

文章编号: 1000-8152(2009)03-0309-04

挖泥船泥浆管道输送流速的自适应预估控制

闭治跃¹, 王庆丰², 唐建中²

(1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 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: 针对挖泥船泥浆管道输送流速控制的大惯性、大时滞、参数时变和建模困难等特点, 提出一种单神经元自适应预估控制方案. 该方案利用神经网络的自学习能力, 对系统结构、参数、不确定性和非线性进行学习, 结合Marsik和Strejc提出的无辨识自适应控制算法对控制参数进行在线修正, 在控制方案中加入Smith预估器, 利用搜索寻优的方法对时变的时滞进行在线优化, 提高了预估算法的鲁棒性和适应能力. 通过现场实验证明了本控制方法的有效性, 在疏浚施工环境变化, 时滞较大的条件下仍然能够使泥浆流速基本保持稳定, 具有较强的抗干扰能力和良好的跟踪性能.

关键词: 疏浚; 泥浆管道输送; 流速控制; 自适应预估控制

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A

Self-adaptive predictive control of slurry transportation-rate in the dredging pipeline

BI Zhi-yue¹, WANG Qing-feng², TANG Jian-zhong²

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control of Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: A new single neuron self-adaptive predictive scheme is introduced for controlling the slurry transportation-rate in the dredging pipeline. To deal with such a process of high inertia, long time-delay, time-varying parameters and the difficulty in modeling, this scheme makes use of the self-learning capability of the neuron network to study the control system structure, parameters, uncertainties and nonlinear characteristics; combines with the identification-free self-adaptive control algorithm proposed by Marsik and Strejc to carry out the on-line adjustment of control variables; incorporates the Smith predictor and employs the optimization searching algorithm for on-line optimizing the time-delay parameter to enhance the robustness and adaptability of the predictive algorithm. Field experiments are also carried out to test the performance of the proposed control scheme. Results show that the control performance is satisfactory in various dredging environments, even the time-delay is significant; the control system compensates external disturbances and exhibits desirable tracking ability.

Key words: dredging; slurry pipeline transport; transportation-rate control; self-adaptive predictive control

1 引言(Introduction)

挖泥船是重要的疏浚工具. 泥浆管道输送系统是挖泥船主要的组成部分, 其构成如图1所示. 为了提高泥浆输送效率、降低成本, 国内外主要的疏浚研究机构和疏浚设备制造商非常重视泥浆管道输送流速的自动控制方面的研究, 取得了一些积极的成果^[1~3]. 从本质上讲, 泥浆管道输送系统是一个非线性的时变系统. 虽然系统中的柴油机一般可以用一阶滞后模型来表示^[4], 但系统中泥泵和泥浆输

送管道的工作特性是非线性和时变的, 要从机理上建立其数学模型仍然相当困难. 为了解决建模困难的被控过程的控制问题, Marsik和Strejc提出了一种无辨识自适应控制算法^[5], 作为一种智能自适应控制器被广泛应用于各种建模困难的系统控制中^[6]. Smith预估控制器是解决系统大时滞控制问题的经典有效方法, 在实际中获得了广泛的应用.

针对挖泥船泥浆管道输送流速控制的大惯性、大时滞、参数时变和建模困难等特点, 本文提

出一种单神经元自适应预估控制方案, 将无辨识自适应控制算法和Smith预估控制器有机的结合起来, 很好的解决了泥浆流速控制建模困难和大时滞控制问题. 现场实验结果证明了控制算法的有效性, 在外扰较大的工况下仍然获得良好的控制效果.

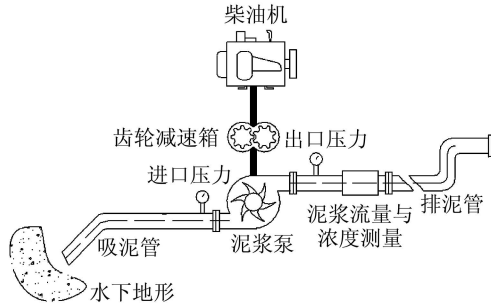


图1 泥浆管道输送系统的基本构成

Fig. 1 Structure of slurry pipeline transport system

2 控制器设计与控制算法(Controller design and control algorithm)

本文提出的挖泥船泥浆管道输送流速的自适应

预估控制结构如图2所示.

图2中: $G(z)$ 为被控过程无时滞部分的传递函数; $d = \tau/T$ 为纯滞后时间; T 为采样周期; $G^*(z)$ 为系统的估计模型; d^* 为系统纯滞后时间的估计.

神经元权值 $\omega_i(k)$ 的学习采用改进的有监督的Hebb学习规则, 为了保证算法的收敛性和鲁棒性, 对学习算法进行规范化处理. 采用自适应PSD控制算法对控制器增益 $k_v(k)$ 进行自调整. 另外, 为了提高系统的响应速度和稳态收敛速度, 改善系统的抗干扰能力, 引入了神经元的权值增益 $k'_i(k)$ 修正算法, 该增益修正算法的规则是:

- 1) 求和增益系数 $k'_1(k)$ 在系统偏差较小时取大值, 反之取较小值, 有利于加快消除系统稳态静差;
- 2) 比例增益系数 $k'_2(k)$ 在系统偏差较小时取小值, 反之取较大值, 有利于加快系统响应速度;
- 3) 微分增益系数 $k'_3(k)$ 在系统偏差较小时取大值, 反之取较小值, 有利于系统加快对小偏差的反应速度, 提高控制器的抗干扰能力.

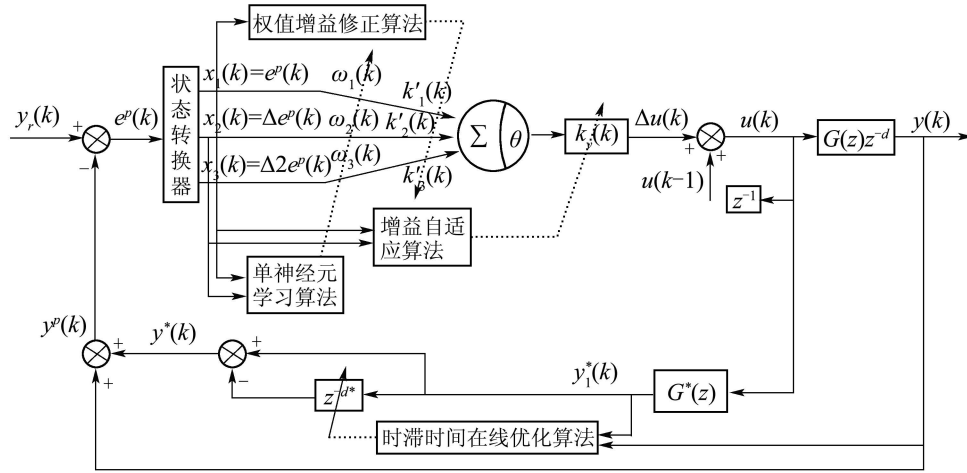


图2 单神经元自适应预估控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of single neuron self-adaptive predictive control

综上, 流速的自适应预估控制算法归纳如下:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \quad (1)$$

$$\Delta u(k) = k_v(k) \sum_{i=1}^3 \omega'_i(k) k'_i(k) x_i(k), \quad (2)$$

$$\omega'_i(k) = \omega_i(k) / \sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)|, \quad (3)$$

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \eta_i e^p(k) u(k) [e^p(k) + \Delta e^p(k)], \quad (4)$$

$$x_1(k) = e^p(k) = y_r(k) - y^p(k), \quad (5)$$

$$x_2(k) = \Delta e^p(k) = e^p(k) - e^p(k-1), \quad (6)$$

$$x_3(k) = e^p(k) - 2e^p(k-1) + e^p(k-2), \quad (7)$$

$$y^p(k) = y(k) + y^*(k). \quad (8)$$

$$\text{当sgn}(e^p(k)) = \text{sgn}(e^p(k-1))\text{时,} \\ k_v(k) = k_v(k-1) + C \cdot k_v(k-1) / T_v(k-1); \quad (9)$$

$$\text{当sgn}(e^p(k)) \neq \text{sgn}(e^p(k-1))\text{时,} \\ k_v(k) = 0.75k_v(k-1), \quad (10)$$

$$T_v(k) = T_v(k-1) + L \cdot \text{sgn}(|\Delta e^p(k)| - T_v(k-1) \cdot |\Delta^2 e^p(k)|), \quad (11)$$

$$k'_i(k) = 1 + \alpha_i \exp\{-d_i [e^p(k)]^2\}. \quad (12)$$

其中: $y_r(k), y(k), y^*(k), y^p(k)$ 分别为 k 时刻泥浆期望流速、实际流速、Smith 预估器输出、泥浆预估流速; η_i 为权值学习率; $0.025 \leq C \leq 0.05$; $0.05 \leq L \leq 0.1$; α_i 为权值增益修正系数; d_i 为函数宽度; 通过设定适当的 α_i 和 d_i 就可以使得增益系数 $k'_1(k), k'_2(k)$ 和 $k'_3(k)$ 随误差 $e^p(k)$ 的不同朝着期望的方向变化, 使整个控制系统的性能得到改善。

3 系统模型离线辨识(System model off-line identification)

3.1 $G^*(z)$ 和 d^* 的离线估计(Off-line identification for $G^*(z)$ and d^*)

从机理上建立泥浆管道输送系统的数学模型仍然相当困难, 为简化模型结构, 在工况点附近将其线性化, 采用受控自回归模型(CAR)来描述, 即

$$A(z)y(k) = z^{-d}B(z)u(k) + \xi(k). \quad (13)$$

其中:

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a},$$

$$B(z) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b},$$

$\xi(k)$ 为 k 时刻的随机干扰, z^{-1} 为单位后移算子。

将式(13)重新写成如下的向量形式

$$y(k) = \varphi^T(k-1)\theta + \xi(k), \quad (14)$$

式中: $\varphi(k)$ 和 θ 分别为信息向量和参数向量;

$$\varphi^T(k-1) =$$

$$[-y(k-1), -y(k-2), \dots,$$

$$-y(k-n_a), u(k-d), u(k-d-1);$$

$$u(k-d-2), \dots, u(k-d-n_b)],$$

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}; b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T.$$

利用最小二乘法对式(14)参数进行离线辨识^[7]。由于系统的时延 d^* 和阶次 n_a, n_b 是未知的, 所以必须先辨识系统的时延和阶次。

系统的时延用如下方法确定: 利用时延 $d^* = 0$ 并且阶次 n_a, n_b 足够大的系统模型, 对实验数据进行拟合, 可以得到参数向量的估计 $\hat{\theta}$ 。在向量 $\hat{\theta}$ 中寻找满足如下条件的参数 d_0 :

$$\begin{cases} |\hat{b}_1|, |\hat{b}_2|, \dots, |\hat{b}_{d_0-1}| \ll \sum_{i=1}^{n_b} \hat{b}_i, \\ |\hat{b}_{d_0}| \gg |\hat{b}_{d_0-1}|, \end{cases}$$

则系统的时延为 $d^* = d_0$ 。系统的阶数用损失函数法确定^[8]。

3.2 d^* 的在线搜寻优化算法(On-line optimization searching algorithm for d^*)

采用文献[6]介绍的简单搜寻算法对纯滞后时间进行在线优化。该方法的基本思想是给出纯滞后时间的搜寻范围, 然后在系统的实时过程中按下式进行搜索, 以获得满意的纯滞后时间:

$$G(z) - z^{-(d^*-d)}G^*(z) \rightarrow \min. \quad (15)$$

4 实验验证(Experimental verification)

为了验证本文控制算法的有效性, 在浙江临海旧渡疏浚施工现场进行了实验。作为参照, 将本文控制算法和常规PID控制条件下泥浆流速的控制性能进行了对比实验。

4.1 泥浆流速恒值控制实验(Constant value control experiment for slurry velocity)

设定泥浆期望流速为 3.5 m/s, 两种控制器的控制性能实验结果如图3所示, 图中 v 为泥浆流速。两次实验是在相同的施工环境中先后进行, 可以近似认为系统所受的外扰相同。实验结果表明, 在外扰基本相同的条件下, 自适应预估控制器的总体性能要优于常规PID控制器, 两者的均方误差 $(\Sigma e^2/n)$ 分别为 7.4396×10^{-4} 和 47.172×10^{-4} 。

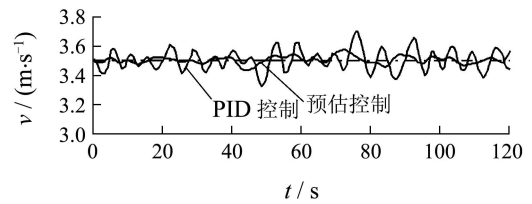


图3 泥浆流速实验曲线

Fig. 3 Experiment curves of slurry velocity

4.2 泥浆流速跟踪实验(Tracking control experiment for slurry velocity)

跟踪实验是检验控制器控制性能的重要手段。自适应预估控制器跟踪变化的期望流速的试验结果如图4所示。从试验结果可以看出, 自适应预估控制器具有良好的跟踪性能。

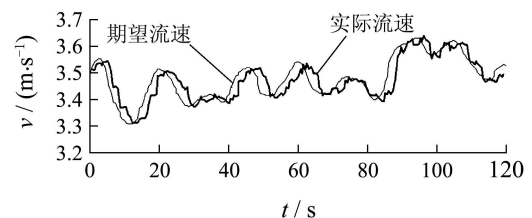


图4 泥浆流速跟踪实验曲线

Fig. 4 Experiment curves of slurry velocity tracking

5 结论(Conclusion)

本文所提出的单神经元自适应预估控制方案具有算法简单实用、无需系统精确建模和在线辨识系统模型等优点. 现场实验结果表明该控制方案在疏浚施工环境变化, 时滞较大的条件下仍然能够使泥浆流速基本保持稳定, 具有较强的抗干扰能力和良好的跟踪性能.

参考文献(References):

- [1] MIEDEMA S A. Automation of a cutter suction dredge[C] // *Proceedings of the Sixteenth World Dredging Congress*. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2001.
- [2] IHC. Renewing the dredging controls of US hopper dredger ES-SAYONS[J]. *Ports and Dredging*, 2003, E160: 24 – 26.
- [3] WANG Q G, TANG J Z. Research on expert system for dredging production optimization[C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation*. Dalian, China: [s.n.], 2006.
- [4] 邵家骧. 柴油机调速系统仿真与设计[C] // 中国内燃机学会首届学术年会论文选集. 上海: 中国内燃机学会秘书处, 1985.
(SHAO Jiexiang. Simulation and design of diesel engine speed control system[C] // *Technical Conference of China Combustion Engine Association*. Shanghai: The Secretariat of China Combustion Engine Association, 1985.)
- [5] MARSIK J, STREJC V. Application of identification-free algorithms for adaptive control[J]. *Automatica*, 1989, 25(2): 273 – 277.
- [6] 江青茵. 无辨识自适应控制预估算法及应用[J]. 自动化学报, 1997, 23(1): 107 – 111.
(JIANG Qingyin. Predictive algorithms of identification-free algorithms for adaptive control and its application[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(1): 107 – 111.)
- [7] LJUNG L. *System Identification: Theory for the User(2nd Edition)*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [8] 顺晃, 舒迪前. 智能控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

作者简介:

闭治跃 (1973—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事机电系统自动化控制研究, E-mail: zhiyuebi2004@yahoo.com.cn;

王庆丰 (1963—), 男, 博士生导师, 主要从事电液控制元件及系统、机电液集成智能控制等研究, E-mail: qfwang@zju.edu.cn;

唐建中 (1973—), 男, 博士后, 主要从事机电系统自动化控制、电力系统监测与控制等研究, E-mail: tangjzisme@163.com.