

吸冲一体式射流泵特性方程及设计研究

门洋帆, 李玉超, 李善成, 曾广会

海军潜艇学院, 山东 青岛

收稿日期: 2023年11月12日; 录用日期: 2024年3月7日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

本文从大深度水下除泥作业的实际需求出发, 提出了一种吸冲一体式射流泵。在传统射流泵方程的基础上, 推导了吸冲一体式射流泵的特性方程, 并以此为基础, 设计了一款能够适用于大深度打捞的吸冲一体式射流泵, 为大深度水下除泥作业提供了参考。

关键词

吸冲一体, 射流泵, 特性方程

Research on Characteristic Equation and Design of Suction and Impulse Integrated Jet Pump

Yangfan Men, Yuchao Li, Shancheng Li, Guanghui Zeng

Naval Submarine Academy, Qingdao Shandong

Received: Nov. 12th, 2023; accepted: Mar. 7th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

In this paper, starting from the actual needs of deep-water desilting operations, an integrated suction and impulse jet pump is proposed. Based on the traditional jet pump equation, the characteristic equation of the suction and impulse integrated jet pump is derived. Based on this, a suction and impulse jet pump is designed for deep-water salvage, providing a reference for deep-water desilting operations.

Keywords

Suction and Flushing Integration, Jet Pump, Characteristic Equation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国不断地走向深海远海，深海遇险遇难的事故频率会逐步增加。当潜艇、飞机沉没于深海时，由于深海沉积物的作用，其往往会陷入海底淤泥中，这将严重影响失事装备的搜寻作业和打捞作业[1]，因此水下除泥是有效搜寻和打捞沉没海底沉物的必需手段之一。目前，打捞作业中水下除泥主要采用气升式吸泥装置，该装置使用的普通型吸泥管的最大内径为 152 毫米，加强型吸泥管的最大内径为 254 毫米。然而，随着走向远海深海，当水深较大时，由于管路吸泥管长度和管径较大，受水流影响大，使得水下的布设及操作使用困难，同时气升式深海供气需要压力较大，无法进行深海作业[2]。因此，气升式吸泥装置大深度下有效除泥作业能力极其薄弱，难以满足大深度水深条件下除泥作业的需要。综上，设计出一个能方便操作的清除大深度环境下沉积物附近泥沙并且可以稳定工作的水下冲泥吸泥装置是目前亟需解决的技术难题。目前，环形射流泵由于结构比较简单，操作方便，对沙粒等固体物质的运输性能较好，是适宜开展水下清除淤泥的装置之一。射流泵没有旋转部件，不会对打捞物造成二次伤害。但是往往水下淤泥粘性较大，导致了清淤难度加大，一种吸冲一体式环形射流泵可以很好地解决该问题。目前对于射流泵的设计理论已经十分成熟[3]-[5]，刘冰等利用射流泵理论探究了双喷嘴下射流泵的设计，并提出了双喷嘴射流泵的理论设计[6]。郭威研究了一种水下复合清淤工具，利用 CFD 研究了中心射流泵和冲泥复合下的装置的性能，但没有详细的理论说明[7]。因此，对于吸冲一体式环形射流泵的设计还处于空白，本文结合射流泵理论，开展了吸冲一体式射流泵的理论设计，并针对水下清淤设计了一种吸冲一体式射流泵。

2. 吸冲一体式环形射流泵的工作原理

环形射流泵的结构如图 1 所示，它包含环形喷嘴、喉管、扩散管。工作原理为高压的工作流体通过喷嘴射出，在喷嘴出口处速度较高，压力降低。这样被吸流体就会被吸入喉内，两股流体会在喉管内混合和能量交换，在扩散管混合液体流速降低，压力增大，从而使混合液排出需要的距离。射流泵没有运动旋转部件，具有结构简单、工作可靠、耐磨损、维护费用低、控制灵活方便等优点。目前射流泵在挖泥、疏浚和清淤方面已经有不少学者进行了相关研究[8]-[11]。

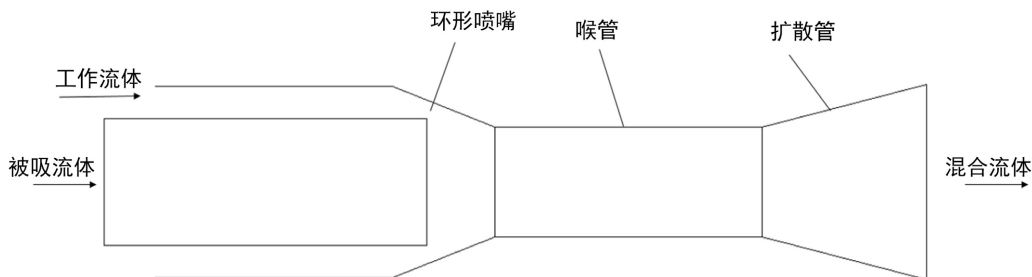


Figure 1. Ring jet pump
图 1. 环形射流泵

针对水下清淤作业，防止泥沙淤积过厚无法进行吸泥作业，对环形射流泵进行了改进，增加了冲泥喷嘴，提升吸泥泵效率和效果。改进后如图 2 所示。

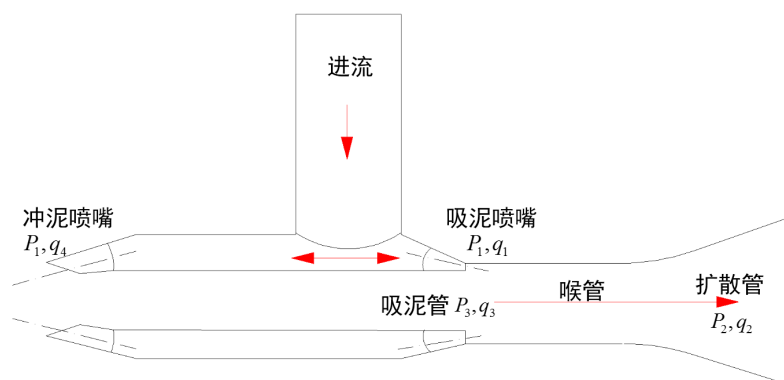


Figure 2. Working principle of suction and impulse integrated jet pump
图 2. 冲吸泥一体式射流泵工作原理

改进后的工作原理是：高压进流进入后分为两部分，一部分流体作为冲洗液由冲泥喷嘴射流喷出，冲击泥沙形成悬浮液。另一部分作为射流泵动力液由吸泥喷嘴射流喷出，在吸泥喷嘴与喉管之间的吸入室处，动力液的高压头转变为速度水头，从而使得吸入室(喉管)周围压力迅速降低，形成负压吸附区。在压差作用下，冲泥喷嘴处形成的泥沙悬浮吸入液进入喉管与动力液充分混合后。在此过程中，动力液失去动量和动能，而吸入液会相应地得到能量。混合液进入扩散管后的进入增压阶段，由于扩散管横截面积逐渐增大，会将速度水头转为压力水头，从而排出。

3. 基本方程的推导

射流泵的压力、流量与射流泵的几何尺寸之间的关系，反映了射流泵的工作部件对其性能的影响[12]。对于射流泵的工作特性参数，通常有无量纲压头比 P 、无量纲流量比 M 、无量纲面积比 R 以及无量纲流速比 V 。

3.1. 无量纲参数

1) 无量纲压头比 P

$$P = (p_2 - p_3) / (p_1 - p_2)$$

无量纲压头比为被吸流体的压头增加值比上动力液的压头减少值，该值越大，表明被吸液获得的能量越大，泵的举升能力越强。

2) 流量比

$$M_1 = q_3 / q_1$$

$$M_2 = q_4 / q_1$$

式中： M_1 为被吸液的流量 q_3 比上喷嘴动力液流量 q_1 ； M_2 为下喷嘴动力液的流量 q_4 比上喷嘴动力液流量 q_1 。

若 M_1 越大，表明较少的动力液可以抽吸较多的被吸液，泵的抽吸能力强；若 M_2 较大，表明泵的清洗作用大。从吸冲射流泵效率来看，冲泥喷嘴流量对射流泵举升能力基本没有贡献。但是在实际工作中往往可能由于泥沙过厚或者浓度过大导致射流泵效率比较低下，因此需要综合考虑流量的分配，使得射

流泵吸泥效率处于最佳。

3) 面积比

$$R = A_j / A_t$$

式中： A_j 为吸泥喷嘴的环形面积； A_t 为喷嘴处横截面的面积，即喉管截面面积。

4) 密度比

$$\rho = \rho_3 / \rho_1$$

式中： ρ_1 为动力液密度； ρ_3 为被吸液密度(为吸泥喷嘴的动力液与泥沙混合后的密度)。

3.2. 特性方程推导

射流泵工作时，其能量主要体现在动力液通过喷嘴时提供的能量 E_j 、被吸液得到的能量 E_s 、动力液与被吸液混合时的能量损失 L 、动力液通过吸泥喷嘴时的能量损失 F_{j1} 、动力液通过冲泥喷嘴时的能量损失 F_{j2} 、被吸液通过吸入管道时的能量损失 F_s 以及混合液通过喉管和扩散管时的能量损失 F_{td} (沿程损失)。总的能量损失为：

$$E_f = L + F_{j1} + F_{j2} + F_s + F_{td}$$

动力液通过吸泥喷嘴后压力由 p_1 变为了 p_2 ，通过冲泥喷嘴时动力液的能量由 p_1 最终变为了 p_3 ，因此单位时间内，动力液提供的能量为：

$$E_j = q_1(p_1 - p_2) + q_4(p_1 - p_2)$$

单位时间内，被吸液得到的能量为：

$$E_s = q_3(p_2 - p_3)$$

吸泥喷嘴的动力与被吸液最终进入喉管混合，速度差为 0，根据洛伦兹混合损失模型[8]，动力液与被吸液在喉管中的混合能量损失为：

$$L = \rho_1 q_1 \frac{(v_j - v_t)^2}{2} + \rho_3 q_3 \frac{(v_s - v_t)^2}{2} + \rho_1 q_4 \frac{v_c^2}{2}$$

式中： ρ_1 为动力液密度； ρ_3 为混合液密度； v_j 为动力液在吸泥喷嘴处的速度； v_t 混为合液在喉管断面的平均速度， v_c 为动力液在冲泥喷嘴处的速度， v_s 为吸入液在吸泥喷嘴处的速度。

动力液通过吸泥、冲泥喷嘴能量损失 F_{j1}, F_{j2} ，被吸液经过吸入环道能量损失 F_s 以及喉管与扩散管的摩擦损失 F_{td} 分别为：

$$F_{j1} = \rho_1 q_1 K_{j1} v_j^2 / 2$$

$$F_{j2} = \rho_1 q_4 K_{j2} v_c^2 / 2$$

$$F_s = \rho_3 q_3 K_s v_s^2 / 2$$

$$F_{td} = \rho_2 q_2 K_{td} v_t^2 / 2$$

式中： K_{j1} 、 K_{j2} 分别为吸泥、冲泥喷嘴能量损失系数； K_s 为被吸液管道能量损失系数； K_{td} 为混合液在喉管、扩散管能量损失系数。

忽略喷嘴边缘厚度，由喷嘴截面处的面积关系可得：

$$A_t = A_j + A_s$$

因此, 存在以下关系:

$$\begin{aligned} v_s &= M_1 v_j / (1 - R) \\ v_t &= R(1 + M_1) v_j \end{aligned}$$

由密度之间关系可知:

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \rho M_1) / (1 + M_1)$$

根据上式可知损失的总能量为:

$$E_f = L + F_{j1} + F_{j2} + F_s + F_{td} = \xi \rho_1 q_1 v_j^2 / 2 + (1 + K_{j2}) \rho_1 q_4 v_c^2 / 2$$

式中:

$$\xi = (1 + K_{j1}) + (1 + K_s) \rho M_1^3 \left(\frac{R}{1 - R} \right)^2 + (1 + K_{td}) R^2 (1 + \rho M_1) (1 + M)^2 - 2R(1 + M_1) \left(1 + \rho M_1^2 \frac{R}{1 - R} \right)$$

在吸泥喷嘴处选一断面, 分别由喷嘴入口断面和吸入液入口断面建立能量方程:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_a + (1 + K_{j1}) \rho_1 v_j^2 / 2 \\ p_3 &= p_a + (1 + K_s) \rho_3 v_s^2 / 2 \end{aligned}$$

进而可得:

$$v_j^2 / 2 = (p_1 - p_3) / (\eta \rho_1)$$

式中:

$$\eta = (1 + K_{j1}) - (1 + K_s) \rho M_1^2 \left(\frac{R}{1 - R} \right)^2$$

同理, 由下喷嘴处建立能量方程可知:

$$v_c^2 / 2 = (p_1 - p_3) / (1 + K_{j2}) \rho_1$$

因此:

$$E_f = \xi q_1 (p_1 - p_3) / \eta + q_4 (p_1 - p_3)$$

根据能量守恒可知:

$$E_f = E_j - E_s$$

整理得:

$$P = (\eta - \xi) / (\eta M_1 + \xi)$$

效率:

$$E = \frac{E_s}{E_j} = \frac{P M_1}{1 + M_2 (1 + P)}$$

由上式可以看出, 效率取决于无量纲压头比和无量纲流量比。该方程考虑了下喷嘴损失的能量以及上喷嘴动力与被吸液混合的能量损失。从公式可以看出 M_2 的增加会引起射流泵效率的降低, 其对射流泵的压头比和效率没有贡献。但是实际 M_2 增加有利于降低被吸液的密度, 从而密度比降低, 能量损失会减少, 从而会提升射流泵的效率, 因此实际工作中需要考虑冲泥喷嘴的流量。

4. 射流泵的性能曲线

射流吸泥泵的设计在于其效率最高,取冲泥的流量与吸泥的流量比为 $M_2 = \frac{1}{5}$, 泥浆密度即 $\rho_3 = 2.65$, 动力液为海水, 密度为 $\rho_1 = 1.025$ 。根据文献[5], 取 $K_s = 0.2$, $K_j = 0.03$, $K_{td} = 0.2$ 。根据上述理论绘制射流泵在不同面积比下的性能曲线以及效率顶点曲线和压力包络线, 如图 3 和图 4 所示。

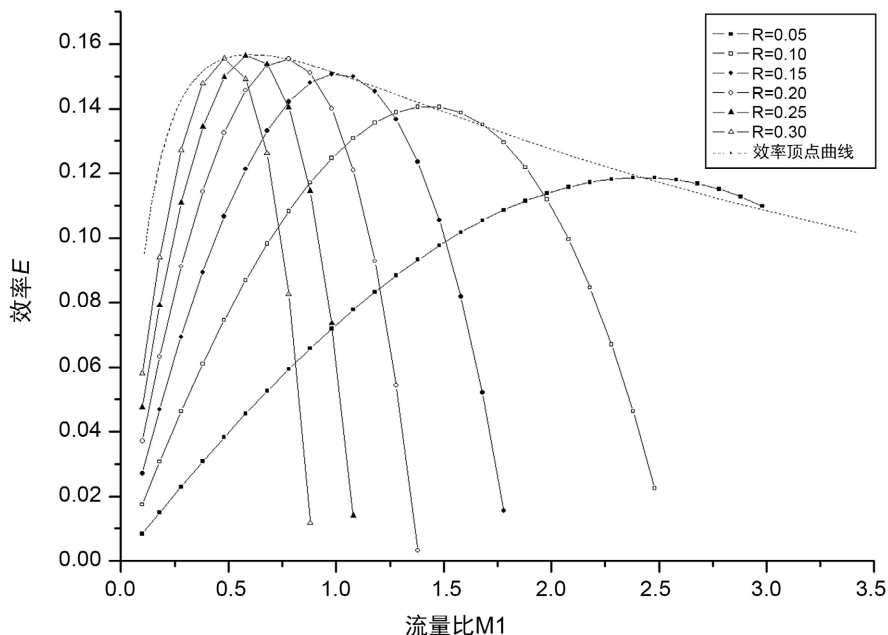


Figure 3. Efficiency curves under different area ratios
图 3. 不同面积比下的效率曲线

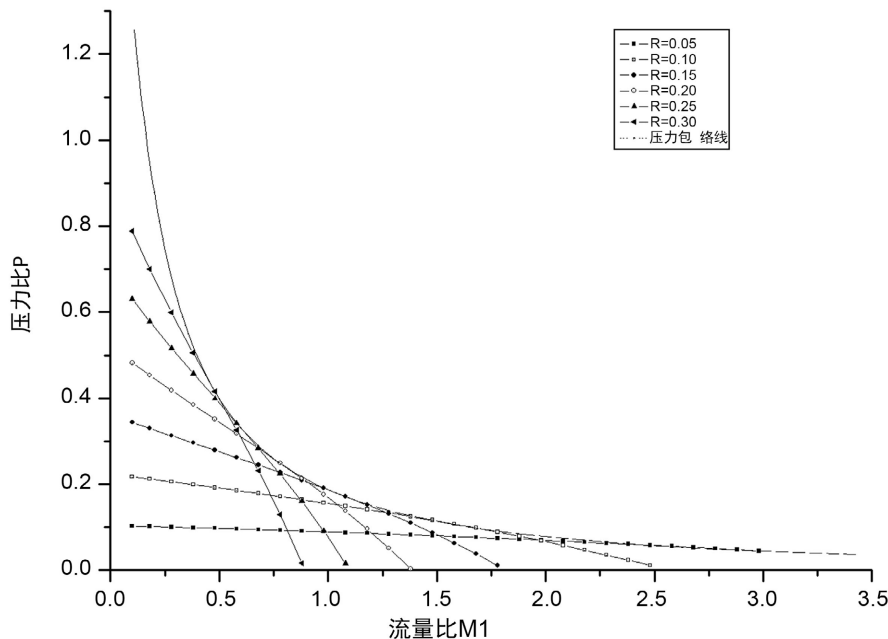


Figure 4. Pressure ratio curves under different area ratios
图 4. 不同面积比下的压力比曲线

从性能包络线曲线可以看出,在不同的面积比下,均存在随着流量比的增大,压力比减小;同时,射流泵的效率存在一个最大值,在设计时如果工作泵未知的情况下,选取最佳效率对应的面积比、流量比以及压力比。

5. 射流泵设计

在实际打捞作业中,只需要排出一定距离即可,无需将泥沙进行举升。因此,要求射流泵深水扬程 10 m,排泥量 30 m³/h,为了满足潜水员或者水下潜器进行水下操作使用,因此射流泵外径不大于 100 mm,这里取 100 mm,即喉管的直径为 $D = 100$ mm。根据性能曲线方程,当效率最大时为 0.1566,面积比为 0.22,最佳流量比为 0.62;压力比为 0.32,此时最大效率为 0.1566。

1) 上喷嘴流量 q_1

$$q_1 = q_3 / M_1 = 48.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

2) 下喷嘴流量 q_4

$$q_4 = q_1 * M_2 = 17.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

3) 上喷嘴的环形内管直径

$$d = \sqrt{(1-R)D^2} = 88.3 \text{ mm}$$

4) 喉管长度

喉管长度即混合室长度,喉管过短会导致吸入液与动力液混合不均匀,导致扩散损失较大;喉管过长,会引起较大的流动损失。一般喉管的长度 $L_2 = (3.5-4)D$,这里取 350 mm。

5) 扩散管

扩散管参数有扩散角、扩散管长度。一般扩散角角度为 8°~13°,这里取 8°;当扩散管角度为 8°时,扩散管长度为:

$$L_3 = (3.5-4)D = 380 \text{ mm}$$

6) 射流入口扬程

$$H_0 = 10/0.34 = 29.5 \text{ m}$$

7) 下喷嘴直径等效直径

$$d_2 = \sqrt{\frac{4q_4}{\sqrt{3.14(1-k_j)}\sqrt{2g\frac{P_1-P_3}{\rho_1}}}} = 12.5 \text{ mm}$$

下喷嘴一般布置 6 个环形喷嘴,则每个直径大小为:

$$d_3 = d_2 / \sqrt{6} = 5.1 \text{ mm}$$

若考虑到大深度一般为水下 100 m 以上进行排泥作业,工作泵安装在船上,取管路长度为 120 m,管路直径为 100 mm,则由达西公式,沿程局部阻力为:

$$H_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{V_g^2}{2g} = 18.6 \text{ m}$$

因此,工作泵的扬程为:

$$H = H_f + H_0 = 48.1 \text{ m}$$

工作泵的流量为:

$$Q = q_1 + q_2 = 65.7 \text{ m}^3$$

工作泵的输出功率为:

$$P_t = \rho g Q_0 H_0 = 8.8 \text{ kW}$$

如果工作泵效率为 60%，则输出功率为 $P_t = 15 \text{ kW}$ 。故工作泵选型如下：离心式潜水泵，排口直径为 50 mm，流量为 120 m³/h，扬程为 100 m，功率为 34 kW 可满足设计要求。

综上：射流泵的设计参数如表 1 所示。

Table 1. Jet pump design parameters

表 1. 射流泵设计参数

| 进水管直径/mm | 吸泥管直径/mm | 喷嘴直径/mm | 喉管长度/mm | 扩散管角度/° | 扩散管长度/mm | 冲泥嘴直径/mm |
|----------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 50 | 88.3 | 100 | 350 | 18 | 380 | 5.1 |

6. 总结

本文针对大深度水下除泥作业难度大，传统的气升式除泥装置已经难以满足大深度除泥作业，采用了环形射流泵为核心的一种水下冲吸泥一体装置，该装置结构简单，操作方便，可满足潜水员水下单人操作，亦可结合水下 ROV 进行更深水深的除泥作业。结合射流基本理论，给出了水下冲洗泥射流泵的具体参数。

为了全面分析冲吸泥一体射流泵冲刷、流动、混合、扩散的性能参数，下一步将结合 CFD 工作，开展水下冲吸泥中的泥沙冲刷、射流泵内部流场分布规律等研究，进一步优化冲吸泥一体射流泵，以提高水下冲吸泥效率，实现更好的水下除泥作业。

参考文献

- [1] 张立山. 深海冲泥作业装置设计及工作机理研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [2] 李善成, 韩伟, 张富刚. 射流泵研究现状及水下清淤展望[J]. 第二届防险救生论坛, 2019: 35-37.
- [3] 王常斌. 油井排砂用射流泵的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [4] 刘旭. 油井射流排砂固液两相流场数值分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [5] 陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [6] 刘冰, 郝志顺, 马世超, 等. 双喷嘴射流泵基本特性方程及其性能研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2645-2650.
- [7] 郭威. 水下冲洗与抽吸功能复合型作业工具研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [8] 陆东宏, 陆宏圻. 射流排泥装置及其地下工程施工的应用[C]//中国机械工程学会年会暨中国工程师机械与运载工程学部首届年会. 2006: 39-41.
- [9] 杨勇, 陆宏圻, 鲁立三. 射流冲吸泥装置形成的人工异重流研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(5): 15-19.
- [10] 陆宏圻, 杨勇, 何培杰, 等. 小浪底水库射流冲吸式清淤设备研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 15-19.
- [11] 倪其军, 阮文权. 清淤射流泵流场数值模拟及其参数对性能影响分析[J]. 船舶力学, 2019, 23(7): 781-789.
- [12] Lu, X., Wang, D., Shen, W., Zhu, C. and Chen, M. (2015) Experimental Investigation on the Performance of Improving Jet Pump Cavitation with Air Suction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **88**, 379-387. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.099>