

· 施 工 ·



# 基于标准化的耙吸挖泥船疏浚设备 生产效率分析

杨增海, 周丙浩

(中港疏浚有限公司, 上海 200136)

**摘要:** 针对耙吸挖泥船疏浚设备参数标准化建设与应用的问题, 基于疏浚设备特性与工程经验, 采用对比归纳与标准化分析的方法, 建立耙吸挖泥船疏浚设备参数标准, 并结合实际施工案例, 进行实测与理论计算对比分析。结果表明, 主要疏浚设备参数的标准化建立对疏浚设备特性的把控与疏浚效率的提升十分重要, 须结合工程应用进行不断补充和完善, 从而为耙吸挖泥船疏浚作业提供参考。

**关键词:** 耙吸挖泥船; 疏浚设备; 标准化; 生产效率

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0211-05

## Production efficiency of trailing suction hopper dredger dredging equipment based on standardization

YANG Zeng-hai, ZHOU Bing-hao

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

**Abstract:** Aiming at the problem of the construction and application of dredging equipment parameter standardization for trailing suction hopper dredger, based on the characteristics of dredging equipment and engineering experience, we use the method of comparison, induction, and standardization analysis, establish the standard of dredging equipment parameters for trailing suction hopper dredger. Combining with the actual construction case, we compare and analyze the actual measurement and theoretical calculation. The results show that the standardization of main dredging equipment parameters is very important for the control of dredging equipment characteristics and the improvement of dredging efficiency, which needs to be supplemented and improved continuously combining with engineering application to provide the references for dredging operation of trailing suction hopper dredger.

**Keywords:** trailing suction hopper dredger; dredging equipment; standardization; production efficiency

随着疏浚行业现代化的推进、工程项目及施工技术与管理系统的日趋复杂, 传统粗放的生产管理方式已不能满足疏浚业的发展新常态。疏浚设备参数标准化契合大数据时代的发展, 能够充分优化施工工艺指导模式, 促使工艺指导更为灵活、便捷、高效, 进而实现多元化数据集中管理, 且有助于将经验转化为实际生产力, 为工作的开展

提供借鉴<sup>[1-2]</sup>。提高耙吸挖泥船的施工效率, 首先应了解疏浚设备特性, 充分发挥疏浚设备效率, 合理选择施工参数与施工方法, 理论结合实际情况, 不断建立和完善指导性的设备参数化标准。本文针对高压冲水压力、泥泵特性参数、波浪补偿器工作压力等设备参数, 根据工程经验, 建立标准化设备参数, 以施工数据为基础, 结合理论

收稿日期: 2020-11-02

作者简介: 杨增海(1988—), 男, 工程师, 从事疏浚吹填施工技术研究。

计算,验证不同工况下的生产效率计算结果,并进行对比分析给出参考标准,同时结合案例进行分析,为耙吸挖泥船疏浚作业提供参考与借鉴。

## 1 疏浚设备参数标准化

### 1.1 高压冲水压力标准

高压冲水射流对坚硬土质进行预切割,并破坏土壤结构,使之液化,使耙齿更易入土,耙齿出水对垂直冲水形成的膨胀区进行补水,加速土壤的液化,并降低耙头拖曳力,从而提高施工效率、减少耙齿磨损、提高航速<sup>[3-4]</sup>。

#### 1.1.1 1.3 万~1.7 万 m<sup>3</sup> 系列

1)挖泥时采用 1.2 MPa 高压冲水压力,流量 6 730 m<sup>3</sup>/h,可采用高压冲水双泵串联,每台泵压力 0.6 MPa,每台泵在电机额定转速时吸收的最大功率为 1 320 kW,泵转速为 414 r/min。

2)挖泥时采用 1.8 MPa 高压冲水压力,流量 4 390 m<sup>3</sup>/h,可采用双泵串联,每台泵压力 0.9 MPa,每台泵在电机增速时吸收的最大功率为 1 320 kW,泵转速为 465 r/min。

3)稀释泥舱时采用 0.6 MPa 高压冲水压力,流量 2×6 730 m<sup>3</sup>/h,可采用双泵并联,每台泵压力 0.6 MPa、流量 6 730 m<sup>3</sup>/h,每台泵在电机额定转速时吸收的最大功率为 1 320 kW,泵转速为 414 r/min。

#### 1.1.2 1.0 万~1.2 万 m<sup>3</sup> 系列

1)挖泥时采用 1.2 MPa 高压冲水压力,流量 4 500 m<sup>3</sup>/h,可采用双泵串联,每台泵压力 0.6 MPa,每台泵在电机额定转速时吸收的最大功率为 1 200 kW,泵转速为 580 r/min。

2)挖泥时采用 1.6 MPa 高压冲水压力,流量 4 100 m<sup>3</sup>/h,可采用双泵串联,每台泵压力 0.8 MPa 时,每台泵在电机增速时吸收的最大功率为 1 200 kW,泵转速为 635 r/min。

3)稀释泥舱时采用 0.6 MPa 高压冲水压力,流量 2×4 500 m<sup>3</sup>/h,可采用双泵并联,每台泵压力 0.6 MPa、流量 4 500 m<sup>3</sup>/h,每台泵在电机额定转速时吸收的最大功率为 1 200 kW,泵转速为 580 r/min。

#### 1.1.3 6 500 m<sup>3</sup> 系列

1)挖泥时采用 0.9 MPa 高压冲水压力,流量 2 800 m<sup>3</sup>/h,电机额定转速时吸收的最大功率为 890 kW,转速为 944 r/min。

2)稀释泥舱时采用 0.45 MPa 高压冲水压力,流量 5 600 m<sup>3</sup>/h,电机额定转速时吸收的最大功率为 810 kW,转速为 789 r/min。2 台高压水炮,每台压力为 0.45 MPa 时,流量 2 800 m<sup>3</sup>/h,可同时使用 2 台高压水炮或 1 台高压水炮与一个泥门区的冲水来稀释泥舱。

#### 1.1.4 5 000 m<sup>3</sup> 系列

1)挖泥时采用 0.98 MPa 高压冲水压力,流量 3 000 m<sup>3</sup>/h,可采用双泵串联,每台泵压力 0.49 MPa,每台泵在电机额定转速时吸收的最大功率为 525 kW,泵转速为 1 495 r/min。

2)稀释泥舱时采用 0.49 MPa 高压冲水压力,流量 2×3 000 m<sup>3</sup>/h,可采用双泵并联,每台泵压力 0.49 MPa,流量 3 000 m<sup>3</sup>/h。每台泵在电机额定转速时吸收的最大功率为 525 kW,泵转速为 1 495 r/min。

#### 1.1.5 4 500 m<sup>3</sup> 系列

挖泥时采用 1.5 MPa 高压冲水压力,单泵工作,流量 1 000 m<sup>3</sup>/h,每台泵在电机额定转速时吸收的最大功率为 700 kW。

综上,高压冲水的正确使用对效率的提升十分关键,而垂直高压冲水的效率最高(偏差约 10°)。因此,必须掌握耙头姿态,根据不同的水深调整耙头姿态,使高压冲水射流接近垂直。另外,使用高压冲水时的航速控制也很重要,航速较慢时,高压冲水的效率才能发挥到最大。

## 1.2 泥泵特性参数无量纲标准

泥泵是疏浚船舶的主要疏浚设备,疏浚船舶的吸、排泥都通过泥泵来完成,疏浚船舶使用的泥泵大都是离心泵。泥泵叶轮在泵壳内液体(泥浆)中旋转时,产生离心力,使叶轮中心形成真空区,泥浆在大气压力的作用下,通过吸泥管而吸入真空区。当叶轮不停旋转,在离心力作用下,泥浆又被甩离叶轮向四周射出,使之在泵壳内速

度变慢压力增大, 最后将泥浆从泥泵出口处压入排泥管, 同时又从河底源源不断地得到补充。从而产生了吸和排的连续的泥浆流运动。

流量表示单位时间内泥泵送出的水或泥浆的体积量, 可用下式来计算:

$$Q=\frac{\pi}{4}d^2v \tag{1}$$

式中:  $Q$  为流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $d$  为排泥管直径 ( $\text{m}$ );  $v$  为排泥管内水或泥浆的流速 ( $\text{m/s}$ )。则流量  $Q$  的无量纲化可表示为:

$$\frac{Q}{\frac{\pi}{4}D^2\cdot\frac{\pi nD}{60}}=\frac{\frac{\pi}{4}d^2v}{\frac{\pi}{4}D^2\cdot\frac{\pi nD}{60}} \tag{2}$$

式中:  $D$  为泥泵吸口直径 ( $\text{m}$ );  $n$  为泥泵转速 ( $\text{r/min}$ )。

压头也称总压头、有效扬程或全扬程。它是单位质量的水或泥浆通过泥泵所能获得的能量。用水柱高度量度, 相当等值的流体静压力, 用  $H$  表示, 单位  $\text{m}$ 。据泥泵特性, 扬程  $H$  的无量纲化可表示为  $\frac{H}{2\left(\frac{\pi nL}{60}\right)^2g}$ , 其中  $L$  为泥泵叶轮直径 ( $\text{m}$ )。

1.3 波浪补偿器标准工作压力

在风浪作用和泥面高低不平时, 根据疏浚物的物理特点、挖掘深度、切屑厚度和拖曳力的大小, 选择不同的波浪补偿器压力, 避免耙臂、耙头承受过大的冲击力, 并在施工过程中, 始终保持耙臂钢丝绳处于绷紧状态, 防止钢丝绳出槽。4 500  $\text{m}^3$  日本品牌系列挖泥船波浪补偿器使用压力范围为 1.0~1.6 MPa, IHC 系列挖泥船波浪补偿器使用压力范围 2~6 MPa。疏浚粉、细砂时, 4 500  $\text{m}^3$  日本品牌系列挖泥船波浪补偿器工程经验压力为 1.1 MPa, IHC 系列挖泥船波浪补偿器工程经验压力为 2.5 MPa; 疏浚浮泥时, 4 500  $\text{m}^3$  日本品牌系列挖泥船波浪补偿器工程经验压力为 1.6 MPa, IHC 系列挖泥船波浪补偿器工程经验压力为 5.5~6.0 MPa。

2 基于标准化的工程应用

2.1 泥泵

疏浚泥泵的典型磨损机理是由叶片前缘与叶

轮毂和防护盖板连接处形成的马蹄涡造成的。涡中的疏浚物, 对形成涡部位的叶轮叶片和防护盖板的表面造成持续磨损, 通过改变叶片前缘与盖板之间的形状和位置可以降低涡流的强度, 达到改善叶轮进口位置磨损率的目的。

2015 年 9 月 13 日, “新海风” 轮在马来西亚巴生港吹填工程施工中, 选用曲线叶轮泥泵, 平均真空为 -0.063 MPa; 2016 年 5 月, 由于曲线叶轮磨损严重, 将其替换为非曲线叶轮, 施工时发现传统的非曲线叶轮取砂时真空仅为 -0.048 MPa, 取砂浓度降低 8.6%, 流速降低 17.6%, 生产效率由 5 550  $\text{m}^3/\text{h}$  下降至 4 850  $\text{m}^3/\text{h}$ , 在取砂量同为 11 000  $\text{m}^3$  的情况下单船取砂时间增加 15~20 min。

通常, 泥泵转速应该运转在泥泵特性曲线的高效区, 以确保挖泥船的生产效率, 但有时也需要根据实际工况条件做适当调整。如挖掘粉土可适当降低泥泵转速 (如可调), 通过降速运行, 既可提高沉淀效果, 增加装舱土体积, 又可降低能耗; 为防止泥泵启动时发生汽蚀, 泥泵启动不应一次达到额定转速, 应先低速合排, 等管道内充满水后再慢慢增加到挖泥模式的转速。如操作不规范, 使泥泵在不稳定状态运转, 施工时耙头会经常离地与接地, 从而造成泥泵工作时的真空突变, 变大则导致汽蚀发生或造成泥泵阻塞, 变小则导致驱动泥泵的柴油机燃烧不充分而加速柴油机的磨损, 致使效率低下, 甚至产生大面积垄沟。

此外, 泥泵叶轮与盖板之间的间隙大小, 将直接影响到泥泵的性能与使用寿命。因此, 对于 GIW 型泥泵, 疏浚磨损率低的淤泥类土质时, 应每 2 周进行一次间隙调整; 疏浚其余土质时, 应每周进行调整。

2.2 布线

布线是按施工区的土质特点、工况以及船舶类型规划的耙迹线, 布线的合理性直接影响工程的施工进度与施工质量。布线与定深的相互配合能极大地降低浅点率, 减少后期扫浅工程量, 提高多波束工程验收通过率。布线间距应根据各船舶的耙头宽度与泵吸能力合理设置。

2.3 恒载质量装舱

在吃水保持不变的情况下，通过降低溢流口的高度继续溢流装舱达到 100% 装载量(中粗砂)，以沉积密度为 2.0 t/m<sup>3</sup>，最大载质量为 1.4 万 t、舱容为 6 000~1 万 m<sup>3</sup> 的耙吸挖泥船为例：1) 溢流口固定在 1 万 m<sup>3</sup> 位置对应 4 000 m<sup>3</sup> 的砂和 6 000 m<sup>3</sup> 的水；2) 溢流口固定在 9 000 m<sup>3</sup> 位置对应 5 000 m<sup>3</sup> 的砂和 4 000 m<sup>3</sup> 的水；3) 溢流口固定在 8 000 m<sup>3</sup> 位置对应 6 000 m<sup>3</sup> 的砂和 2 000 m<sup>3</sup> 的水；4) 溢流口固定在 7 000 m<sup>3</sup> 位置对应 7 000 m<sup>3</sup> 的砂和 0 m<sup>3</sup> 的水(溢流口位置在 8 000 m<sup>3</sup> 以下时可分少量多次调整)。

3 生产效率计算与标准化分析

3.1 理论验证

以“新海马”轮在海门施工的实测数据为基

础，结合理论计算，验证不同粒径分布与不同排距下的生产效率计算结果，并对比“新海马”轮、“新海牛”轮船吹中砂时，不同排距下的测算生产效率，进行排距、密度与生产效率的标准化分析，给出参考标准。

结合海门港新区中天绿色精品钢铁产业基地地块整理工程中的吕四取沙段 H44+000~H52+000(取沙段 1)、新取沙段 0000~4684 区段(取沙段 2)、新取沙段 7310~9987 区段(取沙段 3)，“新海马”轮采用低低模式艏吹输送细砂，进行不同排距下的实际与理论验证对比计算，取沙段 1 的中值粒径 110.84 μm、取沙段 2 的中值粒径 189.51 μm、取沙段 3 的中值粒径 183.97 μm，排泥管径 0.85 m，参数见表 1。

表 1 “新海马”轮艏吹输送细砂实际与理论测算对比结果

取沙段	管线总长/ km	当量长度/ km	中值粒径/ μm	测算 方法	密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	生产效率/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	0.912	1.060	110.84	理论	1.46	13 460.4	6.59	7 098
				实际	1.46	12 708.0	6.22	6 697
2	1.334	1.480	189.51	理论	1.56	10 468.8	5.12	6 790
				实际	1.56	10 044.0	4.92	6 513
3	1.820	1.970	183.97	理论	1.49	8 373.6	4.10	4 719
				实际	1.49	9 468.0	4.16	5 337

相同土质条件，不同排距下的艏吹生产效率见图 1。结合表 1 数据可知，管线长度为 0.912 km 时，理论计算结果与实测结果较为吻合，随着管线长度的增加，误差增大，最大达到 10%，平均误差在 5% 左右，总体误差较小，理论计算结果较为准确，可为实际工程提供参考。

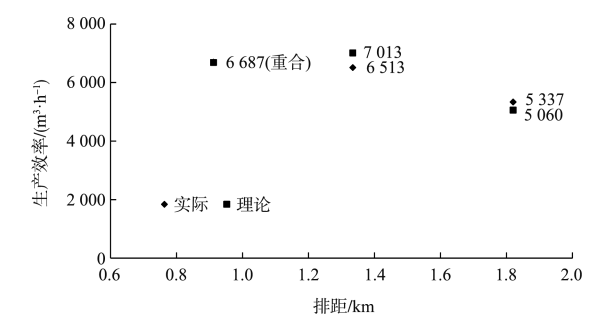


图 1 “新海马”轮艏吹输送细砂实际与理论对比结果

3.2 对比分析

以中值粒径 250 和 231 μm、艏吹管径 1.1 m 为例，“新海牛”“新海马”轮的低低、低高模式艏吹输送中砂在不同排距和输送密度下的生产效率测算对比结果见表 2。由于结果的相似性，取中值粒径为 250 μm 时的数据，建立排距生产效率关系曲线见图 2。

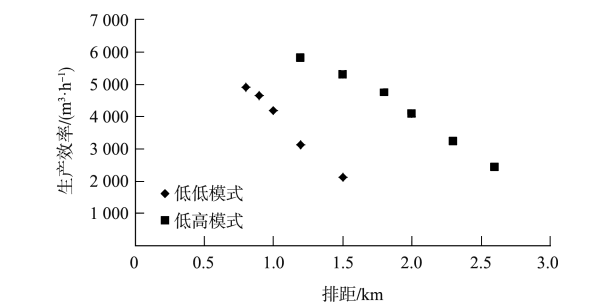


图 2 “新海马”轮艏吹输送中砂排距生产效率关系曲线



表 2 “新海牛”“新海马”轮艙吹输送中砂测算对比结果

泥泵模式	船舶	中值粒径/ μm	排距/ km	密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	临界流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	实用流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	生产效率/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
低低	新海牛	250	0.8	1.30	4.10	4.92	5.22	4 915
	新海马	231	0.8	1.30	4.10	4.92	5.05	5 759
	新海牛	250	0.9	1.30	4.10	4.92	4.95	4 661
	新海马	231	0.9	1.30	4.10	4.92	4.90	5 587
	新海牛	250	1.0	1.28	4.01	4.81	4.75	4 177
	新海马	231	1.0	1.28	4.01	4.81	4.80	5 072
	新海牛	250	1.2	1.22	3.70	4.43	4.52	3 118
	新海马	231	1.2	1.22	3.70	4.43	4.69	3 795
	新海牛	250	1.5	1.16	3.32	3.99	4.21	2 119
	新海马	231	1.5	1.16	3.32	3.99	4.57	2 560
低高	新海牛	250	1.2	1.30	4.10	4.92	6.19	5 828
	新海马	231	1.2	1.30	4.10	4.92	5.37	6 125
	新海牛	250	1.5	1.30	4.10	4.92	5.62	5 291
	新海马	231	1.5	1.30	4.10	4.92	5.10	5 816
	新海牛	250	1.8	1.30	4.10	4.92	5.06	4 764
	新海马	231	1.8	1.30	4.10	4.92	4.84	5 524
	新海牛	250	2.0	1.27	3.96	4.75	4.81	4 080
	新海马	231	2.0	1.27	3.96	4.75	4.85	4 923
	新海牛	250	2.3	1.23	3.75	4.50	4.49	3 237
	新海马	231	2.3	1.23	3.75	4.50	4.86	4 132
	新海牛	250	2.6	1.18	3.46	4.15	4.32	2 443
	新海马	231	2.6	1.18	3.46	4.15	4.92	3 160

根据以上结果分析可得,以 4 000 m<sup>3</sup>/h 为生产效率工作点,“新海马”轮艙吹输送细砂,低低模式适宜排距在 1.6~1.7 km,低高模式适宜排距在 1.5~3.0 km;艙吹输送中砂,低低模式适宜排距在 1.0 km 以内,低高模式适宜排距在 1.0~2.0 km。

4 结语

- 1)高压冲水压力、泥泵特性参数、波浪补偿器工作压力等设备参数的标准化对疏浚设备特性的把控与疏浚效率的提升十分重要,应理论结合实际应用,不断建立和完善设备参数标准,将设备效率发挥到最大。
- 2)工程生命周期内全过程的标准化建立与应用,有利于工程质量与工期把控,节本降耗。
- 3)根据疏浚物的物理特点、挖掘深度、切屑厚度选择不同的疏浚作业参数,形成指导性的生

产效率控制标准。以“新海马”轮为例,“新海马”轮艙吹输送细砂,低低模式适宜排距在 1.6~1.7 km,低高模式适宜排距在 1.5~3.0 km;艙吹输送中砂,低低模式适宜排距在 1.0 km 以内,低高模式适宜排距在 1.0~2.0 km。

参考文献:

[1] 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.

[2] 周丙浩,朱时茂,焦鹏,等.船载框架式整平器扫浅性能分析[J].水运工程,2020(4):180-186.

[3] 周丙浩,沈伟平,朱时茂,等.基于“新海凤”轮的艙喷头优化设计与产量分析[J].船舶工程,2020,42(S1):67-71.

[4] 郑金龙,周丙浩.耙吸挖泥船艙喷嘴结构设计优化方法[J].船舶工程,2020,42(S1):72-74,375.