

基于 Bernoulli 效应的便携式清淤机设计及试验

孙金华, 李 云, 樊宝康, 罗 勇, 骆少泽

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 以河网地区小河道清淤为主要目的, 在 SolidWorks 软件上设计了一台 C-DX 便携式清淤机. 清淤机离析机构的技术原理基于 Bernoulli 效应理论. 室内试验研究了 3 种不同孔径的喷嘴在离析机构 1/4 小开度阀位工况下的管道出口泥沙输送量与密度, 综合技术指标, 推荐的喷嘴孔径为 9.0 mm. 现场清淤试验在河道中检验了清淤机的整体特性, 给出了 235 m 长距离或 45 m 短距离泥浆输送情况下的扬程高度与排淤量的运行参数. 样机试验结果表明, 基于伯努利效应的清淤机具有体积小、出流量大、泥浆浓度高等优点, 能较好适应河道宽度、水深、土质等要素变化. 最后指出泥浆浓度的大小涉及沉积物的物理、化学、生态性质以及清淤机性能.

关 键 词: 清淤机; 设计; 特性试验; 河道

中图分类号: TV851

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)01-0029-05

我国南方水网地区河湖众多、水系发达, 但河道淤积问题日益突出. 特别是在缺乏污水处理能力的农村, 纵横交错的小河道面广量大, 河道淤积过厚使河道有效深度变浅, 水体容量与排灌能力下降, 水体污染源加重, 水生态环境恶化, 削弱了农业综合生产能力, 影响了人民群众的生产生活. 疏浚是农村水资源、水生态和水环境保护的最有效工程措施. 国内外现有的大多数清淤机采用机械挖掘或水力冲淤吸淤工作原理, 清淤小河道的 3 种基本方法为用水泵抽干河道里的水, 再用高压水枪将淤泥冲成泥浆, 用泥浆泵将泥浆抽到岸边沉淀, 该方法清淤较为彻底, 但影响通航或下游供水; 利用抓斗式挖掘机在河堤上作业, 将河道内淤泥挖出, 就地堆放或用车船运走, 但受河道和河堤宽度限制; 用水下清淤机清淤, 特点是整机潜在水底, 整机边行走边将泥浆抽到岸边沉淀, 可以带水作业, 但不易控制, 机具价格较高, 作业完成后搬运困难^[1,2]. 为此, 本文尝试将 Bernoulli 效应理论用于河网便携式高效清淤机新机型设计中, 为河网地区小河道清淤寻找一种新的解决途径.

1 清淤机设计

1.1 C-DX 清淤机的 Bernoulli 效应理论

C-DX 便携式清淤机的核心部件为离析机构(见图 1), 离析机构的技术原理基于水力学中的 Bernoulli 效应, 满足伯努利方程压力与流量的关系. 当流体速度加快时, 物体与流体接触界面上的压力会减小, 反之压力会增加. 这一现象被称为“伯努利效应”. 伯努利效应适用于包括气体在内的一切流体, 是流体稳定流动时的基本现象之一.

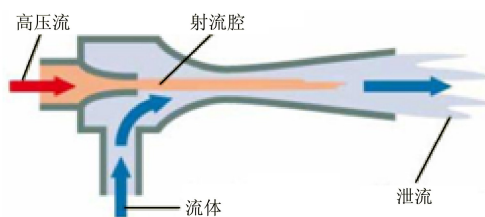


图 1 离析机构的 Bernoulli 效应

Fig. 1 Bernoulli effect of eductor

收稿日期: 2008-07-15

基金项目: 水利部“948”项目(200604)

作者简介: 孙金华(1962-), 男, 江苏靖江人, 研究员, 博士, 主要从事水资源管理理论与应用研究. E-mail: jhsun@nhri.cn

对于不可压缩的理想流体,密度不随压力而变化,可得:

$$Zg + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{常数} \quad (1)$$

式中: Z 为距离基准面的高度; g 为重力加速度; p 为静压力; ρ 为流体密度; u 为流体速度. 方程中的每一项均为单位质量流体所具有的机械能, 方程表明 3 种能量可以相互转换, 但总和不变. 当流体在水平管道中流动时, Z 不变, 上式可简化为: $\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{常数}$, 此式表述了流速与压力之间的关系^[3].

对于类似泥浆的粘性流体, 流动截面上存在着速度分布, 如用平均流速 u 表达动能项, 应乘以动能校正系数 α . 此外, 还需考虑因粘性引起的流动阻力, 即造成单位质量流体的机械能损失 h_f ^[4,5]. 若在流体流动过程中, 单位质量流体又接受了流体输送机械所做的功 W , 则处于均匀流段的两截面 1 和 2 有:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha \bar{u}_1^2}{2} + W = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha \bar{u}_2^2}{2} + h_f$$

根据速度分布计算 α 值, 流体在圆管内层流流动时, 取 $\alpha=2$; 湍流流动时, $\alpha \approx 1.06$.

1.2 C-DX 清淤机结构

在 SolidWorks 软件上设计了一台 C-DX 便携式清淤机. SolidWorks 软件可以在装配布局好的情况下设计其它零部件, 并保证布局图、零部件之间完全相关, 为设计者提供界面和命令全自动的设计环境^[6].

设计的 C-DX 便携式清淤机主要部件由高压喷射泵、离析机构、泥浆泵、操纵装置、升降单元、管道连接器、拼装式浮体等组成, 其样机见图 2.

C-DX 便携式清淤机离析机构, 运用伯努利效应在吸头内产生吸力, 从河底抽取水和淤泥的混合物, 并运送到排放软管的末端. 喷射泵抽取河水经过泵体产生可调节的高压水流供离析机构, 离析机构吸入高压水流用于喷嘴松动可能板结的淤泥, 经过腔体出口释放泥浆. 泥浆泵把淤积物通过螺纹软管排放到堆积场. 整套设备符合人体功能学原理, 使用者可 $0^\circ \sim 180^\circ$ 水平旋转操纵装置, 更大范围清淤河道. 也可根据水深和淤积厚度调节升降单元定位清淤头位置. 拼装式浮体能自由拆卸, 方便运输.



图 2 C-DX 便携式清淤机

Fig. 2 C-DX portable dredging machine

设计的离析机构是一种高性能的水下疏浚工具, 整体性能好, 没有任何运动部件, 利用动能使液体流动, 由 1 个喷射补给线、3 个可调最佳性能用于松土的喷嘴、1 条吸气路径、1 个吸气室、扩散器及排放单元组成. 该工具还配备了可调流量阀和阻止泥浆堵塞管道的反冲阀. 离析机构启动后, 高速喷射出的流体在推力下带走足够的空气, 在腔内产生部分真空, 使流体沿着吸入路线进入腔内. 由于高速流体沿吸入路线进入腔室的流体增加, 因此产生了连续抽吸作用. 离析机构只需定期检查喷嘴磨损情况, 维修时易拆卸.

2 特性试验

2.1 试验目的与方案

设计的 C-DX 便携式清淤机经加工制造后, 参照有关工程实例^[7-9], 其样机在两种环境中进行特性试验, 即室内水槽模拟试验和河道现场清淤试验. 试验设备配置 Glycerin 的模拟压力表 (P1, P2 和 P3), Fischer 电磁流量计 2 个 (FM1, FM2), Porter 核子密度计 1 个 (D1). 室内试验目的是测量 3 种不同孔径的喷嘴在离析机构 1/4 小开度阀位工况下的管道出口泥沙输送量与密度. 现场试验目的是为了检验 C-DX 便携式清淤机的整体特性, 测量喷射泵压力、喷射泵流量、离析机构压力、喷嘴开或关、喷嘴流量、离析机构阀位、扬高、输送距

离、末端流量与流速之间的相互关系. 期望获得长或短距离泥浆输送情况下的扬程高度与排淤量的最优的运行参数.

室内试验的水槽长 8 m、宽 3.5 m、深 4.5 m, 为模拟清淤环境试验, 在水槽中注入 30 t 细沙. 试验条件泥浆泵扬程 1 m, 离析机构吸头起始位置在水下 1 m 处就能接触到细沙, 离析机构到泥沙堆积区距离为 75 m. 该组为密度测量工况 DDDM (density discharge dredge mode).

现场清淤试验在沿江水网地区靖江段某一河道进行. 该河道宽约 8 m, 水深约 1.2 m, 河中心淤积物厚度为 0.6 ~ 0.9 m, 河两边淤积物厚约 0.4 m. 在喷射泵作用下, 泥浆泵与离析机构联合工作时进行了长或短距离两组状态的管道连接试验: 从离析机构到泥浆堆积区 45 m 为短距离工况 SDEM (short distance eductor mode); 从离析机构到泥浆堆积区 235 m 为长距离工况 LDEM (long distance eductor mode).

2.2 试验结果

表 1 为 DDDM 工况不同孔径喷嘴的试验结果, 综合末端流量、泥沙输送量及泥沙密度指标, 推荐的喷嘴孔径为 9.0 mm.

表 1 DDDM 工况不同孔径喷嘴的试验结果
Tab. 1 DDDM mode with different sets of jet nozzles

喷射泵压力	喷射泵流量	离析机构压力	喷嘴孔径	喷嘴流量	末端流量	末端流速	密 度	泥沙输送量
/ kPa	/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/ kPa	/ mm	/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
640	27.58	620	7.0	12.95	88.90	3.14	1395	26.96
620	32.75	590	9.0	23.13	94.93	3.35	1338	24.58
590	37.83	560	11.0	30.28	94.26	3.33	1229	16.92

SDEM 工况下离析机构喷嘴全开时的机械特性见表 2. 可见, 离析机构与泥浆泵联合工作时, 末端流量只与出口扬程有关, 扬程与流量的平方成一次函数关系, 扬程越低, 流量越大. 试验中曾关闭喷嘴, 此时离析机构压力腔内压力接近喷射泵的压力, 扬程 1 ~ 6 m 时末端流量为离析机构喷嘴全开时的 1.04 ~ 1.05 倍, 末端流量流速与喷嘴开关关系不大, 说明对于板结的淤泥使用喷嘴松土也不会影响末端管道的出流量.

表 2 SDEM 工况喷嘴全开的试验结果
Tab. 2 SDEM mode with nozzles fully open

喷射泵压力	喷射泵流量	离析机构压力	喷嘴开关	喷嘴流量	离析泵阀	扬程高度	末端流量	末端流速
/ kPa	/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/ kPa	/ 全开为 1	/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	位/0 ~ 1	/ m	/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
590	60.86	530	1	22.92	5/8	1	124.92	4.41
590	60.86	530	1	22.92	5/8	2	122.41	4.33
590	60.86	530	1	22.92	5/8	3	117.02	4.14
590	60.86	530	1	22.92	5/8	4	113.06	3.99
590	60.86	530	1	22.92	5/8	5	110.12	3.89
590	60.86	530	1	22.92	5/8	6	105.81	3.74

表 3 为 LDEM 工况下离析机构喷嘴全开的机械特性. 由于离析机构达到泥浆堆积地的距离长达 235 m, 是 SDEM 工况的 5.22 倍, 在 6 m 扬程内末端流量为 72.81 ~ 85.42 m^3/h . 说明便携式清淤机的末端出流量能较好地反映其清淤能力.

现场清淤试验结果还表明, 清淤能力及其效果不仅与喷射泵压力、离析机构压力等结构有关, 还与淤泥性质和深度、操作方式及其熟练程度等外部因素有着密切关系. 因此, 末端出流参数相对于实验室水槽内试验结果有一定的偏差.

现场的泥浆水力输送, 还必须引入输送浓度的概念. 泥浆浓度的大小涉及沉积物的物理、化学、生态性质^[10]以及清淤机械的性能. 对于泥浆浓度不能盲目追求指标, 泥浆浓度大, 流动性变差; 泥浆浓度小, 流动性好. 当离析机构吸口完全陷入淤泥中, 泥浆浓度最高, 当泥浆浓度达 50% 以上时, 后置的泵机可能处于超负

荷状态,为此本离析机构的泥浆浓度控制装置,可以合理控制水浆配比使管道内泥浆流动性良好,泵处于正常工作状态.另外,泥浆螺纹输送软管在满足设计流量的条件下,可依据合理的流速选择管径,由此选定 C-DX 便携式清淤机从离析机构到泥浆泵以及泥浆泵到堆积场的管道管径为 100 mm.

表 3 LDEM 工况喷嘴全开的试验结果

Tab. 3 LDEM mode with nozzles fully open

喷射泵压力 / kPa	喷射泵流量 / (m ³ · h ⁻¹)	离析机构压力 / kPa	喷嘴开关 / 全开为 1	喷嘴流量 / (m ³ · h ⁻¹)	离析泵阀 位/ 0 ~ 1	扬程高度 / m	末端流量 / (m ³ · h ⁻¹)	末端流速 / (m · s ⁻¹)
570	65.13	500	1	22.31	3/4	1	85.42	3.02
570	65.13	500	1	22.31	3/4	2	82.81	2.91
570	65.13	500	1	22.31	3/4	3	79.65	2.83
570	65.13	500	1	22.31	3/4	4	77.53	2.74
570	65.13	500	1	22.31	3/4	5	75.47	2.66
570	65.13	500	1	22.31	3/4	6	72.81	2.57

3 结 语

(1) 利用 SolidWorks 软件设计便携式清淤机虚拟样机,可以在制作物理样机之前对清淤机的运动性能、机械装配性、可制造性进行科学评价,从而优化设计,缩短了清淤机开发周期,为今后清淤机的产业化提供了技术支撑;

(2) 伯努利效应的清淤机没有任何运动部件,利用动能使液体与淤积物混合后产生流动,使得泥浆固液两相流沿着吸入路线进入腔内,由离析机构腔室的高低压差产生连续抽吸作用,达到输送泥浆的目的;

(3) 开发了适用于河网环保清淤的无船体结构便携式设备,研制的便携式清淤机实现了设备小型轻量化,方便拆卸与组装,便于运输和使用,且使用过程不污染环境,适用于河网地区小河道清淤.

参 考 文 献:

- [1] 李国通, 谈盛建. 通航河流桥区航道疏浚浅析[J]. 中国水运, 2008, (7): 38-39. (LI Guo-tong, TAN Sheng-jian. Dredging analysis of the navigable river bridge region[J]. **China Water Transport**, 2008, (7): 38-39. (in Chinese))
- [2] 宋贺好. 耙吸式挖泥船是航道疏浚业的生力军[J]. 港口科技, 2008, (6): 25-27. (SONG He-hao. The raking-sucking dredger is the main force in the dredge of the channel[J]. **Science & Technology of Ports**, 2008, (6): 25-27. (in Chinese))
- [3] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 76-90. (CHEN Mao-zhang. Fundamentals of Viscous Fluid Dynamics[M]. **Beijing: Higher Education Press**, 2004: 76-90. (in Chinese))
- [4] 齐学义. 流体机械设计理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 26-38. (QI Xue-yi. Theory and Methods of Fluid Machinery[M]. **Beijing: China Waterpower Press**, 2008: 26-38. (in Chinese))
- [5] Ellenrieder K D. Fluid mechanics of flapping wings[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2008, 32: 1578-1589.
- [6] 邹慧君, 高峰. 现代机构学进展[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 28-45. (ZOU Hui-jun, GAO Feng. Advances in Modern Mechanism[M]. **Beijing: Higher Education Press**, 2007: 28-45. (in Chinese))
- [7] 周怀东, 彭文启. 水污染与水环境修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 172-176. (ZHOU Huai-dong, PENG Wen-qi. Water Pollution and Water Environment Restoration [M]. **Beijing: Chemical Industry Press**, 2005: 172-176. (in Chinese))
- [8] David R B. Analytical model of hydraulic pipeline dredge[J]. **Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division**, 1975, (1): 33-48.
- [9] Thomas M T. Fundamentals of Hydraulic Dredging[M]. **Reston: ASCE Press**, 1996: 61-78.

- [10] 李德军,吕艳华,王润田. 模式识别技术在泥浆浓度反演中的应用[J]. 中国工程科学, 2007, (5): 81-83. (LI De-jun, LV Yan-hua, WANG Run-tian. Application of fuzzy pattern recognition in the measurement of slurry concentration[J]. *Engineering Science*, 2007, (5): 81-83. (in Chinese))

Design and test of the portable dredging machine based on Bernoulli effect

SUN Jin-hua, LI Yun, FAN Bao-kang, LUO Yong, LUO Shao-ze
(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: A main objective of this paper is the successful design of the C-DX portable dredging machine on the platform of SolidWorks, which will be mainly applied to small rivers. Inside the eductor pump, the Bernoulli effect causes suction at the suction head. Laboratory researches on the pipeline sediment and density with three different diameter nozzles in 1/4 of full-open valve condition are conducted, and a 9.0 mm diameter nozzle is then recommended. Operating parameters are analyzed under two conditions of 235 meters and 45 meters pipe translation distances. The prototype tests are carried out and the results show that based on the Bernoulli effect, the dredging machine is designed with small size, huge flow-out, and high mud concentration. The machine has the ability to adapt easily to the parameters of river width, water depth and soil texture, etc.. Finally this paper also points out that the percentage of mud concentration is actually related to bed sediment physics, bed sediment chemistry, natural river ecosystem and machine performance.

Key words: dredging machine; design; characteristics; river

欢迎投稿, 欢迎订阅

依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、计算和分析,以及学科专家评审,《水利水运工程学报》已入编《中文核心期刊要目总览》2008年版(即第五版)之水利工程类核心期刊。同时,经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐,《水利水运工程学报》再次被收录为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。

《水利水运工程学报》系国家水利部主管,南京水利科学研究院主办的学术性科技期刊,国内外公开发行。主要报道水利水电、水运、海洋工程和土木建筑等工程的规划,可行性研究,设计,科研,施工,监理以及管理工作中的新理论,新技术,新方法和新材料等。该刊为全国中文核心期刊和中国科技核心期刊,已被国内外多家检索机构和数据库收录,如美国《剑桥科学文摘(自然科学)》(CSA(Natural Science))等,深受水利水电、水运交通及海洋工程领域广大科技人员和院校师生的欢迎。

《水利水运工程学报》编辑部