



绞吸挖泥船无人操控自动挖泥系统研制

丁树友¹, 顾 明¹, 俞孟蓁²

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212003)

摘要: 由于绞吸挖泥船无人操控自动挖泥系统涉及人工智能、流体力学、土力学、疏浚工艺、信号处理等多个学科, 国内鲜见绞吸挖泥船无人操控自动挖泥系统研制的文献报道。本研究依托“天鲲号”无人操控自动挖泥系统的研制过程, 对设计方案、控制功能、自动挖泥控制模式、挖泥系统模型、自动挖泥控制器等关键环节进行论述。采用现场试验的方法测试“天鲲号”无人操控自动挖泥系统运行效果, 结果表明采用该无人操控自动挖泥系统可以实现稳产、高产的目的, 与人工操控相比生产率提高 15%。该无人操控自动挖泥系统提升了绞吸挖泥船自动化技术水平, 开启了我国疏浚行业自动化新时代。

关键词: 绞吸挖泥船; 人工智能; 无人操控自动挖泥系统

中图分类号: U 615.38 **文献标志码:** A

Development of unmanned automatic dredging system for cutter suction dredger

DING Shu-you¹, GU Ming¹, YU Meng-hong²

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd, Tianjin 300461, China; 2. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Because the unmanned automatic dredging system of the cutter suction dredger covers many disciplines such as artificial intelligence, fluid mechanics, soil mechanics, dredging process, signal processing, etc., the research progress in this field is slow, and there are few reports in the literature on the development of unmanned automatic dredging systems for cutter suction dredgers. In response to the above-mentioned problems, relying on the development process of the “Tian Kun Hao” unmanned automatic dredging system, we discuss the key aspects of the design scheme, control function, automatic dredging control mode, dredging system model and automatic dredging controller. The field test method is used to test the operation effect of the unmanned automatic dredging system of “Tian Kun Hao”. The results show that the unmanned automatic dredging system can achieve stable production and high productivity, and the productivity is improved by 15% compared with the manual control. The unmanned automatic dredging system improves the automation technology of the cutter suction dredger and opens a new era of automation in China’s dredging industry.

Keywords: cutter suction dredger; artificial intelligence; unmanned automatic dredging system

各类挖泥船在疏浚作业过程中主要依靠驾驶员凭经验进行手动操作。由于疏浚作业工艺参数繁多、易变, 长时间的手动操作易使驾驶员产生疲劳, 无法集中注意力进行精细化施工。同时, 受驾驶员技术水平、施工经验、情绪波动等因素影响, 疏浚作业的实际产量往往远低于预计产量。

近年来, 随着人工智能技术的快速发展与应用^[1-2], 国内外已开始研发基于智能控制器和具有自学习能力的人工智能(AI)疏浚系统以提升疏浚船舶的智能化水平^[3], 实现高效、安全的疏浚作业能力。国际上, 荷兰 IHC 公司开展了一系列智能疏浚技术的研究, 其最具有代表性的成果是自动挖掘控制器(automatic cutter controller, ACC)和

收稿日期: 2020-04-02

作者简介: 丁树友(1960—), 男, 教授级高工, 从事挖泥船信息与控制技术研究。

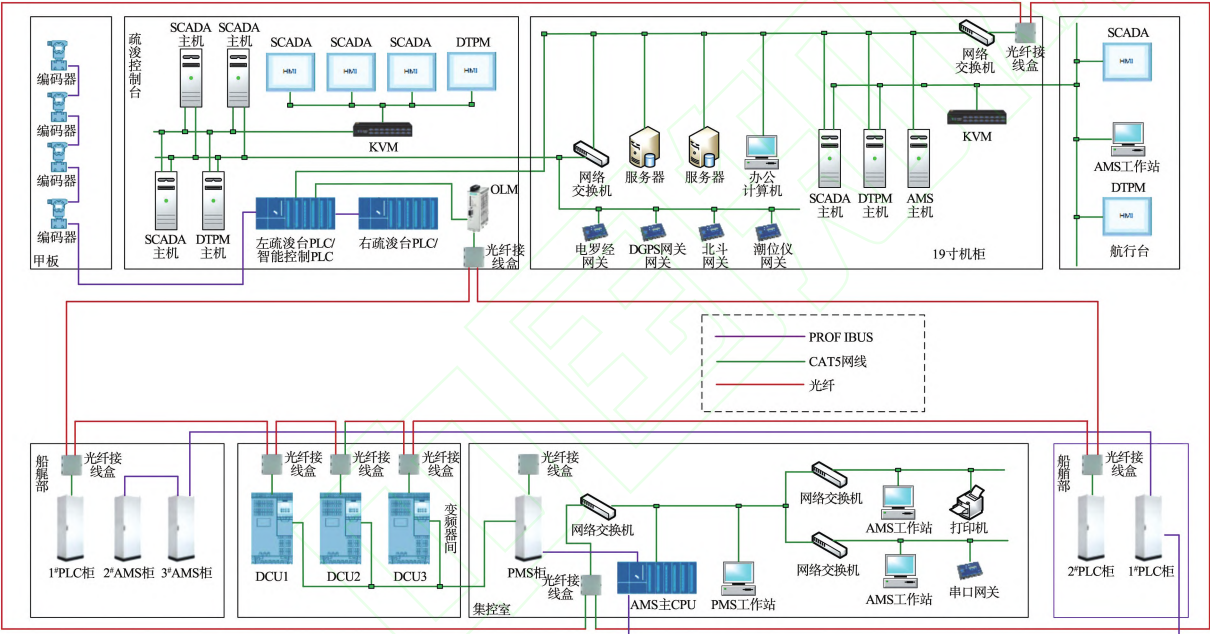
自动泵送控制器 (automatic pump controller, APC), 代表着当今世界的先进水平。2019 年 1 月研制成功的自航绞吸船“天鲲号”首次尝试自动挖泥技术, 安装了自主研发的基于人工智能技术的绞吸挖泥船无人操控自动挖泥系统, 标志着我国疏浚技术又一次取得重大突破。

1 无人操控自动挖泥系统方案设计

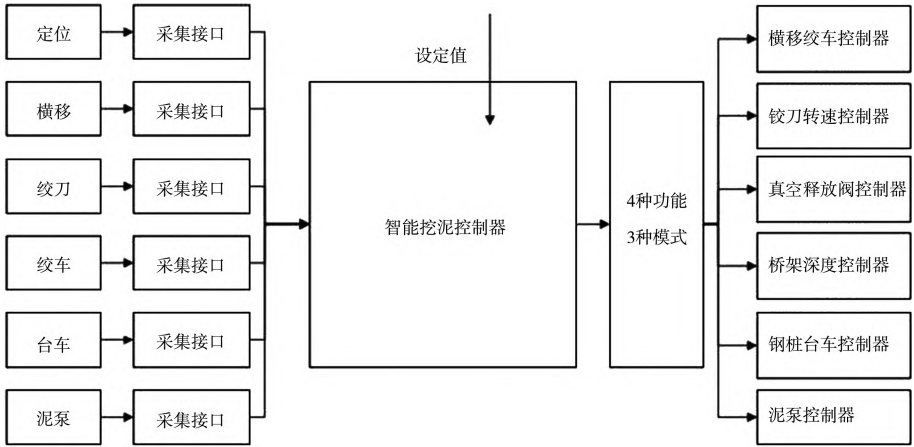
绞吸挖泥船无人操控自动挖泥系统能够最大程度地优化疏浚施工过程, 降低驾驶员的工作强

度, 确保疏浚作业长期保持在最佳工作状态, 较好地解决驾驶员技术水平和施工经验差异导致的疏浚作业实际产量远低于预计产量的问题, 达到提高产量和施工效率、降低能耗的目的。

绞吸挖泥船无人操控自动挖泥系统由一系列疏浚仪器仪表、网络设备、控制设备、显示设备以及应用软件等构成, 在绞吸挖泥船集成监控系统框架基础上, 直接扩展了无人操控自动挖泥 (ADS) 功能。其整船集成监控系统结构和 ADS 系统结构见图 1。



a) 集成监控系统



b) ADS系统

图 1 绞吸挖泥船集成监控系统和 ADS 系统结构

2 ADS 控制功能设计

2.1 目标参数自动功能

“目标参数自动”是绞吸挖泥船目标参数自动挖泥控制的简称, 是一种基于施工工艺目标参数的自动挖泥控制方法。

该方法首先依据施工工况设定施工工艺参数

目标值, 如横移速度、桥架深度、绞刀转速、台车行程、真空值等, 然后模型预测控制器通过联合控制绞刀、横移、桥架绞车、钢桩台车和真空释放阀等实现挖泥船按施工工艺次序自动挖掘作业, 施工过程中始终保持被控目标施工参数保持在设定目标值(图 2)。

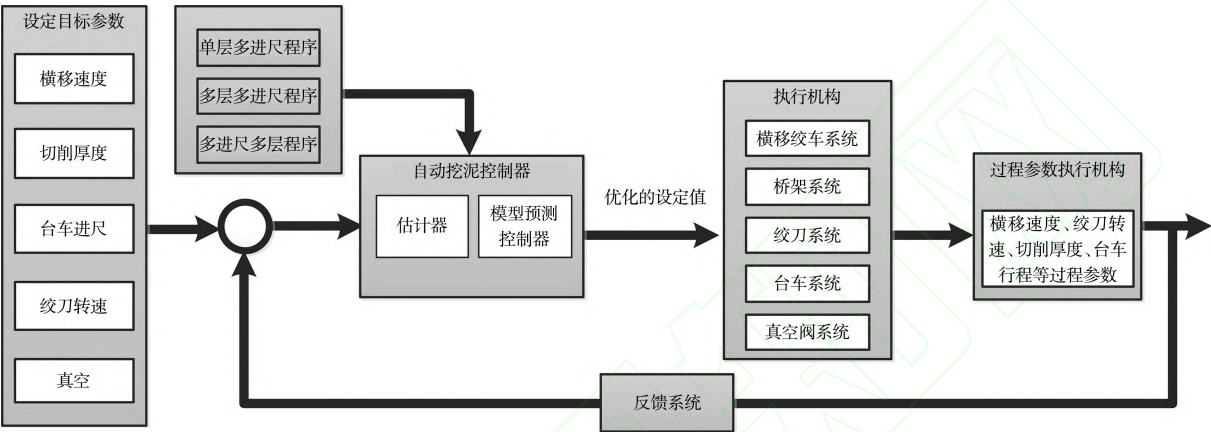


图 2 目标参数自动挖泥控制功能

2.2 目标产量自动功能

“目标产量自动”是在目标参数自动挖泥控制功能的基础上, 依据管路输送浓度自动控制横移速度, 当管路输送浓度高于设定值时自动降低横移速度, 反之增加横移速度, 确保挖掘产量稳定在设定目标范围。

该方法首先根据作业工况设定目标产量参数, 再通过联合控制绞刀、横移、桥架绞车、钢桩台车和真空释放阀等实现挖泥船按施工工艺自动挖掘作业。

2.3 最大产量自动功能

“最大产量自动”是指在目标产量自动控制功能的基础上, 泥浆输送流速控制器和横移控制器联合自动控制横移速度, 且泥浆输送流速控制器优先, 当管路平均流速持续低于管路输送临界流速时, 自动降低横移速度以降低挖掘浓度, 确保最大挖掘产量下的平稳输送能力。

该方法首先根据作业工况设定疏浚工况参数, 再通过疏浚模型估算临界流速, 联合控制绞刀、横移、桥架绞车、钢桩台车和真空释放阀等来实现挖泥船按施工工艺自动挖掘作业, 在保证泥浆流速大于临界流速的前提下, 尽可能提高横移速

度, 从而实现最大产量的自动挖泥。

2.4 经济产量自动功能

“经济产量自动”是指引入挖泥产量与油耗比参数, 系统依据疏浚大数据寻优估算最佳经济性的产量目标。以该产量为目标, 通过泥浆输送流速控制器和横移控制器联合自动控制横移速度, 确保挖掘浓度与输送产量保持在设定经济产量目标值。

3 ADS 作业模式设计

3.1 单层多进尺自动控制模式

单层单进尺自动控制模式是在当前绞刀挖掘层实现 1 个台车行程内的自动挖掘控制。其流程如下:

- 1) 在每个台车行程内, 桥架绞刀自动下放到设定挖掘深度, 横移自动向左(或右)摆动, 接近挖掘边线时减速且到边线后自动停止;
- 2) 钢桩台车自动按设定值进尺, 桥架绞刀下方深度保持不变, 横移自动回摆再进行反向疏浚, 直至该层挖泥结束, 横移自动回中心线停止;
- 3) 挖掘过程中可以根据实际施工环境设计同轨迹再次挖掘。

台车进尺时具有桥架偏差抬起功能以保护设

备,挖掘深度、挖掘宽度偏差控制功能以满足施工精度,进尺时横移自动回摆控制功能以提高施工效率。单层单进尺自动控制模式见图 3a)。

3.2 多层多进尺自动控制模式

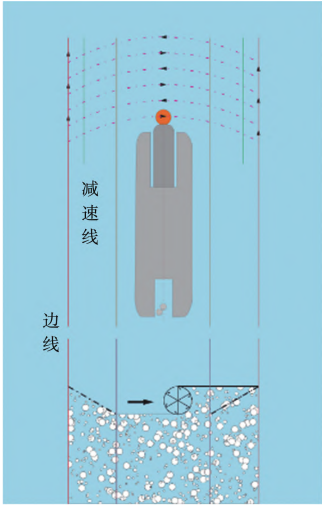
多层多进尺自动控制模式流程如下:

1) 在每个台车行程内,桥架绞刀自动下放到设定挖掘深度,横移自动向左(或右)摆动接近挖掘边线时减速且到边线后自动停止;

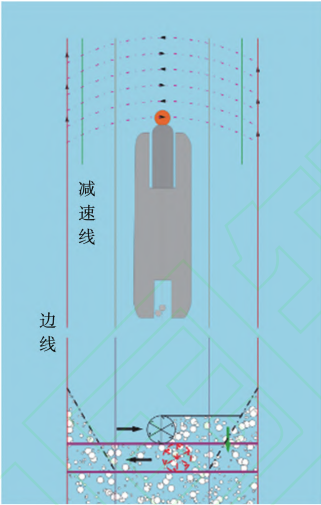
2) 桥架绞刀按设定下放步距下放到下一深度,钢桩台车行程保持不变,横移自动回摆再进行反向疏浚,直至绞刀切削完这一疏浚剖面后,桥架绞刀自动起升到初始泥面位置;

3) 钢桩台车自动按设定值进尺,自动开始下一个疏浚剖面疏浚作业,重复以上过程,直至该台车行程挖泥结束,横移自动回中心线停止。

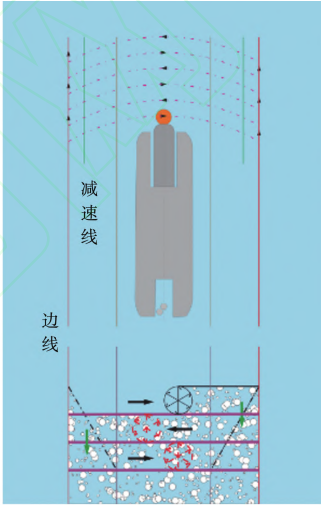
多层多进尺自动控制模式见图 3b)。



a) 单层单进尺



b) 多层多进尺



c) 多进尺多层

图 3 自动挖泥控制模式

3.3 多进尺多层自动控制模式

多进尺多层自动控制模式流程如下:

1) 在每个台车行程内,系统按照单层单进尺自动控制模式逻辑开挖第 1 层,钢桩台车自动收回到零位;

2) 桥架绞刀按设定下放步距自动下放;

3) 自动开始下一层疏浚作业,重复以上过程,直至该台车行程挖泥结束,横移自动回中心线停止。

界工况变化,监测及分析自身设备的运行状态。同时,采集的数据须进行多模态融合与数据处理,形成完整的感知信息。

ADS 系统控制过程中涉及的主要信号数据如表 1 所示。

针对挖泥船施工过程监测数据为非线性—离散性的特点,选择贝叶斯滤波、连续-离散型反馈粒子滤波等滤波算法作为系统智能感知测量数据处理模型。

4 ADS 系统模型的建立

系统基于模型的人工智能方法,采用粒子滤波等状态估计方法,构建描述疏浚挖掘/输送过程的动态模型。

4.1 智能感知测量数据处理模型

为使 ADS 系统的表现媲美优秀驾驶员,需要其具备人的感知能力,通过采集各类传感器数据(如浓度计、流量计、压力仪表等),实时感知外

表 1 ADS 系统主要信号数据

数据来源	数据名称
绞刀	绞刀挖深与位置、绞刀转速、绞刀扭矩、绞刀功率
横移	横移速度、横移拉力
钢桩台车	台车行程
管路输送	泥泵转速、泥泵吸入真空、泥泵排出压力、泥浆浓度、泥浆流速
设定参数	挖掘深度设定、切削厚度设定、横移加/减速率设定、横移速度设定、台车进尺设定

4.2 疏浚机理模型

疏浚过程具有受土质、环境、作业机具效能和施工工艺等影响的特点, 而且这些条件会随着疏浚地点的变化而不断变化。在自动挖泥系统中将使用多个疏浚机理模型以确定挖掘厚度、土质粒径、泥泵及输送管路特性等一系列参数(表 2)。

5 ADS 控制器

采用预测控制器(图 4)模型构建绞吸挖泥船 ADS 控制器(图 5), 各子控制器通过共同涉及的控制参数综合控制来实现前述功能与模式。

表 2 疏浚机理模型	
名称	内容
挖掘模型	开挖深度估计、切削深度与切削力关系、密度预报 ^[4]
输送模型	平均粒径估计、管路平均浓度计算、管路阻尼系数计算、管路泥浆输送水力损失、临界流速估算、泥泵泵效率计算、泥泵功率计算
间接数据模型	产量功耗计算、绞刀深度计算、台车步进计算、浓度计算、产量计算

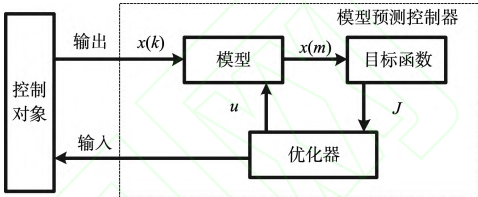


图 4 预测控制器

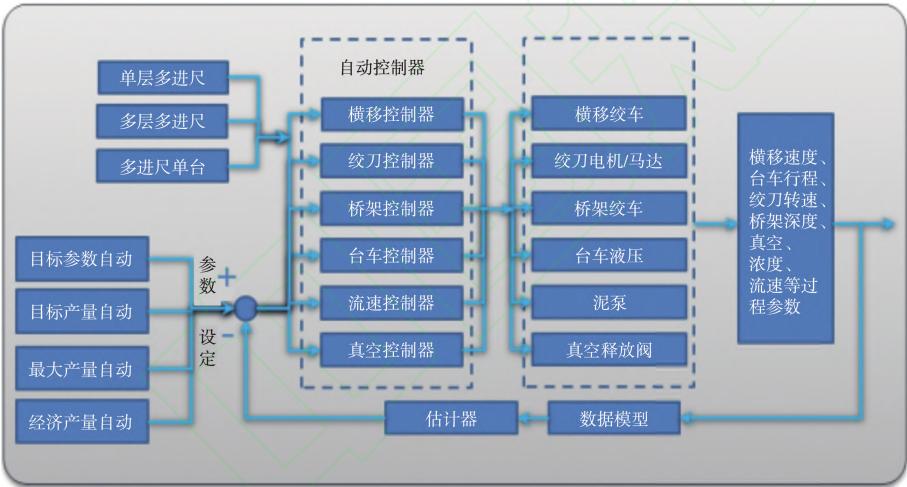


图 5 ADS 控制器

5.1 横移自动控制器

横移自动控制器具有 2 种功能:

1) 边线控制: 当绞刀摆动接近边线时自动降低横移速度, 绞刀到达边线时自动回摆开始反向挖泥;

2) 浓度-横移速度控制: ①在横移摆动挖泥过程中, 当预报密度大于设定值时自动降低横移速度, 反之增加横移速度; ②当管路流速低于管路输送临界流速时降低横移速度, 反之增加横移速度。

5.2 绞刀转速自动控制器

绞刀转速自动控制器的作用是控制绞刀转速自动跟随横移速度变化, 以获得与挖掘土质相适

应的绞刀切片厚度。

5.3 桥架升降自动控制器

桥架升降自动控制器具有 2 种功能: 1) 当水位变化导致绞刀深度偏离设定偏差时, 自动控制桥架上升或下降, 确保精确挖深; 2) 当桥架绞刀摆动到达边线时, 根据控制模式和设定的绞刀下放步距, 桥架绞刀自动按照设计边坡线下放至设定深度, 确保精确挖掘边坡。

5.4 输送泥浆流速自动控制器

输送泥浆流速自动控制器具有 2 种功能: 1) 根据施工工况设定, 自动控制泥泵系统工作在最优工况点(APC); 2) 当管路流速低于输送临界流速时, 将向横移绞车自动控制器发出降速指令, 反

之将向横移绞车自动控制器发出升速指令,确保管路输送浓度和流速,实现高产稳产。

5.5 钢桩台车自动控制器

钢桩台车自动控制器的作用是,在桥架横移摆动至边线时,根据控制模式和设定的台车进尺值,控制台车自动进尺。

6 系统软件

开发了1套绞吸挖泥船智能型无人操控自动挖泥控制系统软件(V1.0),并在“天鲲号”成功应用。系统软件功能包含集成监控功能与自动挖泥功能两部分。

1) 系统软件基于数据库进行构架,采用C/S模式,机舱监测报警与疏浚过程监控相对独立。服务器端实现数据的集中采集、计算与存储。客户端主要实现疏浚过程控制、设备状态监测、故障报警诊断、历史数据处理与分析、远程数据传输等功能,包括疏浚轨迹与剖面显示系统(DTPM)客户端、数据采集与监视控制系统(SCADA)客户端、监测报警系统(AMS)客户端、远程传输客户端。

2) 自动挖泥功能包括疏浚总揽、疏浚管路、绞车、绞刀、钢桩台车、综合监测、功能与模式、参数控制等软件界面。

7 ADS 现场测试

2018年11月,以“天鲲号”为试验船舶,在江苏启东吕四港疏浚工程中测试了ADS系统。该系统仅需一键启动后,即可自动完成实时优化的横移速度挖泥、横移换向、台车进步、桥梁下放等挖泥过程。挖泥产量始终稳定保持在高产区,

与人工操控相比,挖泥生产率平均提高15%以上,该系统提升了绞吸挖泥船自动化技术水平,提高了绞吸式疏浚船舶的疏浚施工效率,不仅能够广泛地应用在我国建造的全电驱自航/非自航绞吸式挖泥船上,也可以用于现有绞吸挖泥船控制系统的升级改造,推广应用前景广泛。

8 结语

1) 首创绞吸挖泥船智能自动挖泥3种自动控制模式和4种自动控制功能,研发了智能感知测量系统数据滤波算法,构建了疏浚挖掘、泥泵、输送和临界流速4种疏浚模型,发明了绞吸挖泥船智能自动挖泥控制方法。

2) 研发了横移自动控制、绞刀转速自动控制、桥架升降自动控制、钢桩台车子自动控制器,形成了基于模型的预测控制器,实现疏浚作业过程的无人操控。

3) 开发绞吸挖泥船无人操控自动挖泥控制成套软件(V1.0),实船挖泥应用表明,挖泥生产率平均提高15%以上,推广应用前景广阔。

参考文献:

- [1] LEE J.CPS: 新一代工业智能[M].邱伯华,译.上海:上海交通大学出版社,2017.
- [2] 中国信息物理系统发展论坛.信息物理系统白皮书(2017)[M].北京:中国信息物理系统发展论坛,2017.
- [3] BRAAKSMA J.Model-based control of hopper dredgers[D].Delft: Delft University of Technology, 2008.
- [4] 丁树友,田俊峰.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, 103.

(本文编辑 郭雪珍)