

耙吸式挖泥船施工效率提升——溢流控制

赵伟

(长江南京航道工程局, 江苏南京 050000)

摘要: 使用耙吸式挖泥船对航道进行疏浚时, 为提高疏浚效率、降低施工成本及能耗指标, 笔者根据多年研究试验分析与疏浚实践经验, 提出了通过充分溢流操作, 提高有效溢流量与挖泥时间, 从而提高施工效率的方法, 并根据对连云港 30 万吨航道工程中的泥沙颗粒位移计算证实了该方法的有效性。此方法目前已运用于连云港航道疏浚工程中, 并取得了良好效果。

关键词: 溢流控制; 泥沙沉速; 悬浮时间; 位移

中图分类号: U66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 10—0090—04

1 引言

随着国内各港口大型船舶来往数量日益增多, 港口航道使用率不断提高, 致使航道内泥沙沉积愈发严重, 因此航道疏浚及等级提升工作势在必行。耙吸式挖泥船是一种集挖泥、装泥和卸泥多功能于一身的航道疏浚工具, 且无需其他船只辅助, 不影响周围船舶航行, 因此在航道疏浚中应用广泛^[1-2]。在使用耙吸式挖泥船施工过程中, 采用均匀布线、溢流施工的方法可取得良好的疏浚施工效果^[3], 但挖泥船装舱过程中泥舱溢流筒的溢流流量与溢流损失不易被直接获取^[4-5], 由此引入有效溢流量的概念。

有效溢流量是指耙吸船在装舱过程中, 从溢流筒溢流出去的部分泥浆在水流作用下, 会移动到航道外而不会返回到航道中, 这部分溢流泥浆即为有效溢流量。有效溢流量越大, 挖泥船施工效率越高。因此, 在施工过程中, 可充分利用航道水流速度、水流持续时间、水域水深等因素以及溢流筒充分溢流将泥沙携带出航道挖槽, 增加施工过程中的有效溢流量。

2 溢流泥沙的运动分析

判定溢流筒中溢流的泥沙是否为有效溢流, 须计算水流将泥沙颗粒携带出挖槽的位移。泥沙颗粒的运动规律较为复杂^[6], 做一定的简化分析, 其位移大小主要影响因素主要包括泥沙沉速、泥沙颗粒悬浮时间、水流垂直航道速度、水域水深等, 如若得出上述影响因素的数值, 需先行测得泥沙粒径(通过粒径计法泥沙颗粒试验测泥沙级配获得)、泥沙容重(通过环刀法测容重获得)、潮流水流分布(通过水文资料获得)、附近水域水深等物理量。由于试验器材及资料条件限制, 部分物理量取值为具有一定代表性的数值, 用以计算泥沙颗粒位移。

本文以连云港 30 万吨航道为工程背景, 对其施工过程中的泥沙颗粒位移影响因素做了如下分析:

2.1 泥沙沉速

根据连云港 30 万吨航道的地质资料显示, 航道上层土质主要为淤泥, 为航道挖槽施工土层, 下层主要为硬黏土和密实粉砂。另根据地质勘查资料和航道一期施工情况, 航道沿线分布两类钙质结核: 第一类为有规律分布的小粒径钙质结核, 在淤泥底板与下部地层交界处普遍分布, 硬黏土和密实粉砂厚度为 10 ~ 30cm, 粒径主要为 5 ~ 80mm, 个别粒径为 110mm; 第二类为零星分布的较大尺度钙质结核, 在各土层中零星分布, 相互连接镶嵌, 结构组成相对整体化。进一步的勘察实验显示航道挖槽施工土质主要为粉质粘土、细砂与中砂, 即泥沙颗粒粒径小于 0.5mm 的比重很大, 因此 0 ~ 0.5mm 为本文分析的主要粒径区间。

根据张瑞瑾泥沙沉速计算公式^[7], 可知在颗粒粒径 D 处于 0.1 ~ 4mm 区间, 泥沙颗粒沉降速度与颗粒粒径、滞粘阻力、颗粒干容重等物理量的关系为:

$$\omega = \sqrt{(13.95 \frac{U}{D})^2 + 1.09 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gD} - 13.95 \frac{U}{D} \quad (1)$$

式中, ω 代表泥沙沉降速度, D 代表泥沙颗粒粒径, U 代表滞粘阻力, γ_s 代表泥沙颗粒干容重, γ 代表水的容重, g 代表重力加速度。

连云港水文气象资料显示, 航道所在海域海水温度在 8℃ ~ 18℃, 可取 10℃ 下滞粘阻力 U 为 $1.31 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 又已知泥沙颗粒干容重 γ_s 为 $1.835 \text{kg}/\text{m}^3$, 水的容重 γ 为 $1 \text{kg}/\text{m}^3$, 重力加速度 g 为 $9.81 \text{m}/\text{s}^2$, 因此上述公式 (1) 可化简为泥沙沉降速度 ω 与泥沙颗粒粒径 D ($0.1 \text{mm} < D < 4 \text{mm}$) 的关系式:

$$\omega = \sqrt{\frac{3.340 \times 10^{(-10)}}{D^2} + 8.929D} - \frac{1.828 \times 10^{(-5)}}{D} \quad (2)$$

当泥沙颗粒粒径不断减小时，滞粘阻力会不断增大，计算时需考虑滞粘阻力的影响，颗粒粒径临界值可设定为 0.1mm。故当颗粒粒径 $D < 0.1\text{mm}$ 时，泥沙颗粒沉降速度的计算公式为：

$$\omega = 0.039g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{D^2}{\nu} \quad (3)$$

上述公式 (3) 化简后可得泥沙沉降速度 ω 与泥沙颗粒粒径 D ($D < 0.1\text{mm}$) 的关系式：

$$\omega = 2.439 \times 10^{-5} D^2 \quad (4)$$

当泥沙颗粒粒径不断增大时，滞粘阻力会不断减小，当颗粒粒径超过一定限定值时，滞粘阻力大小可忽略不计，此时紊动阻力将起决定作用，颗粒粒径临界值可设定为 4mm。由于航道挖槽施工土层土质中大于 4mm 粒径的泥沙颗粒含量很少，因此对施工影响可以忽略不计，此处亦不做计算。

由公式 (2) 与公式 (4) 可建立泥沙沉降速度 ω 与颗粒粒径 D 的关系如图 1 所示，由图 1 可知，泥沙沉降速度随着颗粒粒径的增大而增大；颗粒粒径越小，曲线斜率越小，泥沙沉降速度随颗粒粒径增大而增加得越缓慢；当颗粒粒径达到一定数值 ($D > 0.2\text{mm}$) 时，泥沙沉降速度与颗粒粒径表现出近似于正比例关系的趋势。

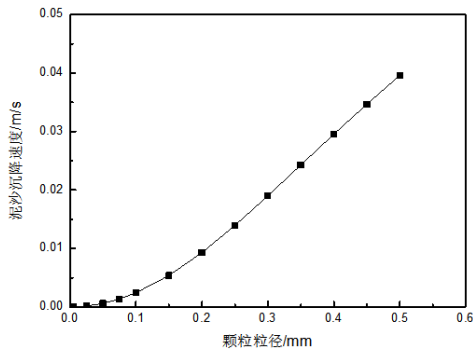


图 1 泥沙沉速与颗粒粒径之间关系

2.2 泥沙颗粒悬浮时间

根据水文气象资料显示，航道海域潮流涨落时潮位基准位为 2.9m，平均高潮位增加 4.9m，平均低潮位增加 1.2m，已知航道挖槽外水域水深为 12m ~ 15m（取 13m），则可得高潮位时水域水深为 20.8m，低潮位时水域水深为 17.1m。水域水深 h 与泥沙颗粒悬浮时间 t 的关系可以表述为：

$$t = \frac{h}{\omega} \quad (5)$$

由公式 (2)、公式 (4) 与公式 (5) 可得泥沙颗粒悬浮时间 t 与颗粒粒径 D 的关系如图 2 所示，由图 2

可知，泥沙颗粒悬浮时间随颗粒粒径增大而减小；颗粒粒径越小，曲线斜率越大，悬浮时间随颗粒粒径增大而减小得越快；粒径为 0.05mm 的颗粒与 0.5mm 的颗粒相比，悬浮时间相差很大，达到 50 倍以上；颗粒粒径越小，高潮位与低潮位的悬浮时间相差越明显，随着颗粒粒径的不断增大，高潮位与低潮位的悬浮时间趋近于相同。

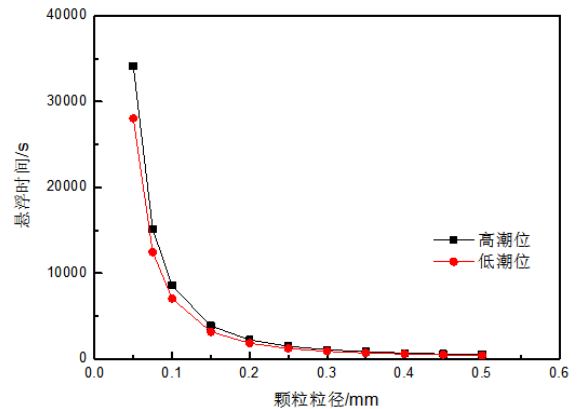


图 2 悬浮时间与颗粒粒径之间关系

2.3 潮流流速

根据航道所在连云港海域海图标注的潮流流向流速图，与潮流涨落规律，可获得水流方向、水流速度以及水流持续时间，由此可计算出在航道垂直方向上的水流速度大小，详见表 1。

表 1 水流垂直航道速度

水流方向 / (°)	水流速度 / (m/s)	水流持续时间 / (h)	水流垂直航道速度 / (m/s)
53	1	1.5	0.6016
8	0.4	0.63	0.3961
31	0.4	1.3	0.3428
60	0.95	0.9	0.4748
59	1.1	0.63	0.5663
33	0.5	0.87	0.4192
20	0.5	1.13	0.4697
54	1	1.77	0.5875

注：1、水流方向取水流与航道垂直方向的夹角，前后四组分别为南向、北向夹角；2、水流方向、水流速度、水流持续时间取涨落潮变化一个周期内（12h 左右），水流速度取每个阶段的平均流速。

2.4 泥沙颗粒位移

根据上文中计算出的泥沙颗粒悬浮时间、水流垂直航道速度、水流持续时间，可计算出泥沙颗粒在水中的悬浮位移。

由于不同颗粒粒径的泥沙悬浮时间相差很大，粒径很小的泥沙悬浮时间远大于水流持续时间，粒径较大的泥沙悬浮时间小于水流持续时间，即其运动受制于悬浮时间，故不同颗粒粒径的泥沙位移计算方法不同，这里简要计算了 0.075mm、0.2mm 与 0.25mm 等 3 种粒径的

泥沙位移值。

0.075mm 粒径泥沙在落潮到涨潮、涨潮到落潮两个时段，通过顺序组合计算出的最大位移如下表 2 和表 3。

表 2 -0.075mm 粒径泥沙落潮到涨潮时的最大位移

水流垂直航道速度 / (m/s)	水流持续时间 / (s)	悬浮时间 / (s)	最大位移 / (m)
0.6061	5400	15182	7096.88
0.3961	2268		
0.3428	4680		
0.4748	3240		

表 3 -0.075mm 粒径泥沙涨潮到落潮时的最大位移

水流垂直航道速度 / (m/s)	水流持续时间 / (s)	悬浮时间 / (s)	最大位移 / (m)
0.5663	2268	15182	7865.02
0.4192	3132		
0.4697	4068		
0.5875	6372		

由于 0.075mm 的泥沙粒径较小，沉速较小，水流作用对其运动位移的影响因素较大，通过计算可得出 0.075mm 粒径的泥沙在水流速度最佳组合中（落潮五六方向到涨潮一二方向）最大位移距离为 10972m。

0.2mm 粒径泥沙在水流中的悬浮时间较小，根据其悬浮时间计算，其位移值如下表 4 和表 5。

表 4 -0.2mm 粒径泥沙落潮到涨潮时的最大位移

水流垂直航道速度 / (m/s)	水流持续时间 / (s)	悬浮时间 / (s)	最大位移 / (m)
0.6061	5400	2237	1345.78
0.3961	2268		886.08
0.3428	4680		766.84
0.4748	3240		1062.13

表 5 -0.2mm 粒径泥沙涨潮到落潮时的最大位移

水流垂直航道速度 / (m/s)	水流持续时间 / (s)	悬浮时间 / (s)	最大位移 / (m)
0.5663	2268	1839	1041.43
0.4192	3132		770.91
0.4697	4068		863.78
0.5875	6372		1080.41

0.25mm 粒径泥沙相比于 0.2mm 粒径泥沙，其在水流中的悬浮时间更小，根据其悬浮时间计算，其位移值如下表 6 和表 7。

表 6 -0.25mm 粒径泥沙落潮到涨潮时的最大位移

水流垂直航道速度 / (m/s)	水流持续时间 / (s)	悬浮时间 / (s)	最大位移 / (m)
0.6061	5400	1469	899.99
0.3961	2268		592.57
0.3428	4680		512.83
0.4748	3240		710.30

表 7 -0.25mm 粒径泥沙涨潮到落潮时的最大位移

水流垂直航道速度 / (m/s)	水流持续时间 / (s)	悬浮时间 / (s)	最大位移 / (m)
0.5663	2268	1230	696.55
0.4192	3132		515.62
0.4697	4068		577.73
0.5875	6372		722.63

0.2mm 与 0.25mm 粒径泥沙根据不同水流持续时间

的组合，均可算出不同的位移值，因组合方式复杂，此处不一一计算。

3 控制溢流提升施工效率

由上述计算可知，泥沙颗粒在水域中的位移主要与颗粒粒径、水流垂直航道速度、水流持续时间以及水域深度等因素有关，因此在航道挖槽施工过程中可有效利用上述因素以增加泥沙颗粒位移，提高挖槽施工效率，节约施工成本，同时降低能耗。通过多次实地测量及现场实践证明，水流将泥沙颗粒携带出航道 600 米以外时，泥沙沉淀后不会造成航道回淤，实际观察得出平潮前后各 45 分钟水流很小，不能满足将泥沙带出航道的要求，每天有总计 6 小时不能采用溢流法施工，而其余 18 小时均能达到设定效果。

笔者对实船施工工艺进行了一定的改进，即在航道挖槽边线处，通过降低船体溢流筒高度使泥仓中的泥沙混合物溢出，然后提高溢流筒装仓，如此反复操作，充分溢流，当船体达到满仓满载时即前往抛泥区卸泥，提高有效挖泥时间、溢流量，从而提高施工效率。

表 8 改进前的船体溢流量与下方量

日期 / (天)	装仓量 / (m ³)	溢流量 / (m ³)	下方量 / (m ³)
1	5180	777	5957
2	5107	765	5872
3	5068	760	5828
4	5087	763	5850
5	5015	752	5767
总计	25457	3817	29274

表 9 改进后的船体溢流量与下方量

日期 / (天)	装仓量 / (m ³)	溢流量 / (m ³)	下方量 / (m ³)
1	5728	2797	8525
2	5930	2922	8852
3	5782	2173	7955
4	5910	2881	8791
总计	23350	10773	34123

在连云港 30 万吨航道疏浚工程中，经过施工工艺的改进，测得实船每天平均下方量由 5855m³ 提高至 8531m³，施工效率提升了 46%；每天重油油耗由 35.17 吨减少至 32.52 吨，每天油耗减少 2.65 吨，整体施工效率取得了较大改善。

4 展望

本次工程通过改进施工工艺，充分溢流，提升了航道疏浚的施工效率、降低了成本和能耗，且水流垂直航道速度越大、作用时间越长，施工效果越好。当然，该施工工艺也存在一定局限性，当某些施工区域处于保护区、水源地或娱乐场所时此工艺无法使用，故施工技术

长江南京河段八卦洲汉道河道 整治工程环境保护设计

徐逸文¹, 庄雪飞², 胡操¹, 李铭华¹, 陈磊¹

(1. 南京市长江河道管理处, 江苏南京 210011; 2. 南京市水务工程建设管理中心, 江苏南京 210098)

摘要: 本文以长江南京河段八卦洲汉道河道整治工程为例, 从积极和负面两个角度分析了工程在建设期和运行期对环境可能产生的影响。结合工程实际, 以问题为导向从水环境、生态环境、环境空气、声环境和人群健康等方面对拟实施的环境保护措施进行了全面设计, 并提出了详细的环境管理与监测手段, 以期为类似工程的环境保护设计提供参考借鉴。

关键词: 长江; 八卦洲汉道; 工程影响; 环境保护设计

中图分类号: TV871.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 10—0093—03

八卦洲汉道段位于南京河段中下段, 上起下关、下至西坝, 主泓长约 18km, 左、右岸均为南京市的经济腹地^[1]。20 世纪 70 年代以前, 在自然状态演变下, 八卦洲洲头持续向北弯曲。80 年代, 左汉枯季分流比减少至 15%, 八卦洲左汉的衰退, 严重地影响了南京市经济的发展。为了稳定河势, 保障防洪安全, 1983 年和 1998 年分别通过一、二期整治工程对洲头护岸工程进行了加固, 有效控制了原有的崩岸险情^[2]。

然而, 近年来左汉加速衰退, 枯季分流比逼近 13%, 汉道左右两岸及洲岸频发崩岸险情^[3]。加之一、

二期整治工程水下采用抛石“打补丁”的方式, 工程整体性较差, 且工程实施已十余年, 年久失修, 局部地段已发生水毁现象, 亟需采取更加系统和深入的治理措施^[4]。因此, 对八卦洲汉道河道进行全方位整治, 对控制和稳定该河段河势, 保障防洪安全, 促进南京市经济社会的可持续发展有重要意义。

新实施的河道整治工程规模较大, 在工程建设过程中会对周围环境造成不利影响, 需进行环境保护设计, 针对性地采取保护措施以减小对生态环境的破坏。本文对长江南京河段八卦洲汉道河道整治工程环境保护设计

和工艺后续可进一步改进与创新。目前国内外已有工程采用了无溢流施工工艺^[8-10], 即将溢流的泥沙混合物通过另一泥泵传输给高压冲水泵排到耙头, 再从耙头吸入泥仓形成闭环, 以此达到环保疏浚的目的。只有通过以往施工经验不断地积累, 充分运用新技术的开发成果, 积极推广精细化施工理念, 才能切实提高施工效率并保证环保作业, 为实现节能降耗的国家战略目标而努力, 为疏浚行业可持续发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 陈子豪, 刘月琴. 耙吸挖泥船舱段结构强度的有限元分析 [J]. 科学技术与工程, 2012 (6): 1441—1444.
- [2] 张弘昊. 耙吸挖泥船轨迹跟踪疏浚控制方法研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- [3] 王强. 挖泥船溢流施工在航道扫浅阶段的应用 [J]. 建筑工程技术与设计, 2016 (10): 569—570.

- [4] 曹祥志, 李炜等. 基于模型的耙吸挖泥船溢流损失估计及模型验证 [J]. 水运工程, 2014 (10): 184—188.

- [5] Braaksm J. Model-based control of hopper dredgers [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2008: 30, 57.

- [6] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.

- [7] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 王明甫. 河流泥沙动力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

- [8] 郑怡然. 环保疏浚底泥脱水与余水净化技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.

- [9] 陈艳萍. 天津港港内水深维护环保疏浚新工艺研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

- [10] 崔金茹. 港内水深维护环保疏浚新工艺达到国际先进水平 [J]. 港口科技, 2018, 27 (3): 48—48.