

· 施 工 ·



重型绞吸船挖岩泥泵叶轮几何优化研究

郭志勇, 郑选斌, 赵 强

(中交天津航道局有限公司, 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 针对重型绞吸船挖岩工况中, 泥泵输送高浓度大颗粒岩混合物时叶轮几何参数制约输送性能、堵泵风险较高的问题, 以“天鲲号”水下及舱内泥泵叶轮为对象开展研究。应用叶轮参数与介质特性间的关系公式, 结合数值模拟分析流场与外特性, 辅以模型泵试验验证的方法, 探究叶轮出口加宽与叶型优化的作用。对优化前后的叶轮扬程、功率与效率进行分析, 重新确定水下、舱内泥泵叶轮转速。结果表明, 叶轮出口宽度增加10%且叶型优化后, 过流通道提升超5%、过流体积增加超15%, 大颗粒通过能力显著增强; 采用优化后叶轮的全船功率负荷满足绞刀、冲水泵与泥泵等大功率设备同时施工的要求。该优化方案为泥泵叶轮设计提供参数与技术路径, 也为同类设备在复杂固液工况下的性能提升提供借鉴。

关键词: 绞吸船; 泥泵叶轮; 叶轮出口宽度; 叶型优化; 模型泵试验

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0220-08

Geometric optimization of mud pump impeller for heavy cutter suction dredger's rock excavation

GUO Zhiyong, ZHENG Xuanbin, ZHAO Qiang

(Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: Transporting high-concentration, large-grain rock mixtures via mud pumps in heavy cutter suction dredgers' rock excavation condition, impeller geometric parameters significantly constrain performance and pose a high risk of clogging. A study is conducted on the impellers of "Tiankun" dredger's underwater and onboard mud pumps. By applying the relationship formulas between impeller parameters and medium characteristics, combined with numerical simulation analysis of flow fields and external performance, supplemented by model pump tests for validation, the effects of impeller outlet widening and blade optimization are investigated. An analysis of the head, power, and efficiency of the impeller before and after optimization is conducted. The rotational speeds of the underwater and onboard mud pump impellers are determined. The results demonstrate that increasing the impeller outlet width by 10% and optimizing the blade design improve the flow passing diameter by over 5% and the flow volume by more than 15%, significantly enhancing the passage capability for large particles. The total power consumption of the optimized impeller meets the requirements for simultaneous operation of high-power equipment such as cutters, water pumps, and mud pumps. This optimization solution provides parameters and technical pathways for impeller design and serves as a reference for improving the performance of similar equipment in complex solid-liquid conditions.

Keywords: cutter suction dredger; mud pump impeller; impeller outlet width; blade optimization; model pump test

重型绞吸船挖岩工况中, 核心设备泥泵需要
输送含岩固液混合物, 其性能对施工效率与成本

至关重要^[1-2]。叶轮作为泥泵关键部件, 几何参数
直接影响其性能, 其中离心泵叶轮出口宽度、叶片

收稿日期: 2025-08-15 录用日期: 2025-09-29

作者简介: 郭志勇(1983—), 硕士, 高级工程师, 从事疏浚工程技术研究及疏浚装备研发工作。

角度等参数对流体输送性能影响显著。陈晓玲等^[3]建立黏性流体输送时叶轮出口宽度设计方法,验证增大出口宽度可抵消流道排挤效应,提升高黏度介质输送效率;赵伟国等^[4]通过数值模拟得出,叶轮出口宽度存在最优值,过宽或过窄均增加水力损失,且对压力脉动影响显著;胡良波等^[5]通过分离涡模拟发现,叶片出口角、出口宽度与扬程正相关,叶片包角呈负相关,揭示多参数协同优化必要性;闫宏福^[6]分析叶轮流道宽度对离心泵性能的作用,指出流道宽度变化会直接改变流体运动轨迹与能量损失,为叶轮局部参数调整提供了参考;强盼等^[7]针对混流泵叶轮,开展关键参数优化设计,为特定泵型的参数匹配提供实践方案;李亚林等^[8]引入正交设计方法,实现复合式叶轮多参数的科学优化,提升了优化过程的系统性与精准性;赵万勇等^[9]探索离心泵叶轮叶片轴向切割设计,通过精细化结构调整拓展泵的工作适应范围;王延鹏等^[10]采用多参数组合变型设计,兼顾介质腐蚀性、输送效率,体现工况适配性设计的重要性。但现有成果多聚焦于常规离心泵、混流泵或特定介质(如黏性流体、海水)的输送场景,且优化目标多围绕清水或低浓度固液混合物的输送效率与稳定性展开,在重型绞吸船挖岩这个特殊工况下,泥泵叶轮需输送高浓度大颗粒岩物料,现有研究难以直接适用。为此,本文重点开展泥泵出口加宽与叶型优化研究,提升泥泵过流通径,以提升挖岩工况下的输送效率。

1 泥泵叶轮几何参数优化方案

1.1 泥泵叶轮调整方案

泥泵施工中,叶轮过流通径是影响输送性能与工况适应性的关键参数,在重型绞吸船挖岩等高浓度大颗粒固液混合物输送场景中作用尤为显著。国外同类型船舶挖岩工况下,相同泵型采用出口加宽叶轮时施工效果更优,本文以“天鲲号”水下、舱内泥泵为基础,以杨正军等^[11]提供的泥

泵叶轮水力设计方法为技术准则,开展叶轮出口加宽与叶型优化,并通过数值模拟分析与物理模型试验验证。

泥泵参数之间存在以下关系:

$$B_2 = \max(\varepsilon_1 d_{\max}, \varepsilon_2 \sqrt[3]{Q/n}) \quad (1)$$

$$Z = \delta \frac{R_1 \sin \beta_1}{d_{\max}} \quad (2)$$

$$\varphi = \left(\frac{1 + c_{\text{vd}} \psi}{1 + c_{\text{vd}}} \right) \varphi_0 \quad (3)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_{50}^{1/2} - d_{50}^{-1/2}}{d_{50}^{1/2} + d_{50}^{-1/2}} \right) \quad (4)$$

式中: B_2 为叶轮出口宽度, mm; ε_1 、 ε_2 、 δ 为模型系数; d_{\max} 为泥泵输送土质最大粒径, mm; Q 为泥泵流量, m^3/s ; n 为泥泵转速, r/min ; Z 为叶轮的叶片数量; R_1 为叶轮进口半径, mm; β_1 为叶片进口安放角, ($^\circ$); φ 为叶轮的叶片包角, ($^\circ$); c_{vd} 为输送浓度; φ_0 为初始参考包角, ($^\circ$), 可沿用当前泥泵叶轮的包角作为初始值; ψ 为粒径修正系数; d_{50} 为输送土质的中值粒径, mm。

具体优化思路为: 第1步, 分析水下、舱内泵蜗壳、叶轮的装配关系, 确定水下、舱内泵叶轮出口宽度 B_2 的最大可增加 10%; 第2步, 依据挖岩工况, 叶片数越少, 过流通径越大的原则, 设定叶轮的叶片数为 3, 依据当前输送管线的直径, 确定叶轮进口半径 R_1 与原叶轮保持一致; 第3步, 根据式(1)计算 d_{\max} 的可优化范围; 第4步, 依据第3步的计算结果结合式(2)确定叶轮的进口安放角 β_1 ; 第5步, 依据式(3)、(4)优化设计叶轮的叶片包角 φ ; 第6步, 按照上述步骤确定的参数开展叶轮的三维设计, 并开展数值模拟分析与物理模型验证, 确保优化后的叶轮具有良好的水力性能。

将水下泥泵叶轮出口宽度增加 10%, 由原来的 500 mm 提升至 550 mm, 见图 1, 将舱内泥泵叶轮出口宽度增加 10%, 由原来的 425 mm 提升至 467.5 mm, 见图 2。

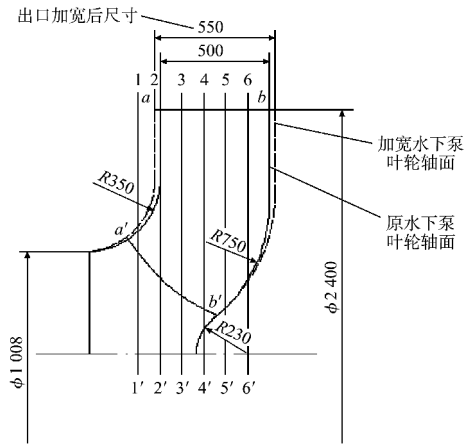


图1 水下泥泵叶轮出口加宽前后轴面对比(单位:mm)
 Fig.1 Comparison of axial profiles of underwater mud pump impeller before and after outlet widening (unit:mm)

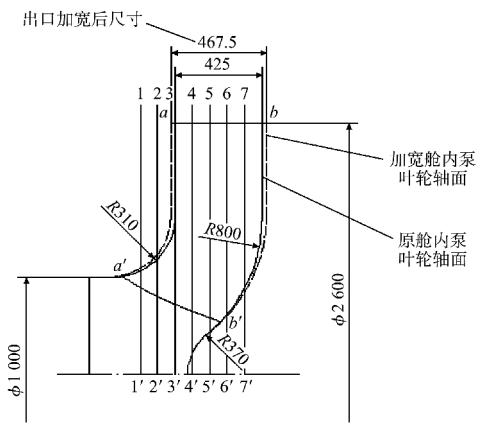


图2 舱内泥泵叶轮出口加宽前后轴面对比(单位:mm)
 Fig.2 Comparison of axial profiles of in-cabin mud pump impeller before and after outlet widening (unit:mm)

1.2 叶轮优化设计

确定水下泥泵与舱内泥泵叶轮出口的加宽大小后,运用三维建模的方法对叶轮的叶型进行优化,其中原水下泥泵到过流径为448 mm,舱内泥泵到过流径为429 mm,通过调整叶片的安放角、扭曲形状,叶轮的通过能力得到进一步增大,水下泥泵优化后的到过流径为490 mm,舱内泥泵优化后的到过流径为460 mm,见图3,运用数值模拟的方法对常用流量5 m³/s时的优化后水下泵、舱内泥泵叶轮内部流场进行模拟分析,见图4、5,其中叶轮内部通道的流动基本通畅,由于滑移作

用在叶片的正面靠近进口边的位置有一个低速区,叶片正背面的压力分布较均匀,水力损失较小。优化后的水下泥泵、舱内泥泵三叶片挖岩叶轮较原有泥泵三叶片挖岩叶轮过流通径提高5%以上,过流体积增大15%以上,显著提升了泥泵对大颗粒岩石的通过能力,有效降低堵泵风险,更适合挖岩工况。

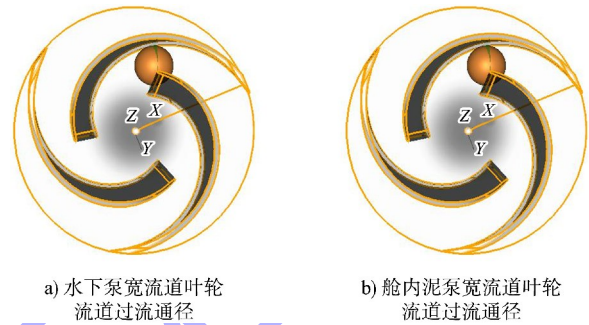
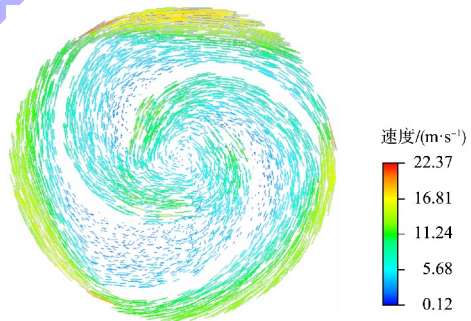
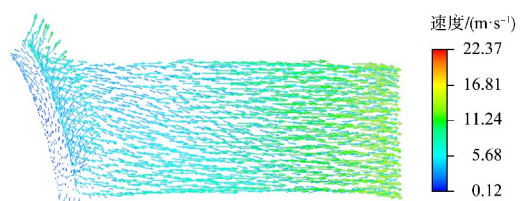


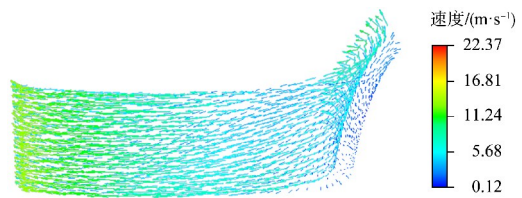
图3 “天鲲号”泥泵叶轮加宽优化后过流通径增加三维图
 Fig.3 3D diagram of increased flow passing diameter after widening and optimization of mud pump impeller of “Tiankun” cutter suction dredger



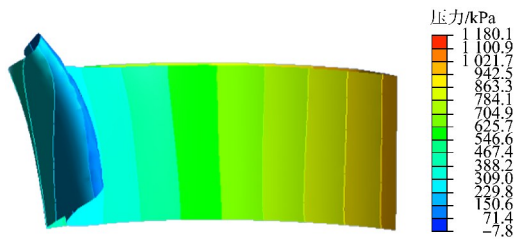
a) 叶轮平面截面流速矢量图



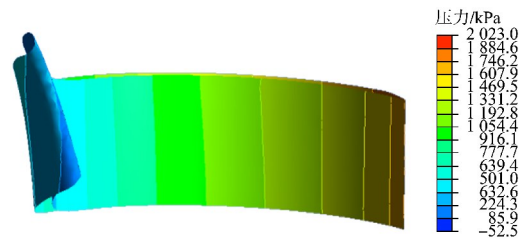
b) 叶片正面流速矢量图



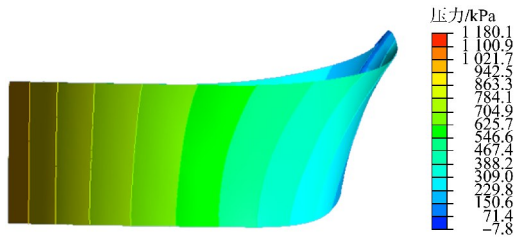
c) 叶片背面流速矢量图



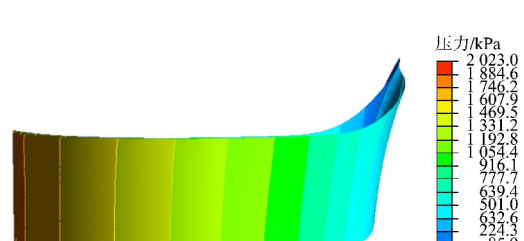
d) 叶片正面压力云图



d) 叶片正面压力云图



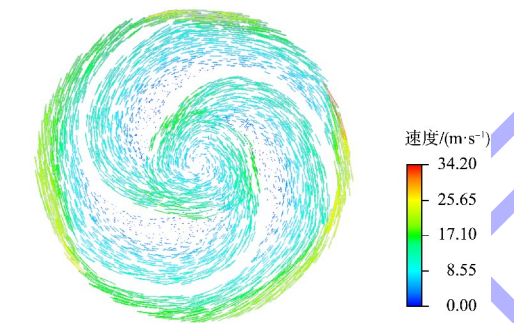
e) 叶片背面压力云图



e) 叶片背面压力云图

图 4 5 m³/s 时水下泥泵加宽优化叶轮流场分布
 Fig. 4 Flow field distribution of widened and optimized impeller of underwater mud pump at 5 m³/s

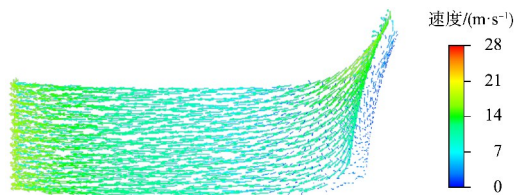
图 5 5 m³/s 时舱内泥泵加宽优化叶轮流场分布
 Fig. 5 Flow field distribution of widened and optimized impeller of in-cabin mud pump at 5 m³/s



a) 叶轮平面截面流速矢量图



b) 叶片正面流速矢量图



c) 叶片背面流速矢量图

2 泥泵外特性分析

通过前述结构设计与数值模拟分析,水下、舱内泥泵加宽优化叶轮的过流能力得到显著提升,叶轮内部流场损失较小,但仍需要从定量的角度对比分析原泥泵与优化后泥泵的外特性变化关系,确保优化后的泥泵在实际施工时的常用工况点运转高效。

2.1 水下泥泵外特性分析

对比不同工况下采用加宽优化叶轮与原水下泥泵的外特性数值模拟结果,见表 1。相同流量和转速下,扬程相对值最大相差不超 2%、功率相对值最大相差不超 4%、效率相对值最大相差不超 1%,常用施工流量 5 m³/s 时,效率达 85% (>80%)。原转速下,优化后水下泥泵整体外特性变化较小,且过流通径增大利于挖岩工况大颗粒输送,故仍可沿用原转速工作。

表 1 不同工况下采用加宽优化叶轮的水下泥泵与原水下泥泵外特性数值模拟结果对比

Tab. 1 Numerical simulation results comparison of external characteristics between underwater mud pump with widened and optimized impeller and original underwater mud pump under different working conditions

流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	加宽优化叶轮的水下泥泵			原水下泥泵		
		扬程/m	功率/kW	效率/%	扬程/m	功率/kW	效率/%
3	248	58.1	2 138	80	57.1	2 081	81
4	248	54.7	2 575	83	53.7	2 518	84
5	248	48.7	2 810	85	48.0	2 748	86
6	248	43.6	3 075	83	42.7	2 967	85

2.2 舱内泥泵外特性分析

对采用加宽优化叶轮的舱内泥泵与原舱内泥泵外特性进行不同工况下的数值模拟对比,见表2。相同流量和转速下,扬程相对值最大增加11%,功率相对值最大增加10%,效率相对值最大减小3%,常用工况点大幅增加的功率,使全船的功率负荷发生较大变化,势必影响绞刀、封水泵等大功率设备的正常使用。为此可参照同一泵的相似原理^[12],依据式(5),按照适当降低泥泵流量,维持优化叶轮扬程与原叶轮接近,保证船舶吹填距离的原则,优化泥泵工作转速。

$$\frac{Q_{\text{优}}}{Q_{\text{原}}} = \frac{n_{\text{优}}}{n_{\text{原}}} = \sqrt{\frac{H_{\text{优}}}{H_{\text{原}}}} \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{优}}$ 、 $Q_{\text{原}}$ 分别为优化后、原泥泵叶轮流量, m³/s; $n_{\text{优}}$ 、 $n_{\text{原}}$ 分别为优化后、原泥泵叶轮转速, r/min; $H_{\text{优}}$ 、 $H_{\text{原}}$ 分别为优化后、原泥泵叶轮扬程, m。

优化转速后的舱内泥泵外特性对比见表3。泥泵转速由原来的310 r/min降低至302 r/min,各工况点流量相对值最大减少不超3%,扬程相对值最大相差不超5%,功率相对值最大变化不超2%,效率相对值无变化。泥泵与绞刀、封水泵等大功率设备同时工作时,船舶的整体功率负荷增长有限,利于挖岩工况下船舶稳定施工。

表 2 不同工况下采用加宽优化叶轮的舱内泥泵与原舱内泥泵外特性数值模拟结果对比

Tab. 2 Numerical simulation results comparison of external characteristics between in-cabin mud pump with widened and optimized impeller and original in-cabin mud pump under different working conditions

流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	加宽优化叶轮的舱内泥泵			原舱内泥泵		
		扬程/m	功率/kW	效率/%	扬程/m	功率/kW	效率/%
3	310	117.2	4 478	77	112.2	4 100	80
4	310	113.9	5 426	82	112.0	4 900	84
5	310	108.8	6 154	87	101.0	5 600	87
6	310	98.6	6 610	88	89.2	6 000	88

表 3 扬程相近时加宽优化叶轮的舱内泥泵与原舱内泥泵外特性数值模拟结果对比

Tab. 3 Numerical simulation results comparison of external characteristics between in-cabin mud pump with widened and optimized impeller and original in-cabin mud pump under similar head conditions

泥泵形式	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	扬程/ m	功率/ kW	效率/ %	泥泵形式	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	扬程/ m	功率/ kW	效率/ %
3.9	302	108	5 017	82	4.0	310	112.0	4 900	84		
4.9	302	103	5 689	87	5.0	310	101.0	5 600	87		
5.8	302	94	6 111	88	6.0	310	89.2	6 000	88		

3 物理模型试验

以“天鲲号”舱内泥泵加宽优化叶轮泥泵为原

型,进行模型泵设计。依据相似性原理模型泵的转速确定为1 000 r/min,根据管内流速确定模

型泵进口直径为 0.015 m, 叶轮、泵壳按照原型泵 1:6.67 的比例进行设计。模型泵轴承体等与泥泵吸入性能无关的部件采用系列产品进行组装, 电机功率为 30 kW, 额定转速为 1 000 r/min, 管路管径为 150 mm, 试验介质为清水, 测试流量范围 0.016~0.060 m³/s。

3.1 开式模型泵试验平台搭建

试验平台主要由入口管路系统、出口管路系统、试验泵和水箱组成, 包括电机、模型泵、进水管、出水管、压差表、电磁流量计、扭矩测量仪、闸阀等设备, 见图 6、7。试验过程中, 通过闸阀调节流量, 采用电磁流量计测量流量, 利用压差表测量扬程, 采用电测功方法测量轴功率, 即通过测量电动机的输入功率, 结合电动机效率计算轴功率。

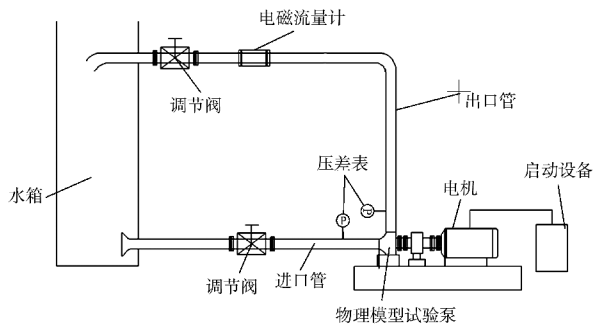


图 6 开式模型泵试验台

Fig. 6 Open-type model pump test bench



图 7 开式模型泵试验台现场布置

Fig. 7 On-site layout of open-type model pump test bench

3.2 物理模型试验分析

试验结果表明, 相同流量点下, 模型泵扬程试验值均低于模拟值, 功率试验值均低于模拟值, 模型泵的效率均高于模拟值, 见表 4, 其中, 小流量 0.016 m³/s 的偏差最大, 扬程、功率与效率的最大相对差值分别为 5.2%、11.3% 与 7.8%, 主要因为小流量时流动状态更复杂, 数值模拟的湍流模型对低雷诺数流动的刻画存在不足, 相关计算模型有待进一步优化完善。

将模型泵试验数据和模拟数据通过相似原理换算到原型泵参数, 与舱内泥泵加宽优化叶轮模拟数据对比, 扬程、功率和效率的变化趋势基本一致, 见图 8。常用施工流量 5 m³/s 时, 加宽优化后的泥泵效率高于 80%, 保持了与原泵一致的高效性, 实际使用时既能提高输送的通过性, 又能保证较高的施工效率。

表 4 模型泵试验数据与模拟分析数据对比

Tab. 4 Comparison of data between model pump test and simulation analysis

流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	模型泵试验			模拟分析		
		扬程/m	功率/kW	效率/%	扬程/m	功率/kW	效率/%
0.016	1 000	29.1	8.0	58.0	30.6	8.9	53.5
0.029	1 000	27.0	10.1	76.8	28.4	10.8	74.7
0.040	1 000	25.6	12.3	82.2	27.3	13.1	81.5
0.043	1 000	25.3	12.6	83.1	26.9	13.8	82.2
0.049	1 000	24.4	13.8	84.6	25.9	14.9	83.6
0.058	1 000	22.7	15.1	84.5	23.8	16.1	83.8
0.060	1 000	22.2	15.3	84.8	23.0	16.3	83.1

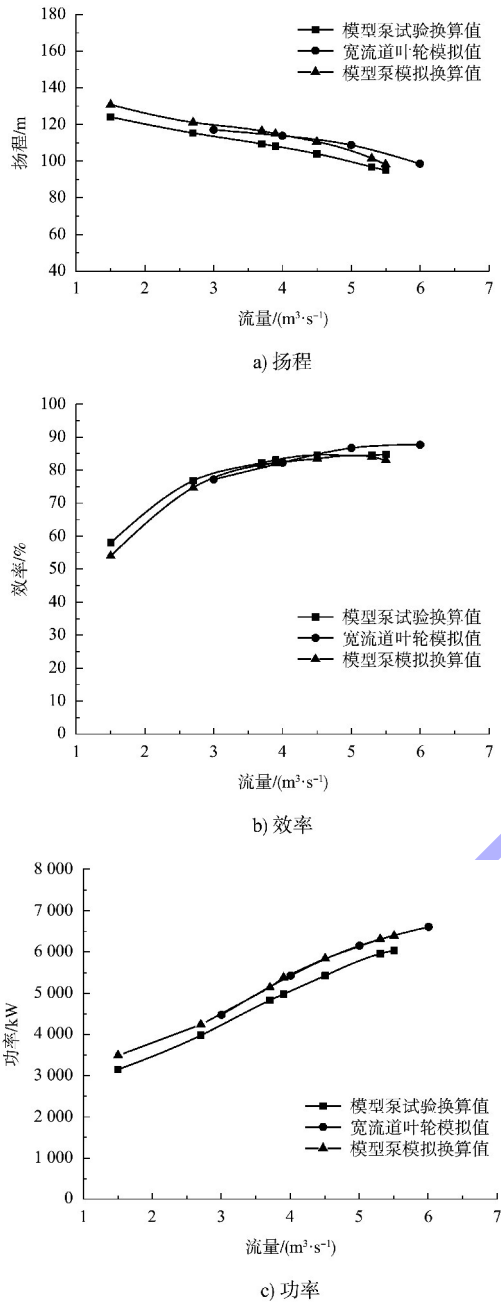


图 8 模型泵试验及模拟换算性能曲线与舱内泥泵加宽优化叶轮模拟性能曲线对比

Fig. 8 Comparison of model pump experimental and simulation conversion performance curves with simulation performance curves of widened and optimized impeller of in-cabin mud pump

4 结语

1) 叶轮出口加宽与叶型优化的协同方案,可在保障泥泵高效运行(效率 $\geq 80\%$)的同时,大幅降低挖岩工况堵泵风险,是适配高浓度大颗粒输送的有效路径。但在具体应用中,需要结合船舶功率负荷实际情况与优化后泥泵的外特性,重新

校核泥泵转速,以确保全船功率负荷无大幅变化,避免影响挖岩工况下绞刀、高压冲水泵等大功率设备的正常运转。

2) 本文工作的不足之处:仅针对挖岩工况通用场景,未进行特定场景的差异化研究;数值模拟精度有待提升,模拟与试验偏差超 5%;现有优化仅聚焦过流能力,未涉及耐磨设计。

3) 未来针对不同岩性(如砂岩、泥岩)及介质浓度,开展叶片安放角、包角的多参数协同优化,建立适配不同工况的参数数据库;完善低雷诺数湍流模型,引入修正项降低小流量工况模拟偏差至 3%以内,提高模拟精度;探索耐磨材料与优化叶轮结构的结合,通过磨损试验验证,力争将叶轮使用寿命提升 20%以上,为重型绞吸船泥泵性能提升给予更全面的技术支撑。

参考文献:

[1] 王曦巍,李军,冯诗甲,等. 重型绞吸挖泥船挖掘砂岩泥岩施工工艺优化[J]. 水运工程, 2024(3): 184-188, 193.
WANG X W, LI J, FENG S J, et al. Optimization of construction technology for excavation of sandstone mixed with mudstone by heavy-duty cutter suction dredger[J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 184-188, 193.

[2] 刘昊,杨俊钊,张亚楠,等. 重型绞吸挖泥船挖岩施工工艺优化[J]. 水运工程, 2020(S1): 100-104.
LIU H, YANG J Z, ZHANG Y N, et al. Optimization of rock dredging technology of heavy cutter suction dredger [J]. Port & waterway engineering, 2020(S1): 100-104.

[3] 陈晓玲,张武高,黄震. 离心泵输送粘性流体时叶轮出口宽度的设计[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(11): 1693-1696, 1702.
CHEN X L, ZHANG W G, HUANG Z. Design method of the outlet width of centrifugal pump when handling viscous medium [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(11): 1693-1696, 1702.

