

# 深海钻探泥浆举升系统双泵协同机制研究

秦如雷<sup>1,2,3</sup>, 陈浩文<sup>1,2,3\*</sup>, 李云军<sup>4</sup>, 高洁云<sup>1,2,3</sup>, 和国磊<sup>1,2,3</sup>, 许本冲<sup>1,2,3</sup>,  
殷国乐<sup>1,2,3</sup>, 梁楠<sup>1,2,3</sup>, 宿向辉<sup>5</sup>, 刘欣<sup>6</sup>, 秦博文<sup>6</sup>

- (1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;  
2. 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 河北廊坊 065000;  
3. 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 河北廊坊 065000;  
4. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东广州 510715; 5. 浙江理工大学机械工程学院, 浙江杭州 310018;  
6. 天津市百利溢通泵业有限公司, 天津 300380)

**摘要:** 深海钻探泥浆举升系统在无隔水管泥浆循环钻井(RMR)工艺中具有关键作用。为了提升举升系统的安全余量和适应性, 本文对多泵串并联机制进行了深入研究, 详细描述了泥浆举升泵的串并联结构设计和工作原理, 探讨了串联和并联运行时流量与扬程的关系以及泵组串并联工况点的数解法和图解法步骤。进一步地, 利用模型泵实测特性曲线, 使用图解法获取了双泵串并联工况下的 $Q-H$ 特性曲线和工况点, 并提出了双泵协同控制的建议。

**关键词:** 泥浆举升泵; 多泵串并联; 数解法; 图解法; 双泵协同; 无隔水管泥浆循环钻井; 深海钻探

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)05-0053-06

## Research on the collaborative mechanism of dual pumps in mud lifting system for deep sea drilling

QIN Rulei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Haowen<sup>1,2,3\*</sup>, LI Yunjun<sup>4</sup>, GAO Jieyun<sup>1,2,3</sup>, HE Guolei<sup>1,2,3</sup>, XU Benchong<sup>1,2,3</sup>,  
YIN Guoyue<sup>1,2,3</sup>, LIANG Nan<sup>1,2,3</sup>, SU Xianghui<sup>5</sup>, LIU Xin<sup>6</sup>, QIN Bowen<sup>6</sup>

- (1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;  
2. Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China;  
3. Innovation Center for Deep Exploration and Drilling Equipment Technology, CGS, Langfang Hebei 065000, China;  
4. CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Company Limited, Guangzhou Guangdong 510715, China;  
5. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;  
6. Tianjin Premier ESP Pumping System Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

**Abstract:** The deep sea mud lifting system plays a critical role in the Riserless Mud Recovery (RMR) drilling process. In order to enhance the safety redundancy and adaptability of the lifting system, in-depth research on the multi pumps series parallel mechanism was conducted, including the detailed study of the series parallel structure design and working principle of the mud lifting pump, and the relationship between flow rate and lift during series and parallel operation, as well as the mathematical method and graphical method for series parallel operating points of the pump group. Furthermore, by utilizing the measured characteristic curve of the model pump, the  $Q-H$  characteristic curve

收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2024-08-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.05.006

基金项目: 国家重点研发计划项目“深海钻井泥浆回收安全应急关键装备研发”(编号: 2023YFC2813102)

第一作者: 秦如雷, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事大洋钻探与天然气水合物勘查开发装备的研发工作, 河北省廊坊市金光道77号, qrlei@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 陈浩文, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探技术、设备及工艺的研发工作, 河北省廊坊市金光道77号, Chaowen@mail.cgs.gov.cn。

引用格式: 秦如雷, 陈浩文, 李云军, 等. 深海钻探泥浆举升系统双泵协同机制研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 53-58.

QIN Rulei, CHEN Haowen, LI Yunjun, et al. Research on the collaborative mechanism of dual pumps in mud lifting system for deep sea drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 53-58.

and operating points of the dual pumps series parallel operation were obtained using graphical method. Finally, suggestions for dual pumps collaborative control were proposed.

**Key words:** mud lifting pump; multiple pumps in series and parallel; mathematical method; graphic method; dual pump collaboration; RMR; deep sea drilling

## 0 引言

在使用无隔水管泥浆循环钻井(Riserless Mud Recovery,简称RMR)工艺时,钻井平台上的泥浆泵通过钻杆将泥浆输送至钻头,钻进时产生的岩屑被泥浆携带通过环空返回井口吸入模块<sup>[1]</sup>,系统示例见图1。泥浆举升泵作为RMR的关键单元,负责将含有岩屑的泥浆从吸入模块沿上返管线输送回钻井平台,经固控系统清洁后再返回泥浆系统循环使用。为应对长期工程应用带来的安全风险和作业挑战,泥浆举升系统采用双泵作为举升单元,这样既可提高系统的安全余量,又能够有效提高举升能力,以应对上返泥浆流量和密度的变化<sup>[2-4]</sup>。

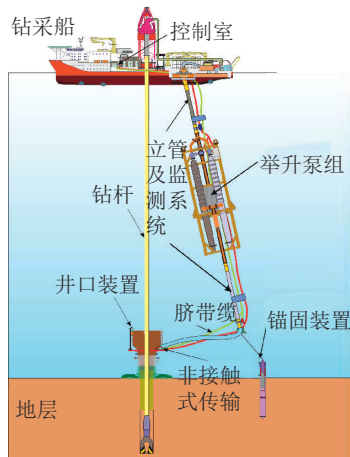


图1 RMR系统示例

Fig.1 An example of RMR system

国内外对深海环境中的流体举升泵进行了大量研究。在泵型设计方面,高本金等<sup>[5]</sup>对用于泥浆提升的叶片式圆盘泵进行了结构设计和压力特性研究,并提出了其设计方法及在RMR钻井中的水力特性计算。邹伟生等<sup>[6]</sup>对深海采矿离心泵进行了结构设计和数值计算研究,提出了八级提升电泵的设计方法和特性预测。

在水泵并联运行研究方面<sup>[7]</sup>,符永正等<sup>[8]</sup>发现并联运行时流量增量可能偏小,提出优化泵配置和管路设计等措施,以确保系统稳定运行。张永秋等<sup>[9]</sup>则改进了并联运行时工况点的确定方法,提出

了一种高精度方法,提升系统效率并降低成本。汪建华等<sup>[10]</sup>通过图解法和解析法分析了并联水泵数量与流量的关系,指出并联泵数量增加引起总流量增加,但单泵流量会减小,为系统设计提供了依据。

在水泵串联运行研究方面,邓在德<sup>[11]</sup>提出了串联高效运行设计和改进方案,提升系统性能并降低能耗。叶松涛等<sup>[12]</sup>探讨了4种典型的串联泵控制方案,通过仿真实验发现节流控制能耗较高,但调控性能和安全性较好,为控制策略选择提供了参考。许景伟等<sup>[13]</sup>提出了长输管道多泵串联调速运行的数解方程,为泵站设计和管理提供了理论支持。曾晓渝等<sup>[14]</sup>分析了串联运行的常见问题,并提出了相应解决方案,强调在保障安全的同时考虑节能和经济性,以提升供水系统综合效益。

上述研究对多泵协同运行的理论和数值求解方面进行了较为深入的研究,但其研究的前置输入条件为定频定量泵,且输送的介质为水,研究过程较为理想化,研究结果尚不足以直接支撑输送固液气多态混合流、且排量在35~50 Hz之间无极调速的RMR举升泵组的设计和 control 机制选择。本文以RMR举升泵组的复杂工况为前提,融合前述学者的理论和试验成果,提出具有针对性的双泵协同作业特性分析结论。

## 1 泵组串并联结构及工作原理

泥浆举升泵是RMR系统实现泥浆高效、长期稳定举升的执行单元。双泵举升系统是将2台举升泵集成在一个撬块中,采用空间集约化设计理念,在可满足需求的情况下,实现举升撬块最小化。举升系统主要由水下电机、泵体、泵组吸液管汇、泵组出液管汇、泵组切换单元、HPU单元、卸荷切换管汇、泵撬块、泵撬承重模块、甲板测控台架等关键部件组成,如图2所示。

多工况切换管汇是实现泵组多功能举升的重要部件,其功能有:作为举升系统的功能转换执行单元,通过阀门的开闭组合,实现泵组单泵、双泵串联与并联运行;作为第一级应急装置,可在工况需

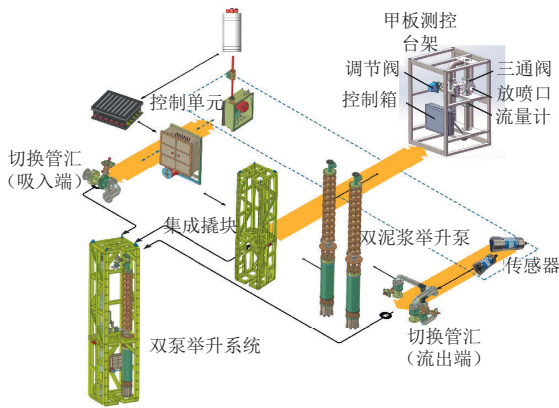


图 2 双泵泥浆举升系统总体方案

Fig.2 Scheme of dual-pump mud lifting system

要时实现泥浆举升泵的卸荷防喷。

若要在双泵系统中实现上述功能,多工况切换管汇原理可按图 3 设计。该管汇由 4 台水下遥控球阀和若干管道组成,4 台球阀通过开闭组合可实现双泵举升系统的运行状态改变。

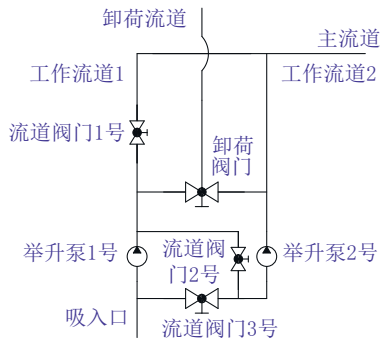


图 3 多工况切换管汇原理

Fig.3 Principle of multi-condition switching manifold

不同工况的具体原理为:

(1)单泵运行:举升泵 1 号运行(泵 1 号开启,泵 2 号关闭,卸荷阀门关闭,流道阀门 1 号开启,流道阀门 2 号开启,流道阀门 3 号关闭);举升泵 2 号运行(泵 1 号关闭,泵 2 号开启,卸荷阀门关闭,流道阀门 1 号关闭,流道阀门 2 号关闭,流道阀门 3 号开启);

(2)双泵串联运行:举升泵 1 号运行,举升泵 2 号运行,卸荷阀门关闭,流道阀门 1 号关闭,流道阀门 2 号开启,流道阀门 3 号关闭;

(3)双泵并联运行:举升泵 1 号运行,举升泵 2 号运行,卸荷阀门关闭,流道阀门 1 号开启,流道阀门 2 号关闭,流道阀门 3 号开启;

(4)泵组卸荷:卸荷阀门开启即可。

## 2 理论基础

在理想状态下,同型号同规格的 2 台水泵其流量与扬程关系如下所示<sup>[15]</sup>。

串联时:

$$Q = Q_1 = Q_2, H = H_1 + H_2 \quad (1)$$

并联时:

$$Q = Q_1 + Q_2, H = H_1 = H_2 \quad (2)$$

式中: $Q_1$ ——泵 1 的流量,  $m^3/s$ ;  $Q_2$ ——泵 2 的流量,  $m^3/s$ ;  $Q$ ——2 台泵总的流量,  $m^3/s$ ;  $H_1$ ——泵 1 的扬程,  $m$ ;  $H_2$ ——泵 2 的扬程,  $m$ ;  $H$ ——2 台泵总的扬程,  $m$ 。

从式(1)、(2)得知,当 2 台或 2 台以上水泵串联时,流量并无大的改变而扬程叠加;并联时,扬程并无大的改变而流量叠加。

实际工况中,由于管路摩阻、局部扬程损失等影响,双泵串并联工作的流量和扬程等特性参数是无法通过简单的数值叠加确定的,其工况点需要通过数解法或图解法确定。

### 2.1 数解法

根据伯努利能量方程计算泵装置扬程,由计算得到的速度场和压力场以及叶轮上作用的扭矩计算泵装置的水力性能。离心泵串并联装置的进水口与出水口的总能量差定义为装置扬程,计算公式为<sup>[16-18]</sup>:

$$H_{net} = \left( \frac{\int_{s_2} P_2 u_r ds}{\rho Q g} + H_2 + \frac{\int_{s_2} u_{t2}^2 ds}{2 Q g} \right) - \left( \frac{\int_{s_1} P_1 u_r ds}{\rho Q g} + H_1 + \frac{\int_{s_1} u_{t1}^2 ds}{2 Q g} \right) \quad (3)$$

式中: $Q$ ——流量,  $m^3/s$ ;  $H_1$ ——离心泵串并联装置进水断面扬程,  $m$ ;  $H_2$ ——离心泵串并联装置出水断面扬程,  $m$ ;  $s_1$ ——离心泵串并联装置进水断面面积,  $m^2$ ;  $s_2$ ——离心泵串并联装置出水断面面积,  $m^2$ ;  $u_1$ ——离心泵串并联装置进水口各点流速,  $m/s$ ;  $u_2$ ——离心泵串并联装置出水口各点流速,  $m/s$ ;  $u_{r1}$ ——离心泵串并联装置进水口断面各点流速法向分量,  $m/s$ ;  $u_{r2}$ ——离心泵串并联装置出水口断面各点流速法向分量,  $m/s$ ;  $P_1$ ——离心泵串并联装置进水断面各点静压,  $Pa$ ;  $P_2$ ——离心泵串并联装置出

水断面各点静压, Pa;  $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

沿程压降是泥浆沿着管路输送时由于摩擦产生的压力损失, 单位压力损失即为水力坡度  $J_m$ , 其计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$J_m = C_v \frac{\rho_s - \rho_{df}}{\rho_{sw}} + 1.192 \left\{ 0.11 \left( \frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} + 0.2578 \left( \frac{\sqrt{gD}}{V_m - W_{gt}} \right)^{2.9514} C_v^{1.1108} \left( \frac{\rho_s - \rho_{sw}}{\rho_0} \right) \right\} \frac{V_m^2}{2gD} \quad (4)$$

式中:  $C_v$ ——流量系数,  $\rho_s$ ——颗粒的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_{df}$ ——钻井液的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_{sw}$ ——海水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $D$ ——管道内径,  $\text{mm}$ ;  $\Delta$ ——管道粗糙度, 取值 0.30;  $V_m$ ——实际提升速度,  $\text{m/s}$ ,  $W_{gt}$ ——颗粒群临界沉降速度,  $\text{m/s}$ ,  $Re$ ——雷诺系数,  $g$ ——重力加速度。

要使系统能够正常举升流体, 泵串并联后的装置扬程需满足如下关系式:

$$H_{net} > J_m L + H_a \quad (5)$$

式中:  $L$ ——管道长度,  $\text{m}$ ;  $H_a$ ——局部扬程损失, 根据管道结构查手册可得,  $\text{m}$ 。

## 2.2 图解法<sup>[20]</sup>

### 2.2.1 单泵工作点的确定

在特定管路系统与固定的操作条件下, 将流体流经该管路时所需的压头与流量的关系在坐标图上表示出来, 称为管路特性曲线, 如图 4 所示。管路特性曲线由管路布局和操作条件决定, 与泵的性能无关。在相同的坐标系中, 将试验测得的离心泵特性曲线绘入, 此时管路特性曲线与离心泵特性曲线的交点(M点)为同时符合管路和离心泵特性的点, 即为离心泵的工作点。

### 2.2.2 双泵串并联工况点的确定

串联运行的  $Q-H$  曲线为两单泵曲线纵向叠加, 即把串联的单台水泵的曲线在同一流量下扬程相加, 管路系统特性曲线  $R_{MC}$  与串联运行的  $Q-H$  曲线相交于 A 点, A 点为串联运行时的工况点, A 点横坐标  $Q_A$  就是串联运行时的流量, 其纵坐标即为工况点时串联运行的扬程。如图 5 所示。

并联运行的  $Q-H$  曲线为两单泵曲线横向叠加, 即把并联的单台水泵的曲线在同一扬程下流量相加, 管路系统特性曲线  $R_{MC}$  与并联运行的  $Q-H$  曲线

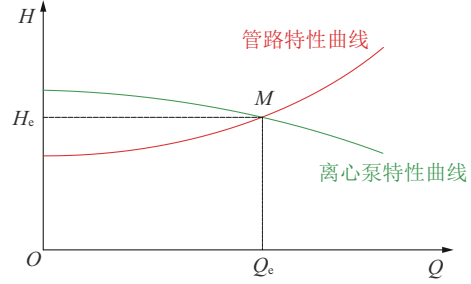


图 4 单泵工作点的确定

Fig.4 Method for determining the operating point of a single pump

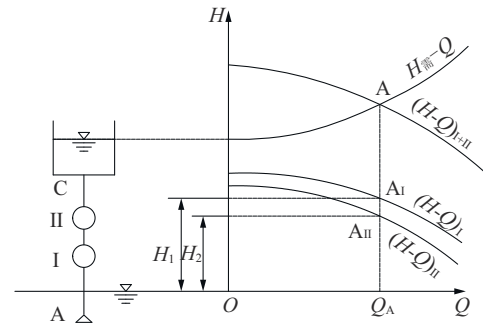


图 5 相同泵串联运行特性

Fig.5 Characteristics of pumps in series operation

相交于 M 点, M 点为并联运行时的工况点, M 点横坐标  $Q_M$  就是并联运行时总的流量, 为保障系统能够顺利举输送流体,  $Q_{运行} < Q_M$ 。如图 6 所示。

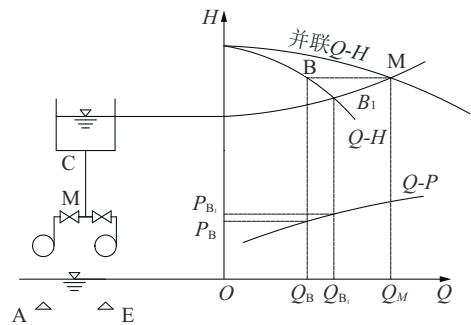


图 6 相同泵并联运行特性

Fig.6 Characteristics of pumps in parallel operation

## 3 举升系统串并联控制

为了更精确的刻画泥浆举升泵组的水力特性, 在采用 CFD-DEM 耦合计算的方法构建离心泵的计算模型, 进行了全尺度流场模拟, 对离心泵的叶轮设计、流场和内颗粒分布规律、泥浆携岩运移规

律研究的基础上,试制了两级模型泵。将模型泵与混输系统连接,开展了清水工况下两级泵试运行试验以及参数获取试验,通过试验得到模型泵在不同频率下的  $Q-H$  特性曲线,见图 7。

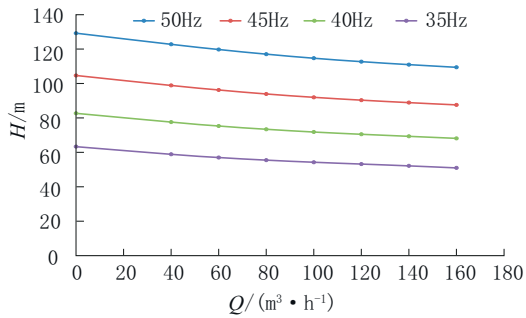


图 7 两级模型泵实测特性

Fig.7 Measured characteristic curves of a two-stage model pump

应用图解法求解串联和并联情况下的泵组特性曲线。使用管道扬程损失计算公式,计算了不同流量下的管路特性,并将管路特性曲线与泵组特性曲线绘制在同一坐标系中,得到了泵组串并联两种情况下特性曲线与管路损失曲线的相对关系。通过特性曲线图中的交点 A,即可确定双泵串联和双泵并联情形下的工况点,图中还针对特定频率列出了该频率下的单泵工作曲线,以辅助说明双泵协作工况下的控制点。

如图 8 所示,串联情况下,35 Hz 频率下的泵  $Q-H$  特性曲线可以与管路损失曲线相交于点 A,交点处流量  $Q_A$  为  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H_A$  为  $520 \text{ m}$ ,此时单泵工作频率 35 Hz,流量  $Q_{A'}$  为  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H_{A'}$  为  $260 \text{ m}$ 。即串联时的工作频率应该选用 35 Hz,通过控制被压阀门的开度将泵送的总流量稳定在  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ ,此时即为串联时系统的最佳工况点,若大于此频率则会出现泵组扬程大于管损,可能会对甲板上泥浆测控台和固控系统造成冲击。

如图 9 所示,并联情况下,50 Hz 频率下的泵  $Q-H$  特性曲线可以与管路损失曲线相交于点 A,交点处流量  $Q_A$  为  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H_A$  为  $550 \text{ m}$ ,此时单泵工作频率 50 Hz,流量  $Q_{A'}$  为  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为  $H_{A'}$  为  $550 \text{ m}$ 。即并联时的工作频率应该选用 50 Hz,通过控制被压阀门的开度将泵送的总流量稳定在  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,此时即为并联时系统的最佳工况点,若大于此频率则会出现泵组扬程大于管损,可能会对甲板上

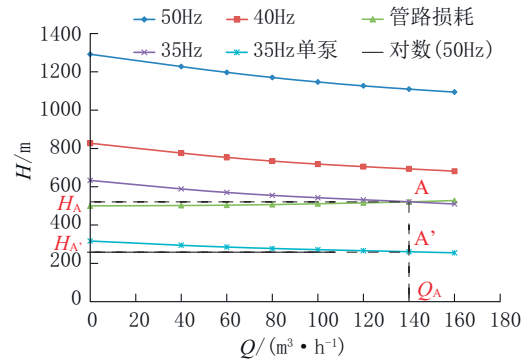


图 8 举升泵串联工况不同频率  $Q-H$  特性

Fig.8  $Q-H$  characteristic curves of lifting pumps in series operation at different frequencies

上泥浆测控台和固控系统造成冲击,低于此频率则无法满足系统举升要求。

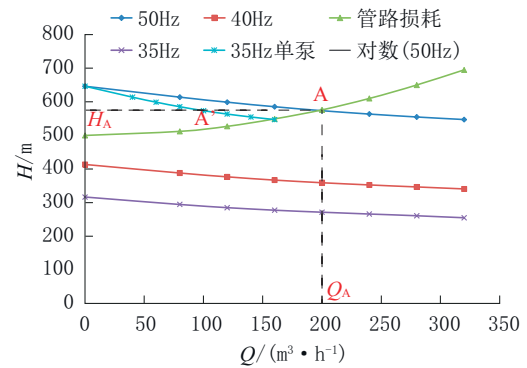


图 9 举升泵并联工况不同频率  $Q-H$  特性

Fig.9  $Q-H$  characteristic curves of lifting pumps in parallel operation at different frequencies

双泵协作控制参数建议如表 1 所示,工作中要双泵同频控制,保持统一参数。

表 1 双泵协作控制建议

Table 1 Recommendations for dual-pump collaborative control

工况	控制频率/Hz	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	扬程/m
双泵串联	35	140	520
双泵并联	50	200	550

#### 4 结论

(1) 泥浆举升泵的串并联运行对于提高系统的安全冗余和适应性具有重要意义,串联和并联运行时的流量与扬程关系复杂,要实现双泵协同控制需明确双泵串并联时的特性曲线。

(2)数解法和图解法是确定泵组串并联工况点的有效方法,为多泵协同控制研究提供了理论依据。

(3)通过模型泵试验,成功获取了泵组在清水工况下的 $Q-H$ 特性曲线,为双泵协作控制提供了实验数据支持。使用图解法提出了双泵串联和并联时的最佳工况点,包括频率、流量和扬程等参数,为实际工程应用提供了指导。

随着技术的发展和应用的拓展,预计泥浆举升泵的串并联技术将得到更广泛的应用,进一步提高深海泥浆举升系统的效率和可靠性。

### 参考文献(References):

- [1] 王嘉瑞,秦如雷,冯起赠,等.大洋钻探井口吸入模块设计与模态分析[J].钻探工程,2023,50(6):45-55.  
WANG Jiarui, QIN Ruxue, FENG Qizeng, et al. Design and modal analysis of wellhead suction module for ocean drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(6):45-55.
- [2] 陈浩文,于彦江,王艳丽,等.气举技术应用于深海无隔水管泥浆回收钻井工艺可行性分析[J].钻探工程,2022,49(2):9-15.  
CHEN Haowen, YU Yanjiang, WANG Yanli, et al. Feasibility analysis of gas lift technology for application in deep sea riserless mud recovery drilling[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):9-15.
- [3] 秦如雷,于彦江,陈浩文,等.无隔水管泥浆循环举升泵选型及性能参数计算方法[J].钻探工程,2021,48(S1):381-385.  
QIN Ruxue, YU Yanjiang, CHEN Haowen, et al. Selection and calculation of parameters of the mud lifting pump for RMR[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):381-385.
- [4] Brown J D, Urvant V V, Thorogood J L, et al. Deployment of a riserless mud-recovery system offshore Sakhalin Island[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE, 2007: SPE-105212-MS.
- [5] 高本金,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.  
GAO Benjin, CHEN Guoming, YIN Zhiming, et al. Deepwater riserless mud recovery drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009,31(2):44-47.
- [6] 邹伟生,刘瑞仙,刘少军.粗颗粒海底矿石浆体提升电泵研究[J].中国机械工程,2019,30(24):2939-2944.  
ZOU Weisheng, LIU Ruixian, LIU Shaojun. Study on lifting motor pumps for coarse particle slurry in sea bed mining[J]. China Mechanical Engineering, 2019,30(24):2939-2944.
- [7] 封安东.多泵串并联运行性能分析与试验研究[D].合肥:安徽农业大学,2023.  
FENG Andong. Analysis and experimental study on the performance of multiple pumps operating in series and parallel[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023.
- [8] 符永正,吴克启,蔡亚桥.水泵并联变台数运行的有关问题分析[J].水泵技术,2005(3):41-43.  
FU Yongzheng, WU Keqi, CAI Yaqiao. Analysis of Some aspects about multiple pumps operation in parallel[J]. Pump Technology, 2005(3):41-43.
- [9] 张永秋,张晓霞,雷鹏帅,等.同型号泵并联运行工况点确定的简便方法[J].兰州交通大学学报,2008,27(4):73-74.  
ZHANG Yongqiu, ZHANG Xiaoxia, LEI Pengshuai, et al. A simplified method to determine the operating point of type pumps in parallel[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008,27(4):73-74.
- [10] 汪建华,汪禹.同型号离心泵并联运行相关问题的探讨[J].机械研究与应用,2012(1):57-58.  
WANG Jianhua, WANG Yu. Research on relevant problem of same type pumps operation in parallel[J]. Mechanical Research & Application, 2012(1):57-58.
- [11] 邓在德.串联泵(机)装置高效运行的设计和选型[J].节能,1989(3):29-32.  
DENG Zaide. Design and selection of efficient operation of series pump (machine) device[J]. Energy Conservation, 1989(3):29-32.
- [12] 叶松涛,谢杰辉,魏秀静,等.串联离心泵节流与变频控制方案比较分析[J].化工自动化及仪表,2015(1):7-11.  
YE Songtao, XIE Jiehui, WEI Xiujing, et al. Comparative analysis of control schemes for centrifugal pumps in series[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2015,42(1):7-11.
- [13] 许景伟,孟振虎.离心泵串联调速运行的数解方法[J].油气储运,2009,28(6):21-25.  
XU Jingwei, MENG Zhenhu. Numerical method for variable running speed of centrifugal pumps in series[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009,28(6):21-25.
- [14] 曾晓渝,孙跃民.离心泵串联供水问题的探讨[J].重庆电力高等专科学校学报,2010,15(4):5-7.  
ZENG Xiaoyu, SUN Yuemin. A study on the series water supply of the centrifugal pump[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2010,15(4):5-7.
- [15] 王红超,魏志聪,李晓俊,等.多级串并联离心泵运行特性研究[J].流体机械,2024,52(2):54-59.  
WANG Hongchao, WEI Zhicong, LI Xiaojun, et al. Research on the operating characteristics of multistage series-parallel centrifugal pumps[J]. Fluid Machinery, 2024,52(2):54-59.
- [16] 李明桥,刘建华,赵妍.供水泵站工程水泵选型计算实例分析[J].西北水电,2021(4):69-71.  
LI Mingjiao, LIU Jianhua, ZHAO Yan. Example analysis of pump selection calculation in pump station project[J]. Northwest Water Power, 2021(4):69-71.
- [17] HE G L, XU B C, CHEN H W, et al. Study of the relationships among the reverse torque, vibration, and input parameters of mud pumps in riserless mud recovery drilling[J]. Applied Sciences, 2023,13(21):11878.
- [18] Ramakrishna R, Hemalatha S, Rao D S. Analysis and performance of centrifugal pump impeller[J]. Materials Today: Proceedings, 2022,50:2467-2473.
- [19] Smith D, Winters W, Tarr B, et al. Deepwater Riserless Mud Return System for Dual Gradient Tophole Drilling[C]//SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. Kuala Lumpur: SPE, 2010: SPE-130308-MS.
- [20] 关隴凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011.  
GUAN Xingfan. Modern Pumps Theory and Design[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2011.

(编辑 王文)