

· 施 工 ·



绞吸船可伸缩式新型吸口格栅的 理论设计方法

李金峰¹, 徐 斌¹, 赵 强²

(1. 中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300450; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 绞吸船吸口格栅常发生石块堵塞, 清理石块需要停泵, 费时费力。介绍一种新型可伸缩式吸口格栅, 其中每组格栅由固定内格栅和活动外格栅组成。绞吸船正常施工时, 外格栅在高速水流作用下处于上推状态, 格栅间距小; 当石块堵塞于格栅之间时, 降低流速至临界流速以下, 外格栅跌落, 格栅间距变大, 石块自行脱落。提出格栅外形尺寸设计方法, 通过格栅及堵塞石块理论受力分析给出外格栅上推临界流速、外格栅和堵塞石块脱落临界流速的计算方法, 并采用理论计算开展典型案例设计。采用该方法设计的格栅形式清理绞刀吸口无需停泵, 有效提高绞吸船时利率, 可用于绞吸船疏浚多石底质工况。

关键词: 绞吸船; 吸口; 格栅; 设计方法

中图分类号: U615.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0191-07

Theoretical design method of new type of retractable suction grille for cutter suction vessels

LI Jinfeng¹, XU Bin¹, ZHAO Qiang²

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Dredging Engineering Technology for Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: The suction grille of cutter suction vessels often experiences stone blockage, and the cleaning of stones requires stopping the pump, which is time-consuming and labor-intensive. This article introduces a new type of retractable suction grille, in which each group of retractable suction grilles consists of a fixed inner grille and a movable outer grille. During normal construction of cutter suction vessels, the outer grille is in an upward pushing state under the action of high-speed water flow, and the spacing between the grilles is small. When the stones are blocked between the grilles, the flow rate is reduced to below the critical flow rate, the outer grille drops, the spacing between the grilles increases, and the stones fall off on their own. This article provides a design method for the overall dimensions of the grille, and provides a calculation method for the critical velocity of the upward push of the outer grille and the critical velocity of the detachment of the outer grille and the blocked stone through the theoretical force analysis of the grille and the blocked stone. Furthermore, typical case designs are carried out using theoretical calculations. The grille designed using this method can clean the cutter suction without stopping the pump, effectively improving the efficiency of the cutter suction dredger, and can be used for dredging multi stone soil.

Keywords: cutter suction dredger; suction; grille; design method

绞吸船是疏浚工程的主力船型, 在航道、港池疏浚和维护中发挥重要作用。绞吸船绞刀吸口位于绞刀后端的椎体下方^[1], 呈喇叭口状, 其作用是收集并吸入绞刀挖掘的疏浚土, 由于疏浚土

中的块石等杂物进入输送管道后易导致泥泵流道堵塞^[2], 因此常在绞刀吸口处安装格栅, 防止超过限制粒径的石块进入。国内外疏浚企业对绞刀吸口格栅开展了大量现场试验研究, 周志强等^[3]

收稿日期: 2024-06-17

作者简介: 李金峰(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚技术研究工作。

基于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术对绞吸船常用的绞刀防石设备进行水力性能研究, 确定由于加装防石设备造成的局部水力损失系数, 结果表明单防石环和犬牙式防石格栅水力损失最小。孙芳淳^[4]分析多种形式吸口格栅的优、缺点, 对绞刀吸口格栅间距进行调整和改造并开展现场试验, 取得良好的工程效果。王晓萌^[5]开展 3 种吸口格栅形式的现场试验研究, 基于绞吸船施工数据分析不同格栅形式的局部水力损失系数及对挖掘的影响, 为不同工况采用合理的格栅形式提供参考依据。

现有文献中的格栅形式一般由钢板焊接而成, 长时间疏浚后堵塞物往往会卡塞在吸口格栅之间, 造成吸入真空增加、吸入浓度下降^[6], 影响绞吸船的生产效率。此时, 一般需要脱泵回水, 通过反向水流将堵塞物冲刷掉, 或将绞刀提升至绞刀平台后进行人工清理, 无论哪一种清理方法均需停泵, 单次清理吸口格栅时间平均在 0.5 h 左右, 对于卡塞紧密的堵塞物, 即使采用以上方法也难以清理, 造成劳动量大和挖泥船停工时间长, 挖泥船时利率和生产效率降低。

1 可伸缩式吸口格栅工作原理

本文设计一种绞吸船用新型可伸缩式吸口格栅, 吸口格栅由多组构成, 每组格栅由内格栅、外格栅、螺栓组成。内格栅采用钢板竖向焊接在绞刀吸口上、下端; 外格栅采用 U 形钢板嵌套在内格栅外部, 钢板两侧内壁与内格栅之间留有缝隙, 钢板开口处预留多个螺栓孔, 上紧螺栓, 外格栅可沿内格栅自由滑动。相邻组格栅间隔布置, 组内相邻格栅横截面的长边呈一定水平夹角。当绞吸船施工时, 在吸口处高速水流携带下, 外格栅上推, 相邻组格栅之间的间隙减小, 当有石块、块状杂物堵塞在格栅之间时, 适当降低泥泵转速, 减小水流对外格栅和堵塞物的绕流阻力, 外格栅在重力作用下沿内格栅下滑, 格栅之间的间隙增大, 堵塞物可在重力作用下自行脱落。可伸缩式吸口格栅结构和安装效果见图 1、2。

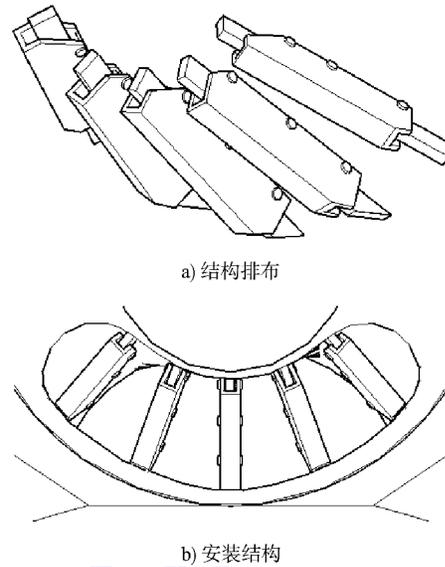


图 1 可伸缩式吸口格栅结构
Fig. 1 Retractable suction grille structure

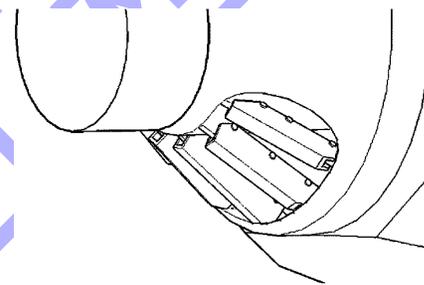
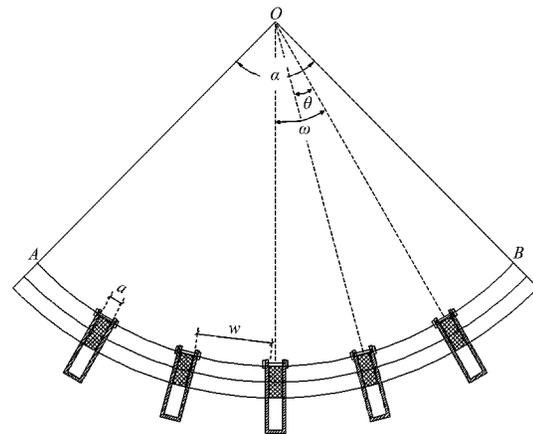


图 2 可伸缩式吸口格栅安装效果
Fig. 2 Installation effect of retractable suction grille

2 格栅外形尺寸设计

2.1 横截面尺寸设计

格栅横截面如图 3 所示。



注: A、B 为绞刀吸口左右两端点; α 为吸口弧面角度 $\angle AOB$; a 为内格栅的截面宽度; w 为相邻内格栅之间的最小间距; θ 为相邻格栅横截面轴线的夹角; ω 为内格栅横截面轴线与整体格栅中轴线的夹角。

图 3 可伸缩式吸口格栅横截面
Fig. 3 Cross section of retractable suction grille

内格栅安装完成后, 近似有:

$$L = na + (n+1)w \quad (1)$$

式中: L 为内格栅内侧面所在弧面 \widehat{AB} 长度; n 为安装格栅组数。

相邻格栅横截面轴线的夹角为:

$$\theta = \frac{\alpha}{n+1} \quad (2)$$

设内格栅截面长度为 b , 外格栅截面宽度为 c 、长度为 l , 内格栅两侧与外格栅的间隙为 δ , 螺栓内侧与外格栅外端距离为 m , 外格栅钢板厚度为 t , 另外设相关距离参数 x 、 y 、 z 如图 4 所示。则有:

$$c = a + 2(\delta + t) \quad (3)$$

$$x = \frac{t}{\cos(\theta/2)} \quad (4)$$

$$y = t \tan(\theta/2) \quad (5)$$

$$z = (l - b - t - y) \sin(\theta/2) \quad (6)$$

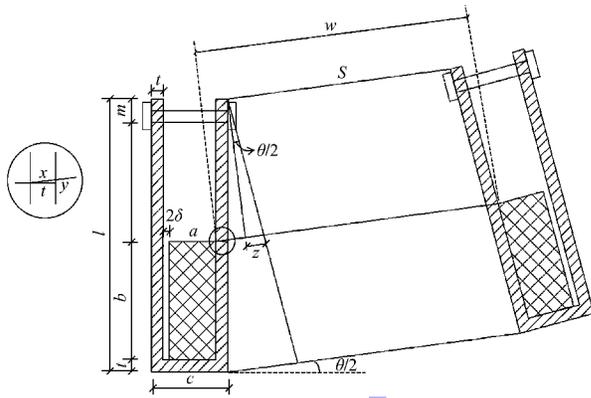


图4 单组格栅横断面

Fig. 4 Cross section of single-group grille

外格栅上推后, 若相邻格栅之间堵塞石块, 外格栅堵塞一侧与内格栅之间的间隙将变为 0, 另一侧间隙变为 2δ , 此时相邻外格栅之间的最小间距 s 为:

$$s = w - 2x - 2z \quad (7)$$

由式(1)~(7)得:

$$a = \frac{L - (n+1) [s + 2t/\cos\mu + 2(l - b - t \cdot \tan\mu + 1) \sin\mu]}{n} \quad (8)$$

$$c = a + 2(\delta + t) \quad (9)$$

由式(8)~(9)得 c 与 t 、 c 与 a 关系如下:

$$c = \frac{L - (n+1) \{s + 2t/\cos\mu + 2[l - b - t(\tan\mu + 1)] \sin\mu\}}{n} + 2(\delta + t) \quad (10)$$

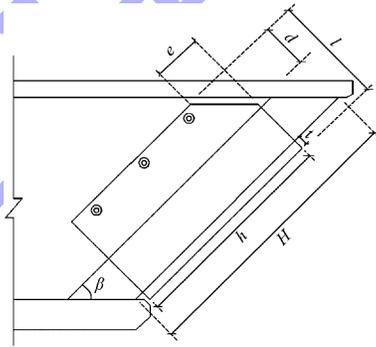
$$c = a + 2\delta + \frac{S - (L - na)/(n+1) + 2(l - b) \sin\mu}{(\tan\mu + 1) \sin\mu - 1/\cos\mu} \quad (11)$$

式中: $\mu = \frac{\alpha}{2(n+1)}$

2.2 纵截面尺寸设计

单组格栅纵截面见图 5。

为避免石块从外格栅上部或下部进入吸口, 外格栅长度以略大于内格栅长度与块石限制粒径之差为宜, 即 $h > H - s$ 。外格栅上部适当切角, 以保证外格栅可以在水流携带作用下实现上推, 直角边切角尺寸为 $d \times e$ 。



注: H 为内格栅长度; β 为内格栅安装后与吸口管道内壁夹角; h 为外格栅长度; d 、 e 为直角边切角尺寸。

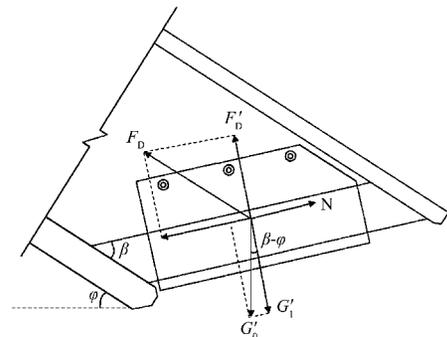
图5 单组格栅纵截面

Fig. 5 Longitudinal section of single-group grille

3 外格栅及石块受力分析

3.1 外格栅重力

格栅受力分析如图 6 所示。



注: F_D 为绕流阻力, F'_D 为绕流阻力垂直格栅方向的分力, $F'_D = F_D \sin \beta$; G'_0 为格栅的有效重力; G'_1 为 G'_0 在垂直于内格栅纵轴线方向上的分力。

图6 外格栅受力分析

Fig. 6 Force analysis of external grille

外格栅体积 V_1 为:

$$V_1 = th(2l+c-2t) - edt \quad (12)$$

螺栓体积 V_2 为:

$$V_2 = \frac{\pi}{4} D_1^2 c + 2 \times \frac{\pi}{4} D_2^2 k \quad (13)$$

式中: D_1 为螺栓直径; D_2 为螺母直径; k 为螺母厚度。

若每块外格栅安装 2 个螺栓, 则格栅有效重力 G'_0 为:

$$G'_0 = \left[th(2l+c-2t) - edt + 2 \times \left(\frac{\pi}{4} D_1^2 c + 2 \times \frac{\pi}{4} D_2^2 k \right) \right] \cdot (\gamma - 10) \quad (14)$$

式中: γ 为钢板和螺栓重力密度, 扣除水浮力作用后的有效重力密度 $\gamma' = \gamma - 10$ (水重力密度取 10 kN/m^3)。

设绞刀桥架下放角度为 φ , 当 n 为奇数时:

$$\omega_{\max} = \frac{n-1}{2} \theta = \frac{(n-1)\alpha}{2(n+1)} \quad (15)$$

则 G'_0 在垂直于内格栅纵轴线方向上的分力 G'_1 为:

$$G'_1 = G'_0 \cos(\beta - \varphi) \cos \omega \quad (16)$$

G'_1 最大值和最小值:

$$G'_{1,\min} = G'_0 \cos(\beta - \varphi) \cos \left[\frac{(n-1)\alpha}{2(n+1)} \right] \quad (17)$$

$$G'_{1,\max} = G'_0 \cos(\beta - \varphi) \quad (18)$$

3.2 外格栅绕流阻力

外格栅在吸口处水流的作用下会产生上推力, 此上推力可称为绕流阻力。绕流阻力为压强阻力与摩擦阻力之和, 方向与流体运动方向相反, 通常表示为:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad (19)$$

式中: C_D 为绕流阻力系数; A 为外格栅在垂直于流体运动方向平面上的投影面积; ρ 为水流密度; v 为吸口处水流流动速度。

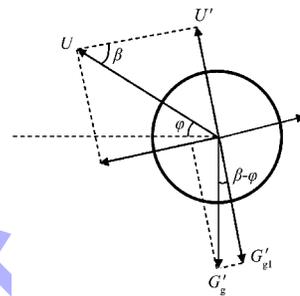
C_D 主要取决于雷诺数 Re , 并和物体的形状和表面粗糙度有关, 当 $100\,000 < Re < 500\,000$ 时 (外格栅在吸口处水流中的雷诺数在此范围内), 方形物体在均匀水流中的 C_D 表示为^[7-8]:

$$C_D = \zeta \left(1.8 - \frac{Re - 100\,000}{400\,000} \right) \quad (20)$$

式中: ζ 为横截面长宽比影响系数, 按照相关文献经验数据, 当 l/c 取 1、2、3、4 时, ζ 分别取 1.00、0.83、0.78、0.71。

3.3 堵塞石块重力

石块受力分析如图 7 所示。



注: G'_g 为扣除水的浮力作用后石块的有效重力; $G'_{g,1}$ 为 G'_g 在垂直于内格栅纵轴线方向上的分力; U 为堵塞石块在水流作用下承受的绕流阻力; U' 为绕流阻力在垂直格栅方向的分力。

图 7 石块受力分析

Fig. 7 Force analysis of rock

将堵塞石块假定为球形, 则有:

$$G'_g = \frac{1}{6} \pi D^3 (\gamma_g - 10) \quad (21)$$

$$G'_{g,1} = G'_g \cos(\beta - \varphi) \cos \omega \quad (22)$$

$G'_{g,1}$ 最大值和最小值为:

$$G'_{g,1,\min} = G'_g \cos(\beta - \varphi) \cos \left[\frac{(n-1)\alpha}{2(n+1)} \right] \quad (23)$$

$$G'_{g,1,\max} = G'_g \cos(\beta - \varphi) \quad (24)$$

式中: D 为石块直径; γ_g 为石块的重力密度。

3.4 堵塞石块绕流阻力

堵塞石块在水流作用下承受的绕流阻力可表示为^[9-10]:

$$U = C_D \frac{\rho \pi D^2 V^2}{8} \quad (25)$$

$$U' = U \sin \beta \quad (26)$$

当 $Re > 1\,000$ 时, C_D 取 0.45。

3.5 受力平衡分析

当无石块堵塞, 外格栅处于跌落与上推的临界状态时, 有 $G'_1 = F'_D$;

当有石块堵塞, 外格栅处于跌落与上推的临界状态时, 有 $G'_1 + G'_{g,1} = F'_D + U'$ 。

4 设计案例

4.1 格栅外形尺寸设计

绞吸船绞刀吸口中内格栅内侧面所在弧面长度 $L=168\text{ cm}$, $\alpha=90^\circ$, 假设安装格栅 5 组, 石块限制粒径为 20 cm , 即外格栅上推时相邻外格栅之间的最小间距 $s=20\text{ cm}$, 外格栅截面长度 $l=23\text{ cm}$, 内格栅截面长度 $b=10\text{ cm}$, 内格栅两侧与外格栅的间隙为 $\delta=0.24\text{ cm}$ 。将以上边界条件代入式 (10)、(11), 得到外格栅钢板厚度 t 与外格栅截面宽度 c 、内格栅截面宽度 a 的关系如图 8 所示。

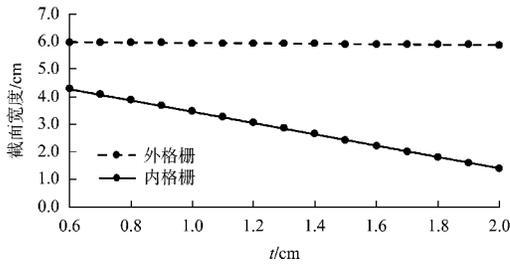


图 8 外格栅钢板厚度与截面宽度的关系

Fig. 8 Relationship between thickness of external grille steel plate and width of cross-section

内格栅长度 $H=60\text{ cm}$, 内格栅安装后与吸口管道内壁夹角 $\beta=45^\circ$, 外格栅长度 $h>H-s=40\text{ cm}$, 取 $h=45\text{ cm}$, 为满足外格栅可以在水流携带作用下实现上推, 将外格栅上部直角边 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 进行切角, 即 $d=e=10\text{ cm}$ 。

4.2 外格栅受力分析

外格栅截面宽度基本不变, 取 $c=6\text{ cm}$ 作为计

算 Re 的特征长度, $l/c=3.83$, ζ 插值取为 0.72 。外格栅所承受的绕流阻力计算结果见表 1。

表 1 外格栅绕流阻力计算结果
Tab. 1 Calculation results of flow resistance on external grille

流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Re	C_D	F_D/N	F'_D/N
3.0	179 676	1.153	140.0	99.0
3.5	209 622	1.099	181.7	128.5
4.0	239 568	1.045	225.7	159.6
4.5	269 514	0.991	270.9	191.5
5.0	299 460	0.937	316.2	223.6
5.5	329 406	0.883	360.6	255.0
6.0	359 352	0.829	403.0	284.9

取格栅钢板及螺栓钢材重力密度 $\gamma=78.5\text{ kN/m}^3$, 螺母厚度 $k=1\text{ cm}$, 螺母直径 2 cm , 螺栓直径 1 cm , 分别取桥架下放角度 φ 为 15° 、 30° 、 45° 。外格栅在不同下放角度下的有效重力分力 G'_1 与外格栅所承受的绕流阻力分力 F'_D 计算结果如图 9 所示。

绞吸船绞刀吸口面积是排泥管线面积的 1.2 倍, 设计外格栅跌落与上推的管线临界流速范围为 $4.2\sim 6.0\text{ m/s}$, 则绞刀吸口处临界流速范围为 $3.5\sim 5.0\text{ m/s}$ 。当外格栅钢板厚度 $t=1.48\text{ cm}$, 由图 9 得到的吸口处临界流速范围为 $4.0\sim 4.9\text{ m/s}$, 即当排泥管线内流速低于 4.8 m/s (4.0×1.2) 时全部外格栅跌落, 当排泥管线流速高于 5.88 m/s (4.9×1.2) 时全部外格栅上推。

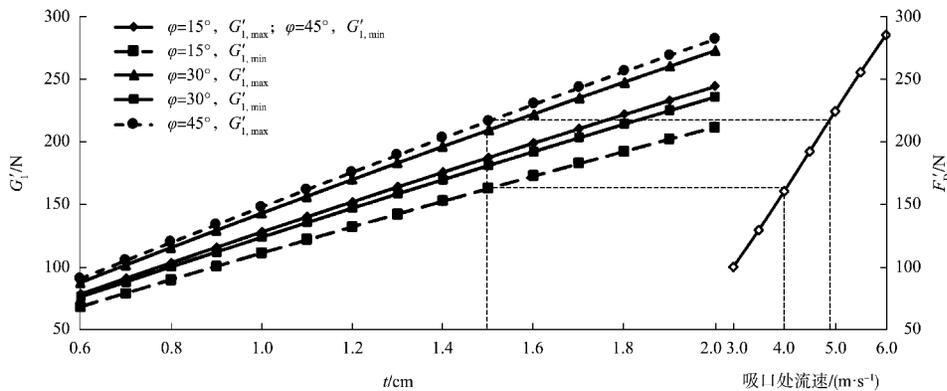


图 9 外格栅有效重力与绕流阻力计算结果

Fig. 9 Calculation results of effective gravity and flow resistance on external grille

4.3 堵塞石块受力分析

取石块直径 $D = 21 \text{ cm}$ ，石块重力密度 $\gamma_g = 26 \text{ kN/m}^3$ ，计算得石块有效重力 $G'_g = 77.5 \text{ N}$ 。分别取桥架下放角度 φ 为 15° 、 30° 、 45° ， $G'_{g,1}$ 计算结果见表 2。石块所承受的绕流阻力计算结果如表 3。

外格栅及堵塞石块在不同下放角度下的有效重力分量 ($G'_1 + G'_{g,1}$) 与外格栅及石块所承受的绕流阻力分量 ($F'_D + U'$) 计算结果见图 10。当外格栅钢板厚度 $t = 1.48 \text{ cm}$ ，由图 10 得到的吸口处临界流速范围为 $3.5 \sim 4.8 \text{ m/s}$ ，满足要求，即当排泥管路内泥浆流速低于 4.2 m/s (3.5×1.2) 时石块和全部外格栅跌落。根据图 8 可知， $t = 1.48 \text{ cm}$ 对应的外格栅截面宽度 $c = 6 \text{ cm}$ ，内格栅截面宽度 $a = 2.4 \text{ cm}$ 。

表 2 石块有效重力计算结果

Tab. 2 Calculation results of effective gravity of rock

$\varphi / (^\circ)$	$G'_{g,1,max} / \text{N}$	$G'_{g,1,min} / \text{N}$
15	67.1	58.1
30	74.9	64.8
45	77.5	67.1

表 3 石块绕流阻力计算结果

Tab. 3 Calculation results of flow resistance of rock

流速 $U / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Re	C_D	U' / N	U' / N
3.0	628 866	0.45	70.1	49.6
3.5	733 677	0.45	95.4	67.5
4.0	838 488	0.45	124.6	88.1
4.5	943 299	0.45	157.7	111.5
5.0	1 048 110	0.45	194.7	137.7
5.5	1 152 921	0.45	235.6	166.6
6.0	1 257 732	0.45	280.4	198.2

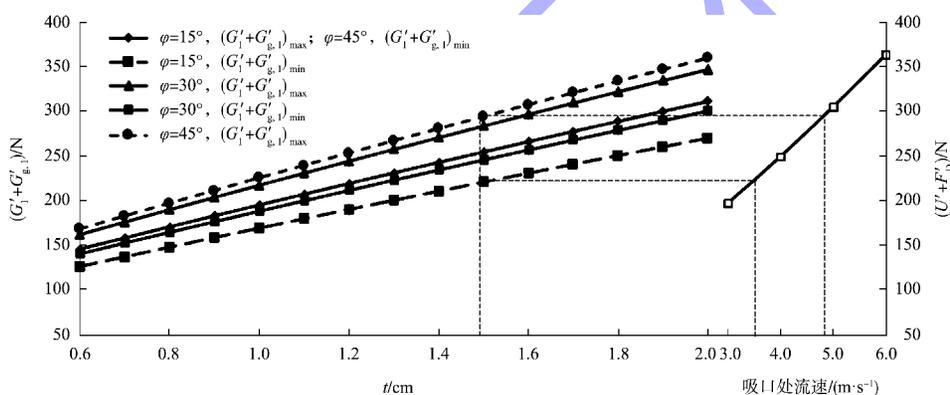


图 10 外格栅、堵塞石块有效重力及绕流阻力计算结果

Fig. 10 Calculation results of effective gravity and flow resistance of external grille and blocking rocks

5 结论

1) 每组可伸缩式吸口格栅由固定内格栅和活动外格栅组成，相邻组格栅呈一定角度布置，在绞吸船不同流程情况下，外格栅在上推和跌落状态之间自由切换，用于调整格栅间距。

2) 绞吸船正常施工时，外格栅在高速水流作用下处于上推状态，格栅间距小，当石块堵塞在格栅之间时，降低流速至临界流速以下，外格栅和石块自行跌落，清理绞刀吸口无需停泵，提高绞吸船时利率。

3) 本文给出了格栅外形尺寸设计方法，通过格栅及石块理论受力分析给出了外格栅上推临界流速、外格栅和堵塞石块脱落临界流速的计算方法。

4) 当内格栅内侧面所在弧面长度 $L = 168 \text{ cm}$ ，安装格栅 5 组，石块限制粒径 20 cm ，外格栅钢板厚度 $t = 1.48 \text{ cm}$ ，当吸口处流速高于 4.9 m/s 时全部外格栅上推，格栅处于正常工作状态，降低泥泵转速，当吸口处流速低于 3.5 m/s 时全部外格栅跌落、石块脱落。

参考文献:

- [1] 张克非,刘超,厉金.绞吸船挖岩施工工艺探讨[J].中国水运(下半月),2018,18(5):123-124,164.
ZHANG K F, LIU C, LI J. Discussion on construction technology of rock excavation by cutter suction dredger[J]. China water transport (second half of the month), 2018, 18(5): 123-124, 164.
- [2] 李磊.基于CFD对绞吸船桥梁前端结构改造性能分析研究[J].中国水运,2018,18(7):82-84.
LI L. Performance analysis of front end structural renovation of cutter suction dredger bridge based on CFD[J]. China water transport(second half of the month), 2018, 18(7): 82-84.
- [3] 周志强,杨正军,文栋.基于CFD的绞吸船绞刀防石设备水力性能研究[J].水运工程,2014(8):163-167.
ZHOU Z Q, YANG Z J, WEN D. Hydraulic characteristics of anti-stone device in cutter head of cutter suction dredger based on CFD [J]. Port & waterway engineering, 2014(8): 163-167.
- [4] 孙芳淳.绞吸式挖泥船施工黏土混块石防石设备的应用[J].水运工程,2020(6):209-213,219.
SUN F C. Application of anti-rock equipment for construction of clay concrete block stone by cutter suction dredger [J]. Port & waterway engineering, 2020 (6): 209-213, 219.
- [5] 王晓萌.3种用于绞吸船杂物集中区施工的防杂装置[J].水运工程,2022(4):203-206.
WANG X M. Three kinds of anti-impurity equipments for construction of debris concentration area of cutter suction dredger [J]. Port & waterway engineering, 2022 (4): 203-206.
- [6] 吴瑞祥.绞吸船施工地连墙码头施工难题及解决措施[J].中国高新科技,2020(5):105-106.
WU R X. Difficulties and solutions in construction of wall connected wharf using cutter suction dredger [J]. China high-tech, 2020(5): 105-106.
- [7] 邓绍云.桩柱水流绕流阻力特性及其计算[J].中国港湾建设,2007(1):4-6.
DENG S Y. Drag force characteristics and calculation of water flow around pile [J]. China harbour engineering, 2007(1): 4-6.
- [8] 邓绍云,邱清华.有限深度均匀水流中方柱阻力测试研究[J].红水河,2009,28(3):42-47.
DENG S Y, QIU Q H. Test study of square column resistance in uniform flow with finite depth [J]. Hongshui river, 2009, 28(3): 42-47.
- [9] 王珊珊,董毓利,段进涛,等.高雷诺数下二维长方形截面柱绕流数值模拟[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(1):24-30.
WANG S S, DONG Y L, DUAN J T, et al. Numerical simulation of flow around two dimensional rectangular column at high Reynolds number [J]. Journal of Huaqiao University (natural science), 2018, 39(1): 24-30.
- [10] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003.
QIAN N, WAN Z H. Mechanics of sediment transport [M]. Beijing: Science Press, 2003.

(本文编辑 王传瑜)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动,他们建立伪网站,利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明,从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿邮箱网址:www.sygc.com.cn,敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部