

RMR 举升泵组管线切换系统设计

刘晓林^{1,2,3}, 姜宇昊^{1,2,3}, 高洁云^{1,2,3*}, 王林清^{1,2,3}, 殷国乐^{1,2,3}

(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)

摘要: 在海洋石油生产树或水下设备管线系统中, 当需要对管线进行开、闭等切换操作时, 由于深海环境无法手动操作, 通常需要使用作业级 ROV 或水下测控系统来远程控制。本文以实现 RMR 举升泵组管线多状态工作模式为目标, 基于水下液压系统原理、参数和结构设计, 搭建了水下 HPU 系统; 选型液控球阀作为执行件, 提出了适应 RMR 水下工况环境的球阀可靠性测试方案, 完成了一套适用于 RMR 举升泵组管线切换系统的设计, 对于 RMR 举升泵组及其他水下设备管线切换系统的设计具有广泛应用价值。

关键词: RMR; 举升泵组; HPU; 管线切换

中图分类号: P634.3; TE92 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0238-07

Design of switch system of RMR lift pump group

LIU Xiaolin^{1,2,3}, JIANG Yuhao^{1,2,3}, GAO Jieyun^{1,2,3*}, WANG Linqing^{1,2,3}, YIN Guoyue^{1,2,3}

(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)

Abstract: In offshore oil production trees or subsea equipment pipeline systems, when it is necessary to perform switching operations such as opening and closing the pipelines, manual operation is not feasible in deep-sea environments. Therefore, work-class ROVs or underwater measurement and control systems are typically employed for remote control. This paper aims to achieve a multi-state working mode of the RMR lift pump group pipeline, establishing an underwater HPU system based on the principles, parameters, and structural design of underwater hydraulic systems. Selection of hydraulic control ball valves as the actuator, and a reliable testing scheme for ball valves adapted to the underwater working conditions of RMR is proposed. A design for a pipeline switching system suitable for the RMR lift pump group has been completed. This research has a wide range of application value for the RMR lift pump sets and other underwater equipment pipeline switching systems design.

Key words: RMR; lift pump group; HPU; pipeline switching

0 引言

无隔水管泥浆回收循环钻井 (Riserless Mud

Recovery, 简称 RMR), 是在海洋实施开路钻井时, 利用水下举升泵和上返管线将泥浆举升回输至钻

收稿日期: 2024-07-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.036

基金项目: 国家重点研发计划项目“深海开路泥浆液位闭环控制系统研制”(编号: 2021YFC2800802)

第一作者: 刘晓林, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 机械设计制造及其自动化专业, 从事钻探装备及岩土钻掘装备自动化和智能化研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, liuxiaolin_cqu@163.com。

通信作者: 高洁云, 女, 汉族, 1996年生, 助理工程师, 机械工程专业, 硕士, 从事钻探新技术、新设备、新工艺的研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 775726390@qq.com。

引用格式: 刘晓林, 姜宇昊, 高洁云, 等. RMR 举升泵组管线切换系统设计[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 238-244.

LIU Xiaolin, JIANG Yuhao, GAO Jieyun, et al. Design of switch system of RMR lift pump group[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 238-244.

井平台,从而实现泥浆闭路循环的双梯度钻井系统^[1-4],旨在解决深水钻井存在的安全密度窗口窄、泥浆浪费、井控和环境污染等难题,同时可降低浅层气带来的危险、钻井平台负载和可变载荷大小^[5-8]。

举升泵作为 RMR 系统泥浆泵送回收动力核心装备,通常采用双泵组结构,通过设计举升泵组管线系统实现单泵运行单泵备份、双泵串并联运行等冗余/增效工作模式,并可设置应急解堵、放喷工况的旁通管线,极大地提高系统的安全可靠性^[9-11]。

本文基于水下 HPU(Hydraulic Power Unit,液压力单元)技术,采用高压液控球阀作为系统主要执行件,设计了一套 RMR 举升泵组管线切换系统;开展了液控球阀选型与测试;搭建了水下 HPU 系统,实现了 HPU 泵的启停、液控球阀开闭控制,以及球阀角度位置和系统压力信号的采集,配合系统上位机可以远程、便捷地实现 RMR 举升泵组管线的切换控制,而无需借助水下 ROV 等外部设备。同时,水下 HPU 与液控球阀的组合相比水下电动球阀,液压系统在提供更大、更平稳的执行驱动力的同时,深水环境适应性、可靠性更高,价格更低廉。

1 系统方案设计

1.1 功能需求分析

根据 RMR 举升泵泵送泥浆工作特点,按单泵工作单泵备份、双泵串并联以及应急解堵、放喷等工况进行分析,举升泵组管线系统需具备以下 4 种管线状态和工作模式:

- (1)单泵运行、单泵备份。双泵中有一台泵运行,另一台泵作为备份,当工作泵出现故障时,切换到另一台泵运行。
- (2)双泵并联运行。双泵的进、出口分别相连,双泵并联运行,适用大流量合流工况。
- (3)双泵串联运行。双泵中一台泵的出口接另一台泵的进口,双泵串联运行,相当于增加泵的级数,提高泵组扬程。
- (4)解堵、放喷。双泵的出口均引向外部,此时泥浆排海,适用于泵组管线解堵、放喷^[12-15]。

基于以上分析,设计 RMR 举升泵组管线示意图 1。

如图 1 所示,为实现以上举升泵组管线状态和工作模式,在管线的进、出口和旁通分别设置阀门,

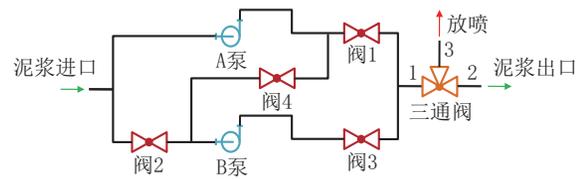


图 1 RMR 举升泵组管线示意图

通过上位机集控系统控制 HPU 来驱动各阀门开关状态组合来切换管线,各工作模式阀门开关状态见表 1。

表 1 阀门开关状态

工作模式	阀 1	阀 2	阀 3	阀 4	三通阀
A 泵运行,B 泵备份	开	关	关	关	1-2
A 泵备份,B 泵运行	关	开	开	关	1-2
AB 泵并联	开	开	开	关	1-2
AB 泵串联	关	关	开	开	1-2
解堵、放喷	-	-	-	-	1-3

1.2 测控单元拓扑结构

根据管线切换系统工作模式和功能需求,对于测控单元拓扑结构设计如图 2 所示。

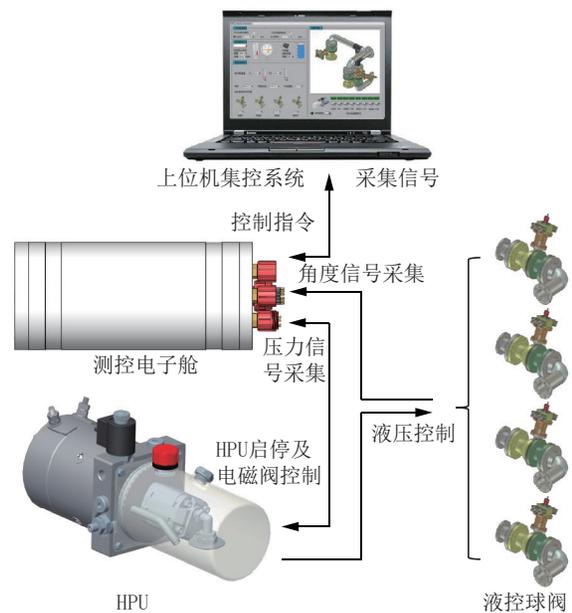


图 2 测控单元拓扑图

图 2 中,在控制方向上,上位机集控系统通过数字控制指令控制下位机测控电子舱,测控电子舱则发出开关量信号控制 HPU 启停和电磁阀换向,进而驱动阀门;阀门作为管线切换的主要执行件,其由

液压执行器和阀体两部分组成,由HPU的电磁阀换向油路通过液压执行器驱动阀芯开闭。

在信号采集反馈方向上,HPU内油路安装压力传感器,液压压力信号经采集变送进入测控电子舱;另外,安装在阀门上的角度传感器反馈阀芯开闭状态,将角度位置信号采集进入测控电子舱;液压压力和阀芯位置信号经测控电子舱处理后送入上位机集控系统显示,为操控人员提供液压系统压力和阀门开度状态信息指示和参考。

1.3 总体方案设计

根据管线切换系统功能需求分析以及测控系统拓扑结构设计,形成系统总体方案设计:系统由以接驳盒、测控舱等组成的供电和测控单元,水下HPU,阀门及管线和举升泵组组成,运用水下测控和HPU技术,通过HPU液压输出驱动液控阀门,实现管线切换,系统框图示意图见图3。



图3 总体方案设计框图

2 阀门选型与测试方案

2.1 选型与技术指标

对于深海环境使用场景下的液控阀门的选型,主要考虑环境、流体介质和可靠性。针对本项目中含岩屑的泥浆介质,要求具有较好的流道通过性,采用直通式结构较好,如闸板阀和球阀;闸板阀的阀板和阀座密封面之间有相对滑动,在介质力作用下易产生擦伤,而球阀的密封面与球面常在闭合状态,不易被介质冲蚀,且结构简单、体积小,适用于轻量化海洋设备,因此选用液控球阀。

根据RMR举升泵组管线参数设计,如管径、压力和工作水深等,结合流体介质、耐压密封、耐磨要求和安装及工况特点,选用一种高压液控球阀,外形结构如图4所示,其技术指标参数见表2。

2.2 耐压密封和磨损测试方案

为验证液控球阀水下工作可靠性,对某型高压液控球阀设计耐压密封和磨损测试方案,测试装置示意如图5所示。

图5中,测试装置采用PLC控制的液压系统来开启或关闭球阀,并可通过压力表和角度传感器反馈数据观察系统压力和球阀开闭状态;手动增压泵用来对球阀内部增压,在进出口封闭的情况下,可



图4 球阀外形结构

表2 球阀技术指标参数

项目	技术指标	项目	技术指标
工作水深	1000 m	驱动方式	液压驱动
材质	316 L 不锈钢	额定压力	10 MPa
质量	180 kg	泵送压差	不低于 6.5 MPa
球阀通径	DN150	配置传感器	角度位置传感器 (4~20 mA 输出)
连接方式	法兰	切换时间	不高于 5 s(流量 0.6~1.5 L/min)

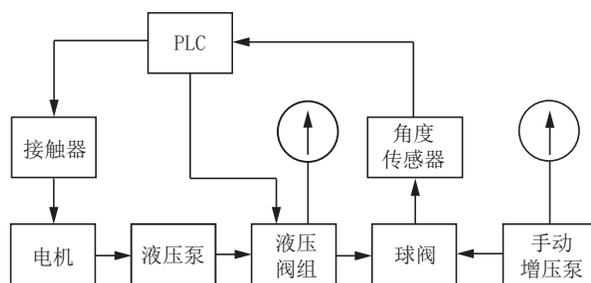


图5 球阀测试装置示意框图

测试球阀带压密封和动作情况^[16]。测试装置主要技术参数见表3。

表3 球阀测试装置主要技术参数

项目	参数
液压系统压力	额定压力 16 MPa
液压系统流量	4.5 L/min
压力传感器	24 V 供电/4~20 mA 输出/精度 1%FS
手动增压泵	额定压力 21 MPa

2.2.1 耐压密封测试

球阀密封结构如图6所示,球阀共有转轴、阀芯、壳和进出口法兰端面4处密封结构。

为测试球阀密封结构,在进出口封闭情况下使

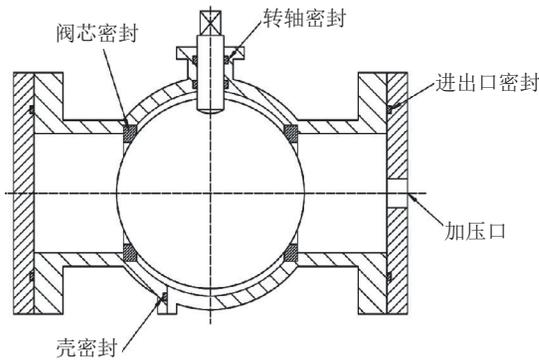


图 6 球阀密封结构图

用淡水对球阀加内压并保压^[17],具体测试方案见表 4。

表 4 球阀密封测试

步骤	阀芯状态	测试内容及方法	测试目标
1	半开	将球阀加满水,进出口封闭,通过	观察密封
2	全开	手动增压泵对球阀加内压 8 MPa,	是否外泄
3	全关	保压 1 h 以上,重复测试 5 次	漏及形变

2.2.2 磨损测试

因 RMR 举升泵组管线内工作介质为含岩屑的泥浆,球阀开闭过程可能会使密封结构磨损失效,因此设计以下磨损测试:

球阀内腔加满 1:10 勾兑含砂泥浆,分别在无压、带压密封及带压开闭状态,使用测试装置对球阀进行磨损测试^[18],磨损测试方案见表 5。

表 5 球阀磨损测试

步骤	加压状态	测试内容及方法	测试时间	测试目标
1	无压	(1)将球阀加满含砂泥浆,进出口封闭;(2)启动液压系统,自动对球阀进行开闭操作	8 h;20 s/循环	
2	密封带压	(1)将球阀加满含砂泥浆,出口封闭,进口接手动增压泵对球阀加内压 8 MPa;(2)启动液压系统,自动对球阀进行启闭操作	8 h;20 s/循环	试验结束后关闭阀芯,手动增压泵加压至 8 MPa,观察阀芯密封是否泄漏,球面是否有明显划痕
3	带压开/闭	(1)将球阀加含砂泥浆超过球面,出口打开,进口接手动增压泵;(2)启动液压系统,自动对球阀进行开闭操作,在阀芯关闭后对球阀加内压 8 MPa	4 h;20 s/循环	

3 水下 HPU 设计

3.1 液压系统参数确定

3.1.1 系统压力及流量设定

根据表 2 球阀液压执行器压力和流量参数,结合球阀测试装置测试期间阀芯开启速度和压力,将液压系统额定工作压力设为 16 MPa 可满足要求;考虑最多 3 个球阀同时动作的情况,初步选定系统流量为 4.5 L/min。

3.1.2 液压泵及电机功率计算

根据液压系统压力、流量和效率计算液压泵功率,液压泵输入功率计算公式为:

$$N = P \cdot Q / 60\eta \quad (1)$$

式中: N ——液压泵输入功率,kW; P ——系统压力,MPa; Q ——系统流量,L/min; η ——液压泵效率。

按一般陆地用液压柱塞泵效率取 0.85 计算,即: $\eta = 0.85$ 。

又根据已确定的系统压力 $P = 16$ MPa,流量 Q

$= 4.5$ L/min,代入式(1)中,计算液压泵输入功率:

$$N = 1.41 \text{ kW}$$

据此确定液压泵的功率为 1.5 kW。

水下 HPU 的液压泵由水下电机作为原动机驱动,电机机械输出功率转化为液压泵的输入功率,考虑水下 HPU 的电机需在充液环境中运行,电机输出效率损失按 30% 估算,计算电机输出功率:

$$N_0 = 1.5 / (1 - 30\%) = 2.14 \text{ kW}$$

据此,按国标电机功率序列确定电机功率为 2.2 kW。

3.1.3 液压油箱容积设计

根据液压系统一般设计原则,油箱容积取不低于系统每分钟流量的 2~5 倍,本系统按长时间连续工作考虑,油箱容积按系统每分钟流量 5 倍设计,则油箱有效充油容积:

$$V = 5 \times 4.5 \text{ L/min} \times 1 \text{ min} = 22.5 \text{ L}$$

据此确定油箱有效充油容积 < 22.5 L。

3.2 液压原理设计

按一般液压系统基本设计原则,液压系统由7类基本元件组成:(1)液压油箱;(2)液压管路;(3)液压泵;(4)压力控制阀;(5)方向控制阀;(6)流量

控制阀;(7)执行元件。对于本系统设计的水下HPU,按定量系统设计,无需流量控制阀,设计液压系统原理见图7。

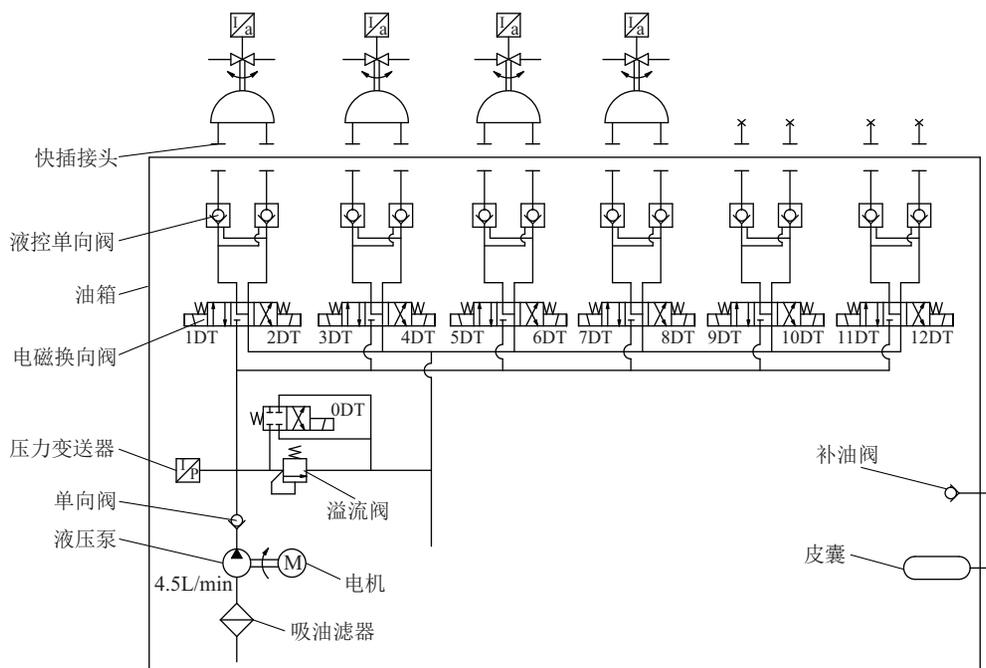


图7 液压系统原理

本液压系统设计的思路和特点^[19-22]:

- (1)采用开式定量系统回路设计,简单可靠;
- (2)可输出4路液压油控制4个球阀开闭,预留2路供后续扩展备用,每路都使用双液控单向阀,可使球阀执行器保压锁紧;
- (3)与陆地液压系统不同,油箱与外界环境封

闭并设计内置油囊以平衡补偿海水环境压力。

3.3 电控接口设计

根据测控功能需求,水下HPU对外的电控接口主要有4处接口(见图8),分别为电源进线、HPU电机控制、球阀角度信号采集、压力信号采集和电磁阀控制。

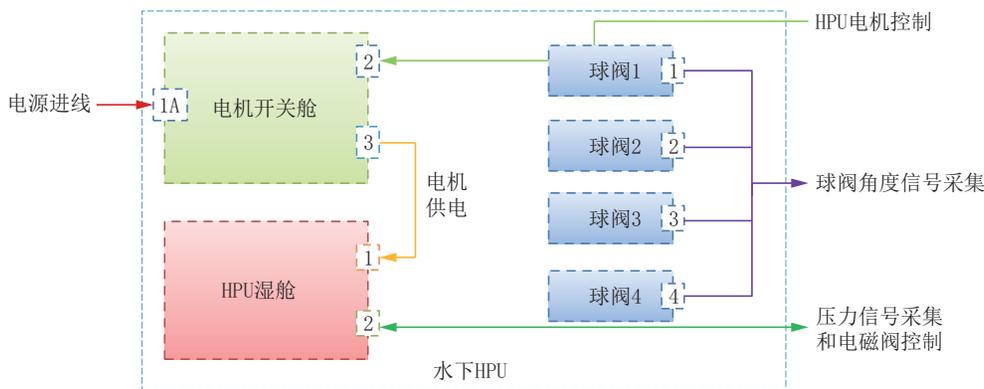


图8 HPU电控接口示意

本系统设计的HPU由泵组接驳盒通过电源进线供电 AC220 V,输入功率 ≥ 3 kW;其他3处采集

和控制接口接入测控舱,配合上位机中央集控系统,可控制HPU电机启停、各电磁换向阀油路通断,

并读取显示系统压力和球阀阀芯角度位置。

3.4 主要元件选型

根据前述液压系统参数设定和原理设计,对液压系统主要设备元件选型如下。

3.4.1 液压泵及电机

根据系统压力和流量参数,考虑体积、质量因素,选用RK系列单排径向柱塞泵,该系列泵的技术参数见表6。

表6中,选择柱塞数3、柱塞直径13 mm,额定工作压力32 MPa,理论流量4.54 L/min,即可满足设计要求。该系列泵的额定转速为1500 r/min,因泵组接驳盒的供电为AC220 V,选用YE3系列国标铝壳电机,型号为YE3-100L1-4,安装方式为B35。

3.4.2 溢流阀、电磁换向阀及液控单向阀

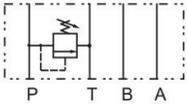
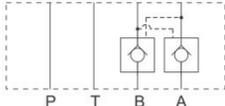
在溢流阀、电磁换向阀及液控单向阀的选型中,考虑阀的整体一致性、模块化程度,选用结构简单的板式安装阀,可叠加安装,只需按油路数选用

表6 RK系列径向柱塞泵技术参数

额定工作压力/MPa	100	63	50	32	22.5	
柱塞直径	6.5	8.5	10	13	15	
额定转速	1500 r/min					
型式	柱塞数	理论流量/(L·min ⁻¹)				
单排	1	0.37	0.64	0.89	1.51	2
	2	0.75	1.29	1.79	3.02	4
	3	1.13	1.93	2.68	4.54	6
	4	1.51	2.58	3.58	6.05	8
	5	1.89	3.22	4.47	7.56	10
	6	2.26	3.87	5.37	9.07	12
	7	2.64	4.51	6.26	10.59	14.1

标准安装阀板即可。本系统选用7路标准安装阀板,设计安装6路三位四通换向阀油路输出执行机构,每路叠加双液控单向阀,另外1路两位四通换向阀油路给泵建压/卸荷,叠加溢流阀。阀的选型及技术参数见表7。

表7 阀的选型及技术参数

名称	型号	公称通径/mm	调整范围	液压符号
叠加式溢流阀	MRF-02P-K-4-20	6	7~25 MPa	
电磁换向阀	SWH-G02-C2B-D24-20	6	—	
电磁换向阀	SWH-G02-C4-D24-20	6	—	
叠加式液控单向阀	MPC-02W-05-40	6	开启压力0.35 bar(35 kPa)	

3.5 布局及结构设计

3.5.1 整体结构

水下HPU整体结构模型见图9。

本系统水下HPU的设计采用撬装一体式框架结构设计,便于运输和安装;主体结构为方箱充油湿舱式封装,内置了除液压执行件外的全部液压系统,端盖采用透明亚克力材质,方便观察液压系统工作情况,并在其上设置充油和排气孔;另设圆柱形电机开关舱(干舱),内置电机启动接触器。湿舱上设有进出油口以及水密电插座,以对外提供液压

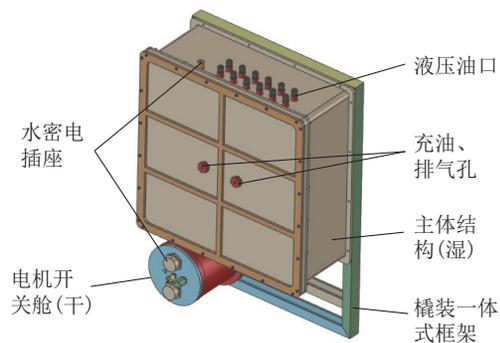


图9 水下HPU整体结构模型

输出和接入测控舱电信号;干舱上设有水密电插座,用来引入电源供电和输出电机启停控制。

为符合海洋设备防腐要求,水下HPU结构金属件均采用316 L不锈钢材质。

3.5.2 内部布局

为满足深海环境耐压密封、耐腐蚀要求,同时适应水下设备高集成化、高可靠性设计原则,水下HPU主体结构采用方箱结构充油湿舱(见图10),湿舱同时作为液压系统封闭油箱和阀箱,舱内充油既作为液压系统工作介质,又封闭隔绝海水密封、防腐,还作为舱内外油补偿平衡介质:当舱内充满液压油时,在舱内油囊作用下,海水进入油囊内部,海水压力通过油囊形变始终与油囊外部的液压油压力自适应平衡,这样湿舱内外几乎无压差,极大减少了对封装舱体结构的强度要求,使结构大大轻量化。

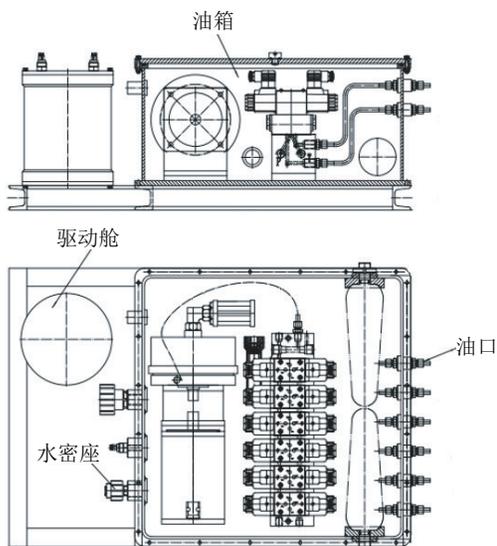


图10 水下HPU内部布局

根据舱内结构布局和尺寸设计,经计算舱内总体积约67.4 L,有效充油容积按1/3估算约为22.5 L,与前述油箱有效容积最小值吻合,符合设计要求。

4 结语

在RMR举升泵组管线切换系统的设计中,分析系统功能需求,确定系统方案,选型更适用本文所设计管线切换系统工作环境的高压液控球阀,并设计耐压密封和磨损测试方案,以通用液压系统设计为基础,结合深海环境对液压系统的隔绝海水、压力平衡、耐腐蚀以及高集成度、模块化和轻量化

等要求,完成电控接口设计及元件选型,搭建了一套小型水下HPU系统,以该系统作为动力和控制单元、液控球阀作为执行单元,实现了一套管线切换系统设计。

参考文献:

- [1] 殷志明. 新型深水双梯度钻井系统原理、方法及应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
- [2] 李旋, 何新霞, 潘辉. 海底泥浆举升泵驱动电机无传感器矢量控制[J]. 电气传动, 2021, 51(5): 25-30.
- [3] 高本金. 海底泥浆举升圆盘流场仿真与性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
- [4] 何新霞, 徐伟敏. 基于FPGA的海底泥浆举升泵控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(8): 2475-2477, 2481.
- [5] 王国栋, 陈国明, 殷志明, 等. 深水无隔水管泥浆举升钻井系统配置及安装流程[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(11): 11-15.
- [6] 王志伟. 大洋勘探船无隔水管泥浆闭式循环钻井系统设计研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- [8] QIN R L, LU Q P, HE G L, et al. Quantitative Analysis of the Stability of a Mud-Return Circulation System in a Riserless Mud-Recovery Drilling System [J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(16): 9320.
- [9] 刘玉含. 深水RMR钻井管柱稳定性机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- [10] 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.
- [11] 解永超. 海底泥浆举升水合物钻井系统设计与配置研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [12] 陈浩文, 王林清, 王偲, 等. 400 m级无隔水管泥浆回收系统研发及海试[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 37-44.
- [13] BROWN J D, URVANT V V, THOROGOOD J L, et al. Riserless mud-recovery system used in Sakhalin wells [J]. OIL & GAS JOURNAL, 2007, 105(17): 51.
- [14] 包玉龙. 面向多管线流量仪表标定系统的分段切换控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [15] 王国栋, 陈国明, 殷志明. 新型RMR钻井系统泥浆返回管线海底锚泊方案[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(11): 5-8.
- [16] 商守博, 吴志星, 王鑫, 等. 水下控制系统测试台设计及试验研究[J]. 机械设计, 2024, 41(3): 1-8.
- [17] 杨鼎瑞. 硬密封固定球阀密封性能研究及结构优化[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [18] 彭东华. 天然气管道球阀冲蚀磨损行为与寿命预测研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- [19] 李金龙. 水下控制模块液压系统设计及长软管对系统影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [20] 涂绍平, 朱迎谷, 项立扬, 等. 4000 m深海科考重型ROV成套系统设计及应用[J]. 控制与信息技术, 2023(6): 16-23.
- [21] 张子涵. 安装修井液动力系统设计及可靠性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [22] SOTOODEH K. Closed Loop Hydraulic System and Its Effect on Actuator Design [J]. Journal of Marine Science and Application, 2021, 20(2): 333-342.

(编辑 荐华)