DOI：10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.013
李明超，孔锐，秦亮，等. 基于施工循环的绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析[J]. 水利水运工程学报，2018(6)：98-104.（LI Mingchao，KONG Rui，QIN Liang，et al. Smoothness analysis of dredging operation of cutter suction dredger based on construction cycles[J]. Hydro-Science and Engineering，2018(6)：98-104.（in Chinese））

基于施工循环的绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析

李明超[1]，孔　锐[1]，秦　亮[2]，韩　帅[1]，田桂平[2]
（1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津　300354；2. 中交天津航道局有限公司，天津　300042）

摘要：绞吸挖泥船是水利工程疏浚施工领域广泛使用的一类工程船舶，安装在船上的工况监测系统能够实时记录船体的疏浚作业状态，但是所获得的实时监测数据并不能直接提供船体疏浚作业平稳度的关键信息。提出一种基于施工循环的绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析评价方法，通过选择合适的施工监测参数作为绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析指标，然后在预定义的施工循环内对平稳度指标进行计算分析，得到挖泥船在整个施工期间的疏浚作业平稳度变化情况，以及每个施工循环内的疏浚作业平稳度值。据所得的疏浚作业平稳度，能够判断挖泥船操作人员的疏浚作业平稳度优劣，并直观评价其相应的疏浚产量，为绞吸挖泥船的疏浚作业提供有效指导。同时，通过与传统的疏浚作业平稳度分析方法进行比较可见，所提出的方法能够定量地反映绞吸挖泥船在整个施工期间和每个施工循环中的平稳度变化情况，弥补了传统方法的不足，具有更强的实用性和优越性。

关　键　词：绞吸挖泥船；实时监测数据；疏浚施工循环；平稳度指标；疏浚产量
中图分类号：TV851　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-640X(2018)06-0098-07

疏浚工程是借助人力、机械或水力方法挖掘水下土石方并进行运输或吹填的工程。绞吸挖泥船因对水域范围和疏浚土质具有广泛的适用性，已成为常用的疏浚装备。目前，在疏浚工程领域中，对绞吸挖泥船的研究主要集中在以下几个方面。首先，由于绞吸挖泥船的疏浚施工过程位于水下，疏浚环境隐蔽，很难精确控制绞吸挖泥船的施工作业。对绞吸挖泥船的疏浚作业优化与控制进行研究，可以达到降低作业成本和提高作业效率的目的。Tang 等[1-3]提出了以专家系统为基础的绞吸挖泥船疏浚作业在线优化、故障预防和控制决策系统；Yue 等[4]提出了一种挖泥船生产效率预测模型；田俊峰等[5]开发了绞吸挖泥船计算机辅助疏浚决策系统，指导疏浚操作人员优化疏浚参数，提高绞吸挖泥船的生产效率；Jeong 等[6]提出了一种基于多种权重因子的最优河道疏浚管理模型，用来辅助疏浚的决策。对绞吸挖泥船疏浚作业仿真及数值模拟的研究，可以优化疏浚施工过程，提高疏浚产量。倪福生等[7-8]提出了绞吸挖泥船疏浚系统仿真的基本构思，研制了多通道环形柱幕绞吸挖泥船施工模拟系统；Miao 等[9-10]开发了疏浚工程土质三维建模与可视化分析系统，实现数字钻孔勘探模拟等功能；曲红玲等[11]通过建立辐射沙脊群洋口港区二维波浪潮流泥沙数学模型，对航道开挖方案实施后的潮流、泥沙进行了数值模拟；段志龙[12]采用计算机仿真方法对绞吸挖泥船的疏浚施工过程进行仿真分析与应用研究。此外，还有部分学者对疏浚工程中的相关施工管理进行了研究。Skibniewski 等[13]提出了一种基于网络的项目管理系统以促进疏浚工程的绩效；赵德招等[14]阐述了疏浚工程中疏浚土的管理利用及发展方向；陈建军等[15]提出了无线传输技术在疏浚工程船舶远程施工管理中的应用。尽管已经存在很多对绞吸挖泥船的研究，却很少有相关论文就绞吸挖泥船的实时监测数据进行探究。

收稿日期：2018-01-12
基金项目：国家优秀青年科学基金资助项目(51622904)；天津市杰出青年科学基金资助项目(17JCJQJC44000)
作者简介：李明超(1979—)，男，湖北仙桃人，教授，博士，主要从事水利工程仿真与优化分析研究。
E-mail：LMC@tju.edu.cn

绞吸挖泥船的疏浚作业过程受土质、水文气象等复杂施工环境因素的影响，是一个多因素相互作用、相互影响的过程，这使得挖泥船的疏浚作业具有风险大、疏浚产量不稳定的特点。在疏浚施工过程中，疏浚作业平稳度是影响绞吸挖泥船施工的重要因素，平稳的施工操作能够避免船体发生故障，还能减少燃料的损耗和维护成本的投入。然而，目前仍然没有一个定量的指标对绞吸挖泥船的疏浚作业平稳度进行评价分析。

因此，本文通过挖掘分析绞吸挖泥船的实时监测数据，对挖泥船在疏浚施工过程中的疏浚作业平稳度进行评价，为船体操作人员驾驶水平的考核提供新的视角。研究分析的总体流程如图 1 所示，主要包括：①绞吸挖泥船监测数据的预处理；②确定绞吸挖泥船的施工循环；③选择绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析指标；④分析绞吸挖泥船疏浚作业平稳度；⑤为绞吸挖泥船的施工管理提供建议。

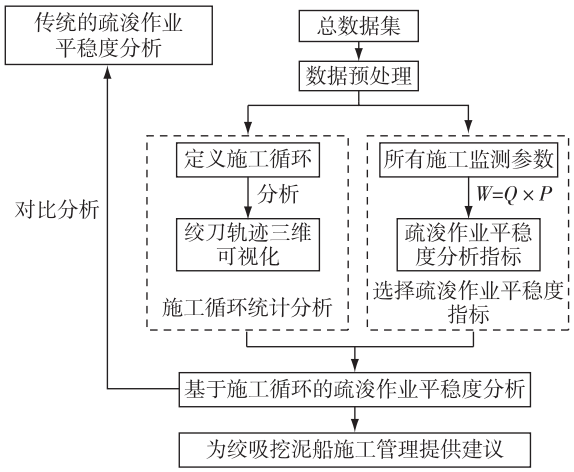

图 1　绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析流程

Fig. 1　Flow chart of dredging operation smoothness analysis of cutter suction dredger

1　实时监测数据预处理

1.1　绞吸挖泥船监测数据

研究数据集是从安装在绞吸挖泥船上的综合工况监测系统上获得，综合工况监测系统能全方位监测绞吸挖泥船在施工过程中的疏浚作业状态，包括绞吸挖泥船的绞刀转速、泥管排出压力、水下泵转速、摆宽等 255 个监测参数的实时数据信息，并每 2 s 反馈 1 次。在数据集中，记录了绞吸挖泥船 2012 年 7 月 7 日上午 4:00 至 7 月 12 日上午 4:00 共 5 d 的船体施工状态信息。

1.2　数据预处理

绞吸挖泥船的疏浚环境复杂，其综合工况监测系统所监测的数据具有维度多、数量庞杂的特点。在疏浚作业过程中，也常常由于操作人员的操作水平、监测系统的传感器灵敏度等原因，给监测数据集带来很多冗余的、有“噪声”的数据。因此，需要进行以下几方面的数据预处理操作。

(1)绞吸挖泥船综合工况监测系统属于非完全智能系统，切泥厚度、管路总阻尼等监测参数的数据值需要操作人员手动输入，但往往由于操作人员的疏忽，导致很多监测参数值的缺失。对于这些缺失的监测参数值，若能在相近施工时段内找回，则按照找回的值进行替换补充；否则，认为是 0。

(2)在绞吸挖泥船综合工况监测系统中，由于传感器的灵敏度原因，即使挖泥船上的部分设备不工作，在波浪、风等外界环境的干扰下，监测参数的传感器返回值仍然在 0 值附近波动，应将这些数据视为 0 来处理。

(3)绞吸挖泥船在疏浚作业过程中，船体并非始终处在疏浚作业状态，故采用二值函数判断绞吸挖泥船是否处于疏浚作业状态。对于非疏浚作业状态的情况，应进行筛除，仅对正常疏浚作业的情况进行分析。

当绞吸挖泥船处于非疏浚作业状态时，绞刀深度小于 0(绞刀深度值大于 0 时，绞刀位于水面之下；绞刀深度值小于 0 时，绞刀位于水面之上)，或者横移速度、绞刀转速均等于 0。可设绞吸挖泥船施工参数时序函数为 $s(x)$：

$$s(x) = s_1(x)s_2(x)s_3(x) \tag{1}$$

$$C(x) = \begin{cases} 0 & s(x) \leqslant 0 \\ 1 & s(x) > 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中：$s_1(x)$ 为绞刀深度时序函数；$s_2(x)$ 为横移速度时序函数；$s_3(x)$ 为绞刀转速时序函数；$C(x)$ 为绞吸挖泥船的状态函数。当 $C(x)=1$ 时，为绞吸挖泥船正常疏浚作业状态，即正常工作状态。

2 绞吸挖泥船施工循环

2.1 疏浚施工循环定义

绞吸挖泥船在疏浚作业过程中,以主定位钢桩为中心,绞刀头从疏浚区域的施工边线切入,当摆宽达到设计要求时,绞刀头以相反的方向再次回到初始施工边线位置,绞吸挖泥船疏浚施工经过 2 个摆宽,定义挖泥船的这一施工过程为 1 个完整的施工循环(图 2)。在绞吸挖泥船结束 1 个完整的施工循环之后,改变绞刀头的设定深度,挖掘更深一层的土质,开始新一轮的施工循环,即垂直摆动的施工模式;或者不改变绞刀头的设定深度,增加绞刀头的前进步长,继续挖掘上层的土质,开始新一轮的施工循环,即水平摆动的施工模式。绞吸挖泥船的整个疏浚施工过程就是不断重复着这个完整的施工循环。

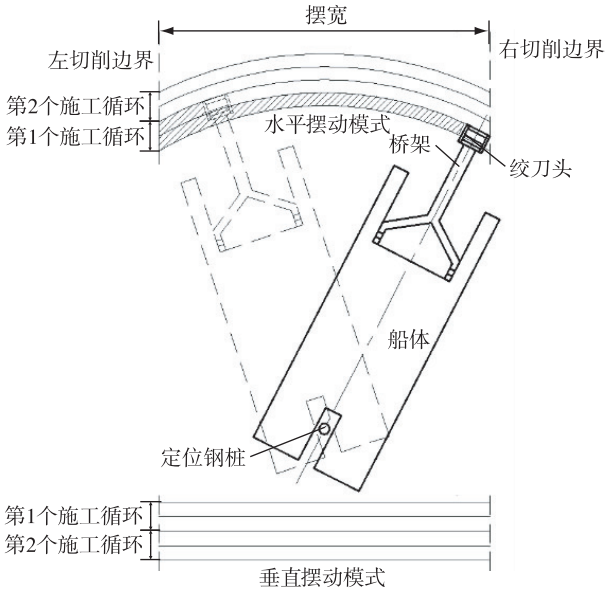

图 2 绞吸挖泥船施工循环

Fig. 2 Construction cycles of a cutter suction dredger

2.2 施工循环次数统计分析

根据综合工况监测系统所监测的数据集,对绞吸挖泥船的绞刀位置信息,即绞刀在疏浚施工过程中的三维坐标,在三维建模软件中进行可视化分析,得到绞吸挖泥船的施工轨迹。根据上述绞吸挖泥船的施工循环定义,挖泥船从疏浚区域的施工边线切入,摆宽达到设计要求后,再以相反的方向到达初始施工边线位置,经过 2 个连续设计摆宽的疏浚作业即完成了 1 个完整的施工循环。绞吸挖泥船的综合工况监测系统对摆宽也进行了监测,取部分摆宽的监测数据,如图 3 所示,摆宽值随着绞吸挖泥船施工循环的重复而不断变化,在疏浚施工中,摆宽达到设计要求时,所监测的摆宽值的绝对值也达到最大值。根据绞吸挖泥船摆宽的变化特征及绞刀施工轨迹分析结果,统计 5 d 中所有的施工循环个数为 103 个,每天的施工循环数分别为 57,7,0,4 和 35 个。

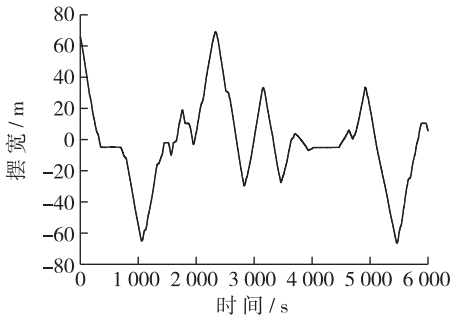

图 3 绞吸挖泥船的摆宽随时间的变化

Fig. 3 Changes of swing width of cutter suction dredger with time

在绞吸挖泥船疏浚作业过程中,并不是任意状态都存在疏浚产量,比如在船体处于绞刀清洗等状态时,式(2)中的 $C(x)=1$,即绞吸挖泥船处于正常工作状态,但这时绞吸挖泥船并不存在疏浚产量,这种状态对分析船体的疏浚作业平稳度没有任何意义,在进行平稳度分析时应该去除。基于上述情况,对绞吸挖泥船的每个施工循环进行重新分析,在第 1 天中,存在 2 个疏浚产量为零的施工循环,去除这 2 个施工循环后,共存在 101 个既处于正常工作状态又存在疏浚产量的施工循环,对这 101 个施工循环进行疏浚作业平稳度分析。

3 疏浚作业平稳度分析指标

绞吸挖泥船的疏浚作业主要由土质削切系统、桥架升降系统、船舶横移系统、泥浆输送系统、台车步进系统 5 个相关系统协调作业来完成。土质削切系统用来控制绞刀的旋转削切土质,桥架升降系统用来控制绞刀头的升降,泥浆输送系统将疏浚土质输送到吹填区域,台车步进系统控制绞吸挖泥船的前移。绞吸挖泥船的疏浚产量反映在这 5 个相关系统中,主要受土质削切系统和泥浆输送系统的影响,即挖掘疏浚产量和输送疏浚产量。而疏浚施工中的疏浚产量主要受输送疏浚产量决定。输送疏浚产量(以下简称疏浚产量)取决

于泥浆流量和泥浆浓度[16]。在一定的客观工况条件下，为提高绞吸挖泥船的疏浚产量，一方面可提高泥泵的输送流量，另一方面可提高泥浆浓度。对于绞吸挖泥船的泥泵输送流量，根据泥泵特性[16]，要使泥泵的排出流量增加，需要增加挖泥船主机的输出功率和降低挖泥船的扬程。然而，自绞吸挖泥船建造开始，主机的输出功率就已经确定。在疏浚工程确定后，相应的施工工况条件，如土质、排距及相应的排高、所需的扬程等也就基本确定。因此，泥泵的输送流量一般不能提高。仅在发现泥泵流量下降的时候，泥管排出压力也相应改变，此时需要采取相应的措施，保证泥泵有稳定的流量输出。泥浆浓度主要受土质、工况等条件决定。对绞吸挖泥船的操作人员来说，使泥浆浓度处于疏浚工程相关技术规范规定的平均浓度以上、接近最高浓度，并保持平稳的工作状态，具有非常重要的现实意义。而过高或者过低的泥浆浓度，均使得泥管排出压力改变，造成泥泵的排出流量也发生变化。

根据上述分析，泥浆浓度、泥浆流量与泥管排出压力值的变化密切相关，泥管排出压力值能够表征疏浚产量的变化。而且，绞吸挖泥船综合工况监测系统对绞刀转速、水下泵转速、泥管排出压力等施工参数均进行了监测。因此，选择泥管排出压力作为绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析指标。以泥管排出压力值在某施工期间内的标准差作为挖泥船的疏浚作业平稳度，则绞吸挖泥船在某施工期间内的疏浚作业平稳度如式(3)所示：

$$D = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - m)^2} \tag{3}$$

式中：D 为绞吸挖泥船在某施工期间内的疏浚作业平稳度(kPa)；x_i 为某一时刻的泥管排出压力值(kPa)；m 为绞吸挖泥船在某施工期间内的泥管排出压力平均值(kPa)；n 为某施工期间内所监测泥管排出压力值的数量。

疏浚作业平稳度 D，是绞吸挖泥船的泥管排出压力值在某施工期间内的标准差，能表征绞吸挖泥船的疏浚作业平稳程度，其值越大，说明绞吸挖泥船的疏浚作业越不平稳，反之，说明疏浚作业越平稳。绞吸挖泥船的疏浚作业平稳度可以衡量操作人员在不同时间段的驾驶水平，进而为绞吸挖泥船操作人员的业绩考核提供参考。

4　疏浚作业平稳度分析与评价

4.1　传统的疏浚作业平稳度分析

传统的绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析方法，依据疏浚施工经验，在挖泥船的疏浚仪表控制台观察平稳度分析指标(主要为影响泥浆浓度和泥浆流速的施工监测参数)随时间的变化特征，进而进行船体的疏浚作业平稳度定性分析[2]。以数据集中的 2012 年 7 月 11 日上午 4:00 到 7 月 12 日上午 4:00 所监测的数据为例，对这种绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析方法进行阐述。

泥管排出压力指标见图 4。从图 4 中虽然能够直观地看出泥管排出压力随时间的变化趋势，并得到定性的绞吸挖泥船疏浚作业平稳度，但并不能得到定量的平稳度值提供给绞吸挖泥船操作人员作为指导。因此，这种绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析方法有一定的缺陷。

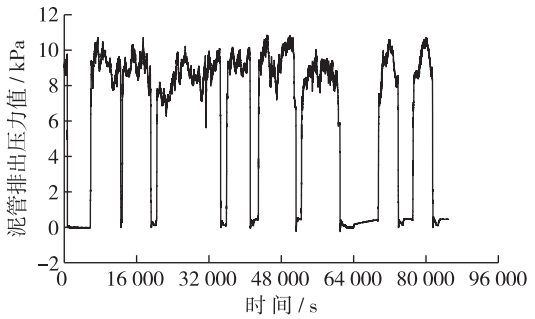

图 4　泥管排出压力随时间变化

Fig. 4　Changes in discharge pressure of mud pipe with time

4.2　基于施工循环的疏浚作业平稳度分析

用经过预处理之后的 2012 年 7 月 7 日上午4:00至 7 月 12 日上午 4:00 共 5 d 的监测数据来进行绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析。根据统计得到的既处于正常工作状态又存在疏浚产量的施工循环数，其中第 1～2 天的施工循环共有 62 个，第 3 天的施工循环为 0 个，第

4~5 天的施工循环共有 39 个。根据式(3)得到每个施工循环内绞吸挖泥船的疏浚作业平稳度。图 5 为绞吸挖泥船疏浚作业平稳度指标的分析结果,从图 5 可以看出疏浚作业平稳度值在每个施工循环内的变化情况,操作人员并不是一直保持着平稳的驾驶操作,而是不断重复着平稳和非平稳驾驶操作。事实上,受水下地形复杂程度、风浪等外界因素的影响,挖泥船不可能一直处于理想的疏浚作业平稳状态(即疏浚作业平稳度的值为 0)。

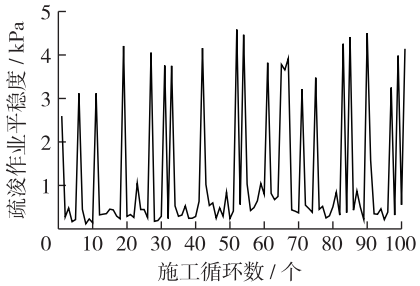

图 5 疏浚作业平稳度分析结果

Fig. 5 Analysis results of dredging operation smoothness

在绞吸挖泥船的疏浚作业平稳度分析结果中,定义疏浚作业平稳度 $D \leqslant 1$ kPa 的情况为疏浚作业平稳,$D>1$ kPa 的情况为疏浚作业不平稳。因此,由图 5 得到疏浚作业平稳的施工循环数为 74 个,疏浚作业不平稳的施工循环数为 27 个。

绞吸挖泥船在每个施工循环中的疏浚产量见图 6。分别对疏浚作业平稳与疏浚作业不平稳情况进行分析(图 7),可见在疏浚作业平稳度 $D \leqslant 1$ kPa 的 74 个施工循环中,疏浚产量大于 1 000 m^3/s 的施工循环占 75.68%;在疏浚作业平稳度 $D>1$ kPa 的 27 个施工循环中,疏浚产量大于 1 000 m^3/s 的施工循环占 11.11%。由于绞吸挖泥船的疏浚产量受疏浚土质、时间利用率等多因素影响[16],疏浚作业平稳度数值低的施工循环对应的疏浚产量不一定高,但是,绞吸挖泥船在疏浚作业平稳的情况下,疏浚产量大于 1 000 m^3/s 的施工循环数所占的百分比明显高于疏浚作业不平稳的情况。因此,疏浚作业平稳度仍是影响疏浚产量的重要因素,平稳的绞吸挖泥船疏浚作业有利于提高疏浚产量。

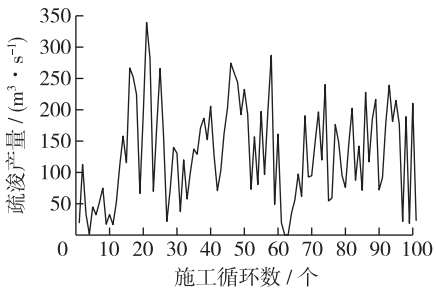

图 6 绞吸挖泥船在各个施工循环的疏浚产量

Fig. 6 Dredging production of cutter suction dredger in every construction cycle

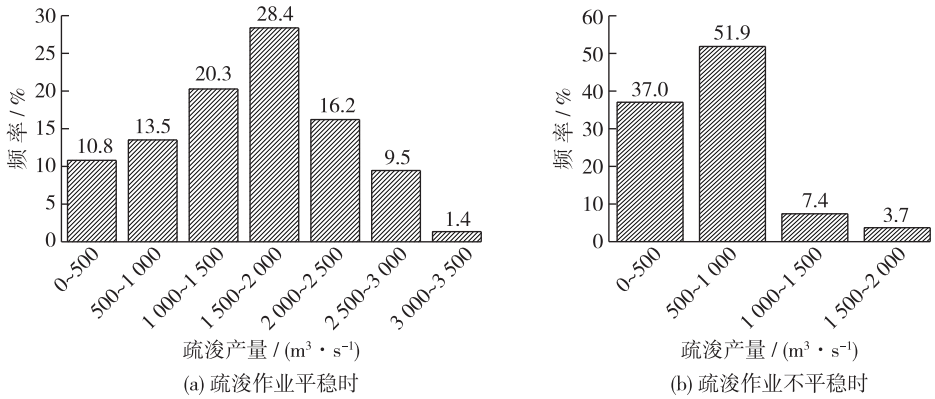

图 7 疏浚作业时各疏浚产量对应的施工循环数所占百分比

Fig. 7 Percentages of construction cycles numbers corresponding to dredging production during dredging operation

因此,绞吸挖泥船的疏浚作业平稳度能够直观地反映操作人员在不同时期的驾驶情况,进而反映操作人员驾驶水平的高低。根据绞吸挖泥船的疏浚作业平稳度,能够对操作人员在不同时期的业绩考核提供建议。

5 结 语

基于绞吸挖泥船疏浚施工过程中的实时监测数据,综合分析施工监测参数,选择合适的疏浚作业平稳度

分析指标，对绞吸挖泥船疏浚作业平稳度进行研究，结果表明：

(1)与传统方法相比，所提出的方法能够定性及定量地表征绞吸挖泥船在整个施工期间和每个施工循环中的疏浚作业平稳度变化。

(2)疏浚作业平稳度是影响疏浚产量的重要因素，绞吸挖泥船的平稳疏浚作业有利于提高疏浚产量。但对于疏浚土质、时间利用率、施工环境等影响绞吸挖泥船疏浚产量的因素有待进一步深入研究。

(3)绞吸挖泥船的疏浚作业平稳度能够直观地反映操作人员在不同时期的驾驶操作平稳情况，进而反映操作人员驾驶水平的高低，为操作人员在不同时期的业绩考核和绞吸挖泥船的施工管理提供了新的视角。

参 考 文 献：

[1] TANG J Z, WANG Q F. Online fault diagnosis and prevention expert system for dredgers[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(1): 511-521.

[2] TANG J Z, WANG Q F, ZHONG T Y. Automatic monitoring and control of cutter suction dredger[J]. Automation in Construction, 2009, 18(2): 194-203.

[3] TANG J Z, WANG Q F, BI Z Y. Expert system for operation optimization and control of cutter suction dredger[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(3): 2180-2192.

[4] YUE P, ZHONG D H, MIAO Z J, et al. Prediction of dredging productivity using a rock and soil classification model[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2015, 141(4): 06015001.

[5] 田俊峰，顾明，丁树友，等. 绞吸挖泥船计算机辅助疏浚决策系统[J]. 水运工程，2005(3): 20-23. (TIAN Junfeng, GU Ming, DING Shuyou, et al. Computer-aided dredging monitoring and decision-making system of cutter suction dredger[J]. Port and Waterway Engineering, 2005(3): 20-23. (in Chinese))

[6] JEONG A, KIM S, KIM M, et al. Development of optimization model for river dredging management using MCDA[J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 369-373.

[7] 倪福生，赵立娟，顾磊，等. 绞吸挖泥船疏浚仿真研究[J]. 系统仿真学报，2012，24(11): 2271-2274. (NI Fusheng, ZHAO Lijuan, GU Lei, et al. Simulation of dredging of cutter suction dredger[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(11): 2271-2274. (in Chinese))

[8] 丁宏锴，倪福生. 绞吸式挖泥船疏浚动态特性与仿真系统设计[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2002，30(6): 40-43. (DING Hongkai, NI Fusheng. Dynamic behavior and simulation system of a cutter suction dredger[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2002, 30(6): 40-43. (in Chinese))

[9] MIAO Z J, LI M C, ZHONG D H. Numerical calculation of channel dredging volume using 3D digital stratum model[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(2): 90-96.

[10] MIAO Z J, LI M C, ZHONG D H. Automatic generation method of geological cross-sections in dredging engineering based on 3D solid NURBS models[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(6): 393.

[11] 曲红玲，尤薇，马洪亮. 洋口港区烂沙洋北水道航道开挖可行性研究[J]. 水利水运工程学报，2014(1): 70-77. (QU Hongling, YOU Wei, MA Hongliang. Feasibility studies of waterway excavation in the northern Lanshayang tidal channel in Yangkou port area[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(1): 70-77. (in Chinese))

[12] 段志龙. 绞吸挖泥船挖掘过程数字化仿真及应用[D]. 天津：天津大学，2014. (DUAN Zhilong. Digital simulation and application of dredging process of cutter suction dredger[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))

[13] SKIBNIEWSKI M J, VECINO G A. Web-based project management framework for dredging projects[J]. Journal of Management in Engineering, 2011, 28(2): 127-139.

[14] 赵德招，刘杰，程海峰，等. 长江口深水航道疏浚土处理现状及未来展望[J]. 水利水运工程学报，2013(2): 26-32. (ZHAO Dezhao, LIU Jie, CHENG Haifeng, et al. Current situation and future prospect of dredged material disposal in the Yangtze estuary deepwater navigation channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 26-32. (in Chinese))

[15] 陈建军，王炜. 基于无线传输技术的疏浚工程船舶远程施工管理及设备故障诊断[J]. 舰船电子工程，2009(6): 167-170. (CHEN Jianjun, WANG Wei. Remote working management and devices fault diagnosis of dredging engineering ship based on wireless transmission technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2009(6): 167-170. (in Chinese))

[16] JTJ 319—1999 疏浚工程技术规范[S]. (JTJ 319—1999 The technical code of dredging engineering[S]. (in Chinese))

Smoothness analysis of dredging operation of cutter suction dredger based on construction cycles

LI Mingchao[1], KONG Rui[1], QIN Liang[2], HAN Shuai[1], TIAN Guiping[2]

(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300354, *China*; 2. *CCCC Tianjin Dredging Company Limited*, *Tianjin* 300042, *China*)

Abstract: The cutter suction dredger is a kind of construction equipment which is widely used in dredging construction in the field of hydraulic engineering. The states of dredging operations can be measured by a work condition monitoring system embedded into the dredger in real time. However, the obtained data cannot provide enough key information directly for the dredging operation smoothness. This paper presents a method to analyze and evaluate the dredging operation smoothness based on the construction cycles. At first, the appropriate monitoring parameters are selected as the index of the dredging operation smoothness. And then the dredging operation smoothness is analyzed in the predefined construction cycles, and the dredging operation smoothness values are obtained for both the whole dredging construction process and each construction cycle. According to the obtained results, the dredging operation smoothness of the operators and the corresponding dredging production can be evaluated intuitively, which provides an effective guidance for dredging operations. Meanwhile, compared with the traditional method for analyzing the smoothness of the dredging operations, the proposed method can reflect the changes in the smoothness values quantitatively for both the whole construction process and each construction cycle. In addition, the method given by this paper can make up for the shortcomings of the traditional method and has stronger practicability and superiority.

Key words: cutter suction dredger; real-time monitoring data; dredging construction cycle; smoothness index; dredging production