

水下拖曳升沉补偿系统的非参数模型自适应控制

王海波, 王庆丰

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 水下拖曳系统拖曳作业时, 拖船航速变化和升沉运动使拖体深度产生较大范围变化. 为补偿拖体深度变化, 本文提出了由外层深度升沉补偿控制系统和内层位置伺服控制系统双层结构的水下拖曳升沉补偿系统总体设计方案, 运用基于紧格式线性化的非参数模型自适应控制方法设计了系统外层深度升沉补偿控制器. 仿真研究表明, 应用了非参数模型自适应控制方法的水下拖曳升沉补偿系统具有良好的动态性能和抗干扰能力.

关键词: 非参数模型; 自适应控制; 水下拖曳系统; 深度升沉补偿

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Nonparametric model adaptive control for underwater towed heave compensation system

WANG Hai-bo, WANG Qing-feng

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

Abstract: In the underwater towed system, the depth variation of the towed body increases dramatically with the velocity changes and the heave motions of the towed ship in the ocean. To compensate the depth changes of the towed body, we propose an integrated control scheme which is composed of the external depth-heave compensation and the inner position-servo control. The external depth-heave compensation controller is designed by using the nonparametric model adaptive control approach which is based on a dynamic linearization of tight format. The simulation study demonstrates that the nonparametric-model-adaptive-control applied to the underwater towed heave-compensation system has excellent dynamic performance and disturbance-rejection capability.

Key words: nonparametric model; adaptive control; underwater towed system; depth heave compensation

1 引言(Introduction)

水下拖曳系统在水下目标探测, 生物学采样和海洋打捞救助等方面具有广泛应用, 一般由拖缆绞车、拖缆和拖体组成, 如图1所示.

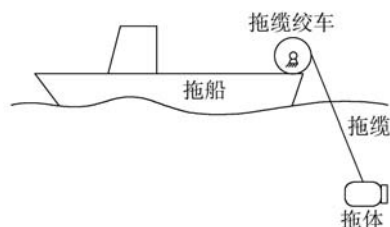


图1 水下拖曳系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater towed system

水下拖曳系统拖曳作业时, 拖船的航速变化和升沉运动引发拖体深度和拖缆张力发生变化, 拖体深度和拖缆张力的变化随着海况的恶化而加剧, 较高海况下拖船的剧烈运动不仅影响拖体中传感器的正常工作, 而且给拖体和拖缆的安全造成很大威胁, 为

保证水下拖曳系统在5级海况下能够正常进行拖曳作业, 其必须具备升沉补偿功能^[1].

本文研究的水下拖曳升沉补偿系统以削弱拖船航速变化和升沉运动对拖体深度的影响作为控制目标, 通过测量拖体深度控制拖缆绞车收放实现升沉补偿功能^[2,3]. 拖缆绞车收放运动受拖缆张力的影响, 拖缆张力的波动会造成对拖体深度升沉补偿的扰动, 而拖缆张力变化到拖体深度变化为一个复杂的非线性过程, 采用单一的控制策略难以获得理想的控制效果, 本文提出了具有双层结构的水下拖曳升沉补偿控制系统总体方案.

水下拖曳升沉补偿系统的被控对象建模困难, 输入输出特性随拖缆释放长度和拖船航速的改变而变化, 基于数学模型的自适应控制策略不适合运用在本系统中; PID及其改进方法对于时变非线性被控对象的控制效果较差; 基于神经网络的控制策略必须已知被控对象的阶数, 其隐层节点数目难以确定, 不

宜处理时变系统,特别是结构时变系统.相比而言,基于紧格式线性化的非参数模型自适应控制方法无需受控系统数学模型,仅需受控系统当前的I/O数据,具有鲁棒性强和易于实现的优点,本文运用此方法设计了系统的升沉补偿控制器^[4,5].

2 系统数学模型(Mathematical model of system)

假设水下拖曳升沉补偿系统的拖缆和拖体仅在垂直面内进行2维运动,拖缆是细长、柔性和圆柱形状,并始终处于张紧状态,拖缆的张力不干扰拖船的运动,拖体在垂直面内的运动为线性运动且无俯仰.

2.1 坐标系(Coordinate)

水下拖曳升沉补偿系统坐标系如图2所示,其中分别建立了两种坐标系:全局惯性坐标系 $O'XZ$ 和固结在拖缆任意点上的局部坐标系 $O'X'Z'$, (i, k) 表示全局惯性坐标系的单位矢量, i 水平与拖船运动方向相同, k 垂直向下; (t, n) 表示局部坐标系的单位矢量, t 为拖缆切线方向, n 为拖缆法线方向.拖缆首端 O 点连接拖缆绞车由水面上的拖船拖动前进,末端 B 点连接拖体重心 G 点.

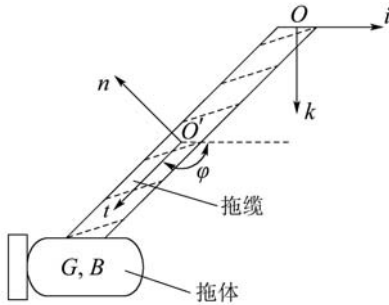


图2 水下拖曳系统坐标系

Fig. 2 Coordinate of underwater towed system

2.2 数学模型(Mathematical model)

参考文献[6]建立了水下拖曳升沉补偿系统的水动力数学模型,其中拖缆动力学模型基于Ablow and Schechter模型,其动力学方程组为

$$My' = N\dot{y} + q. \quad (1)$$

其中: $y = [T \ V_t \ V_n \ \varphi]^T$,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -V_n \\ 0 & 0 & 1 & V_t \\ 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} \frac{-meV_t}{1+eT} & m & 0 & -m_1V_n \\ e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+eT \\ \frac{-m_1eV_n}{1+eT} & 0 & m_1 & mV_t \end{bmatrix},$$

$$q = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho D\pi\sqrt{1+eT}C_tV_t|V_t| - w_1\sin\varphi \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2}D\pi\sqrt{1+eT}C_nV_n|V_n| - w_1\cos\varphi \end{bmatrix}.$$

拖体的动力学方程为

$$-T_b \cos \varphi_b = C_i u_b |u_b| + (m_b + \lambda_i) \dot{u}_b, \quad (2)$$

$$-T_b \sin \varphi_b = -(m_b - \rho V_b)g + C_k w_b |w_b| + (m_b + \lambda_k) \dot{w}_b. \quad (3)$$

方程式(1)(2)和(3)中各变量的含义见参考文献[6].

2.3 边界条件和干扰信号(Boundary conditions and disturbance signals)

水下拖曳升沉补偿系统在拖缆首端和末端各有一个边界条件:拖缆首端的速度为拖船航速、拖船升沉运动和拖缆绞车收放运动的合成速度,拖缆末端的速度与拖体重心处的速度相同.

系统干扰信号包括拖船航速干扰和升沉运动干扰,假设拖船航速为正弦信号,拖船升沉运动的频谱分布与海浪波能谱相同,海浪波能谱采用 P - M 谱表示.

动力学方程组(1)~(3)和边界条件构成了水下拖曳升沉补偿系统的数学模型,其可用如下离散时间模型表示.

$$h(k+1) = f(h(k), \dots, h(k-n_h), u(k), \dots, u(k-n_u), w(k), \dots, w(k-n_w), v(k), \dots, v(k-n_v)). \quad (4)$$

式中: f 为紧集上的实值连续函数, h 为输出信号,表示拖体深度, u 为拖船航速, w 为拖船升沉运动速度, v 为输入信号,表示拖缆绞车收放速度, n_h, n_u, n_w, n_v 分别为各变量的阶数.

3 控制系统设计(Design of control system)

3.1 总体控制方案(General control scheme)

本文研究的水下拖曳升沉补偿系统以削弱拖船航速变化和升沉运动对拖体深度的影响作为控制目标,拖缆时变张力扭矩作为拖缆绞车运动的干扰信号.针对此类水下拖曳升沉补偿系统的特点,本文提出其控制系统总体方案,如图3所示,它具有外层深度升沉补偿控制系统和内层位置伺服控制系统双层结构;外层采集拖缆和拖体的状态参数,通过深度升沉补偿控制器,确定拖缆绞车收放拖缆的目标角位移和角速度,内层位置伺服控制系统在时变的拖缆张力力矩干扰下,实现对目标角位移信号和角速度的快速、无静差的跟踪控制.

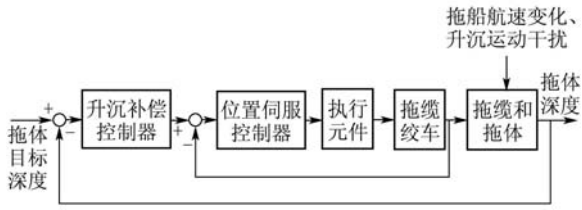


图3 水下拖曳升沉补偿系统总体控制方案

Fig. 3 General control scheme of the underwater towed heave compensation system

3.2 升沉补偿控制器设计(Design of heave compensation controller)

受篇幅限制, 总体控制方案中的内层位置伺服控制系统在本文不再详述, 本文重点研究外层深度升沉补偿控制系统。

水下拖曳升沉补偿系统在每一时刻 k , 有限的拖缆绞车收放速度变化导致有限的拖缆收放长度, 从而拖体深度变化有限, 此外, 系统输入输出可控制, 实值连续函数 $f(\cdots)$ 关于系统当前的控制输入信号 $v(k)$ 的偏导数是连续的。

基于参考文献[4]和文献[5]的提供的紧格式线性化理论, 当 $\Delta v(k) \neq 0$ 时, 一定存在一个称为伪偏导数(pseudo-partial-derivative)的量, 使得

$$h(k+1) = h(k) + \phi(k)(v(k) - v(k-1)), \quad (5)$$

并且 $|\phi(k)| \leq b$ 。

式(5)即为系统数学模型式(4)的折线化等效, 在等效过程中, 采样周期和控制输入 $\Delta v(k)$ 的值要

足够小, 这样 $\phi(k)$ 才可以看成是一个慢时变参数, 与 $v(k)$ 的关系可以忽略, 从而设计自适应控制器。

考虑系统的性能指标为:

$$J(v(k)) = (h_r(k+1) - h(k+1))^2 + \lambda(v(k) - v(k-1))^2.$$

其中: $h_r(k+1)$ 为目标深度, λ 为控制输入量的权重系数。

将式(5)代入性能指标函数, 且使 $\frac{\partial J(v(k))}{\partial v(k)} = 0$, 得系统的控制律为:

$$v(k) = v(k-1) + \frac{\rho_k \phi(k)}{\lambda + |\phi(k)|^2} [h_r(k+1) - h(k)]. \quad (6)$$

控制律中的伪偏导数 $\phi(k)$ 的参数估计方程为:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta v(k-1)}{\mu + |\Delta v(k-1)|^2} (\Delta h(k) - \hat{\phi}(k-1) \Delta v(k-1)). \quad (7)$$

若 $\hat{\phi}(k) \leq \varepsilon$ 或者 $\Delta u(k-1) \leq \varepsilon$, 则

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}_{\text{reset}}. \quad (8)$$

式(7)(8)中, $\rho_k, \eta_k \in (0, 2)$ 是步长序列。

水下拖曳升沉补偿系统的非参数模型自适应控制算法由控制律(6)和参数估计式(7)(8)构成, 无需受控系统的数学模型, 仅需要受控系统当前的I/O数据, 与常规控制算法相比, 具有在线估计参数少, 设计简单, 鲁棒性强和易于实现的优点, 其控制框图如图4所示。

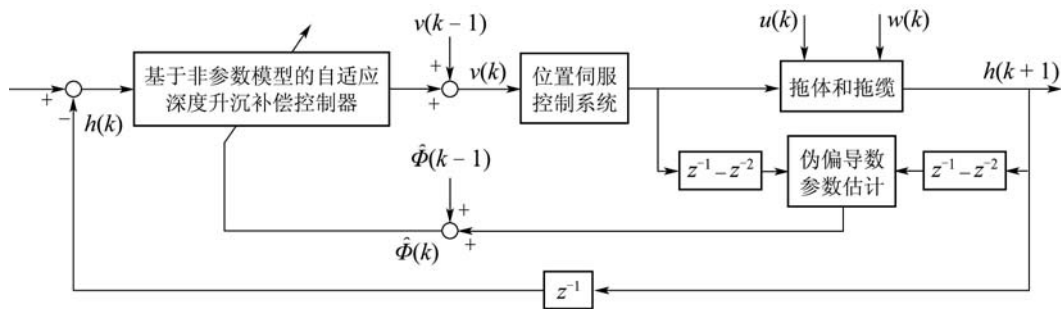


图4 非参数模型自适应控制框图

Fig. 4 Block diagram of nonparametric model adaptive control

4 仿真研究(Simulation study)

水下拖曳升沉补偿系统数学模型的干扰信号: 拖船航速 u 取为 $6 + 2\sin(2\pi t/8)$ m/s, 拖船升沉运动 w 依据风速11 m/s下的 P - M 波能谱采用线性叠加法将不同频率和随机初始相位的余弦波叠加而成, 其分别如图5所示。

仿真时, 当实际值 $h(k)$ 与控制目标值 $h_r(k+1)$ 具有较大偏差时, 如控制系统刚启动时, 必须对控制律计算结果 $v(k)$ 加以饱和限制, 避免控

制系统产生较大的振荡, 仿真模型中参数 T , V_t , V_n 和 $\phi(k)$ 的初始值设定为零, 拖缆初始释放长度60 m, 因此拖体深度初始值为60 m; 深度升沉补偿控制器的参数设置为: 采样间隔 $dt=0.01$ s, $\mu = 1$, $\lambda = 0.1$, $\varepsilon = 0.05$, $\rho_k = 1$, $\eta_k = 1$, $\hat{\phi}_{\text{reset}} = 0.05$, $\hat{\phi}(1) = \hat{\phi}(2) = 0$, $v(1) = v(2) = 0$, 拖体目标深度 $h_r(k) = 50$ m。

深度升沉补偿控制器不工作时, 即 $v = 0$ 时, 拖体的深度变化 h 如图6所示。

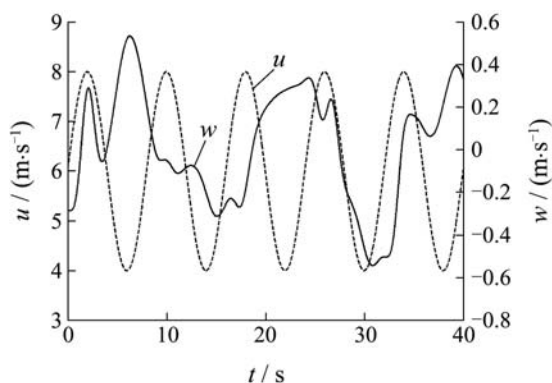


图5 干扰信号

Fig. 5 Disturbance signals

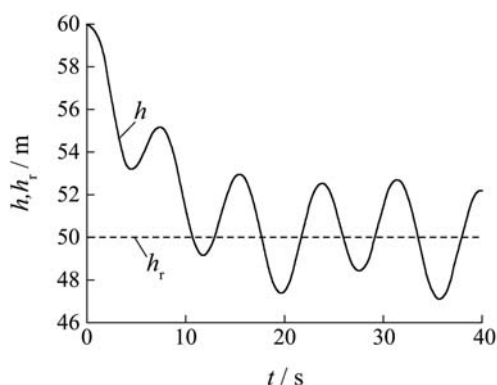


图6 无深度升沉补偿控制时拖体深度变化

Fig. 6 Depth changes of towed body without depth heave compensation

深度升沉补偿控制器工作时,拖体的深度变化 h 和输入控制信号拖缆绞车收放速度 v 分别如图7和图8所示。

仿真结果图6和图7表明,应用了非参数模型自适应控制方法的水下拖曳深度升沉补偿控制系统抗干扰能力极强,具有良好的动态性能。

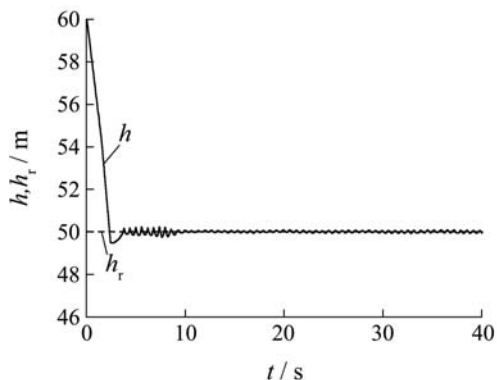


图7 有深度升沉补偿控制时拖体深度变化

Fig. 7 Depth changes of towed body with depth heave compensation

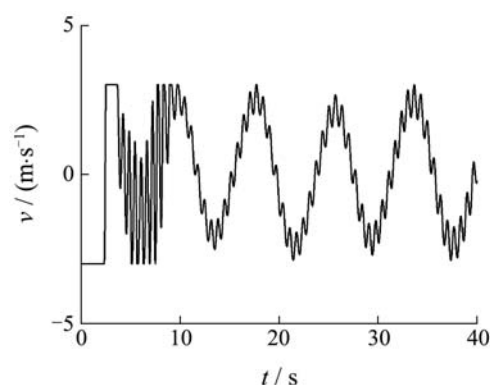


图8 有深度升沉补偿控制时拖缆绞车收放速度

Fig. 8 Velocity of cable winch with depth heave compensation

5 结论(Conclusion)

水下拖曳升沉补偿控制系统应用了基于紧格式线性化的非参数模型自适应控制算法,其无需受控系统的数学模型,仅需要受控系统当前的I/O数据,其具有良好的动态性能和较强鲁棒性。此外,该种非参数模型自适应控制算法调节参数少,非常利于现场调试和运用。

参考文献 (References):

- [1] 叶果洛夫BИ, 俞骥, 戈华. 水下拖曳系统[M]. 北京: 海洋出版社, 1989.
- [2] 吴家鸣, 叶家玮, 李宁. 拖曳式多参数剖面测量系统水动力与控制性能研究述评[J]. 海洋工程, 2004, 22(1): 111 - 120.
(WU Jiaming, YE Jiawei, LI Ning. Comments on the research of hydrodynamic and control performances of a multi-parameter profile sampling towed system[J]. *The Ocean Engineering*, 2004, 22(1): 111 - 120.)
- [3] 康天增. 水下声纳被动拖曳缓冲系统-液压蓄能器的应用[J]. 机电设备, 1995, (3): 14 - 18.
(KANG Tianzeng. Underwater sonar passive towed system - the application of hydraulic accumulators[J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 1995, (3): 14 - 18.)
- [4] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状和展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586 - 592.
(HOU Zhongsheng. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 586 - 592.)
- [6] 王海波, 王庆丰. 水下拖曳升沉补偿系统水动力数学模型研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 77 - 83.
(WANG Haibo, WANG Qingfeng. Study on dynamic model of underwater towed heave compensation system[J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26(4): 77 - 83.)

作者简介:

王海波 (1980—), 男, 现为日本东京工业大学特别研究员, 目前主要从事水下拖曳机电装备研究, E-mail: wang.h.ac@m.titech.ac.jp;

王庆丰 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向主要有电液控制元件及系统、海洋机电装备集成智能控制、工程机械混合动力及电液控制, E-mail: qfwang@zju.edu.cn.