

基于参数自整定和模糊前馈的疏浚系统控制

王 帅¹, 王二永¹, 项 恒², 黄宪中²

(1. 河南理工大学 电气工程及自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 黄河建工集团有限公司, 郑州 450045)

摘要: 在疏浚工程中抽砂系统一般采用 PID 控制器调节泥浆浓度, 但当河床形态及河水流速等工况变化时, 基于固定参数的 PID 控制难以达到满意效果; 针对被控对象的特性, 提出将参数模糊自整定 PID 与模糊前馈结合的控制方案; 该方案能根据工况变化动态调节 PID 参数, 并根据龙头吸咀与河底距离提供前馈补偿, 能及时抑制吸咀位置对泥浆浓度灵敏度的影响; 仿真结果表明, 与传统 PID 控制相比, 该方案对不同工况均能表现出较低的超调量, 更快的响应速度, 以及更强的抗干扰能力和稳定性。

关键词: 疏浚系统; 参数自整定 PID; 模糊控制器

Control of Dredging System Based on Parameter Self-tuning and Fuzzy Feedforward

Wang Shuai¹, Wang Eryong¹, Xiang Heng², Huang Xianzhong²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. The Yellow River Construction Engineering Group Co. Ltd., Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In dredging project, the PID controller is generally used to control the mud concentration. When the condition of the river bed and the flow rate of the river is changed, it is difficult to achieve satisfactory results. Based on the characteristics of the controlled object, a scheme combining fuzzy self-tuning PID and fuzzy feedforward is proposed. It can dynamically adjust the PID parameters according to the working condition, and provide feed-forward compensation according to the distance between tap suction and the river bottom. The simulation results show that, compared with the traditional PID control, the proposed scheme show a lower overshoot, faster response speed, and stronger anti-interference ability and stability.

Keywords: dredging system; self-tuning PID; fuzzy controller

0 引言

抽砂船在疏浚工程中发挥着重要作用, 主要用于江河、水库和河道的淤积清理, 以满足内河航运的通航需求。在河道清淤施工中, 如果河道与淤区距离较远, 一般由抽砂船抽吸河底泥浆, 泥浆经多级泥浆泵和输砂管道输送至淤区。抽砂船的基本原理是通过射流水枪冲击河底形成高浓度泥浆, 再由大功率泥浆泵抽吸泥浆, 然后通过管道输送至指定位置。在整个抽砂工作过程中, 泥浆浓度是系统的主要控制目标。泥浆浓度过低会降低系统输送效率, 提高输送成本; 反之, 若浓度过高, 泥浆泵负荷加重, 设备磨损加剧, 管道也容易产生淤堵, 造成安全隐患。尤其在输砂管道弯头、上坡等位置泥浆所受阻力较大, 当泥浆浓度过高时极易发生局部淤积, 如不及时处理将会造成管道爆裂、泵体损坏等严重后果。尽管泥浆泵本身有过流保护电路, 淤堵时能切断电路以保护水泵, 但会造成管道内泥浆流速急剧下降, 进一步加重淤堵程度。因此, 有效地控制泥浆浓度, 既保持较高的输送效率, 又能保证工程安全稳定运行, 是抽砂系统设计中需要解决的关键问题。

随着仪表技术、通讯技术和计算机技术的飞速发展, 抽砂施工工艺也在不断进步, 并逐步向自动化和智能化方向迈进, 带动了相关理论和技术研究的蓬勃开展。文献 [1] 开发了抽砂船工况监控系统, 可实现抽砂过程控制、功率管理和报警功能。文献 [2] 提出了基于状态空间模型的线性二次型控制策略, 以生产率最大为目标对整个抽砂系统进行优化控制。文献 [3] 根据土质变化建立抽砂过程模型, 寻求使产量最大的工艺参数。以上文献从不同角度提出了优化抽砂过程的控制策略, 但都是基于静态工况和理想假设条件下的问题求解, 当应用于工况动态变化的实际工程中时, 往往难以达到预期效果。本文在传统 PID 控制的基础上, 采用参数模糊自整定的 PID 控制方法, 同时结合模糊前馈控制, 使系统可根据实际工况自动调节 PID 参数, 并根据龙头吸咀距河底位置给出合适的超前补偿。仿真结果表明, 本文提出的控制方案显著提高了动态响应速度, 在工况变化条件下有良好的适应性, 具有较小的超调量, 能更好地满足实际抽砂工况下对系统各项性能的需求。

1 抽砂系统结构及控制需求

抽砂作业系统由龙头、卷扬机、泥浆泵和输砂管道组成, 如图 1 所示。龙头顶端附近装有水枪喷咀, 可发出高压水流冲击河底泥沙, 冲散的泥沙与水混合形成泥浆, 在

收稿日期: 2018-04-13; 修回日期: 2018-05-15。

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(17A510002)。

作者简介: 王 帅(1974-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 硕士生导师, 主要从事工业过程控制和智能控制方向的研究。

泥浆泵的作用下被龙头顶端的吸咀吸入, 经输砂管道运送至下一级泵站。系统的控制目标是保持泥浆浓度稳定, 以确保输砂效率, 同时减少设备损耗。泥浆浓度主要受龙头吸咀与河底距离影响, 当距离较近时, 吸入的泥沙量大, 泥浆浓度高; 反之, 当距离较远时, 泥浆浓度较低。实际中抽砂船通过电机带动卷扬机控制龙头升降, 改变龙头吸咀与河底位置, 进而控制泥浆浓度。

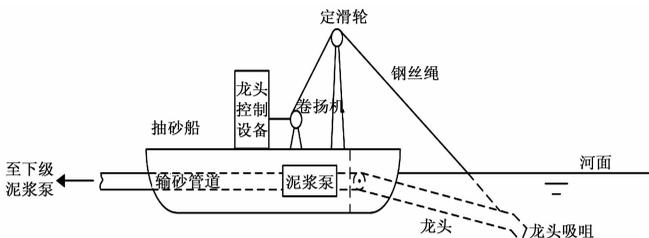


图 1 抽砂系统施工结构图

2 抽砂控制系统主要硬件模块

抽砂控制系统硬件主要包括电流电压传感变送器、泥浆泵监控器、龙头升降控制器、泥浆浓度控制器和智能主控器, 如图 2 所示。泥浆浓度控制器和龙头升降控制器分别安装在抽砂船泥浆泵控制柜和龙头控制柜内部。各级泥浆泵均配有泥浆泵监控器, 分别安装在各泥浆泵控制柜内部, 电流和电压传感变送器安装在各泥浆泵电机电源进线上。泥浆浓度控制器和泥浆泵监控器内置无线模块, 与智能主控器通过 GSM 公网实现信息传输。

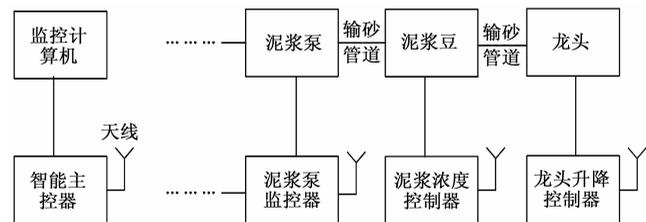


图 2 抽砂控制系统结构图

抽砂控制系统运行过程中, 智能主控器实时收集各泥浆泵监控器发来的数据, 通过 RS484 总线上传至监控计算机。同时, 智能主控器接收监控计算机下发的控制指令和配置信息, 向泥浆泵监控器和泥浆浓度控制器发出控制信号, 控制龙头升降和泥浆泵的启停。系统具有过载保护功能, 当管道内逐渐产生淤积时, 泵实时功率会随之上升, 系统监测到泵实时功率超出预定值后, 发出报警信号并适当提升龙头, 减小泥浆浓度, 达到清理淤积物的目的。

2.1 泥浆泵电压电流检测模块

泥浆泵运行过程中, 电流和电压传感变送器实时采集泵电机电压电流数据, 通过电流环方式传给泥浆泵监控器。泥浆泵监控器根据电压电流数据计算泵实时功率, 同时将计算数据通过无线模块上传至智能主控器。

电压传感器选用格林 GL-DJU-500 模块 (量程为 0~500 V), 并联在泥浆泵输入两相电源线之间。电压传感器

将相间交流电压转换为 4~20 mA 电流后发送给泥浆泵监控器。电流传感器选用美控 MIK-DJI-500 模块 (量程为 0~500 A), 将电机单相电流转换为 4~20 mA 电流后传给泥浆泵监控器, 安装时将单相电源线穿过电流传感器的测试孔。因三相电机进线接有功率补偿设备, 电压和电流传感器安装在功率补偿设备和电机之间, 以保证所测电压和电流反映电机的真实运行值。

2.2 泥浆泵监控器

泥浆泵监控器选用巨控 GRM201G-4D4I4Q, 内置 PLC 控制器、继电器、模拟量接口和 GSM 无线通信模块, 可实现 PLC 编程控制、模拟开关量输入输出和远程无线通信功能。除位于抽砂船上的泥浆泵之外, 其它各级泥浆泵均配有泥浆泵监控器。泥浆泵监控器模拟量接口接收电压和电流传感器传来的 4~20 mA 电流信号, 转换成数字信号后存入存储器, 控制器对该信号进行换算滤波预处理后送至 GSM 无线通信模块。GSM 无线通信模块工作在 900 MHz, 外置 GSM 吸盘鞭状天线, 负责将电压电流数据通过 GPRS 网络传送至智能主控器。

2.3 龙头升降控制器

龙头升降控制器也选用巨控 GRM201G-4D4I4Q。龙头升降控制器接收泥浆浓度控制器发来的控制命令, 控制龙头上升和下降。龙头控制器输出上升和下降两个开关信号, 分别经继电器隔离后, 接入龙头电机上升和下降接口。

2.4 泥浆浓度控制器

泥浆浓度控制器安装在抽砂船上, 兼有泥浆浓度控制和泥浆泵监控功能, 选用巨控 GRM201G-4D4I4Q 实现。泥浆浓度控制器能根据当前浓度测量值和设定的控制算法, 自动向龙头控制器发出龙头上升或下降指令以保证泥浆浓度恒定, 还可接收智能主控器发来的紧急清管指令, 当管道发生淤积时提升龙头清理管道淤积物。

2.5 智能主控器

智能主控器选用 GRM202G-4D4I4Q, 在 GRM201G-4D4I4Q 的基础上增加了 RS485 通信接口。智能主控器通过 GSM 无线通信模块接收各泥浆泵监控器发来的电压电流数据, 经 RS485 接口送至监控计算机。监控计算机根据这些电压电流数据计算各泥浆泵的实时功率, 并与预设警戒值作比较, 如超出警戒值则判定泥浆泵出口侧管道出现淤积现象, 于是向泥浆浓度控制器发出清管指令, 降低泥浆浓度, 按预定时间长度冲刷管道。管道冲刷结束后, 监控计算机向泥浆浓度控制器发出龙头下降指令, 将龙头降至正常工作位置, 恢复常规运行。

管道发生淤堵时龙头的上升幅度可以通过实验方法确定。在实际应用中, 预先通过实验或根据经验, 确定发生淤堵时泥浆泵当前功率与所需龙头上升幅度的对应关系, 将该关系表存储在监控计算机内。当出现淤堵时, 监控计算机根据当前泥浆泵功率查表得出所需龙头上升幅度, 将其发送至龙头控制器完成指定幅度的提升。

当发生淤堵时, 距淤堵位置最近的上游方向的泥浆泵

实时功率上升幅度最大, 监控计算机可以据此信息判断淤堵的大致位置。如果龙头提升仍不能消除淤堵, 可由人工在该位置附近定位淤堵并及时处理。

3 泥浆浓度控制器设计

泥浆浓度控制器是抽砂系统的核心单元, 其通过调整龙头垂直位置以保持泥浆浓度恒定, 对稳定输砂产量和保障系统安全运行都起着至关重要的作用。在抽砂过程中, 随着泥沙从河底持续被吸离排走, 河床形态和水流状况都在不断变化, 被控对象泥浆浓度特性也随之改变, 采用固定参数的 PID 控制策略难以达到理想效果。另外, 当调节龙头垂直位置时, 受系统结构制约, 龙头位置的改变与泥浆浓度变化之间存在较大延时, 单纯采用负反馈模式的控制将产生较大滞后, 影响控制系统的实时性。根据现场调研, 泥浆浓度控制的滞后性是导致泥浆泵过载损坏和堵管爆管等生产事故的主要原因。

通过上述分析, 抽砂过程是典型的模型参数时变且具有滞后性的被控对象, 使用传统 PID 控制方法存在明显的局限性, 需要根据被控对象的特性提出有针对性的改进方案。为解决抽砂系统参数时变和滞后对控制的不利影响, 泥浆浓度控制器的设计采用参数自适应调整和前馈相结合的方式, 由模糊自整定 PID 控制器和模糊前馈控制器两部分组成, 以下分别介绍各部分的原理和实现方法。

3.1 模糊自整定 PID 控制器

传统 PID 控制器具有结构简单、调试方便、通用性强等优点, 在工业控制领域得到了广泛应用。PID 控制器的主要局限是对负荷变化剧烈、被控对象参数时变、非线性和大滞后系统的控制效果不佳。在这些情况下控制器参数整定的难度也较大, 因为仅靠实验或经验整定的控制器参数往往只在一定范围的工况条件下工作良好, 难以适应被控对象特性随时间的变化。对于非线性、不确定性和受多种因素影响的复杂系统, 可以采用模糊控制器取代传统 PID 控制器。模糊控制器具有较强的鲁棒性和干扰抑制能力, 可以充分利用操作人员积累的经验和推理方法, 对难以建立数学模型的复杂被控对象能提供更有效的控制手段。但模糊控制器也有稳态误差较大, 模糊规则设置不当易出现控制死区等问题。因此在实际应用中往往将模糊控制与 PID 控制相结合, 以达到优势互补, 扬长避短的效果。模糊控制与 PID 控制的结合有多种方式, 较常见的方式是由模糊控制器确定 PID 的参数, 即模糊控制器根据预先定义好的模糊子集和推理规则, 利用被控对象偏差和偏差变化实时计算和调整 PID 参数。采用这种方式, PID 参数能跟随被控对象特性变化进行自我优化, 使 PID 控制器与被控对象始终处于良好的匹配状态, 达到较为理想的控制效果。

针对泥浆浓度对象参数随工况不同而动态变化的特点, 本文采用基于模糊规则的参数自整定 PID 控制器, 其结构如图 3 所示。该控制器接收泥浆浓度误差 e 和误差变化率 e'

为输入, 根据 e 和 e' 的变化情况和预设的推理规则, 实时在线调整 PID 控制器参数 k_p , k_i 和 k_d , 使 PID 控制器能及时适应工况条件变化, 始终保持在最佳工作状态。

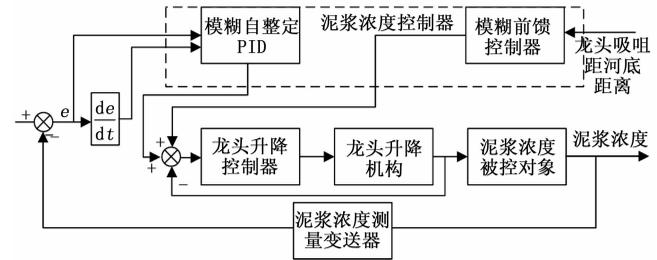


图 3 抽砂控制系统结构图

模糊控制器的设计主要包括模糊论域分级、隶属函数选择和模糊规则设定 3 个方面。模糊论域分级的作用是将输入值转换为模糊集合, 论域分级数目越多, 就更容易确定控制规则, 但会增加计算和推理的工作量, 增大硬件实现的难度; 论域分级数目少, 又将使模糊描述过于粗糙, 控制效果变差。

根据正常施工条件下的监测数据范围, 结合精度要求和硬件约束, 通过合理选择量化因子, 泥浆浓度误差, 误差的变化率以及输出的模糊论域都为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$ 。

模糊规则的设定主要依据是抽砂船施工人员和相关专家总结的经验, 同时结合大量实验数据做出适当调整。根据施工人员和专家经验, 可总结出 PID 控制器参数的调节规律为:

- 1) 如果偏差较大, 偏差变化率较小, 说明龙头偏离正常工况位置较远, 应主要调节 k_p , 减小 k_i 和 k_d , 将龙头快速移到合适位置, 并避免超调。
- 2) 如果偏差较小, 偏差变化率较大, 应主要调节 k_i 和 k_d , 减小 k_p 。如偏差和偏差变化率符号相反, k_i 应设为较小值; 如偏差和偏差变化率相同, k_i 应设为较大值。
- 3) 如果偏差和偏差变化率均较大, 应主要调节 k_p 和 k_d , 如二者符号相反, k_p 应取较小值, 反之应取较大值。
- 4) 如果偏差和偏差变化率均较小, 则 k_p , k_i 和 k_d 均应取较小值, 避免超调和振荡。

隶属函数是模糊控制的语义规则, 反映了人们对被控对象过渡过程的定性描述, 主要用于输入变量的模糊化和输出变量的反模糊化。隶属函数的形状主要有三角形、梯形和高斯平滑型等。一般来说, 隶属函数曲线形状越尖锐, 控制灵敏度就越高, 形状越平缓, 控制灵敏度下降, 系统稳定性越好。为减小 PID 参数变化对控制系统的影响, 模糊规则产生器的输入输出采用平滑型高斯隶属函数, k_p , k_i 和 k_d 的模糊规则表如 1~3 所示。

3.2 模糊前馈 PID 控制器

以上设计的参数模糊自整定 PID 虽然解决了被控对象非线性条件下的自适应控制问题, 但 PID 控制器仍属于反馈控制, 只有当偏差产生后才能产生校正作用, 使控制存在

表 1 k_p 模糊规则表

e'	e						
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	0	PS
NM	NB	NM	NS	NS	0	PS	PS
NS	NM	NM	0	0	PS	PS	PS
0	NM	NS	0	0	PS	PM	PM
PS	NS	0	PS	0	PS	PM	PM
PM	0	0	PS	PS	PM	PM	PB
PB	0	PS	PM	PM	PM	PB	PB

表 2 k_i 模糊规则表

e'	e						
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	0	0
NM	NB	NM	NS	NS	0	0	PS
NS	NM	NS	NS	NS	0	PS	PS
0	NM	NS	0	0	PS	PS	PS
PS	NS	0	0	PS	PS	PM	PM
PM	0	0	PS	PS	PM	PM	PB
PB	0	PS	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 k_d 模糊规则表

e'	e						
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	NM	0
NM	NM	NM	NM	NM	NS	NS	0
NS	NS	NS	NS	NS	NS	0	0
0	NS	0	0	0	0	0	0
PS	0	PS	PS	PS	0	0	PM
PM	0	PS	PS	PS	PS	PS	PM
PB	PS	PS	PS	PM	PM	PM	PB

一定的滞后。对于抽砂控制系统, 泥浆浓度的变化存在较大的惯性, 泥浆浓度的测量也存在一定的延时, 如果仅使用 PID 控制器将产生较大的振荡, 振荡持续时间也较长, 对输砂管道和泥浆泵造成长时间的冲击, 不仅增加了对设备的磨损消耗, 降低设备使用寿命, 而且故障率也会随之升高, 使系统稳定性下降。

如前所述, 泥浆浓度主要受龙头吸咀与河底距离的影响。实际中龙头吸咀与河底距离通过龙头顶端的超声波传感器测量。在施工过程中随着泥沙的不断吸走, 吸咀下方的河床形态也在不断变化, 对泥浆浓度构成了主要干扰。采用模糊前馈控制器, 可以根据吸咀与河床的动态变化输出合适的龙头升降补偿量, 与 PID 控制器的输出相加得到最终的龙头升降控制值。当龙头吸咀与河床较远时, 模糊前馈控制器输出负值, 下降龙头使之接近河床; 反之则输出正值, 提升龙头减少泥浆浓度。由于模糊前馈控制器通过直接检测干扰给出超前补偿, 可使干扰在出现之初就及时得到抑制, 大大提高了系统的抗干扰能力。根据现场工

作人员经验可知, 当龙头距河床较近时, 泥浆浓度变化的灵敏度要高于距河床较远的情况, 即泥浆浓度变化灵敏度随龙头位置不同而改变。将龙头吸咀与河床距离和龙头升降量分别作为前馈控制器的输入和输出, 设计模糊前馈控制器规则如下:

1) 以当前龙头吸咀与河床距离 d 决定龙头升降变化率。对于相同的吸咀与河床距离变化 Δd , 如果吸咀距河床较近, 模糊前馈控制器输出较大的 Δh , 反之则输出较小的 Δh 。

2) 以龙头吸咀与河床距离的变化 Δd 决定龙头升降量 Δh 的大小。

模糊前馈控制器的输入输出论域为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$, 隶属度采用三角隶属函数, 其控制规则表如表 4 所示。

表 4 模糊前馈控制规则表

Δd	d						
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS
NM	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PS
NS	PM	PM	PS	PS	PS	PS	PS
0	0	0	0	0	0	0	0
PS	NM	NM	NS	NS	NS	NS	NS
PM	NM	NM	NM	NS	NS	NS	NS
PB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NS

4 仿真结果与对比验证

根据现场测量数据, 通过拟合可得龙头升降传递函数为 $\frac{5.321}{6s+2}$, 泥浆浓度是根据实验数据建立的二阶模型, 模型参数由龙头距河底位置决定。

在 Matlab 平台上使用 Simulink 仿真验证控制系统性能, 同时与传统 PID 控制器进行性能比较, 其仿真结构图如图 4 所示。

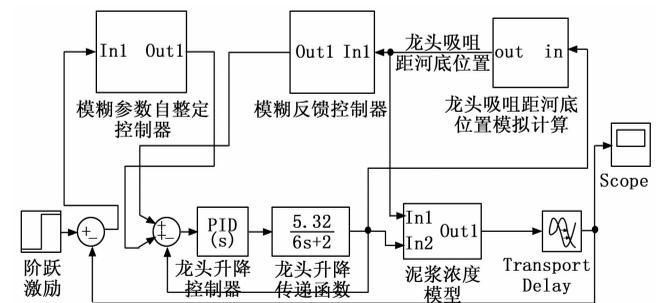


图 4 控制系统仿真结构图

1) 龙头吸咀距河床较远时的工况。当龙头吸咀距河床较远时, 泥浆浓度随距离变化的灵敏度较小。如图 5 所示, 传统 PID 控制方法虽然超调量较低 (约为 10%), 但需要 120 秒过渡时间到达稳态, 且上升时间较长, 约为 43 秒。自整定模糊前馈控制在过渡时间上要明显少于传统方

法, 约为 60 秒, 且具有较快的响应速度, 上升时间显著缩短, 约为 22 秒, 说明对此工况变化具有较好的适应性。

2) 龙头吸咀距河床较近时的工况。龙头吸咀距河床较近时, 泥浆浓度随距离变化的灵敏度较大, 龙头位置变化会对泥浆浓度造成较大干扰。如图 6 所示, 传统 PID 控制由于参数固定, 无法适应泥浆浓度的非线性变化, 出现了较大幅度的振荡, 超调量接近 15%, 过渡时间也显著增加, 约为 140 秒。自整定模糊前馈控制在超调量和过渡时间方面均明显优于传统 PID 方法, 一方面得益于参数的自适应调节, 另一方面则归功于前馈控制器能够根据干扰变化及时予以补偿, 提高了系统的动态性能。

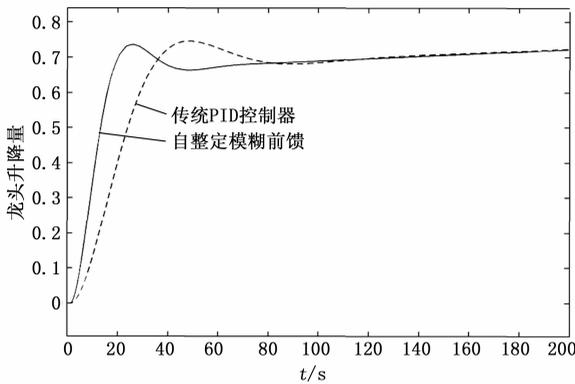


图 5 龙头吸咀距河床较远工况下控制效果对比图

3) 在抽砂船工作过程中, 受河底形态、龙头位置、泥浆泵工作点等因素不断变化的影响, 系统参数也随之改变, 进而影响系统的控制效果。为便于分析, 将泥浆浓度模型仿真参数设为: 时间段 0~220 s 内 $\frac{3.28}{200s + 25 + 1}e^{-6s}$; 220~440 s 内 $\frac{3.28}{300s + 35 + 1}e^{-6s}$ 。

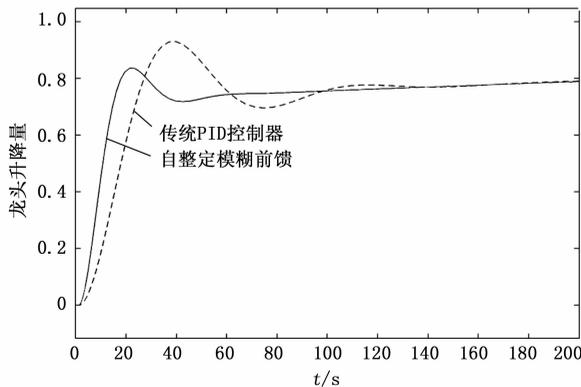


图 6 龙头吸咀距河床较近工况下控制效果对比图

如图 7 所示, 系统参数变化后, 传统 PID 控制器由于不能调整自身参数, 出现了较大的超调量, 稳定时间也随之增加。自整定模糊前馈控制则比较稳定, 超调仅有少量提升, 稳定时间也略有增加, 说明在复杂工况变化情况下能保持良好的稳定性, 具有较强的环境适应能力。

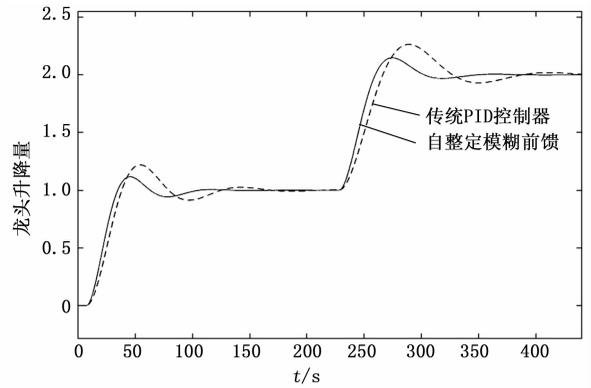


图 7 系统参数变化条件下控制效果对比图

5 结束语

疏浚工程中抽砂系统具有较大的非线性和滞后特性, 采用传统 PID 控制在复杂工况条件下适应性较差, 难以满足系统对实时性、准确性和稳定性的要求。本文在传统 PID 控制的基础上, 应用模糊控制技术, 设计实现了参数可根据工况变化模糊调节的自整定 PID 控制器, 以及对主要干扰进行快速补偿的模糊前馈控制器。经与传统 PID 控制器的性能比较, 具有超调量小, 响应时间短, 对复杂工况下被控对象特性变化有较强的适应能力, 能有效补偿河床形态变化引起的干扰, 具有较好的应用推广价值。

参考文献:

- [1] 袁伟俞, 孟 蕪, 张洪涛. 大型耙吸挖泥船综合监控系统设计 [J]. 舰船科学技术, 2014 (6): 117-120.
- [2] 朱文亮, 倪福生, 魏长赞, 等. 挖泥船疏浚横移过程线性二次型产量最优控制 [J]. 船舶工程, 2016 (2): 230-235.
- [3] 张盛祥. 绞吸式挖泥船疏浚集成控制系统研究 [J]. 中国水运, 2010 (5): 67-68.
- [4] 丁树友. 绞吸挖泥船作业产量的现场优化技术 [J]. 水运工程, 2007 (5): 13-15.
- [5] 周文强. 绞吸挖泥船工况监测系统探究 [J]. 机电信息, 2016 (18): 154-155.
- [6] 蒋 爽, 倪福生. 绞吸挖泥船横移系统多回路控制研究 [J]. 自动化仪表, 2016 (12): 62-66.
- [7] 朱文亮, 倪福生. 基于状态空间法的疏浚控制系统建模与分析 [J]. 计算机应用, 2016 (S2): 120-124.
- [8] 陈芊屹, 曾 强. 挖泥船吸扬作业系统的优化应用 [J]. 中国水运, 2016 (1): 15-18.
- [9] 朱喜春. 绞吸式挖泥船自动挖泥作业研究 [J]. 中国水运, 2016 (8): 26-27.
- [10] 黄志刚. 冲吸式挖泥船在博斯腾湖西泵站疏浚工程中的应用 [J]. 中国水运, 2014 (4): 10-11.
- [11] 陈建国. 绞吸挖泥船施工工况点的测试与选择 [J]. 上海航道科技, 1991 (4): 45-50.
- [12] 范世东, 刘正林. 疏浚作业优化研究及系统实现. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2002, 26 (2): 1-6.