

基于智能疏浚模式的滨州港产能与控制模型



周丙浩

(中港疏浚有限公司, 上海 200136)

摘要: 高效疏浚是疏浚施工一直追求的目标, 也是研究的热点。基于智能疏浚模式的控制原理, 对智能疏浚模式下“航浚 6008”轮的滨州港工程施工数据进行分析, 建立产能与控制模型, 并对该耙吸挖泥船在滨州港工程的产能做进一步优化计算。结果表明, 生产率受流量、浆体相对密度与泥泵特性等因素的影响和制约; 疏浚过程中, 智能疏浚模式主要依靠活动罩控制器与泥泵控制器的相互配合, 当实际泥浆流速高于(最佳)设定值时, 在其他边界条件不变时, 活动罩自动控制器将活动罩下压, 使耙头生产率与泥泵汽蚀控制相匹配; 检测到泥泵汽蚀时, 泥泵控制器通过降低泥泵转速而降低泥浆流速, 以达到最佳混合物流速。

关键词: 耙吸挖泥船; 智能疏浚模式; 控制; 生产率

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0158-05

Capacity and control model of Binzhou Port based on intelligent dredging mode

ZHOU Bing-hao

(CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: Efficient dredging is not only the goal that has been pursued in the process of dredging construction, but also a hot spot in research. Based on the control principle of intelligent dredging mode, this paper analyzes the construction data of the Binzhou Port project under the intelligent dredging mode of “Hangjun 6008” ship, establishes the capacity and control model, and further optimizes and calculates the capacity of this trailing suction hopper dredger in the Binzhou Port project. The results show that the productivity is affected and restricted by flow rate, slurry relative density, and pump characteristics. In the process of dredging, the intelligent dredging mode mainly depends on the cooperation between the AVC and the EPC. When the actual flow rate is higher than the (optimal) set value and other boundary conditions are invariant, the AVC will press down the visor to match the productivity of the drag head with the vacuum limit of the pump. When the pump limit reaches, the EPC reduces the flow rate by reducing the speed of the pump to achieve the optimal mixture speed.

Keywords: trailing suction hopper dredger; intelligent dredging mode; control; productivity

近几年, 每年的全球疏浚量都达到数十亿立方米, 所产生的经济总量高达上百亿美元, 仅我国沿海, 疏浚需求就达6亿~7亿m³, 市场规模达数十亿美元^[1-2], 其中, 耙吸挖泥船完成的施工量占疏浚总量的一大半。但随着时间的推移, 港口航道拓宽和维护工程量有所降低, 耙吸挖泥船的市场占有率有所缩减。因此, 开展耙吸挖泥船优

化疏浚技术研究, 探讨优化疏浚流量的方式方法, 对提高挖泥船疏浚作业效率和增强市场竞争力具有重大意义。

近百年来众多学者从泥沙管道输送阻力、泥沙对泥泵特性的影响以及泥泵性能的提升等多方面进行了研究^[3-4], 为优化施工的计算提供了坚实的基础。本文基于以上相关的研究成果, 对耙吸

挖泥船施工中以最大生产率为目标的工作点优化方法进行研究和应用分析，尤其对最大生产率对应的泥浆输送管道流量进行计算分析和讨论，供相关人员参考，以达到提高其疏浚效率、节能减排的目的。

中港疏浚有限公司于2019年首次建造具有智能疏浚模式的2艘耙吸挖泥船“航浚6008”轮与“航浚6009”轮，针对“一人疏浚”模式下的疏浚效果，中港疏浚有限公司科信中心基于装舱时间、生产率、能耗、真密度、流速和密度等数据，进行了手动与智能疏浚模式下的疏浚性能对比试验与分析^[5]。在此基础上，本文基于智能疏浚模式的控制原理，对滨州港工程“航浚6008”轮的智能疏浚数据进行分析，建立产能与控制模型，并对“航浚6008”轮在滨州港工程的产能做进一步优化计算，从而提高疏浚效率和生产率，节本降耗。

1 控制原理

疏浚过程中，疏浚控制台的智能疏浚模式主要依靠活动罩控制器AVC与泥泵控制器EPC的相互配合，当实际泥浆流速高于(最佳)设定值时，AVC将活动罩下压，使耙头生产率与泥泵汽蚀控制相匹配；检测到泥泵汽蚀时，EPC通过降低泥泵转速降低泥浆流速，以达到最佳混合物流速。通过这种机制，AVC和EPC配合寻找最佳生产率点。具体控制方式如图1所示。

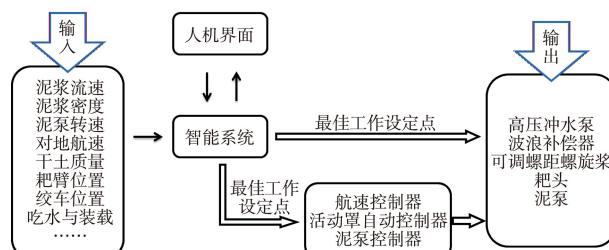


图1 控制方式

其中，最佳工作点为此时施工船舶能力范围内的生产率最大点，包括挖掘土方量与输送土方量之间的挖掘平衡点以及泥泵排压与管道阻力间的输送平衡点。航速控制器TSC从推进控制系统、耙臂位置监测系统、吃水和装载测量系统中获取

信息，在航行速度受到风、流、耙头阻力等各种因素影响时，以航速设定值为控制目标，通过向推进系统发出模拟信号，不断调整螺旋桨螺距，自动补偿耙头拖曳力和其他外力，并保持0.5~5 kn范围内的恒定航速，保证抽吸过程的平稳。TSC控制如图2所示，这一过程中，耙头所产生的疏浚力是一个非常重要的方面，如切割力以及耙头对船舶舷侧的拉力，随着土质的变化疏浚力会变得很大，此时需要100%的可用推进功率，而在正常航行时只需要5%~10%。

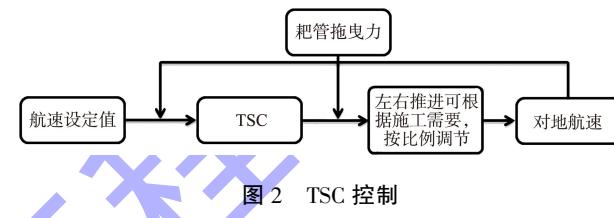
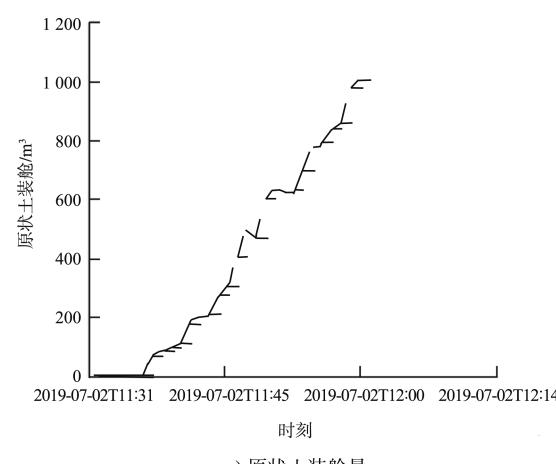


图2 TSC控制

2 智能疏浚模式下的滨州港产能分析

选取2019-06-27—2019-08-01期间“航浚6008”轮在滨州工程施工数据中运行比较稳定且特征比较明显的典型数据段分析处理。以生产率、挖深、浓度、真密度、排压等参数为评判指标，采用逐级筛选的方法，首先选择装舱生产率比较稳定的数据段，然后再逐级从中分别挑选挖深、浓度、真密度、排压、泥泵转速等参数稳定且具有代表性的数据。筛选后，得到稳定数据(2019-07-01T 00:02—03:02段、2019-07-07T00:26—00:59段、2019-07-12T04:40—06:27段、2019-07-02T11:31—11:59段)，以2019-07-02T11:31—11:59段数据为例，分析处理结果见图3。



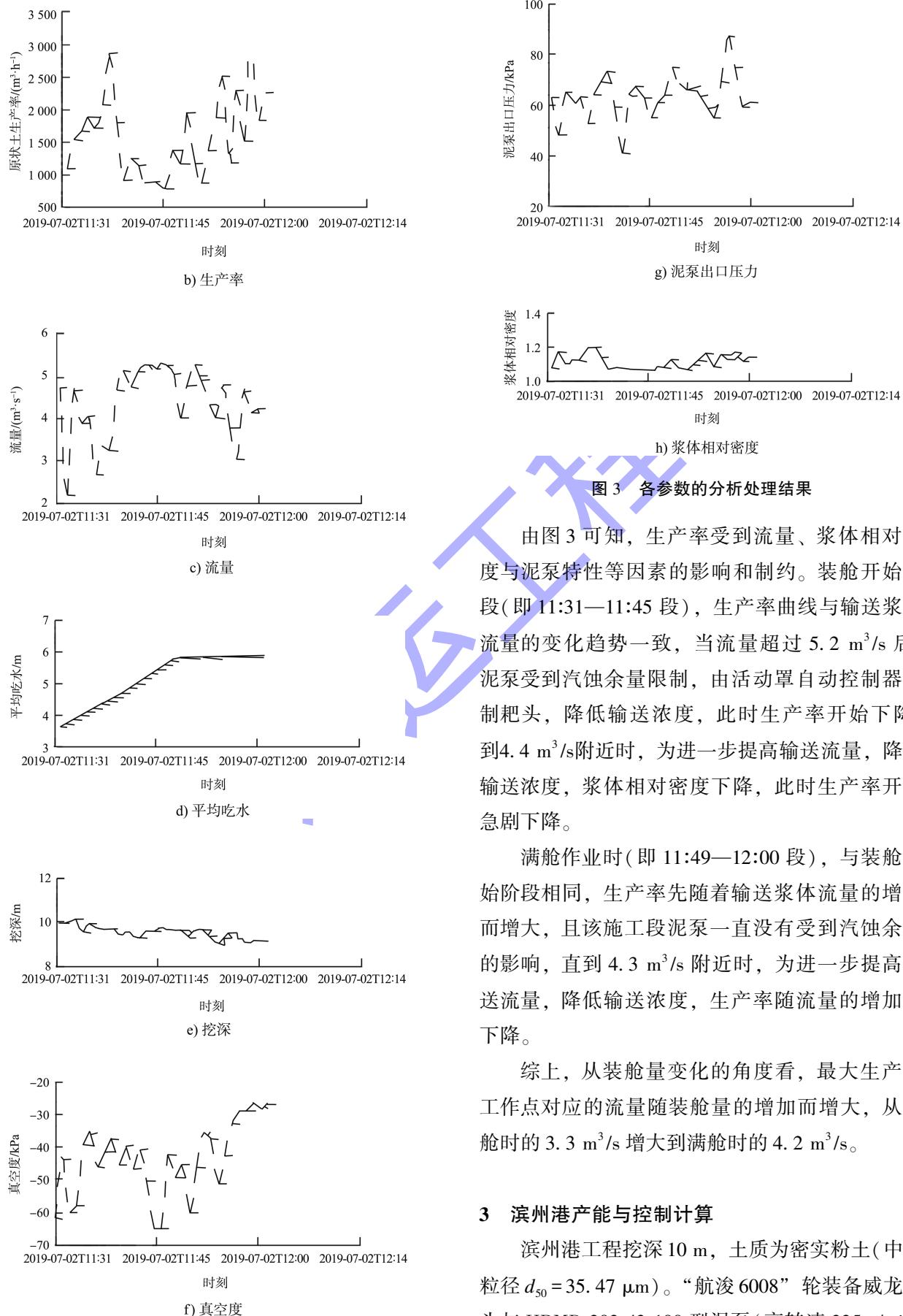


图 3 各参数的分析处理结果

由图 3 可知, 生产率受到流量、浆体相对密度与泥泵特性等因素的影响和制约。装舱开始阶段(即 11:31—11:45 段), 生产率曲线与输送浆体流量的变化趋势一致, 当流量超过 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 后, 泥泵受到汽蚀余量限制, 由活动罩自动控制器控制耙头, 降低输送浓度, 此时生产率开始下降。到 $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近时, 为进一步提高输送流量, 降低输送浓度, 浆体相对密度下降, 此时生产率开始急剧下降。

满舱作业时(即 11:49—12:00 段), 与装舱开始阶段相同, 生产率先随着输送浆体流量的增大而增大, 且该施工段泥泵一直没有受到汽蚀余量的影响, 直到 $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近时, 为进一步提高输送流量, 降低输送浓度, 生产率随流量的增加而下降。

综上, 从装舱量变化的角度看, 最大生产率工作点对应的流量随装舱量的增加而增大, 从空舱时的 $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 增大到满舱时的 $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 滨州港产能与控制计算

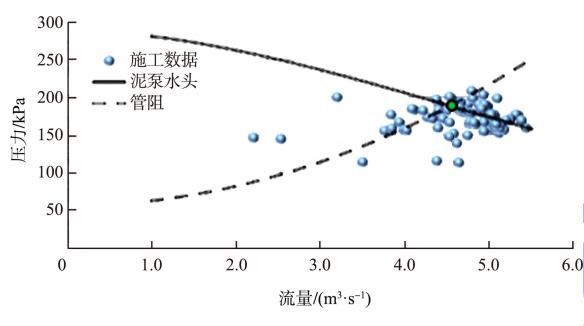
滨州港工程挖深 10 m, 土质为密实粉土(中值粒径 $d_{50} = 35.47 \mu\text{m}$)。“航浚 6008”轮装备威龙耙头与 HRMD 202-43-100 型泥泵(高转速 325 r/min ,

低转速 191 r/min), 装舱管路参数见表 1。

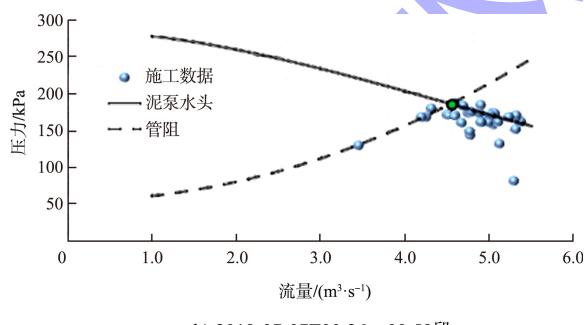
表 1 “航浚 6008” 轮进船管路

分段	管径/m	长度/m	45°弯头/个	90°弯头/个	闸阀/个	三通/个
耙管	1.0	33.030	0	3	1	0
泵前	1.0	6.618	0	3	0	1
斜管	0.9	11.179	0	1	0	0
直管 1	0.9	11.173	1	1	1	2
直管 2	0.9	19.664	1	1	1	1

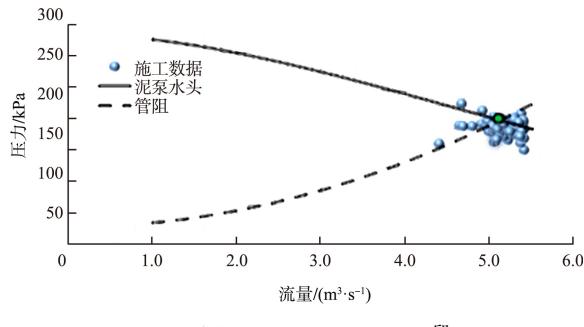
基于 2019-07-01T00:02—03:02 段、2019-07-07T00:26—00:59 段、2019-07-12T04:40—06:27 段、2019-07-02T13:51—14:09 段、2019-07-02T11:31—11:59 段的施工数据, 进行理论工作点计算, 结果如图 4 所示(其中泥泵水头已换算为 kPa 表示)。



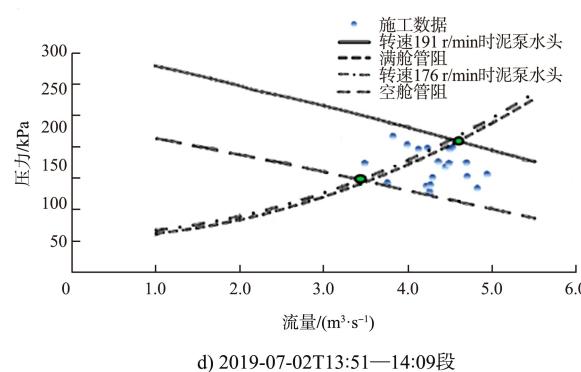
a) 2019-07-01T00:02—03:02段



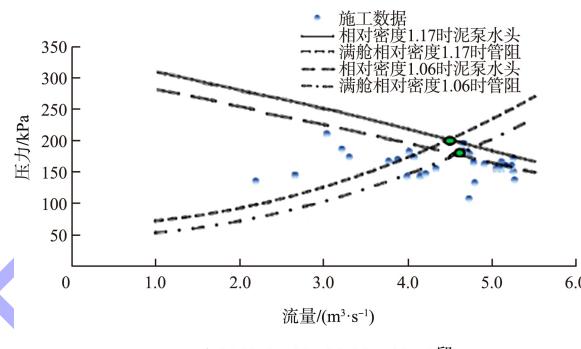
b) 2019-07-07T00:26—00:59段



c) 2019-07-12T04:40—06:27段



d) 2019-07-02T13:51—14:09段



e) 2019-07-02T11:31—11:59段

图 4 理论工作点计算对比曲线

由图 4 可知, 随着施工段的变化, 理论工作点也随之发生改变; 与实际数据分析结果相吻合, 理论工作点对应的流量随装舱量的增加而增大; 空舱时, 理论工作点对应流量约 $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$; 满舱时, 理论工作点对应流量约 $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大可达 $5.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 。理论工作点对应流量与实际施工数据基本吻合, 计算模型及其参数的选择符合作业需求。

根据实际施工与模拟计算分析结果, 对“航浚 6008”轮滨州港工况下的生产率进行计算与优化分析, 结果见表 2。对于满舱和空舱两种施工工况, 关键流速取 0.77 m/s , 泥泵转速为 191 r/min , 航速为 3 kn ; 满舱时, 输送泥浆密度为 1453 kg/m^3 , 平均流速为 6.91 m/s , 生产率可达 $9341 \text{ m}^3/\text{h}$; 空舱时, 输送泥浆密度为 1210 kg/m^3 , 平均流速为 7.02 m/s , 生产率可达 $4101 \text{ m}^3/\text{h}$ 。优化后的流量-生产率曲线如图 5 所示。

表 2 施工参数优化计算结果

施工阶段	泥浆密度/ (t·m ⁻³)	生产率/ (m ³ ·h ⁻¹)	体积浓度/%	工作流量/ (万 m ³ ·h ⁻¹)	平均流速/ (m·s ⁻¹)	关键流速/ (m·s ⁻¹)	总排压/ kPa	泥泵效率	泥泵功率/ kW	泥泵转速/ (r·min ⁻¹)	航速/ kn
满舱	1.453	9 341	47.87	1.582 2	6.91	0.77	262	0.868	1 283	191	3
空舱	1.210	4 101	23.87	1.607 4	7.02	0.77	212	0.867	1 075	191	3

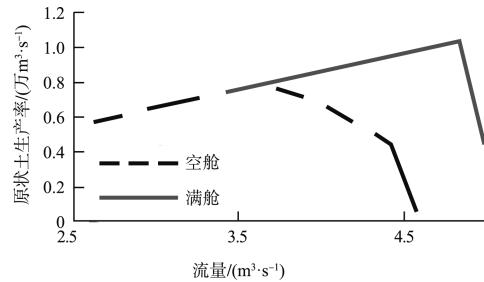


图 5 优化后的流量-生产率曲线

从图 5 可看出, 原状土生产率随流量的增加先增大后减小; 空舱时的工作点流量为 $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 满舱时的工作点流量为 $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$; 空舱时, 低流量阶段受汽蚀限制, 随着流量的增加, 最大浓度随之减小, 此时生产率降低, 当流量到达 $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近, 受泥泵功率限制, 降低泥泵转速, 此时生产率急剧下降; 满舱时, 泥泵位于水面以下约 4 m 深处, 泥泵不受汽蚀限制, 低流量阶段, 生产率随流量的增加而增大, 当流量到达 $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 受泥泵功率限制, 生产率开始剧烈下降。

综上, 智能模式下的疏浚产能受浓度、流量、泥泵功率等因素限制, 通过控制活动罩与泥泵转速控制流量与浓度, 实现最佳生产率。满舱时, 输送泥浆密度取 1.453 t/m^3 , 平均流速取 6.91 m/s , 生产率可达 $9 341 \text{ m}^3/\text{h}$; 空舱时, 输送泥浆密度取 1.210 t/m^3 , 平均流速取 7.02 m/s , 生产率可达 $4 101 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4 结论

1) 疏浚过程中, 疏浚控制台的智能疏浚模式主要依靠活动罩控制器与泥泵控制器的相互配合, 当实际泥浆流速高于(最佳)设定值时, AVC 将活动罩下压, 使耙头生产率与泥泵真空极限相匹配; 达到极限时, EPC 通过降低泥泵转速而降低泥浆

流速, 以达到最佳混合物流速。

2) 生产率受到流量、浆体相对密度与泥泵特性等因素的影响和制约。通过对滨州工程施工数据的处理分析结果可知, 生产率曲线与输送浆体流量的变化趋势基本一致, 当流量超过 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 后, 泥泵受到汽蚀余量限制, 由活动罩自动控制器控制耙头活动罩, 降低输送浓度, 此时生产率开始下降。到 $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近时, 为进一步提高输送流量, 降低输送浓度, 浆体相对密度下降, 此时生产率开始急剧下降。

3) 通过对“航浚 6008”轮在滨州工况下的优化计算可得, 满舱时, 输送泥浆密度取 1.453 t/m^3 , 平均流速取 6.91 m/s , 生产率可达 $9 341 \text{ m}^3/\text{h}$; 空舱时, 输送泥浆密度取 1.210 t/m^3 , 平均流速取 7.02 m/s , 生产率可达 $4 101 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

参考文献:

- [1] 北京智研科信公司.2016—2022 年中国疏浚工程市场调查与行业前景预测报告[EB/OL].(2015-12-10)[2016-03-25].http: www.libaogao.combaogao12101C0062015.html.
- [2] 李铭志, 何炎平, 黄超.超大型绞吸挖泥船泥沙输送系统优化设计[J].水运工程, 2017(2): 166-172.
- [3] LAHIRI S K, GHANTA K C.Prediction of pressure drop of slurry flow in pipeline by hybrid support vector regression and genetic algorithm model[J].Chinese journal of chemical engineering, 2008, 16(6): 841-848.
- [4] WILSON K C, ADDIE G R, SELLGREN A, et al. Slurry transport using centrifugal pumps[M]. New York: Springer Science and Business Media Inc., 2004.
- [5] 周丙浩, 焦鹏, 朱时茂, 等.基于经济控制器模式的耙吸挖泥船疏浚性能分析[J].水运工程, 2020(6): 194-198.

(本文编辑 王璁)