

· 信息技术 ·



基于 RBF-ARX 模型的耙吸挖泥船 泥浆管道输送模型预测控制^{*}

张曦元¹, 苏 贞^{1,2}, 付敬奇², 俞孟蕻¹

(1. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212000; 2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 针对耙吸挖泥船挖泥装舱过程中管道内泥浆输送流速过低导致管道堵塞影响疏浚效率、造成安全风险等问题, 进行泥浆管道输送模型预测控制研究。提出一种基于 RBF-ARX 模型的预测控制方法, 通过改变泥泵转速控制耙吸挖泥船输送管道中泥浆的流速。建立基于 RBF-ARX 模型的泥浆管道输送模型, 设计基于 RBF-ARX 模型的预测控制器, 并对泥浆输送过程进行仿真。结果表明, 设计的模型预测控制器与 PID 控制器相比, 该控制方法具有较好的动态控制效果与较强的鲁棒性。

关键词: 耙吸挖泥船; 管道输送; 模型预测控制; RBF-ARX 模型

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0217-06

Model predictive control for slurry pipeline transportation of trailing suction hopper dredger based on RBF-ARX model

ZHANG Xi-yuan¹, SU Zhen^{1,2}, FU Jing-qí², YU Meng-hong¹

(1. School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;

2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: During the dredging and loading process of a trailing suction hopper dredger, the slurry blocks the pipeline when its transportation flow rate is too low, which not only affects dredging efficiency but also causes safety hazards. In response, this paper focuses on the model predictive control of slurry pipeline transportation. It proposes a predictive control method based on the radial basis function-autoregressive exogenous (RBF-ARX) model, and this method controls the flow rate of the slurry in the pipeline of a trailing suction hopper dredger by changing the speed of the slurry pump. It then builds a model of slurry pipeline transportation based on the RBF-ARX model and designs a predictive controller based on the RBF-ARX model to simulate the slurry transportation process. The results show that compared with the proportional-integral-derivative (PID) controller, the proposed model predictive controller has a better dynamic control effect and higher robustness.

Keywords: trailing suction hopper dredger; pipeline transportation; model predictive control; RBF-ARX model

在填海造陆、扩宽航道、江河污染治理等方面, 挖泥船都发挥着一席之地^[1]。由于耙吸挖泥船具有较高的机动性和较强的抗风浪能力, 其能适应不同的工作环境且已成为挖泥船中的主力军。耙吸挖泥船通过耙头挖掘海底的土壤, 将被挖掘的土壤由泥浆泵吸出, 通过管道输送到泥舱中,

当泥舱装满时, 将泥沙排放到指定地点^[2]。

耙吸挖泥船在挖泥作业时, 泥浆管道输送过程不仅影响着耙吸挖泥船的工作效率也影响着单位能耗。另外, 控制泥浆流速对其安全运行也至关重要, 当泥浆流速过缓时泥浆中的固体颗粒会沉积在管道底部, 造成堵塞, 而泥浆流速过高时,

收稿日期: 2021-11-16

*基金项目: 工信部高技术船舶项目(工信部装函[2019]360号)

作者简介: 张曦元(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶自动化。

固体颗粒会加速管道的磨损。目前,针对耙吸挖泥船管道输送控制的研究较少,需要借鉴其他管道输送控制的方法。Priyanka 等^[3-4]通过控制输油管道中控制阀开度百分比设置比例-积分-微分(PID)控制器调节输油管道的流量,并通过控制不同的压力点设置模糊 PID 控制器调节输油管道的流量。由于上述控制管道流量的方法大多集中在均匀材料的运输上,无法解决管道中粗颗粒泥浆输送的自动控制。Wei 等^[5]提出一种模型预测控制(MPC)方法控制绞吸挖泥船管道输送中泥浆的流量,结果显示该方法比其他 PID 方法更能有效地控制浆液管道输送问题中的流量。目前,由于水下情况非常复杂,采用动力学模型无法准确地描述系统,存在着辨识精度不高、实时性不强等问题。

针对上述问题,本文提出一种基于 RBF-ARX

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_t = \alpha_0(\mathbf{T}_{t-1}) + \sum_{i=1}^K \alpha_i(\mathbf{T}_{t-1}) \varphi_{t-i} + \sum_{m=1}^W \beta_m(\mathbf{T}_{t-1}) \psi_{t-m} + \eta(t) \\ \alpha_i(\mathbf{T}_{t-1}) = c_{i,0}^\alpha + \sum_{j=1}^s c_{i,j}^\alpha \exp(-\lambda_j^\alpha \|\mathbf{T}_{t-1} - \mathbf{Z}_j^\alpha\|_2^2) \\ \beta_m(\mathbf{T}_{t-1}) = c_{i,0}^\beta + \sum_{j=1}^s c_{i,j}^\beta \exp(-\lambda_j^\beta \|\mathbf{T}_{t-1} - \mathbf{Z}_j^\beta\|_2^2) \\ \mathbf{T}_{t-1} = [t_{n-1}, t_{n-2}, \dots, t_{n-p}]^T \\ \mathbf{Z}_j^l = [z_{s,1}^l, z_{s,2}^l, \dots, z_{s,p}^l]^T \end{array} \right. \quad (l = \alpha, \beta)$$

式中: φ_t 为管道内泥浆的流速(m/s); ψ_t 为泥泵转速(r/min); \mathbf{T}_t 为泥泵控制器的状态向量; $\eta(t)$ 为噪声信号; α_i 、 β_m 为 RBF 神经网络的非线性时变系数; $c_{i,0}^\alpha$ 、 $c_{i,0}^\beta$ 为初始值, 均为常数; t 为时间(s); \mathbf{Z}_j^l 为 RBF 网络的中心; λ_j^α 、 λ_j^β 为比例系数; K 、 W 、 s 和 p 为模型的阶次。可以看出, 管道内泥浆的流速和泥泵转速之间存在非线性关系。

1.2 模型参数的辨识及优化

建立 RBF-ARX 模型后,根据耙吸挖泥船 SCADA 系统中正常作业的历史数据辨识模型的阶数和参数,为了提高模型辨识精度,本文采用结构化的非线性参数辨识(SNPOM)算法^[7]求解并优化模型阶数及模型参数,该算法具有收敛速度快、预测误差小的特点^[8]。

1)首先采用SNPOM算法辨识RBF-ARX模型,

模型的模型预测控制方法,利用耙吸挖泥船挖泥作业中数据采集与监视控制(SCADA)系统记录的大量控制器输入、输出数据建立 RBF-ARX 预测模型,通过与 PID 控制方法在控制精度等方面进行比较,验证该控制方法的可行性。

1 RBF-ARX 模型

1.1 基于 RBF-ARX 模型的泥浆管道输送模型

RBF-ARX 模型结合了 RBF (radial basis function, 径向基函数) 神经网络无限逼近和 ARX (auto-regressive with extra inputs, 有源自回归) 模型全局描述的优点, 常用于解决非线性系统在复杂环境运行时的建模难题, 在工业领域取得了广泛应用^[6]。

基于 RBF-ARX 模型的泥浆管道输送模型结构为:

将 RBF-ARX 模型转换成:

$$y(t) = \psi(\boldsymbol{\theta}_N, \mathbf{T}_{t-1})^T \boldsymbol{\theta} + \eta(t) \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}_N$ 为非线性参数, 包含 RBF 的 Z_j 和 λ_j 等所有非线性参数的矢量; $\boldsymbol{\theta}_L$ 为 $c_{i,j}$ 等所有线性权重的矢量。

2)设置目标函数如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} v(\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N) = \frac{1}{2} \|\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N)\|_2^2 \\ \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N) = \begin{bmatrix} f[\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N, x(\tau) - y(\tau+1)] \\ f[\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N, x(\tau+1) - y(\tau+2)] \\ \vdots \\ f[\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N, x(M-1) - y(M)] \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$y(t+1|t) = f[\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N, x(\tau)] \quad (t=\tau, \tau+1, \dots, M-1)$$

式中: $y(t+1|t)$ 为泥浆管道预测控制向前一步预测的输出值; $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}_L, \boldsymbol{\theta}_N)$ 为泥浆管道模型的预测值

与真实数据之间的差。

3) 确定模型阶数。根据经验判断 s 、 p 的值, 然后通过多次计算比较得到 AIC 最小值, 根据 AIC 最小值确定 K 、 W 的值, AIC 准则如下:

$$AIC = N \ln V + 2(e+1) \quad (4)$$

式中: V 为辨识数据集的均方误差; N 为辨识数据集的总数; e 为参数总数。

4) 参数优化。求解目标函数最小的 θ_L 和 θ_N 值, 首先需要采用列维布格-马奎尔特算法 (LMM) 对非线性参数 θ_N 进行优化, 其次采用线性最小二乘法 (LSM) 迭代求解线性参数 θ_L , 当

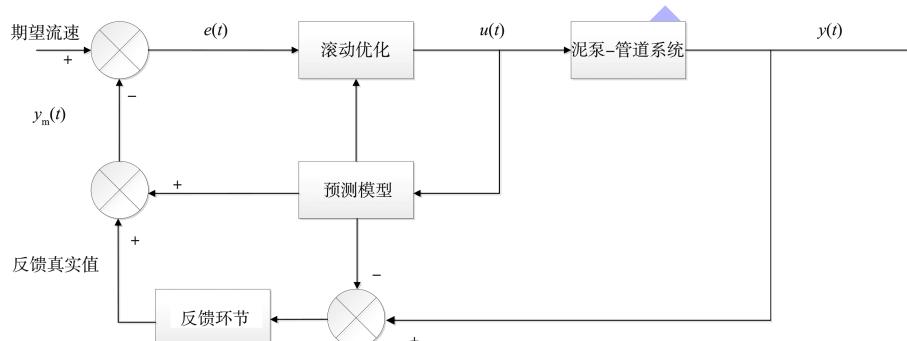
$v(\theta_L^{t+1}, \theta_N^{t+1}) > v(\theta_L^t, \theta_N^t)$ 时, 参数优化完成, 停止迭代循环。

2 RBF-ARX 模型的预测控制器

2.1 控制器结构

模型预测控制 (MPC) 具有不同的形式, 其中动态矩阵控制 (MDC) 采用对象的阶跃响应模型, 由于具有模型容易获得、有效解决时延过程问题等优点, 在实际过程中得到了广泛应用^[9]。

动态矩阵控制^[10] 主要由预测模型、滚动优化、反馈校正及闭环控制的形式构成, 其结构见图 1。



注: $u(t)$ 为输入变量, 是泥泵转速; $y(t)$ 为输出变量, 是泥浆传感器测得流速; $e(t)$ 为误差; $y_m(t)$ 为当前时刻校正后的预测模型输出速度。

图 1 动态矩阵控制结构

图 1 中预测模型采取 RBF-ARX 模型, 由于辨识的 RBF-ARX 模型得到差分形式, 需要转换状态空间形式在控制器使用, 具体方法可以参考文献 [11]。根据模型预测的输出, 再与传感器测得的实际输出进行比较, 将模型预测的系统输出和计算出的误差反馈给输入端, 根据期望流速, 优化计算出最优输出, 使期望流速与模型预测输出值的误差最小。

2.2 期望流速

为了避免发生堵管现象, 参考临界流速计算式^[12], 根据“新海虎 8”耙吸挖泥船施工实际情况, 设计泥浆管道输送的临界流速计算式:

$$v_c = (90C)^{1/3} g^{1/4} D^{1/2} v_{ss}^{1/2} d_s^{-1/4} \quad (5)$$

式中: v_c 为泥浆临界流速 (m/s); C 为土颗粒体积浓度 (%); D 为泥管直径 (m); v_{ss} 为颗粒在清水中的沉积速度 (m/s); d_s 砂粒平均粒径 (m)。

浆流速等于实用最低流速, 根据土质情况确定实用最低流速:

$$v_p = K_v v_c \quad (6)$$

式中: v_p 为实用最低流速; v_c 为临界流速; K_v 为实用最低流速系数, 见表 1。

表 1 实用最低流速系数

土类	淤泥、黏土	粉砂	细砂、中砂	粗砂、砾石
K_v	1.10	1.20	1.25	1.30

3 仿真结果与分析

3.1 RBF-ARX 模型仿真

本文使用“新海虎 8”耙吸挖泥船在厦门港施工时 SCADA 系统所记录的施工数据, 在 Matlab 软件上进行模拟仿真, 仿真主要由两部分组成: 通过耙吸挖泥船 SCADA 系统中所存储的历史数据建立基于 RBF-ARX 的管道输送预测模型, 使用 SNPOM 算法求解、优化模型的阶数和参数, 并通过所设置的测试集检验基于 RBF-ARX 管道输送预

测模型的精确性；根据得到的管道输送预测模型，设计预测控制器和 PID 控制器，比较两者控制器的性能。

从历史数据中选取耙头深度为 15~16 m、泥浆浓度为 0.12%~0.14%、航速为 3.0~3.5 m/s 范围中 800 组数据，使用小波强制阈值消噪法^[13]对数据进行处理，将所有高频系数置零，结果见图 2。

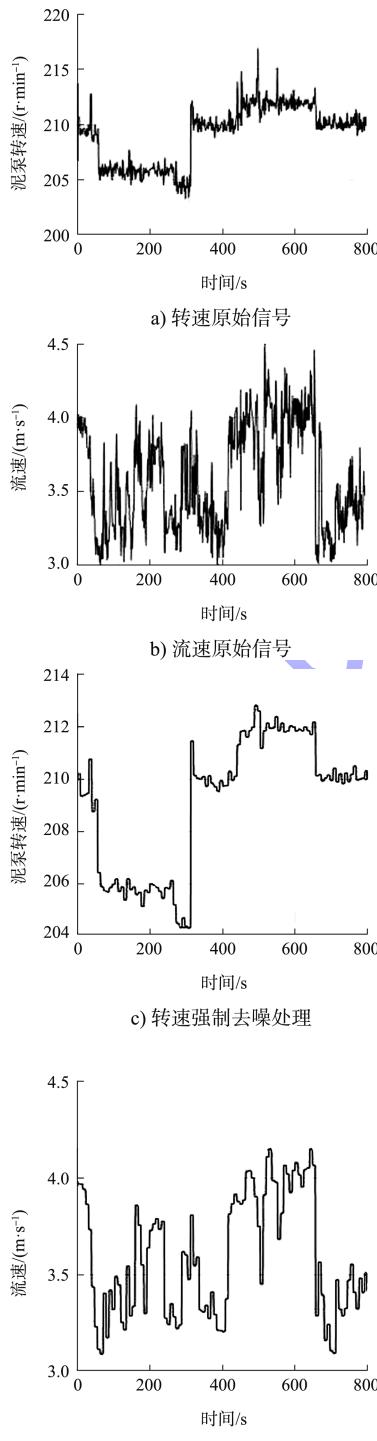


图 2 数据处理结果

管道-泥泵系统假设为单输入单输出系统，其中输入量为泥泵转速，输出量为泥浆流速，根据经验使用一个有 2 个中心点 RBF 神经网络就可以辨识管道输送系统；将处理后的数据分为 2 份，前 400 组数据作为训练集，后 400 组数据作为测试集；设定模型阶次 K 、 W 值的范围在 1~10，计算 AIC 值并进行比较，采用 AIC 值最小时的模型参数构建预测模型；经过计算可以得到当 $K=3$ 、 $W=3$ 时模型训练结果见图 3，此时 AIC 的值最小，预测模型最接近实际系统，由于预测模型的阶数低，更方便计算。

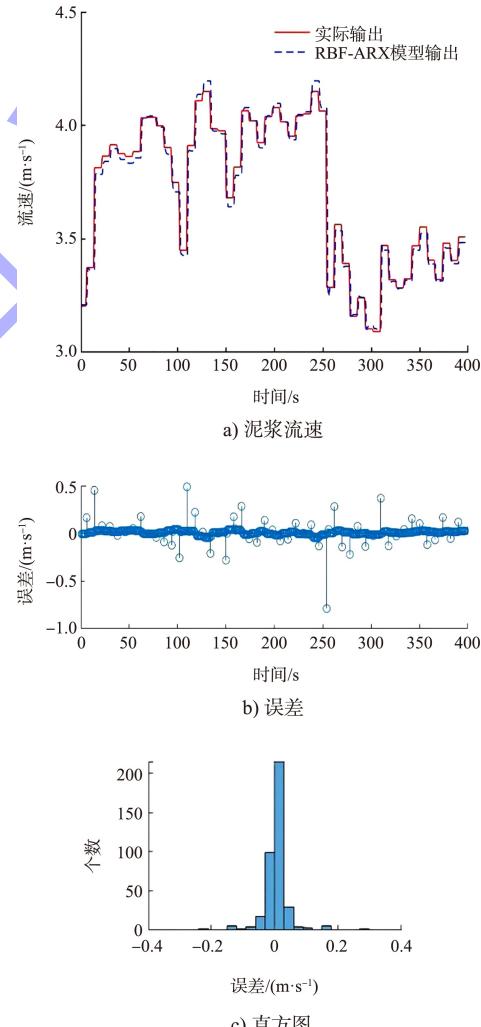


图 3 $K=3$ 、 $W=3$ 时模型训练结果

根据图 3a) 可以看出，RBF-ARX 模型所预测的输出和传感器实际测量的输出基本一致；图 3c) 显示模型的 MSE 误差大多集中在 $-0.1 \sim 0.1$ m/s，由于水下条件复杂，影响条件较多，因此误差在

可以接受范围内。为了检验模型的精确性和适用性, 使用测试集对预测模型进行校验, 结果见图 4。可以看出, 该模型的 MSE 误差集中在 $-0.2 \sim 0.2 \text{ m/s}$, 该误差也在接受范围内, 因此认为该模型能够准确地模拟管道输送系统的运行状态。因此选择该模型作为预测控制器的预测模型, 能够提高所设计控制器的控制精度以及多变环境下的鲁棒性。

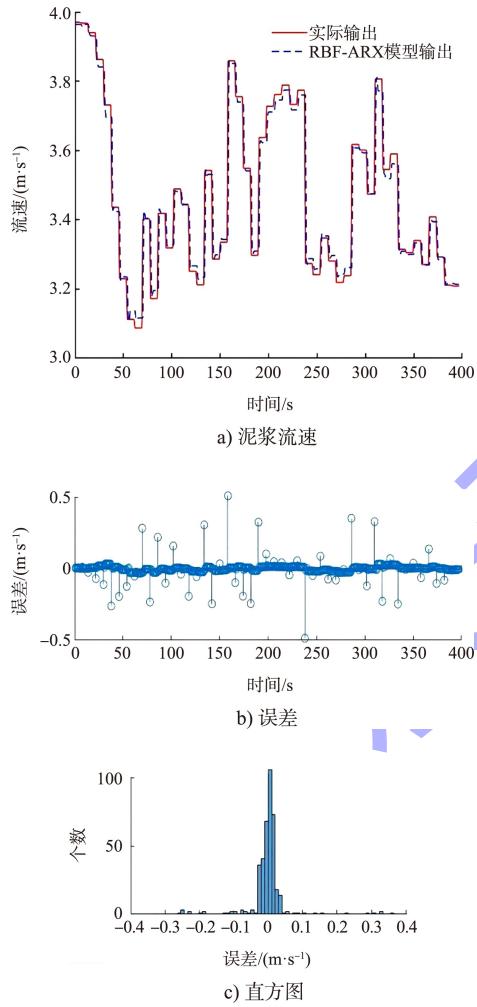


图 4 模型校验结果

3.2 控制器设计及仿真

在 Simulink 仿真平台下, 本文基于 RBF-ARX 模型设计模型预测控制器, 根据转换后得到的状态空间方程建立 PID 控制器和模型预测控制器进行仿真。在仿真中, 泥泵转速根据实际情况调节范围为 $0 \sim 300 \text{ r/min}$ 。泥泵转速初始值设置在 203 r/min 时, 其对应的泥浆流速为 3.5 m/s 。厦门港的土质大多属于中砂, 土壤颗粒平均粒径为

0.4 mm , 根据式(5)(6)计算得到最低实用流速为 4.5 m/s , 设置泥浆的期望流速为最低实用流速, 时间范围设置为 150 s , 其中 PID 控制器设置比例因子为 180, 积分因子为 20, 微分因子为 -5 。MPC 控制器设置预测步长为 15, 控制步长为 7, 期望轨迹平滑度为 0.1 。

在无扰动情况下, 模型预测控制器和 PID 控制器的阶跃响应仿真结果, 见图 5。可以看出, 两个控制器都可以达到期望输出值, 所设计的模型预测控制器在 33 s 就达到了期望输出后续保持稳定。而设计的 PID 控制器在 34 s 时第 1 次达到期望输出, 而后产生 2 次振荡, 在 103 s 时才保持稳定。另外, 所设计的 PID 控制器产生了 4% 的超调量, 而模型预测控制器没有发生超调。因此, 所设计的模型预测控制器在稳定时间、振荡次数和超调量等方面都优于 PID 控制器。

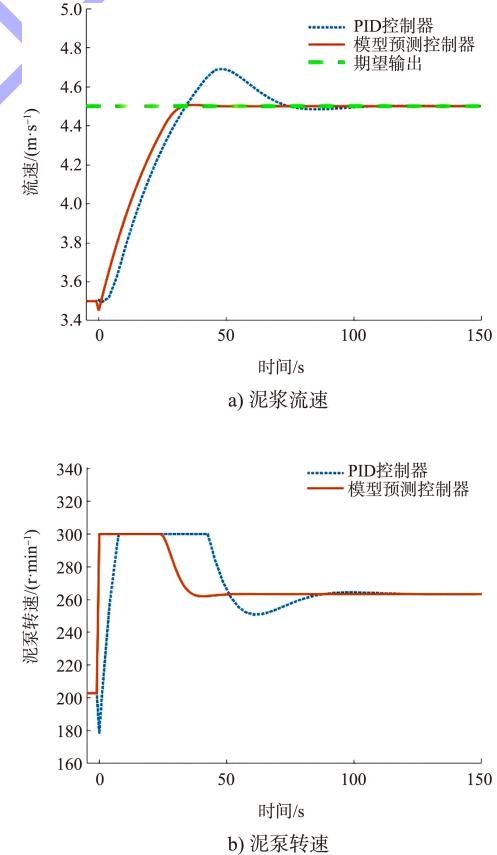


图 5 控制效果对比

4 结论

1) 在不同工况下, 耙吸挖泥船管道输送系统受复杂环境影响难以建立精确的物理模型, 本文

使用 SCADA 系统中的真实离线数据, 建立了基于 RBF-ARX 模型的泥浆输送模型并确定了模型参数和阶次, 该模型能够准确地描述耙吸挖泥船管道输送过程的运行状态, 还具有辨识时间短、适用性高的特点。

2) 目前耙吸挖泥船普遍使用 PID 控制器对泥浆流速进行调节, 本文利用所构建的 RBF-ARX 模型设计模型预测控制器对期望目标进行仿真, 并与 PID 控制器进行比较。结果表明, 基于 RBF-ARX 模型的预测控制器优于 PID 控制器, 能更快达到期望流速并保持稳定, 从而提高疏浚效率。

参考文献:

- [1] BRAAKSMA J. Model-based control of hopper dredgers[D]. Delft: Delft University of Technology, 2008.
- [2] SU Z, ZHOU Z X, YU M H. Online estimation of soil grain diameter during dredging of hopper dredger using continuous-discrete feedback particle filter[J]. Sensors and materials, 2019, 31(3): 953-968.
- [3] PRIYANKAE B, MAHESWARI C, MEENAKSHIPRIYA B. Parameter monitoring and control during petrol transportation using plc based PID controller [J]. Journal of applied research and technology, 2016, 14(2): 125-131.
- [4] PRIYANKAE B, MAHESWARI C, THANGAVEL S.

(上接第 131 页)

3) 3 个导流方案均能有效归顺口门区航行水流和消除回流, 从而达到减淤冲淤的效果。结合各方案消除回流和归顺口门区航行水流的改善情况, 提出了合理的减缓引航道口门区泥沙淤积的工程方案布置。

参考文献:

- [1] 祁永升, 许光祥, 许锡宾, 等.湘江近尾洲二线船闸下游引航道口门区通航水流条件改善措施[J].水运工程, 2021(3): 126-131.
- [2] 李君涛, 戴阳豪, 金辉, 等.扩建船闸下游口门区泥沙淤积特性及减淤技术研究[J].中国港湾建设, 2020, 40(4): 1-5.
- [3] 王建平, 刘超, 张世宝, 等.风光枢纽扩建船闸上游口门区通航水流条件试验研究[J].水运工程, 2021(1): 156-161.

Online monitoring and control of flow rate in oil pipelines transportation system by using plc based fuzzy-PID controller[J]. Flow measurement and instrumentation, 2018, 62: 144-151.

- [5] WEI C Y, WEI Y, JIZ. Model predictive control for slurry pipeline transportation of a cutter suction dredger [J]. Ocean engineering, 2021, 227: 108893.
- [6] 刘伯鸿, 连文博, 李婉婉. 基于 RBF-ARX 模型的高速列车预测控制器设计[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(5): 73-79.
- [7] 刘丽丽, 左继红, 吴军, 等. 基于 RBF-ARX 模型的三容水箱系统预测控制[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(9): 1774-1778, 1852.
- [8] 罗竹. RBF-ARX 模型在船舶航向保持系统建模中的应用[J]. 控制工程, 2019, 26(7): 1348-1352.
- [9] 高龙, 杨奕, 任晓琳, 等. 基于 BP 神经网络的空气源热泵温度 MPC 策略[J]. 控制工程, 2021, 28(9): 1765-1772.
- [10] 毛丽霞. 基于动态矩阵控制的工业炉主蒸汽压力优化算法设计[J]. 工业加热, 2021, 50(8): 33-35.
- [11] 邓霞容. 基于 RBF-ARX 模型的预测控制在温度实时控制系统中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [12] 邱灏, 曹斌, 夏建新. 粗颗粒物料管道水力输送不淤临界流速计算[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 103-108.
- [13] 黄倬楠. 基于小波去噪的 BP 神经网络在变形监测中的应用[J]. 北京测绘, 2021, 35(9): 1211-1215.

(本文编辑 王璁)

- [4] 任恒杰. 船闸下游引航道口门区淤积防治研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- [5] 胡浩, 王崇宇, 舒适. 复杂条件下扩建船闸口门区布置及改善措施[J]. 水运工程, 2019(3): 103-109, 120.
- [6] 赵家强, 于广年. 韩江东溪船闸通航水流条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2019(10): 134-140.
- [7] 李焱, 汤小霞. 长洲水利枢纽四线船闸引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 66-72.
- [8] 李辉. 融江麻石船闸改扩建工程枢纽整体通航水流条件数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [9] 吕彪. 基于非结构化网格的具有自由表面水波流动数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [10] 吕彪, 王志平, 黎国森, 等. 完全三维自由表面非静水压力流动数学模型 I: 算法[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 143-149.

(本文编辑 武亚庆)