \begin{aligned} Z_a &= Z'_a\rho L^2v^2/2 \\ Z_f &= Z'_f\rho L^2v^2/2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Z'_f 和 Z'_a 水平舵的无因次升力系数; ρ 为流体密度; v 为来流速度.

由于在近水面时对潜航器产生影响的波浪力来自二阶波浪力,所以在式(1)中仅考虑二阶波浪力,其数学表达式可近似为^[3, 10]

$$F_w = Z_{so} + Z_zZ_{og} + Z_{\theta}\theta(t) \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} Z_{so} &= \rho \frac{\pi}{2} \int 2S(\omega)\omega^2 e^{-2kh} d\omega \int_{x_s}^{x_b} s(kR, \beta) R(x) dx \\ Z_z &= \rho \pi \int 2S(\omega) \frac{\omega^4}{g} e^{-2kh} d\omega \int_{x_s}^{x_b} s(kR, \beta) R(x) dx \\ Z_{\theta} &= -\rho \pi \int 2S(\omega) \frac{\omega^4}{g} e^{-2kh} d\omega \int_{x_s}^{x_b} s(kR, \beta) R(x) dx \end{aligned}$$

$s(kR, \beta) = I_1(2kR)(4 + \cos^2 \beta) - I_3(2kR)\cos^2 \beta$

其中: $\theta(t)$ 为潜航器纵倾角; Z_{og} 为重心垂向坐标; ω 为波浪角频率; k 为波数; $R(x)$ 为 x 坐标点处潜航器半径; x_s 为潜航器艏端纵向坐标; x_b 为潜航器艏端纵向坐标; β 为相对波浪前进方向; R 为潜航器舭面半径; h 为潜航器载体坐标系与水面之间的距离; I_1 和 I_3 均为第一类虚宗量贝塞尔函数; $S(\omega)$ 为波高能量谱函数.

从式(2)可以看出,前后水平舵升力系数与速度的平方成正比.因此,在低速工况下,潜航器通过调节水平舵舵角能提供的垂向作用力较小.从式(3)可以看出,随着潜航器不断接近水面,潜航器所受的二阶波浪力 F_w 呈指数上升趋势.因此在近水面波浪工况下,单纯依靠水平舵将很难抵抗波吸力.

2 复合控制策略

为了提升潜航器在近水面工况下的深度控制性能,本文在传统反馈控制系统的基础上增加了前馈控制通道,从而形成一个复合控制系统,如图 1 所示.其中前馈控制的输入为潜航器所受不平衡力的观测值,输出为压载水舱开关调节指令.反馈控制部分的输入为深度误差,输出为水平舵偏转指令.图 1 中:压载水舱产生的控制力 $F_c = m_f g$; 不平衡力 $F_d = F_w - B_0$; F 为扰动观测值; df_cmd 为艏水平舵偏转指令信号; da_cmd 为艉水平舵偏转指令信号; df 为艏水平舵偏转角; da 为艉水平舵偏转角.

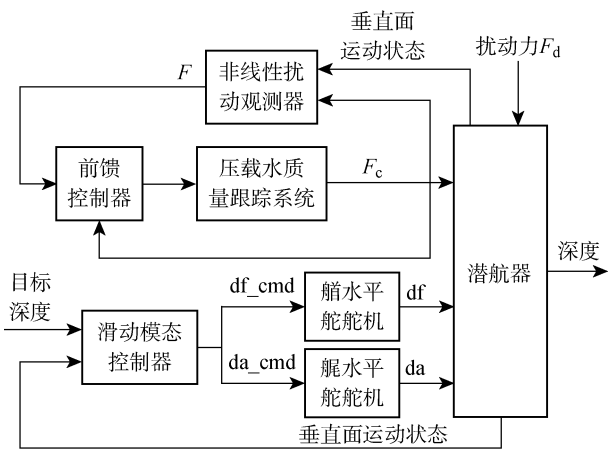


图 1 深度复合控制系统结构图

Fig. 1 Depth composite control system

2.1 基于扰动观测器的变压载水质量控制

2.1.1 扰动观测器设计 前馈控制通道需要输入不平衡力的值,但直接测量潜航器所受的不平衡力比较困难.而在航空和机械领域,为了观测飞行器、机械臂等被控目标受到的外部扰动力,Chen 等^[11]

设计了非线性扰动观测器(NDOB),并对 NDOB 的观测效果进行了理论分析和实验验证. Yang 等^[12]在 Chen 等的工作基础上对 NDOB 做出了简化,并且达到了同样的观测精度.因此本文基于 NDOB 理论设计了以潜航器为对象的扰动观测器,利用该扰动观测器观测出潜航器受到的不平衡力.

分别定义状态变量、控制输入以及模型参数为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} m_f \\ \delta_f \\ \delta_a \end{bmatrix} \\ f(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{(Z_w + Z_{w|w|}|\mathbf{w}|)w}{m - Z_{\dot{w}}} \end{bmatrix} x_2 \\ \mathbf{g}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{g}{m - Z_{\dot{w}}} & \frac{Z_{\delta_f}}{m - Z_{\dot{w}}} & \frac{Z_{\delta_a}}{m - Z_{\dot{w}}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m - Z_{\dot{w}}} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: x_2 为潜航器垂向速度; Z_{δ_f} 为艏舵升力系数; Z_{δ_a} 为艉舵升力系数.

结合式(1),潜航器垂荡数学模型可以描述为^[2, 13]

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1 \mathbf{U} + \mathbf{g}_2 F_d \quad (5)$$

采用文献[11]和[12]的扰动观测器设计方法得到扰动观测器为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= -\mathbf{l}_2 \boldsymbol{\eta} - \mathbf{l}(\mathbf{g}_2 \mathbf{l}_x + f(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1 \mathbf{U}) \\ F &= \boldsymbol{\eta} + \mathbf{l}_x \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{l} = [\mathbf{l}_1 \quad \mathbf{l}_2]$ 为设计的扰动观测器增益参数; $\boldsymbol{\eta}$ 为非线性扰动观测器内部的状态变量.

二阶波浪力是由多个频率的波的衍射而产生,其中各个单频率波的衍射都会对潜航器产生一个大小恒定的向上的作用力和一个缓慢变化的力^[2].因此二阶波浪力在一段时间内可以被视为一个常值型扰动力,同时剩余浮力也是常值力,故潜航器受到的不平衡力有常值特性.令 $\delta = F_r - F$, 其中 F_r 为真实扰动值.根据 Chen^[14]的常值型扰动力观测方法,由式(6)可得

$$\dot{\delta} = -\mathbf{l}_2 \delta \quad (7)$$

$$\delta = \delta_0 e^{\frac{\mathbf{l}_2 t}{m - Z_{\dot{w}}}} \quad (8)$$

式中: δ_0 为初始估计误差; t 为时间.

显然只要选取 $\mathbf{l}_2 > 0$,则扰动观测误差将指数收敛,且收敛速度与 \mathbf{l}_1 无关.因此扰动观测器(式(6))可以写为

$$\dot{\eta} = - \frac{l_2}{m - Z_{\dot{w}}} [(\eta + l_2 \omega) + (Z_w + Z_{w|\omega|} |\omega|) \omega + m_i g + Z_a \delta_a + Z_f \delta_f]$$
$$F = \eta + l_2 \omega$$

(9)

2.1.2 扰动观测器实验验证 由式(1)可见,在静水中航行时潜航器所受的恒定扰动力为剩余浮力,因此静水航行中扰动观测器的估计值应仅为剩余浮力.

首先通过挂载测量潜航器的剩余浮力.如图 2 所示,实验中首先在拉力传感器和潜航器之间用连接绳连接,并保证潜航器处于水平状态.然后在潜航器重心下方位置悬挂重块使潜航器能够浸没在水中,并保证拉力传感器和潜航器之间的连接绳保持紧绷状态.根据重块质量以及拉力传感器读数就可以确定所需平衡压载水质量.通过多次更换重块质量进行多次称重实验,得到多组实验结果求取均值后得到潜航器的剩余浮力约为 18.9 N.

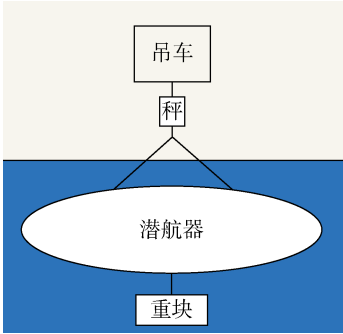


图 2 剩余浮力的测试

Fig. 2 Measurement of extra buoyancy

使用 Simulink 仿真验证扰动观测器观测效果时,设定潜航器初始深度为 2 m,对潜航器动力学模型施加一个大小为 18.9 N,方向向上的恒力,选取扰动观测器增益参数 $l_2=100$.潜航器在舵机和压载水舱停用的状态下原地上浮,即 $\delta_a=\delta_f=0$, $m_f=0$.因此扰动观测器可简化为

$$\dot{\eta} = - \frac{l_2}{m - Z_{\dot{w}}} [(\eta + l_2 \omega) + (Z_w + Z_{w|\omega|} |\omega|) \omega]$$
$$F = \eta + l_2 \omega$$

(10)

在仿真中,扰动观测器模块根据式(10)进行编程处理,得到仿真流程图如图 3 所示.其中: u 为纵向速度; q 为纵倾角速度; r 为偏航角速度; θ 为纵倾角; x 为北向位移; ψ 为艏向角.图 4 所示为扰动观测器观测值在 20 s 后收敛于 18.9 N 处.仿真结果证明了扰动观测器能够较快观测出真实的扰动值.

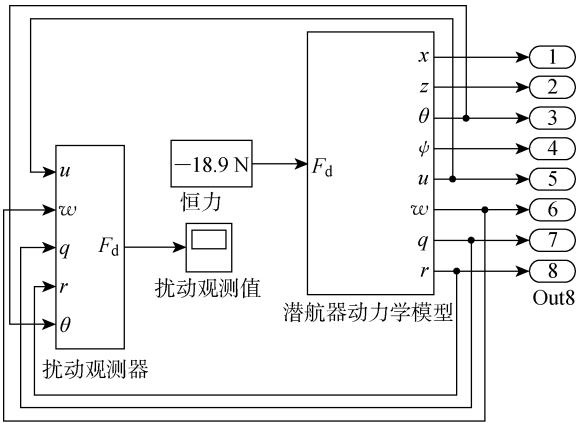


图 3 扰动观测仿真

Fig. 3 Simulation of disturbance observer

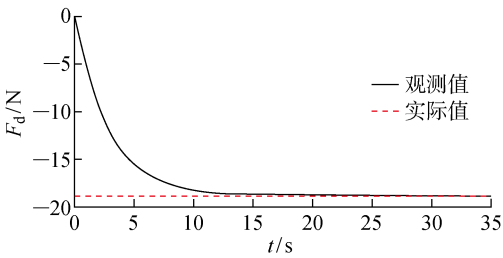


图 4 NDOB 对不平衡力的估计

Fig. 4 NDOB estimation of unbalance forces

在扰动观测器水下在线测试过程中,通过预置压载水舱开关控制程序并使水平控制面处于中位,以实现潜航器从水面潜入水下并保证其不触底、不浮出水面.在此过程中,扰动观测器可以简化为

$$\dot{\eta} = - \frac{l_2}{m - Z_{\dot{w}}} [(\eta + l_2 \omega) + (Z_w + Z_{w|\omega|} |\omega|) \omega + m_i g]$$
$$F = \eta + l_2 \omega$$

(11)

图 5 所示为潜航器在 190 s 后完全浸没至水下,当潜航器完全浸没 25 s 后,扰动在线观测值即收敛于真实值.由此可知,扰动观测器能够准确并快速在线观测出剩余浮力的大小.由于潜航器受到的二阶波浪力和剩余浮力都具有常值特性,所以通过

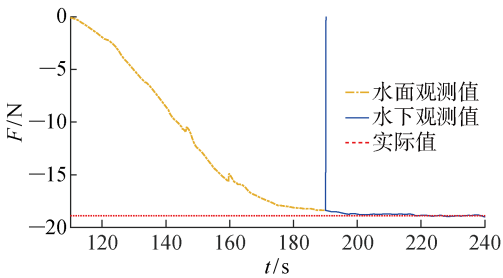


图 5 静水中对剩余浮力的估计

Fig. 5 Estimation of reserve buoyancy in still water

扰动观测器对潜航器剩余浮力的观测效果可以同时验证扰动观测器对不平衡力(二阶波浪力和剩余浮力)的观测效果。

2.1.3 基于质量跟踪控制的前馈控制器 本文利用压载水机构对水舱的水量进行控制,压载水机构是由电磁阀、水泵、流量计、压载水舱、其他附件(如三通和水管)等组成,机构具有 3 种状态,即停止、进水和排水,可调节水舱的目标质量等于扰动观测器的观测值,经过饱和和限制后输入到质量控制系统,调节机构指令控制器根据质量误差产生控制指令,如图 6 所示。图中: M 为设定质量; M_f 为实际质量; Q 为流量计输出流量。基于压载水机构的质量控制系统使得水舱质量不断追踪扰动观测器对不平衡力的观测值,达到抵消不平衡力的作用。

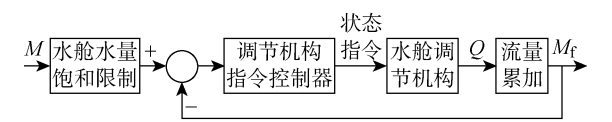


图 6 压载水机构的质量控制系统

Fig. 6 Mass control system based on water ballast mechanism

2.2 基于深度偏差的反馈控制器

滑动模态控制器(SMC)具有鲁棒性好、可靠性高等特点,因此该方法有着较多的应用。本文设计的针对水平控制面的反馈控制器是一个以深度偏差为输入量、水平舵舵角为输出量的 SMC。深度偏差 $e = z - z_d$,其中 z 为当前深度值, z_d 为目标深度值。由于潜航器纵倾恢复力矩较大,艏艉水平舵可以都用于深度控制以充分发挥其控制作用,所以艏艉水平舵采用联动控制策略 $\delta_a = \delta_i = \delta$ 。则根据式(1),

静水下潜航器垂荡方程为

$$(m - Z_{\dot{w}})\ddot{e} = (Z_w + Z_{w|w|}|w|)\dot{e} + (Z_a + F_f)\delta \tag{12}$$

取切换函数为

$$h = \dot{e} + \lambda e \tag{13}$$

式中: $\lambda > 0$ 为指数收敛速度。

采用常值趋近律,并引入边界层以减小抖动现象,取

$$\dot{h} = -k \text{sat}(h), \quad k > 0 \tag{14}$$

式中:饱和函数

$$\text{sat}(h) = \begin{cases} 1, & h > \Delta \\ h/\Delta, & |h| \leq \Delta \\ -1, & h < -\Delta \end{cases}$$

$\Delta > 0$ 为边界层厚度。

由式(13)和(14)可得

$$\ddot{e} + \lambda \dot{e} = -k \text{sat}(h) \tag{15}$$

将式(15)代入式(12)可得

$$\delta = -\frac{1}{Z_a + Z_f} \{ k(m - Z_{\dot{w}}) \text{sat}(\lambda e + w) + [Z_w + Z_{w|w|}|w| + \lambda(m - Z_{\dot{w}})]w \} \tag{16}$$

在仿真时,设定潜航器初始深度为 0.8 m,目标深度为 0.7 m,目标速度为 0.16 m/s,根据式(16)可以得到水平舵偏转指令 δ_i 和 δ_a ,对其进行饱和和限制后,输出至相应舵机。根据式(16)进行编程处理,得到仿真流程模块如图 7(a)所示。其中: dz 为深度偏差; $\Delta b = \Delta s = \delta$ 为滑模控制器输出; $db = \delta b$, $ds = \delta s$ 分别为经饱和限位的艏艉水平舵偏转角; F_x 为纵向推力。通过多组参数选取并仿真后发现,当参数选取为 $k=1.1$ 和 $\lambda=1$ 时,深度收敛速度较为理想。潜航器在低速航行时可以通过水平控制面较好的实现深度控制,如图 7(b)所示。

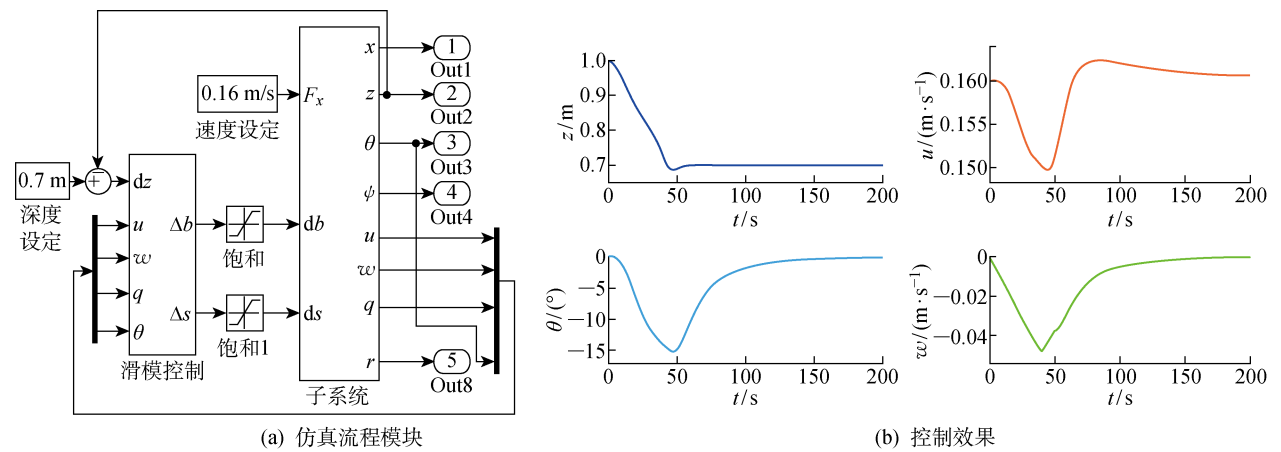


图 7 深度控制 SMC 仿真

Fig. 7 Simulation of depth control based on SMC

3 水池自航试验结果与分析

为了验证该复合控制系统近水面低速工况下的潜航器控制效果,在上海交通大学海洋工程国家重点实验室风浪流深水实验水池静水工况下和二级海况下分别进行了潜航器控制试验.该水池长度为 50 m,宽度为 40 m,平台深度为 10 m.首先利用预设程序使潜航器进行吸排水操作,使潜航器深度达到 0.6~0.7 m 处并保证垂向速度在 0~0.05 m/s 之内.这样的条件被称作触发条件,一旦潜航器达到触发条件,则马上开启推进器并启动深度复合控制系统.在水池试验中目标深度设定为 0.7 m,航行速度

设定为 0.17 m/s,潜航器在水下航行至对岸即自动排水上浮.

图 8 所示为潜航器在静水状态下的控制效果图,从图 8(a)中可以看出,潜航器开启复合控制系统后,深度快速接近预定深度并且上下震荡的误差迅速降至几毫米之内.扰动观测器结合可调节水舱的前馈控制的控制方法得到了验证,该复合控制系统的控制效果也得到了验证.可以看出该方法在静水潜航器深度控制的应用中有着良好的表现.图 9 所示为潜航器在二级海况状态下的控制效果图,从图 9(a)中可以看出,潜航器的深度控制在稳定后也可以达到 3 cm 的控制效果.

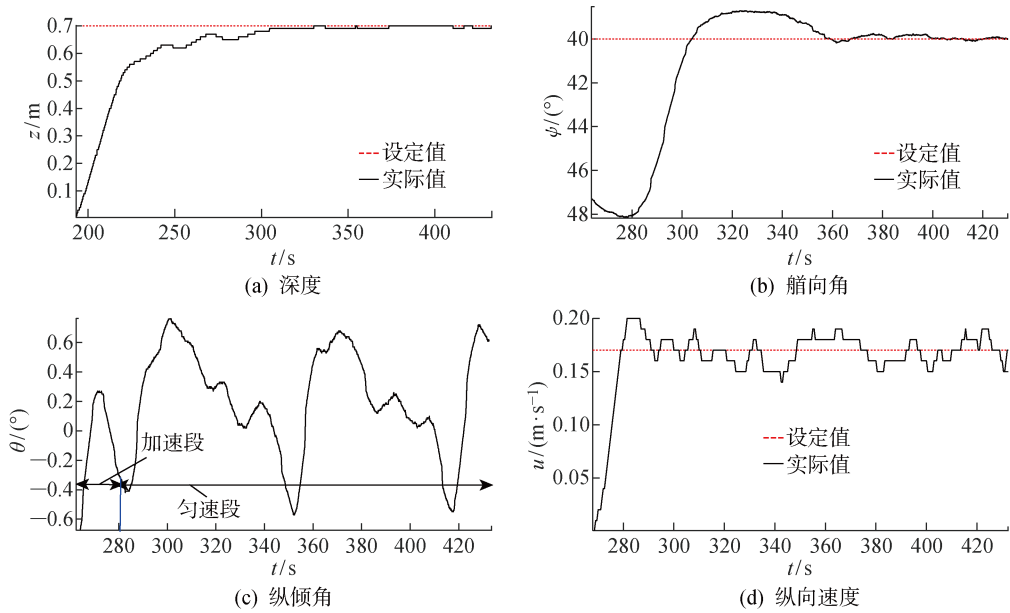


图 8 潜航器在静水中的控制效果

Fig. 8 Control effect of underwater vehicle in still water

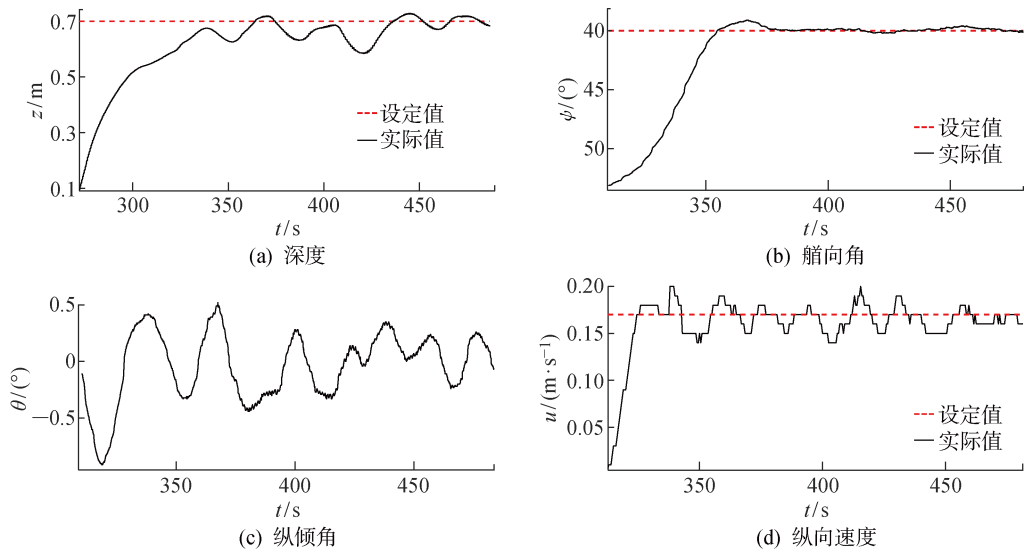


图 9 潜航器在波浪中的控制效果

Fig. 9 Control effect of underwater vehicle in wave

4 结语

针对近水面低速工况下的潜航器深度控制,本文设计了由前馈控制器和反馈控制器相结合的复合控制系统.前馈控制器能够根据扰动观测器的扰动观测值利用水舱调节机构对静不平衡力进行追踪抵消,而反馈控制能够根据深度误差使水平控制面产生前馈控制.

水池自航试验结果表明:复合深度控制系统在静水中低速航行时能够达到无稳态误差;在波浪工况下近水面低速航行时,深度虽然受一阶波浪力影响在一定范围内波动,但其平均值能够保持设定值,说明波吸力已被很好地补偿.

参考文献:

- [1] LICÉAGA-CASTRO E, LICÉAGA-CASTRO J, UGALDE-LOO C E, *et al.* Efficient multivariable submarine depth-control system design [J]. **Ocean Engineering**, 2008, 35(17/18): 1747-1758.
- [2] RENILSON M. Submarine hydrodynamics [M]. New York: Springer, 2015.
- [3] PESSOA J, FONSECA N. Second-order low-frequency drift motions of a floating body calculated by different approximation methods [J]. **Journal of Marine Science and Technology**, 2015, 20(2): 357-372.
- [4] PASKYABI M B, FER I. The influence of surface gravity waves on the injection of turbulence in the upper ocean [J]. **Nonlinear Processes in Geophysics**, 2014, 21(3): 713-733.
- [5] DING X M, LUAN L B, ZHENG C J, *et al.* Influence of the second-order effect of axial load on lateral dynamic response of a pipe pile in saturated soil layer [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 103: 86-94.
- [6] FONT R, GARCÍA-PELÁEZ J. On a submarine hovering system based on blowing and venting of ballast tanks [J]. **Ocean Engineering**, 2013, 72: 441-447.
- [7] ZHOU J Q, CANOVA M, SERRANI A. Non-intrusive reference governors for over-actuated linear systems [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 2017, 62(9): 4734-4740.
- [8] TANGIRALA S, DZIELSKI J. A variable buoyancy control system for a large AUV [J]. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 2007, 32(4): 762-771.
- [9] CHEN Y, WANG G, XU G, *et al.* Hovering control of submarine based on L1 adaptive theory via ballast tanks [J]. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, 2017, 14(4): 1-10.
- [10] 王毓顺. 潜艇近水面空间运动联合控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
WANG Yushun. Research on joint control system design for near-surface submarine [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001.
- [11] CHEN W H, YANG J, GUO L, *et al.* Disturbance-observer-based control and related methods—An overview [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2016, 63(2): 1083-1095.
- [12] YANG J, LI S H, YU X H. Sliding-mode control for systems with mismatched uncertainties via a disturbance observer [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013, 60(1): 160-169.
- [13] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [14] CHEN W H. Disturbance observer based control for nonlinear systems [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2004, 9(4): 706-710.

(本文编辑:黄伟)