

基于 BPPID 的疏浚管道稳定流速控制

蒋爽^{1,2}, 邓岚^{1,2}, 倪福生^{1,2}, 王星^{1,2}

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 河海大学 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 常州 213022)

摘要: 针对疏浚管道输送过程中, 泥浆管道流速难以控制, 输送泥浆所需功耗较大、管道磨损严重甚至会出现堵管、爆管等风险, 文章通过河海大学自主研发的疏浚泥泵管道输送实验台和 MATLAB 仿真手段, 对绞吸挖泥船管道输送的稳定控制方法进行研究; 在采用系统辨识对实验台进行建模的基础上, 提出一种基于 BP 神经网络的 PID 控制器, 将 BPPID 与传统 PID 控制器进行仿真对比分析, 并利用模型实验台分别进行了流速阶跃实验和流速跟踪实验; 仿真和实验结果表明, BPPID 控制器具有自适应学习能力, 在工况复杂多变的环境中, 随时间推移具有更好的系统响应速率, 并能大幅度降低控制系统的超调量, 适用于对超调量较为敏感的泥浆管道输送系统, 为实际绞吸挖泥船输泥管道的稳定流速控制提供参考。

关键词: 管道输送; 疏浚; 绞吸挖泥船; BPPID; 流速控制

BPPID-based Steady Flow Control for Dredged Pipelines

JIANG Shuang^{1,2}, DENG Lan^{1,2}, NI Fusheng^{1,2}, WANG Xing^{1,2}

(1. School of Mechatronics Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education,

Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Aiming at the dredging pipeline conveying process, it is difficult to control the mud pipeline flow rate, the required power consumption for the conveying mud is large, the pipeline wear is serious and even occurs the risk of plugging and bursting, etc. In this paper, A dredging mud pump pipeline conveying experimental bench which developed independently by Hohai University, and the method of MATLAB simulation is used to study the stability control method of cutter dredger pipeline conveying. On the basic modeling of experimental bench using the system identification, a PID controller based on the BP neural network is proposed, the BP-PID controller is simulated and compared with the traditional PID controller, respectively carry out the flow rate step and tracking experiment by using the model experimental bench. The simulation and experimental results show that the BPPID controller has adaptive self-learning capability. Under the complex and changing environment, the BPPID controller has better the response rate and over time of the system and can significantly reduce the overshoot of the system with time. In these cases, the BPPID controller is suitable for the mud pipeline conveying system which is sensitive to the overshoot. By the simulation and experiment, a reference for the stable flow rate control is provided by the actual winch dredger mud conveying pipeline.

Keywords: pipeline transportation; dredge; cutter suction dredger; BP neural network; flow rate control

0 引言

疏浚工程是指通过挖泥船或者其他机具进行水下挖掘, 为了拓宽或者加深港口、锚地和航道的一种水下土方石工程^[1-2]。近年来随着施工工艺的优化改进和信息技术、智能控制技术在疏浚装备领域的创新应用, 我国疏浚技术发展的十分迅速, 具有完全自主知识产权的重型自航式绞吸挖泥船“天鲲号”于 2019 年顺利通过挖岩实验, 正式具备投产能力, 这表明中国已经具备了在全球任何海域建港的技术和能力^[3], 我国的疏浚技术走到了世界的前列。

作为疏浚清淤工作中重要设备, 绞吸式挖泥船虽然主要功能只包含机械挖掘与水力输送, 但其适用范围宽泛,

在近海硬质岩土挖掘、远海岛礁建设甚至河流整治、农田水利等方面都具有广泛的应用。比如在永暑礁、美济礁等南海岛礁的建设中, 绞吸挖泥船就地取材, 对南海海床泥沙进行吹填作业, 实现填海造陆的重大国家战略工程, 维护了我国南海主权与海洋权益。除南海岛礁建设外, 绞吸式挖泥船在港珠澳大桥、上海洋山深水港、长江航道疏浚等国家重大水利工程中, 都扮演着举足轻重的角色。

大型挖泥船的装机功率通常可达几千甚至上万千瓦, 而输送泥浆产生的功耗占绞吸挖泥船清淤作业总功耗 80% 以上^[4], 并且疏浚作业中 90% 以上故障都直接或间接地由泥浆管道输送系统造成, 处理各种故障至少占了 5% 以上的

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-03-15。

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2018YFC040740405)。

作者简介: 蒋爽(1981-), 男, 河南南阳人, 硕士, 高级实验师, 主要从事挖泥船自动化、智能化方向的研究。

邓岚(1998-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事疏浚自动化方向的研究。

引用格式: 蒋爽, 邓岚, 倪福生, 等. 基于 BPPID 的疏浚管道稳定流速控制[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 135-140, 147.

有效工作时间,因此泥管道输送系统的研究历来是挖泥船研究中十分重要的课题。

绞吸挖泥船实际施工过程中,由于外部管道排距较长,疏浚作业环境变化,内部泥泵电机,泥泵转速,泥浆浓度之间存在非线性映射,即使在同一工作条件,不同的泥浆浓度产生的泥浆流速也各不相同。导致管道中泥浆不但流速具有一定的滞后时间,而且其浓度会不断波动,使得泥浆管道输送系统非线性耦合严重,惯性大,参数时变,时滞性长等特点。对于诸如曹妃甸^[5]浅海人工岛工程中细粉砂的输送,管道内泥浆流态变化不大,流速的控制相对容易处理。但是施工土质存在大颗粒、粗砂砾石时,由于不同粒径颗粒的碰撞,启动速度不同,推移质、悬移质流态转变等种种原因^[6],造成流速起伏较大,要实现稳定的泥浆管道流速控制就变得较为困难。

对泥浆管道输送过程的分析可以得知,挖泥船泥浆输送系统互相影响的因素多,管道实际工作环境复杂。现有的挖泥船管道流速多依赖驾驶员的经验,通过对泥泵转速的手动调节来实现。但泥浆流速过高时,功耗较大,对泥泵泵及管道的磨损也随之增大;流速过低则泥沙淤积,管道输送效率下降,严重时易产生堵管甚至爆管现象^[7]。因此,为了提高施工效率,保障施工安全,降低施工故障率,对挖泥船泥浆管道流速的自动化控制研究就显得尤为重要。

据此,研究人员提出诸如神经网络、模糊控制、滑模控制等各种控制方法。其中闭治跃^[8]通过分析泥浆管道输送系统效率的影响因素,提出一种不依赖系统模型的在线动态优化方法;利用模糊决策方法确定系统的控制量。潘成广^[9]提出一种无模型自适应前馈控制(MFAFC, model-free adaptive feedforward control),所设计的MFAFC算法仅仅需要被控泥浆管道输送系统的输入输出,实验表明该算法具有较强的跟踪性和鲁棒性。Razvarz^[10]采用PID控制算法对管道流量进行控制,通过Lyapunov稳定公式验证了稳定性,并由仿真和实验验证所设计控制器的有效性。但上述方法所实现的控制效果并不非常理想,部分模型较为简单,简单地运用这些控制方法并不能直接适用于所有复杂场景。

考虑到疏浚管道内部介质在实际工作中,由于挖泥船的移动,输送管道长度变化等外部因素使得管道液体呈不同特性变化,单纯依靠仿真很难模拟真实的管道输送情况,本文利用河海大学自研的疏浚管道输送实验台,对绞吸挖泥船的管道输送控制方法进行研究,将具有自适应、自学习推理能力的BP神经网络与传统PID算法结合,通过管道流速阶跃响应和稳定流速控制实验,讨论传统PID与BP-PID在稳定流速控制中的效果。

1 管道输送系统分析与建模

1.1 管道输送工作过程

绞吸挖泥船管道输送系统主要运用绞刀对水底土层、

珊瑚等清淤对象切削搅动,使之与水混合形成泥浆,泥浆被抽吸并输送至排泥点。吸泥管通过水下泵的真空压差吸入泥浆,排泥管由舱内泵接力输送泥浆至远距离处的抛泥区。管道布置高低起伏,吸泥管道放置水下;排泥管道从舱内延伸至排泥点,由多根钢管组成,一般布置在水面,有通航要求时则布置在水下,多节输送钢管之间设置软管连接并用单向弯转的限位机构实现有序排布。由吸泥管,排泥管等组成泥浆管道开式输送系统结构原理图如图1所示。

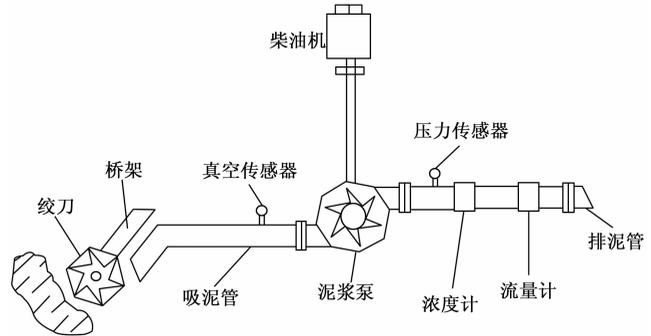


图1 挖泥船管道布置结构原理图

输送管道上通常安装有测量泥浆浓度和流速的放射性浓度计与电磁流量计,这是反映挖泥船产量和施工状态的重要仪表。泥泵出入口则分别安装有压力表和真空表,实时测量泵的出口压力和入口真空度。

1.2 疏浚管道输送实验台简介

河海大学疏浚管道输送实验台主要用于研究疏浚泥泵和管道输送特性,由22 kW变频驱动系统、离心式泥浆泵、循环输送管路、加砂收砂装置、管路测量系统和监控系统组成。实验台如图2所示。

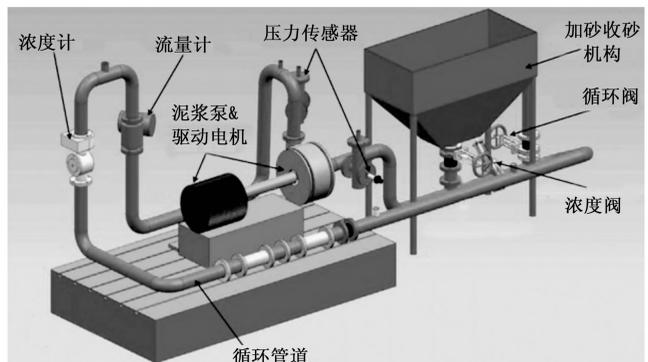


图2 管道输送实验台

实验台泥泵采用和挖泥船相同的离心式泥泵,通过22 kW变频驱动系统带动泥泵旋转,进而使水流在管路中循环往复;高低起伏的封闭循环管道,可以模拟真实挖泥船排泥管中水上管、水下管的布置;利用加砂收砂装置,可以在管路中加入/回收不同粒径和不同浓度的泥沙,实现封闭管道的泥浆调节,从而模拟挖泥船泥泵抽吸不同物质的情况。

在进行疏浚实验时, 为了快速准确的采集泥泵扬程、真空度和管道流速、浓度等关键参数的动态变化过程, 管路测量系统配备了电磁流量计、微波浓度计、压力传感器等高精度仪表, 监控系统选用西门子 S7-1500 系列的高性能 CPU 和高速采集模块, 利用逐次逼近法和中断采集技术, 实现对仪表参数 50ms/次的更新缓存效果^[11]并通过 TCP 通讯协议与 LabView 提供的网络流应用编程接口^[12]实时发送至上位机。

根据实验台的组成和各部分功能, 可知管道调速系统的输入量 $R_{in}(t)$ 为给定的管道流速, 该流速和实际输出流速 $y(t)$ 的差值, 作为 PID 控制器的误差输入 e 。控制量 u 为变频器的频率, 通过调节变频器频率 f 来改变泥泵转速 n , 从而达到对泥浆管道流速 v 的控制。控制系统结构如图 3 所示。

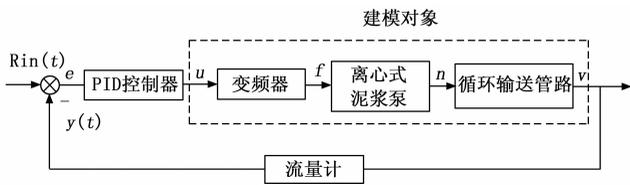


图 3 控制系统结构图

1.3 管道系统分析建模

在工业上针对非线性, 大时滞的系统或控制过程, 大多将反映被控对象动态特性的传递函数加入带有一阶延时的惯性环节或更高阶的大时滞对象来研究。本文建模时, 采用基于“最小二乘法”结构模型的 MatLab 系统辨识工具箱, 对泥浆泵流速响应做系统辨识。建立管道输送实验台数学模型后, 将该数学模型与实验测试数据进行对比, 以确定所选模型参数。利用逆向求解微分方程的方法提高数据拟合程度, 通过调整辨识参数以减小测试数据与模型输出的偏差。

由于变频器频率过高会造成管道内压力过高, 通常将频率限制在 25 Hz 以下, 此时基本可以反应系统动态特性, 能够完成对系统的模型建立。因此设定变频器初始频率为 0 Hz, 终止频率为 25 Hz, 斜坡变化时间为 50 s, 采样时间 T 为 1 s。在此工况下选择一阶、二阶、三阶 3 种不同的系统模型进行多次辨识系统模型, 模型如下所示:

$$G(S) = \frac{k}{(1 + T_1s)} \cdot e^{s\tau} \quad (1)$$

$$G(S) = \frac{k(1 + T_1s)}{(1 + T_2s)(1 + T_3s)} \cdot e^{s\tau} \quad (2)$$

$$G(S) = \frac{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}{(1 + T_3s)(1 + T_4s)(1 + T_5s)} \cdot e^{s\tau} \quad (3)$$

其中: k 为开环增益, ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 为时间常数, 为时滞系数。对 3 种系统模型辨识结果如图 4 所示, 拟合度分别为 93.74%、94.65%、94.24%。

辨识后的模型采用均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 的算法评估实际模型与辨识出来的模型数据拟合优良程度^[13]。均方误差 MSE 准则表达式为:

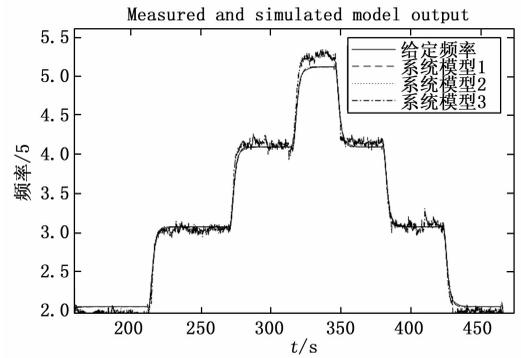


图 4 数据拟合结果

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_1^n [y(k) - y_0(k)]^2 \quad (4)$$

$y(k)$ 为输入相同的信号下辨识所得模型的输出值, $y_0(k)$ 为实验数据的输出值。

对 3 种不同的系统模型进行准则函数计算, 在样本数 $n = 1850$ 的情况下系统模型的均方误差 MSE 分别为:

一阶模型 $MSE = 0.1009$;

二阶模型 $MSE = 0.0086$;

三阶模型 $MSE = 0.0085$ 。

从 MSE 结果来看, 二阶与三阶模型误差接近。因此, 根据数据拟合度, 选择二阶时滞模型可以更好地代表在该工况下管道系统的动态响应。所辨识出的二阶时滞系统模型如下:

$$G(S) = \frac{1.128}{(20484s + 1)(1.8695s + 1)e^{-1.73s}} \quad (5)$$

2 控制器设计

2.1 控制器选型

PID 控制器因其算法简单、鲁棒性好、可靠性高等优点, 被广泛应用于工业过程控制, 在挖泥船等船舶控制中也很常见。但由于绞吸式挖泥船泥浆管道输送系统非线性, 耦合强, 参数时变等特点, 造成不但对管道输送系统的数学建模困难, 而且使得传统 PID 和部分自适应 PID 的控制器效果差强人意。

如增量式 PID 算法对于可以精确描述的数学模型可以获得极好的控制效果, 但在外界环境变化较大的情况下, PID 算法控制效果大打折扣。模糊 PID 依靠客观的专家经验, 虽然其控制效果对被控对象变化不敏感, 环境要求低, 但其适用范围有限, 有时会对专家经验数据过拟合。蚁群算法策略具有良好的动态特性, 易于实现计算, 适用于工程实际应用, 但经常会陷入局部最优解^[14]。

为了解决上述问题, 利用神经网络可以逼近任意非线性函数的特点, 将 BP 神经网络引入 PID 控制算法。与上述 PID 控制器相比, 神经网络结构和算法简单明确, 具有自学习、自整定能力, 可以随外界环境变化而实时更新控制器参数。合理设计的神经网络结构, 既能避免数据过拟合, 又不会过于依赖梯度下降, 陷入局部最优解的窘境。

2.2 BPPID 控制器控制算法

BPPID 控制器分为 PID 控制器和 BP 神经网络，选用增量式数字 PID 控制器对被控对象进行闭环控制，控制器算法为：

$$u(k) = u(k-1) + kp(e(k) - e(k-1)) + kie(k) + kd(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (6)$$

式中， kp 、 ki 、 kd 分别为比例、积分、微分系数。 $e(k)$ 为 k 时刻的误差。神经网络主要由输入层、隐含层和输出层构成。其结构如图 5 所示。

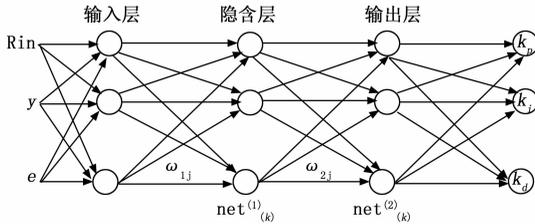


图 5 BP 神经网络结构图

BP 神经网络是一种具有完备理论体系和学习机制的算法模型^[15]。该算法由输入数据的正向传播与系统误差反向传播组成^[16]。

在正向传播中，输入信号为期望流速 Rin，管道流速 y 和管道流速误差 e ，记成 x_1, x_2, x_3 ，初始权值为 ω_{ij} ($i=1, 2$)。输入层通过求和单元 $net^{(i)}(k) = (x_n \cdot \omega_{ij})$ ($n=1, 2, 3$) 输出到隐含层，隐含层的求和单元由激活函数计算后作为输出信号输入给输出层，输出层通过激活函数计算后输出的权值设置为 PID 控制参 kp, ki, kd 。将所计算出的 PID 参数带入 (5) 中得出控制量 u 。控制量 u 进入 PID 系统后，由数据采集系统检测的管道实际流速与期望流速误差对比。BP 网络根据每一次误差 e 的变化进行误差反向传播。

反向传播利用批量梯度下降算法 (BGD, batch gradient descent) 实时计算损失函数梯度数值大小，从输出层开始逐层反向传播不断矫正梯度向量方向，更新权值，最终达到管道流速逐渐逼近期望流速的目的。可以看出，BP 网络的加入使得传统的 PID 控制器具有了自动调整参数的可能，实现 PID 控制器在线自学习的控制目的。

为了简化计算，提高实际应用效率，BPPID 损失函数采用均方误差：

$$E(k) = \frac{1}{2}(Rin(k) - y(k))^2 \quad (7)$$

为增加函数收敛速度，避免传统输出层激活函数 sigmoid 发生梯度消失的情况，输出层激活函数 $g(\cdot)$ 设置为 tanh 函数。

$$g(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (8)$$

使用优化梯度下降法寻找最优权重，输出层调整更新的算法如下：

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \omega_{ji}^{(3)}} = \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_{ji}^{(3)}(k)}$$

$$\frac{\partial \omega_{ji}^{(3)}(k)}{\partial \omega_{ji}^{(3)}(k)} \cdot \frac{\partial net_j^{(3)}(k)}{\partial \omega_{ji}^{(3)}(k)}$$

$$\Delta \omega_{ji}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial \omega_{ji}^{(3)}(k)} + \alpha \omega_{ji}^{(3)}(k-1) \quad (9)$$

其中： $O_j^{(3)} = g(net_j^{(2)}(k))$ 为输入层的 3 个输出，分别为 kp, ki, kd 。 $u(k)$ 为式 (5) 的控制量， η 为学习率， α 为惯性系数。为了减少对系统模型的依赖，通常 $\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$ 可以测量各时刻的控制量 $u(k)$ 对实际流速 $y(k)$ 的相对变化的影响，因此，可以用 $\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} = \frac{y(k+1) - y(k)}{u(k) - u(k-1)}$ 来替代，进一步可以用式 (9) 的符号函数来替代，以避免 $u(k)$ 与 $u(k-1)$ 控制量过于接近，导致式 (8) 发生梯度爆炸^[17]。

$$Sgn\left(\frac{y(k+1) - y(k)}{u(k) - u(k-1)}\right) \quad (10)$$

3 控制器仿真

为了验证 BPPID 对流速控制的可行性，通过 MatLab/Simulink 编制 s 函数来搭建 BP 神经网络 PID 控制系统，BPPID 控制器仿真模型如图 6 所示。

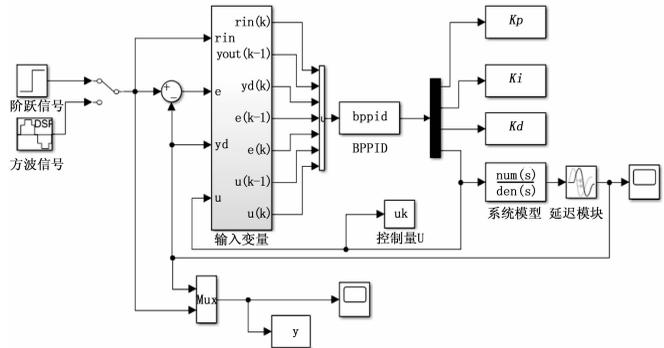


图 6 BPPID simulink 仿真模型

应用所设计的控制器，进行仿真实验。第一组仿真设定输入阶跃信号用以模拟吸泥管道突然吸入泥浆的情况，验证控制器是否能使管道泥浆流速保持稳定。第二组仿真输入阶梯信号以模拟实际泥浆流速不断变化的工况，验证控制器能否跟踪实际管道流速工况的变化。两组仿真都将 BPPID 与传统 PID 的仿真曲线进行对比分析，用对比得出的结果判定更加适合泥浆流速控制的控制器方法。仿真实验结果如图 7 所示。

从仿真曲线可以看出，相比于传统 PID 算法，BP 网络具有在线整定自学习的特点：首先初始权值需要前向传播，使得 BPPID 对于阶跃信号的系统响应稍慢，而当初始权值反向传播后，控制器能跟踪被控对象的变化并且借由梯度下降算法在线更新调整 PID 参数，在最优条件准则下满足不同流速条件的控制要求。基于实验对象为管道输送系统，具有大时延和大惯性的特点，对调节时间的差异不太敏感，反之超调量过大后，流速突变产生的冲击可能对泵体和管路造成瞬间故障，如功率超限、超压爆管等。

因此, 综合仿真情况来看, 图 7 (a) 中, BPPID 控制器的调节时间略长, 但超调量远小于传统 PID 控制器。在图 7 (b) 所设定的给定信号不断变化过程中, BPPID 始终可以保持较小的超调量, 控制效果良好。BPPID 控制器对管路流速稳定控制具有较好的适应性和稳定性。

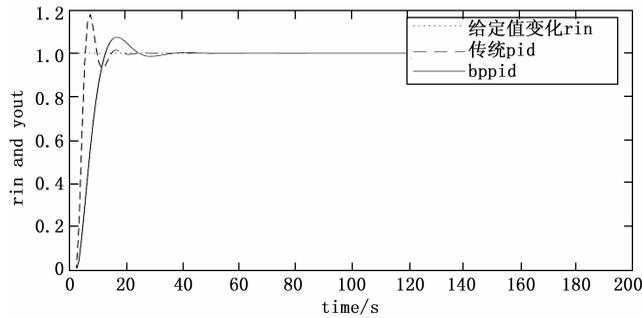


图 7 (a) 阶跃信号响应对比

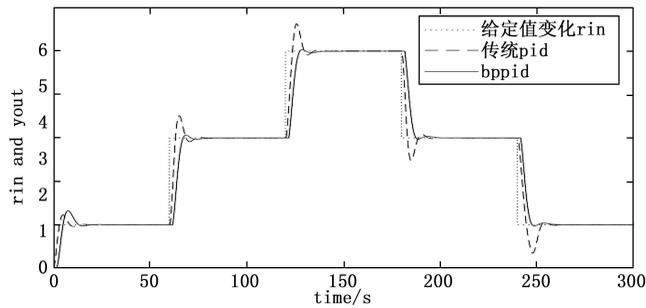


图 7 (b) 阶梯信号响应对比

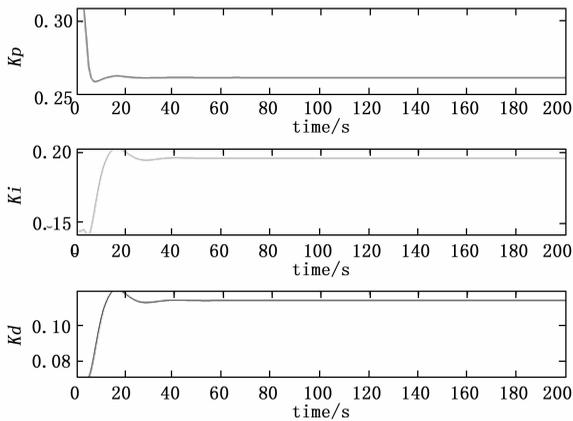


图 8 BPPID 各参数变化量

BP 网络 PID 控制器在经过 tanh 激活函数输出的、三个参数变化过程如图 8 所示。由实现效果可以看出, BP 网络根据流速偏差实现了在线学习调整控制器参数作用。不难观察出 3 个控制器参数都很快调整为稳定值, 这意味着控制器内部, BP 网络可以实现最优参数的自整定。

4 流速稳定控制实验

为了验证所设计控制器是否能应用于实际工况, 利用管道输送实验台进行清水工况下的流速稳定实验。作为参

照, 将传统 PID 与 BPPID 两种算法作用下的泥浆流速控制性能进行对比。

4.1 管道阶跃变化流速实验

分别设定不同变频器频率驱动泥泵, 从而使得管道泥浆呈不同阶跃状态的流速变化, 以此模拟实际工程应用中管道输送流速冲击大、系统非线性等工况, 实验数据如图 9 所示。对图 9 分析可知, 传统 PID 控制下的管道流速从 0 m/s 到 2 m/s 阶跃流速变化的系统响应效果最好。当期望流速变化为 0 m/s 到 1 m/s 时, 传统 PID 调节时间长达 18 s; 在期望流速从 0 m/s 突变至 3 m/s 时, 超调量高达 35.2%。这说明传统 PID 只针对特定阶跃流速变化产生控制效果。相较于传统 PID 控制器, BPPID 在 0~5 m/s 时首次产生 13.18% 的超调, 经过短暂的学习后, 在之后的几次阶跃流速变化下超调量逐渐减少。可以看出, BPPID 在经过几次自训练自学习后, 控制精度逐渐变高, 调节时间逐渐缩短, 相较于传统 PID 可以更好地适应阶跃变化。

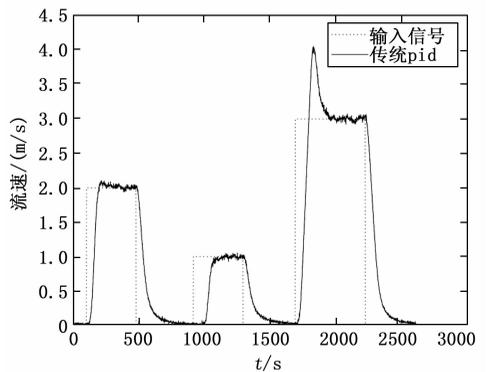


图 9 (a) 传统 PID 流速阶跃变化实验

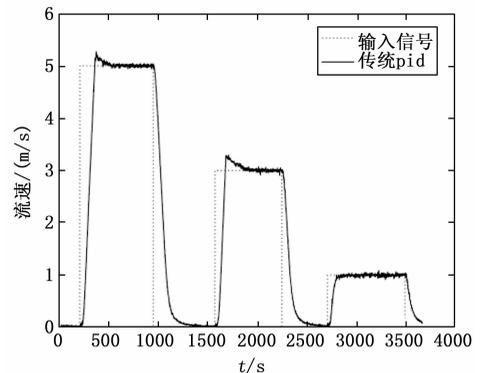


图 9 (b) BPPID 流速阶跃变化实验

4.2 管道连续变化流速跟踪实验

跟踪实验是检验控制器能否应用在管道输送工程的重要手段。通过调节泥泵转速使管道泥浆的流速连续变化, 由流量计检测在控制器作用下能否使管道泥浆实际流速跟随所设定的不同流速变化。实验结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出当期望流速呈阶梯形状变化时, 传统 PID 算法控制的管道流速随着期望流速的变化造成系统超调量无规律增大。与之相反, BPPID 虽然调节时间总体趋

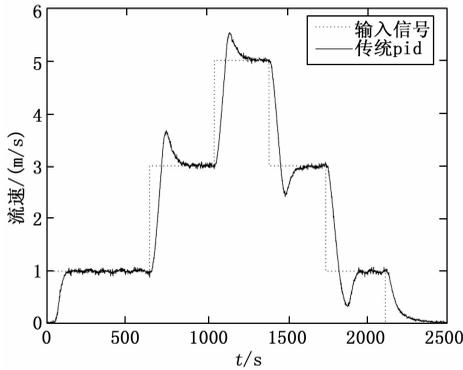


图 10 (a) 传统 PID 流速跟踪实验

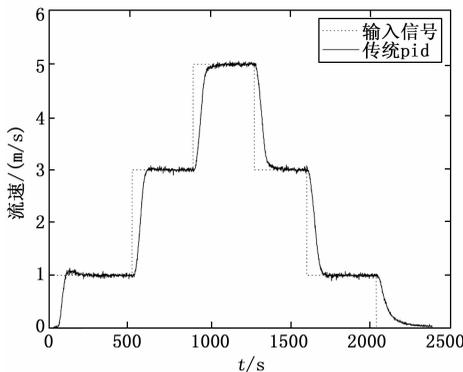


图 10 (b) BPPID 流速跟踪实验

势相比于传统 PID 略长，超调量在期望流速 0 m/s 上升至 1 m/s 时略大于传统 PID，但是在经过短暂的学习训练后，控制精度随时间变化有规律的显著提高，超调量逐渐减少。当期流速从 3 m/s 下降至 1 m/s 时，BPPID 的超调量仅为传统 PID 的八分之一。BPPID 与传统 PID 控制情况对比如表 1 所示。

表 1 BPPID 与传统 PID 调速实验对比

期望流速/(m/s)	调节时间/s		超调量/%	
	Z-N	BPPID	Z-N	BPPID
0-1	14	11	8.14	13.94
1-3	8	10	22.43	8
3-5	8	10	10.49	6.17
5-3	8	11	19.63	8.17
3-1	9	11	67.6	8.3

4.3 实验结果分析

对比不同控制器的超调量和调节时间可以看出，传统 PID 控制算法总体变化表现不佳。究其根本，是由于该算法过于依赖所建立的数学模型，在绞吸挖泥船清淤环境的变化和管道输送过程中，当发生泥浆内固体颗粒沉积管道底部引起泥浆淤堵，管道阻力增大等工况变化时，传统 PID 算法不能及时根据变化调整参数，对管道流速的控制效果降低。对于 BPPID 控制器，由于神经网络的存在，需要经过短暂的自适应调整，控制效果才能跟随实际施工情况的

管道流速变化实时调整。但该控制器算法无需精确的系统模型，仅仅根据给定流速和实际流速就可以对控制参数进行实时在线更新，从而实现自动更新控制器参数效果。因此，BPPID 控制器算法经过一段时间的学习后，在复杂的控制系统中具有更好的系统响应速率，能大幅度降低管道系统流速变化时产生的超调量，且控制效果明显，具有自动整定参数的作用。

在实际疏浚施工过程中，为了用足泥泵功率，实现高浓度、长距离的固液两相物料输送，泥泵负荷通常都控制在 80% 以上。若在泥泵转速调节过程中产生较大的超调量，不但容易造成电机超载，甚至还会损伤泥泵叶轮，影响泥泵寿命。而且为了维持稳定的工况，泥泵转速需要保持在一定范围内。在泥浆输送系统正常运行后，为了保持输送系统稳定，很少大幅调节管道内介质流速。只有在发生堵管、堵泵等突发状况时，才会要求及时改变管道流速，以保证施工安全，最大程度降低损失。因此，对于泥浆管道输送系统流速控制，最大的需求是保持其鲁棒性，限制控制器的超调量就显得至关重要。加入 BP 网络后，与传统 PID 控制相比，BPPID 控制器的超调量明显减小，鲁棒性更强，控制精度更高，更加适合疏浚泥泵管道输送这种工况环境变化较大的场合。

5 结束语

管道流速的控制效果对整个疏浚工程的安全和效率有直接的影响。为了提高管道输送系统自适应性和鲁棒性，本文将 BPPID 控制应用于绞吸挖泥船的泥浆管道流速控制研究，通过阶跃信号和阶梯信号的系统仿真验证其可行性，并利用河海大学管道输送实验台进行管道流速稳定控制实验。实验结果表明，从超调量和调节时间两方面对比来看，BPPID 控制器不但结构简单，适应性好，而且具有在线自整定系统参数的能力，鲁棒性强，控制效果良好，因此在实际疏浚工程中具有较好的参考价值。后续的研究实验，可以通过改变阀门开度，调整泥浆浓度等方式模拟实际疏浚环境中物料组成变化、管道物料淤积等干扰，同时可以引入模型预测控制并结合神经网络或其他先进控制算法对系统进行优化控制，进一步提高输送效率。

参考文献:

[1] 包建平, 朱伟, 闵佳华. 中小河道治理中的清淤及淤泥处理技术 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (1): 56-62, 68.
 [2] 倪福生. 国内外疏浚设备发展综述 [J]. 河海大学常州分校学报, 2004 (1): 1-9.
 [3] 杨秀武, 何波. 港珠澳大桥岛隧工程东人工岛岛隧结合部清淤施工工艺浅析 [J]. 水道港口, 2018, 39 (S2): 116-119.
 [4] 闭治跃, 王庆丰, 唐建中. 挖泥船泥浆管道输送工况点的在线动态优化方法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (9): 93-99, 108.
 [5] 杨文, 邓勇, 刘建伟, 等. 绞吸挖泥船施工效率主要影响因素分析 [J]. 交通企业管理, 2015, 30, 322 (6): 48-50.

(下转第 147 页)