

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.015

基于干扰观测器 PID 的水下绞车控制系统*

刘小菲,王素珍*

(青岛理工大学 自动化学院, 山东 青岛 266520)

摘要:针对海洋工况下坐底自升降式水下绞车深度难以实现精确控制的问题,提出了基于干扰观测器 PID 原理的水下绞车定深控制方法。根据水下绞车的机械结构和控制系统硬件组成,设计了基于干扰观测器的 PID 控制系统,并对传感器集成浮球的正弦定深控制和爬坡定深控制进行了 Matlab 仿真分析,以深度偏差平方作为评判标准,分析了常规 PID 和干扰观测器 PID 的控制效果。研究表明,与常规 PID 定深控制相比,基于干扰观测器的 PID 可以观测和抑制外界干扰对系统产生的影响,能够有效提高水下绞车定深控制的准确性。

关键词:水下绞车;干扰观测器;PID 控制

中图分类号:TH39;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0579-06

Control system of underwater winch based on disturbance observer PID

LIU Xiao-fei, WANG Su-zhen

(College of Automation Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China)

Abstract: Aiming at accurate control problem of underwater winch's specified depth in marine conditions, one kind of specified deep control method was presented based on disturbance observer PID principle. According to the mechanical structure and control system hardware components of underwater winch, the disturbance observer based PID control system was designed. Matlab simulation method was used to analyse the sinusoidal motion and climbing motion of sensor integration float. The control effects of the conventional PID control and PID based on disturbance observer were analyzed respectively by the criteria of the depth squared deviations. The results demonstrate that the disturbance observer based PID can be observed and suppress the influence of external disturbance interference, and there are certain advantages with respect to the PID.

Key words: underwater winch; disturbance observer; PID control

0 引言

随着海洋资源和海洋权益越来越受重视,海洋环境监测装备应运而生。水下绞车是一种可以坐落于海底,通过牵引传感器集成浮球上下升降来实现监测海洋剖面环境因素的机电一体化装备^[1]。为准确地测量给定深度范围的海洋剖面环境数据,水下绞车的定深准确控制至关重要。

干扰观测器的 PID 控制是一种将考虑了外部力矩干扰对名义模型输出造成影响的控制策略。H. S. Lee^[2]提出一种低通滤波器 $Q(s)$ 的设计,可以实现的对低频干扰的有效观测。C. J. Kempf 等^[3]采用基于干扰观测器对驱动精密定位工作台的马达进行控制,有效的排除了低频干扰。于哲等^[4]研究了不确定线性多变量系统中干扰观测器的应用,分析了控制系统的稳定性和干扰抑制性能。尹正男^[5]从干扰和噪声最优抑制出发,对干扰观测器的鲁棒性最优进行了

收稿日期:2015-01-13

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2013M541939);中央高校仪器专项资助项目(201362037)。

作者简介:刘小菲(1995-),女,山东郓城人,在读本科生,主要从事自动化控制方面的研究,E-mail:xiaofeiluanyy@126.com

通信联系人:王素珍,女,副教授,硕士生导师,E-mail:Wangsu-zhen 2020@163.com

研究。水下绞车的稳定控制直接影响到整体系统的可靠性,曾志林等^[6]采用滑模控制对水下大负载液压绞车进行研究,取得了好的稳态和动态性能;徐国华等^[7]使用 IC 搭建了水下绞车的控制系统,使得控制系统简单而且提高了系统可靠性;Asper. V 等^[8]设计了一种水下观测平台,研究了水下绞车的控制和通讯。

为提高控制精度和抗干扰能力,本研究采用基于干扰观测器的 PID 对水下绞车进行定深控制。

1 水下绞车物理模型

水下绞车主要由机械系统、控制系统和传感器集成浮球 3 部分组成(如图 1 所示),是典型的机电一体化设备。本研究所设计的水下绞车为一种坐底自升降式海洋剖面环境因素监测设备。该水下绞车的主要功能是通过传感器浮球的牵引,实现传感器浮球定点定深时的上浮下潜,进而通过所携带的传感器测量海洋剖面的环境参数,如海水的电导率、温度、深度等。主要参数如下:

工作深度:200 m 以浅;

排缆方式:双向丝杠同步排缆;

驱动:直流伺服电机(带抱闸);

缆绳:凯夫拉缆($\varphi 3$ mm);

续航:90 天;

收放速度:0.37 m/s。

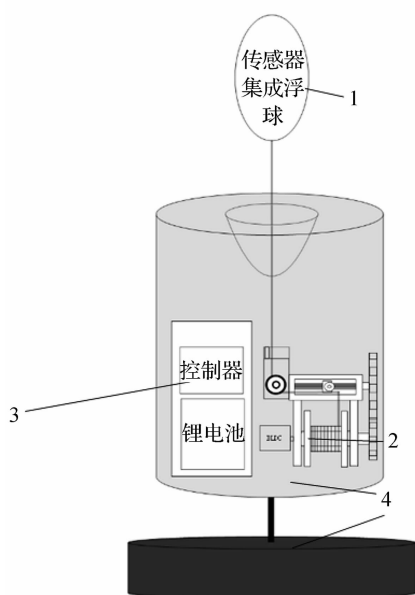


图 1 水下绞车组成

1—传感器集成浮球;2—机械系统;

3—控制系统;4—配重及机架

1.1 机械系统

机械系统是水下绞车运动的主要执行部件。在直流伺服电机的驱动下,滚筒实现正转和反转,完成缆绳的收回和释放动作。滚筒在旋转的同时,通过齿轮传动将转矩传递到排缆机构,实现收放缆绳与规律排缆同步进行。

水下绞车在排缆过程中,最重要的部件是双向丝杠的设计。双向丝杠是在滚珠丝杠和梯形丝杠的基础上演变而来,它由两个等螺距方向相反了梯形槽组成,在丝杠的两侧位置,两个梯形槽通过圆弧过度。通过这样的设计,可以将双向丝杠单向旋转的运动转化为与其配合滑块的往复的运动。理论上,当滚筒收放一圈的凯夫拉缆绳时,滑块恰好移动一个缆绳直径(3 mm)的位移,使得下一圈缆绳的收放与上一圈之间不出现堆叠现象。本研究考虑到凯夫拉缆绳受压后变为扁平状的特性和实际机械约束,设计双向丝杠的导程为 20 mm,每个导程内容纳缆绳 5 排,即滚筒每收放一圈缆绳,排缆机构移动距离为 4 mm。

根据机械约束,本研究所设计滚筒直径为 300 mm,滚筒宽度 360 mm,则一层绳子长度约为 113 m;水下绞车工作深度为 200 m 以浅,忽略缆绳层数滚筒直径的影响,则相对浅深 x :

$$x = \frac{\theta}{360^\circ} \times \pi d \quad (1)$$

式中: θ —绞车旋转角度, d —滚筒直径(300 mm)。

设水下绞车相对浅深 x 与绞车旋转角度 θ 之间的比例系数为 k ,则:

$$x = k\theta \quad (2)$$

通过上述计算可知,若要准确地控制传感器浮球的深度,可以通过准确地控制滚筒所转过的角度后释放的绳长实现。

1.2 控制系统

控制系统的主要功能是对绞车的运行进行定时定深的控制,主要构成如图 2 所示。

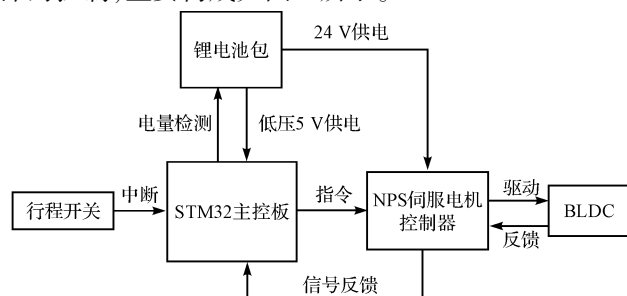


图 2 控制系统

主控板使用 STM32 单片机作为其控制核心,主要进行运算、指令的发送和控制信号采集。主控板经过运算后,计算出传感器集成浮球到达一定深度所需的绳长和该绳长所对应的伺服电机转动的角度,将控制指令发送给 NPS 伺服电机控制器;NPS 伺服电机控制器具有驱动直流无刷伺服电机(BLDC)的功能和检测计算电机旋转角度的功能;在伺服电机的驱动下,滚筒和排绳机构实现缆绳的收放和排列。在控制系统中,放置在绞车顶部的行程开关是用于检测传感器集成浮球是否到达绞车顶部。若传感器集成浮球触碰行程开关,证明已到达绞车顶部指定位置,绞车停止运行;若行程开关未被触碰,证明传感器集成浮球尚未回收完毕,绞车继续回收缆绳,直到浮球到达指定位置。

1.3 传感器集成浮球

传感器集成浮球是水下绞车测量海洋剖面环境参数的主要执行部分,该浮球可以集成 CTD 传感器、叶绿素仪等,主要用于采集海洋剖面环境的电导率、温度、压力、叶绿素等数据。

在采集的过程中,传感器集成浮球主要的受力包括:重力、浮力、牵引力、水阻力、海流力等,海流力主要作用于水平方向,对垂直方向上绳子的牵引力影响较小,即对电机转矩负载影响较小。本研究所设计的传感器集成浮球具有较大的正浮力,可以将缆绳拉紧以抵抗海流力对浮球冲击后产生的偏差,所以在本研究中,忽略海流力对传感器集成浮球的影响。上升过程中,传感器集成浮球受力如下式:

$$\sum_{i=1}^n = 1\rho gV_i = \sum_{i=1}^n m_i g + F_{\text{牵}} + \frac{1}{2}(C_{Df} + C_{Dp})\rho U^2 A \quad (3)$$

式中: ρ —海水密度, V_i —第 i 个部件的排水体积, m_i —第 i 个部件的质量, $F_{\text{牵}}$ —缆绳对浮球的牵引力, C_{Df} —浮球的摩擦阻力系数^[9-10], C_{Dp} —浮球的形状阻力系数^[11], U —浮球的运动速度, A —浮球垂直于运动方向的截面积。

下降过程中,水阻力方向反向,传感器集成浮球受力如下式所示:

$$\sum_{i=1}^n \rho gV_i + \frac{1}{2}(C_{Df} + C_{Dp})\rho U^2 A = \sum_{i=1}^n m_i g + F_{\text{牵}} \quad (4)$$

分析式(1)和式(2)可知:在释放传感器集成浮球的过程中,随着其运动速度的增加,浮球所受的水阻力增大,导致缆绳的牵引力减小。当浮球的上升速度达到绞车缆绳的释放速度时,达到相对的动平衡。

传感器集成浮球速度的变化,直接影响了浮球所受水阻力的变化,进而影响了绞车牵引力,对水下绞车系统形成一种外界干扰;在收回传感器集成浮球的过程中,随着收回速度的增大,浮球所受水阻力增大,绞车的牵引力变大。当绞车的牵引速度达到额定转速后,传感器集成浮球的速度波动会间接的引起绞车牵引力的变化,对直流伺服牵引电机造成外界干扰的输入。

根据以上分析,在海洋环境工况下,水下绞车所牵引的传感器集成浮球速度的波动会间接的影响牵引绞车的牵引力,对直流伺服电机的转矩产生干扰。在控制过程中,若对该干扰不加抑制或补偿,则会影响水下绞车的定深控制精度。

2 基于干扰观测器的 PID

干扰观测器是一种扩展状态观测器,其基本思想是将外界干扰、模型误差、参数摄动等造成的实际对象与名义模型的不同引入相应的补偿,实现对干扰的抑制^[12]。其补偿使用高增益反馈原理,因而能有效地消除内部及外部干扰。对于实际工程上的物理系统,被控对象的传递函数相对阶不为 0,数学模型无法精确获得,C. J. Kempf 等提出在观测干扰后面串入低通滤波器 $Q(s)$,并用名义模型的逆来代替对象传递函数的逆,其基本思想如图 3 所示,虚线框内部分是干扰观测器。

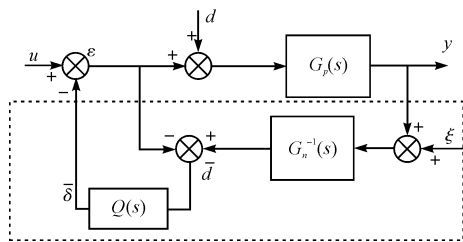


图3 干扰观测器基本思想

$G_p(s)$ —对象的传递函数; $G_n^{-1}(s)$ —名义模型的逆;
 d, u, ξ —输入信号; \hat{d} —观测干扰; $Q(s)$ —低通滤波器

通过 $Q(s)$ 低通滤波器的串入可以实现对低频干扰的有效观测和对高频噪声的有效滤除。在低频段, $Q(s) = 1$,干扰观测器可以使得实际对象的响应与名义模型的响应一致,可实现对低频干扰的有效观测,保证较好的鲁棒性;在高频段, $Q(s) = 0$,干扰观测器对测量噪声不敏感,可实现对高频噪声的有效滤除。

在海洋工况下,传感器集成浮球速度的波动使得其所受的水阻力产生相应变化,水阻力的变化对水下

绞车的力矩造成一种干扰。常规的 PID 由比例单元 P 、积分单元 I 和微分单元 D 组成,没有考虑外界的干扰。本研究在常规 PID 控制器的基础上增加水阻力干扰观测器,将水阻力产生的外部力矩干扰和模型参数变化造成的实际控制对象与名义模型输出的差异,全部等效到输入端,即观测出等效干扰,并在控制中引入等量的补偿,实现对干扰的抑制。

3 模型构建与仿真结果分析

根据 1.1 节所述,水下绞车对于传感器集成浮球的定深控制可以转化为绞车转动的定角度控制。传感器集成浮球速度的变化直接引起水阻力的变化,从而改变了缆绳的牵引力,对绞车造成一种外部干扰。

设所需控制的相对深度即绳子释放长度为 x ,则 x 与驱动电机转角 θ 近似成正比, $x = k\theta$ 。根据基尔霍夫定律、电磁感应定律、牛顿第二定律,建立绞车系统的微分方程:

$$LaJ\ddot{x}(t) + R_a\dot{x} + (R_aD + K_tK_e)\dot{x}(t) = kK_Te_i(t) \quad (5)$$

式中: La —电枢绕组电感,0.55 mH; J —电机与绞车总转动惯量, $J = 0.018 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; R_a —电枢绕组电阻, $R_a = 0.45 \text{ } \Omega$; D —绞车粘性摩擦系数, $D = 0.12$; K_T —绞车力矩系数, $K_T = M_e/T_E$, $K_T = 0.0593 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$; K_e —直流电机反电动势系数, $K_e = 4.25 \text{ v}/\text{Kr} \cdot \text{min}^{-1}$; K —电机转角与绞车定深比例系数, $K = 2.616$ 。

根据拉氏变换微分定理:

$$L\left[\frac{d}{dt}x(t)\right] = sL[X(t)] - x(0)$$

$$L\left[\frac{d^2}{dt^2}x(t)\right] = s^2L[X(t)] - sx(0) - \dot{x}(0)$$

$$L\left[\frac{d^3}{dt^3}x(t)\right] = s^3L[X(t)] - s^2x(0) - s\dot{x}(0) - \ddot{x}(0)$$

在初始条件时, $x(0) = \dot{x}(0) = \ddot{x}(0) = 0$ 。

绞车的传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{x(s)}{E(s)} = \frac{kK_T}{LaJs^3 + RaJs^2 + (R_aD + K_TK_e)s} = \frac{kK_T}{s\{LaJs^2 + R_aJs + (R_aD + K_TK_e)\}} = \frac{15.512}{0.0099s^3 + 0.81s^2 + 5.425s} \quad (6)$$

设 $G_p(s)$ 的名义模型为 $G_n(s)$,则不确定对象的集合可以用乘积摄动来描述,即:

$$G_p(s) = G_n(s)(1 + \Delta(s))$$

式中: $\Delta(s)$ —实际对象频率特性对名义对象模型的摄动,通常情况下,频率增加时,对象的不确定性也增大,因此 $|\Delta(j\omega)|$ 是 ω 的增函数。为说明时间延时的影响,假定 $e^{-\tau T_d}$ 是未建模动态的唯一来源。则:

$$\Delta(s) = e^{-\tau T_d} - 1$$

在仿真中,为体现与实际建模的区别^[13],取系统的名义模型^[14]如下:

$$G_n(s) = \frac{15.512}{0.0102s^3 + 0.85s^2 + 5.850s} \quad (7)$$

建立基于干扰观测器 PID 的水下绞车仿真框图如图 4 所示。

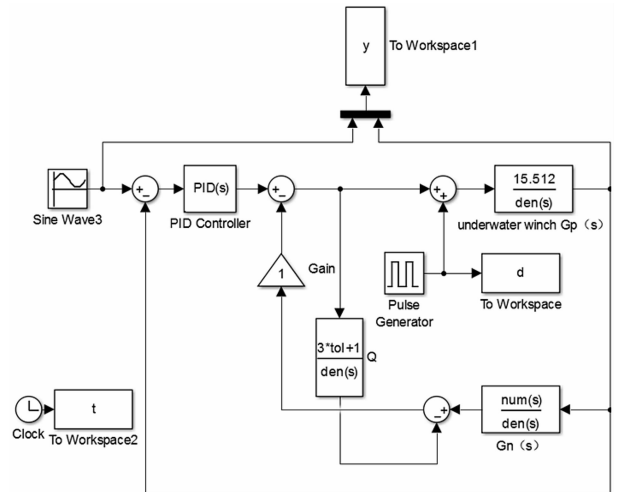


图 4 基于干扰观测器 PID 的控制仿真框图

其中,低通滤波器 $Q(s)$ 的设计非常关键,由 H. S. Lee 提出的 $Q(s)$ 的表达式为:

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^M \alpha_k (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N}$$

式中: $\alpha_k = \frac{N!}{(N-k)!k!}$ 系数, N —分母阶数, M —分子阶数, $N - M$ —相对阶。

$Q(s)$ 的设计需要满足以下条件:

- (1) N 和 M 的选择首先需使得 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 正则,物理可实现^[15-18]。
- (2) 具有通低频阻高频的特性。
- (3) $Q(s)$ 低频滤波器的阶数不应太高。随着 $Q(s)$ 阶数的升高,干扰观测器稳定性变差。
- (4) 合理的取 τ 的值。 τ 越小, $Q(s)$ 的频带越宽,系统抑制外界干扰的能力越强,但对测量噪声的敏感性增大;反之, $Q(s)$ 的频带越窄,干扰观测器对外界干扰抑制减弱。

水下绞车系统传递函数的相对阶为 3,根据以上讨论,本研究采用如下的低通滤波器。

$$Q(s) = \frac{3\tau + 1}{\tau^3 s^3 + 3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1} \quad (8)$$

取 $\tau = 0.001$;

根据上述所建模型,本研究使用 Matlab/Simulink 进行仿真,对水下绞车牵引传感器集成浮球做正弦定深运动和爬坡运动两种情况进行讨论。

当水下绞车牵引传感器集成浮球做正弦定深运动时,采用干扰信号为 $d(t) = 50 \sin(20\pi t)$,仿真结果如图5、图6所示。

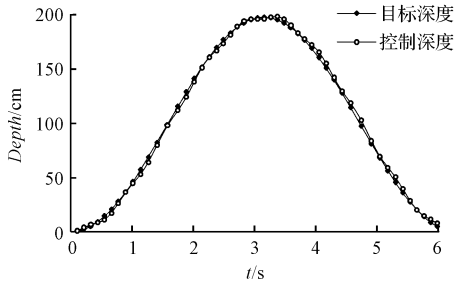


图5 常规PID的浮球正弦式运动定深控制

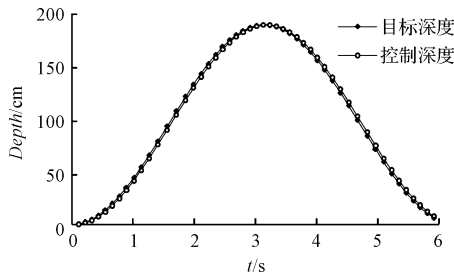


图6 加入干扰观测器PID的浮球正弦式运动定深控制

为分析采取干扰观测器后定深控制的效果,本研究定义为控制值与目标值差的平方,即:

$$\delta = (x_c - x_a)^2 \quad (9)$$

本研究采用仿真过程中前8000组数据作为样本,根据式(9),得到正弦运动中采用干扰观测器PID和常规PID定深控制的偏差平方曲线如图7所示。

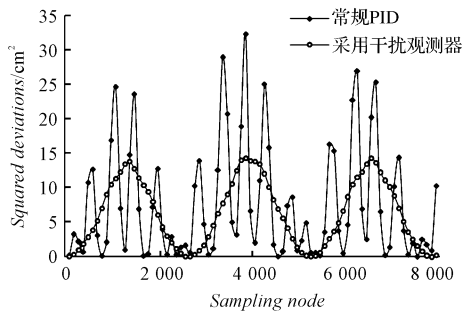


图7 正弦运动中偏差的平方曲线

当水下绞车牵引传感器集成浮球做爬坡定深运动时,采用脉冲干扰信号,仿真结果如图8、图9所示。

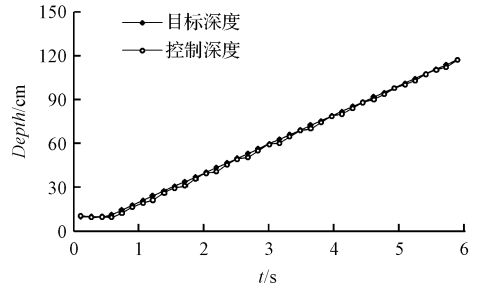


图8 常规PID的浮球爬坡式运动定深控制

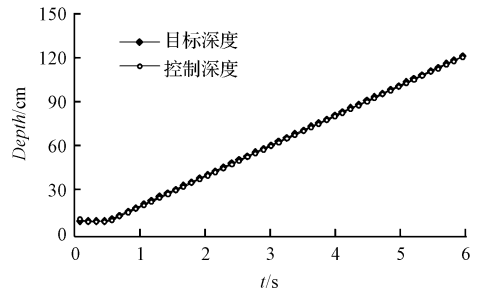


图9 加入干扰观测器PID的浮球爬坡式运动定深控制

本研究采用仿真过程中2500组数据作为样本,绘制爬坡运动中采用干扰观测器PID和常规PID定深控制的偏差平方曲线如图10所示。

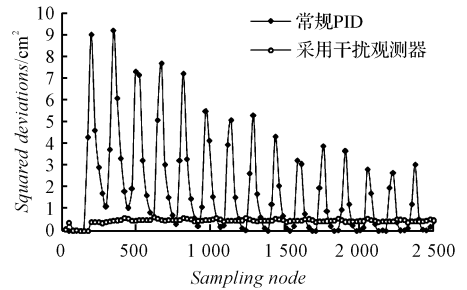


图10 正弦运动中偏差的平方曲线

分析上述图表,采用加入干扰观测器的PID后,控制系统可以有效地抑制外界干扰。对于正弦干扰和脉冲干扰两种不同的干扰信号,基于干扰观测器的PID算法都有效的观测到干扰的存在,并予以耦合。从图5和图6中可以看出,水下绞车在牵引传感器集成浮球在做正弦运动时,可以较好的跟踪控制深度,但存在一定延时;从图8和图10分析可得,传感器集成浮球在做爬坡运动时,常规PID控制的爬坡偏差越来越小,与目标深度吻合程度越来越好,但仍然存在波动。这是由于常规PID控制将干扰造成的控制偏差反馈到系统输入端,使得控制深度逐渐趋近目标深度,但是在逐渐趋近的过程中仍然没有起到抑制干扰的作用,控制深度依然波动;由图9和图10分析可得,加入干扰观测器的PID控制在整个过程中都较好地抑制了外界干扰,使得控制深度

与目标深度吻合较好,控制稳定。

4 结束语

本研究通过 Matlab 仿真分析,对干扰观测器 PID 的控制效果进行了研究,得出以下结论:

(1)本研究采用基于干扰观测器 PID 的水下绞车定深控制可以有效的抑制外界干扰对系统的干扰,减小传感器集成浮球在定深运动过程中的波动。

(2)本研究建立的水下绞车的物理模型和传感器集成浮球的动力学模型,通过耦合外界干扰,构建了绞车控制模型。

(3)本研究通过仿真传感器集成浮球的正弦定深运动和爬坡定深运动,分析了干扰观测器 PID 和常规 PID 的控制效果,发现基于干扰观测器 PID 的水下绞车定深控制在考虑外界干扰后能取得较好的控制效果。

参考文献 (References):

[1] 蔡声波,柴 瀛,刘贵杰. 基于 UML 和 Simulink 的水下绞车控制系统研究[J]. 机电工程,2015,32(8):1104-1109.

[2] LEE. H. S. Robust digital tracking controllers for high-speed/high-accuracy positioning systems [D]. Univ. California, 1994.

[3] KEMPF CJ, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 1999,7(5):513-526.

[4] 于 哲,王 璐,苏剑波. 基于干扰观测器的不确定性多变量系统控制[J]. 自动化学报,2014,4(11):2643-2649.

[5] 尹正男. 具有鲁棒性的最优干扰观测器的系统性设计及其应用[D]. 上海交通大学电子信息与电气工程学院,

2012.

[6] 曾志林,徐国华,赵 寅,徐 兵. 水下大负载高精度液压绞车滑模控制研究[J]. 液压与气动,2012,25(7):18-20.

[7] 徐国华,张军胜,向先波,郭 莹,黄嘉陵. 直流无刷电机驱动的水下电缆绞车系统[J]. 海洋工程,2006,24(2):123-129.

[8] ASPER V, GALLAGER S, von der Heydt K, et al. Design and Construction of a Polar Remote Interactive Marine Observatory (PRIMO) [C]//OCEANS 2006. New York: IEEE,2006:1-3.

[9] 许 辉,邹早建. 基于 FLUENT 软件的小水线面双体船粘性流数值模拟[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2004,28(1):8-10.

[10] 祁 丽,张 军,黄冠星. 基于 Fluent 和 workbench 的蒸汽喷射器流场分析和结构参数优化[J]. 流体机械,2014,42(5):35-38.

[11] 许 辉. 小水线面双体船粘性流数值模拟[D]. 武汉:武汉理工大学交通学院,2004.

[12] 蔺 辉,田新锋. 基于干扰观测器 PID 的直流电机速度控制[J]. 微电机,2011,44(9):29-30,65.

[13] 丁新平,杨俊友,孙荣斌. 基于干扰观测器 PID 控制的磁悬浮系统[J]. 沈阳工业大学学报,2005,27(3):288-290,320.

[14] 周 彤. 基于 Hankel 范数模型降价的控制对象的名义模型选择[J]. 自动化学报,1997,23(2):105-110.

[15] 谭 华. 西门子 S7-200PID 控制于流量控制应用[J]. 液压气动与密封,2015,35(1):62-64.

[16] 巩舒超,宋立忠,田英俊. 基于干扰观测器的舵阻摇 PID 控制[J]. 船电技术,2013,33(7):23-26.

[17] 廖志远,郭 杰. JT200 型卷纸筒机纸带张力的数学建模及 PID 控制[J]. 包装与食品机械,2014(3):52-56.

[18] 宋晓华. 基于 PID 与模糊控制的切削加工过程双模控制[J]. 轻工机械,2015,33(2):61-64.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

刘小菲,王素珍. 基于干扰观测器 PID 的水下绞车控制系统[J]. 机电工程,2016,33(5):579-584.

LIU Xiao-fei, WANG Su-zhen. Control system of underwater winch based on disturbance observer PID[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(5):579-584.