

海底钻机回转液压系统仿真分析

刘广治, 梁涛*

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:海底钻机是海底资源勘探、海洋地质调查以及海洋科学考察不可或缺的重要技术装备,回转系统是海底钻机的核心部件,为钻头提供转速和扭矩。在定量泵供油的回转液压系统中,为减小负载的波动对回转系统输出转速的影响,回转液压系统中设置了定差溢流阀,并利用AMESim对海底钻机回转液压系统进行了建模,在阶跃负载下进行了仿真。仿真结果表明:定差溢流阀能够使得泵出口压力始终与负载相匹配,有效地提高输出转速的平稳性,同时实现系统节能。

关键词:海底钻机;回转系统;液压系统;定差溢流阀;AMESim

中图分类号:P634.3;TE922 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)02-0026-05

Simulation analysis of the rotation hydraulic system of subsea drilling rig

LIU Guangzhi, LIANG Tao*

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Seabed drilling rig is indispensable technical equipment for seabed resource exploration, marine geological survey and marine scientific investigation, and the rotation system is one of the core components of seabed drilling rig for providing rotational speed and torque for the drill bit. In the hydraulic system with quantitative pump oil supply, a differential relief valve is placed in the rotation system to reduce the influence of load fluctuation on the output speed of the system. The rotation hydraulic system of subsea drilling rig is modeled and simulated by AMESim at step load. The simulation results show that the constant differential relief valve can always make the pump outlet pressure match the load, effectively improve the stability of output speed, and at the same time realize system energy saving.

Key words: subsea rig; rotation system; hydraulic system; constant differential relief valve; AMESim

0 引言

全世界海洋的总面积约为3.61亿 km^2 ,占地球表面积的71%。同陆地一样,海底地壳中蕴藏着极其丰富的矿产资源,包括石油、天然气、多金属结核、富钴结壳、热液硫化物等,这些资源具有重要的经济价值和战略意义^[1-3]。在陆地资源日趋枯竭的今天,人类越来越重视海洋资源的开发和利用。通常海底矿体的埋藏深浅不一,且形体和硬度等方面也存在很大的差异。尤其像热液硫化物、富钴结壳

这类与岩石共生、储存于海山岩石上的海底矿藏,大多数情况下需要依靠海底钻机钻探取样^[4-8]。

1 海底钻机简介

海底钻机是一种钻探系统完全工作于水底的钻探设备,与通常的船载钻机需要钻探船或钻井平台有着完全不同的工作方式,海底钻机在海底工作时,只需要一条具有承载能力的脐带缆就可以实现远程的能量供应和通讯控制,如图1所示^[9]。与船

收稿日期:2022-06-15;修回日期:2022-09-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.004

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(项目编号:DD20221722)

第一作者:刘广治,男,汉族,1983年生,高级工程师,机械电子工程专业,硕士,主要从事水下装备方面的研究工作,北京市房山区良乡经济开发区2期创新路1号(102446),liuguangzhi01@163.com。

通信作者:梁涛,男,汉族,1985年生,高级工程师,钻井专业,硕士,主要从事海洋钻探取芯取样技术的研究工作,北京市房山区良乡经济开发区2期创新路1号(102446),289242603@qq.com。

引用格式:刘广治,梁涛.海底钻机回转液压系统仿真分析[J].钻探工程,2023,50(2):26-30.

LIU Guangzhi, LIANG Tao. Simulation analysis of the rotation hydraulic system of subsea drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):26-30.

载钻机相比,水下钻机具有钻探成本低、效率高、受天气影响小、样品扰动小、取心质量高、设备体积小、易操作和船舶适应性强等特点。因此研发海底钻机用于海底资源勘探、海洋地质调查以及海洋科学考察,已成为必然趋势^[10]。

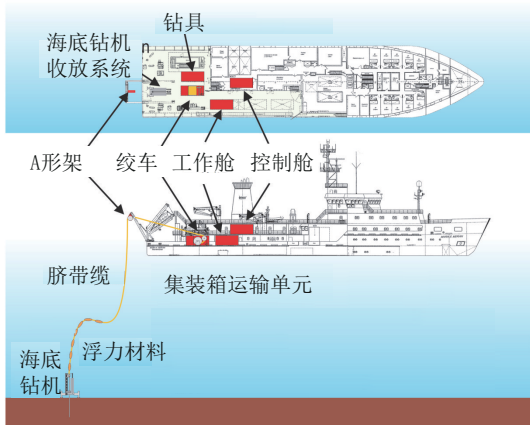


图 1 海底钻机工作示意^[9]

Fig.1 Working diagram of subsea drilling rig

海底钻机的动力头回转系统是一个核心部件,为钻头提供需要的扭矩和转速,同时海底钻机的回转系统也辅助钻杆的接卸。海底钻机的回转系统一般为比例方向阀控液压马达系统,由比例阀控制马达的流量,进而控制马达输出转速。当孔内地层情况比较复杂、负载变化比较剧烈频繁时,回转系统的输出压力就会有相应大幅度的波动。同时泵的输出压力变化,内溢流量也不断的变化,输出流量也会大幅频繁波动,导致回转速度大幅波动,能量损失大,发热严重。为解决上述问题,在比例方向阀控液压马达的动力头回转系统中加入定差溢流阀,定差溢流阀可以使得比例方向阀前后压差保持基本不变,会有效减小回转速度的波动,其原理如图 2 所示。

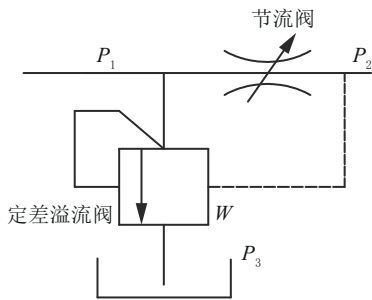


图 2 定差溢流阀压力补偿原理

Fig.2 Pressure compensation principle of the differential relief valve

P_1 为泵出口压力, P_2 为负载压力, P_2 反馈到定差溢流阀弹簧腔, P_1 作用在另一腔,两者压差为定差溢流阀弹簧调定压力,定差溢流阀保持节流阀阀口前后压差不变($P_1 - P_2$ 为定值),数字上等于定差溢流阀弹簧压缩量折算的压力 P_3 (一般 $P_3 < 2$ MPa)。定差溢流阀使得 P_1 随着 P_2 变化而变化,实现了系统节能。

2 海底钻机动力头回转液压系统原理及设计参数

海底钻机动力头回转液压系统主要由电机泵组、溢流阀、比例方向阀、液压马达、定差溢流阀、水下压力补偿器以及梭阀等组成,如图 3 所示。

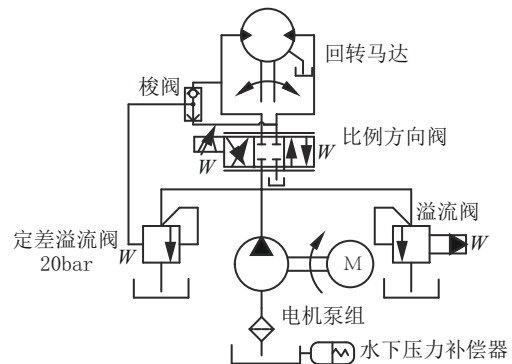


图 3 海底钻机回转液压系统

Fig.3 The rotation hydraulic system of subsea drilling rig

水下压力补偿器:敏感周围海水环境压力,并把海水环境压力传递到液压系统中,对液压系统的压力进行补偿,以消除或减少海水环境压力对液压系统的影响。

目前针对富钴结壳等深海矿产资源调查研制的海底钻机(图 4),其最大钻深 2 m,钻孔直径 75 mm,

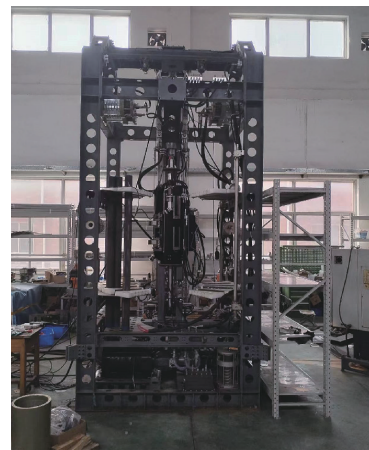


图 4 20 m 钻深海底钻机

Fig.4 Subsea drilling rig with 20m drilling capacity

设计扭矩 250 N·m,设计转速 600 r/min。海底钻机动力头液压系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 海底钻机回转动力头液压系统参数

Table 1 Hydraulic system parameters of the rotation power head of subsea drilling rig

参数名称	数值
最大供油压力/MPa	35
马达排量/(mL·r ⁻¹)	45
泵排量/(mL·r ⁻¹)	18
定差溢流阀压差/MPa	2

为进一步分析定差溢流阀在定量泵供油的液压系统中对比例方向阀控液压马达回转系统性能的影响,需借助专业仿真软件进行物理建模和仿真分析。

3 基于 AMESim 海底钻机动力头回转液压系统仿真模型建立

AMESim 软件是计算机系统工程高级建模和仿真平台,它是由法国 Imagine 公司自 1995 年开始推出的基于计算机技术的系统建模及仿真软件。它为用户提供了一个时域仿真建模环境,可利用已有模型和(或)建立新的子模型,来构建优化设计所需的实际原型,采用易于识别的标准 ISO 图标和简单直观的多端口框图,方便用户建立复杂系统以及用户所需的特定应用实例,还可以修改模型和仿真参数进行稳态和动态仿真、绘制曲线并分析仿真结果。该软件界面友好、操作方便,能够让使用者快速建立仿真模型,并能帮助用户分析系统参数以及优化设计,从而缩短开发周期,减少开发成本^[10-13]。

根据海底钻机回转系统液压原理图,利用 AMESim 软件库中元器件的模型,搭建海底钻机回转液压系统的物理模型见图 5。模型参数见表 2。

4 海底钻机动力头回转液压系统仿真分析

海底钻机动力头回转负载主要包括:钻头与孔底岩石摩擦产生的扭矩,回转钻杆柱与孔壁的摩擦产生的扭矩^[14-15]。这些负载按性质分为线性负载和阶跃负载,影响因素很多,不容易量化。为了更好地分析海底钻机回转液压系统的性能,我们采用分析极端工况,即阶跃负载下回转系统的动态性能^[16]。

海底钻机钻进过程中,若动力头回转负载为阶跃负载,即负载扭矩突然增大,此时工况最为恶劣,

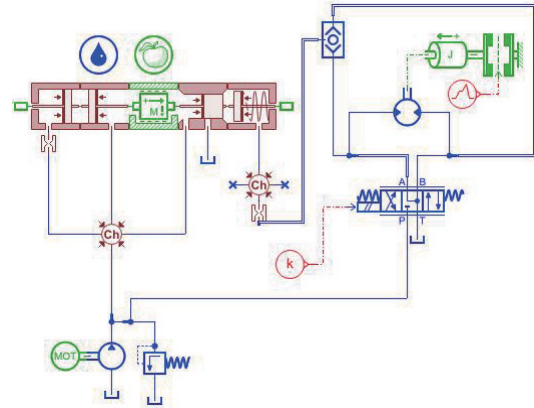


图 5 海底钻机动力头回转液压系统仿真模型

Fig.5 Simulation model of the power head rotation hydraulic system of subsea drilling rig

表 2 仿真模型中初始参数

Table 2 Initial parameters in the simulation model

参数名称	数值
最大供油压力/MPa	35
泵排量/(mL·r ⁻¹)	18
马达排量/(mL·r ⁻¹)	45
定差溢流阀弹簧初始预紧力/N	156
弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	9
阀芯行程/mm	10
阀芯活塞直径/mm	10
阀芯活塞杆直径/mm	5
阀孔直径/mm	10
电机转速/(r·min ⁻¹)	1500

假设此时动力头回转的负载变化曲线为:0~10 s 为 50 N·m,10~20 s 阶跃为 100 N·m,20~30 s 阶跃为 150 N·m,如图 6 所示。

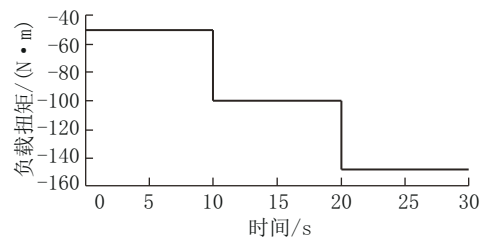


图 6 输入信号线

Fig.6 Input signal curve

输入负载扭矩与回转系统输出扭矩相反。在输入负载扭矩下,比例方向阀输入电流 40 mA(阀口全开),分析海底钻机动力头回转系统输出扭矩的曲线,如图 7 所示。

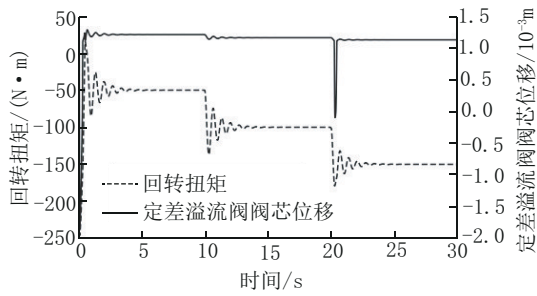


图 7 回转系统扭矩响应曲线

Fig.7 Torque response curve of the rotation system

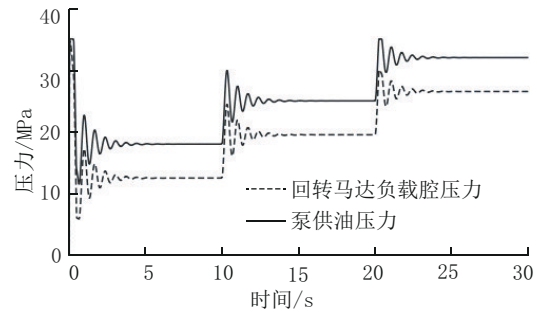
图 7 中虚线为回转系统输出扭矩,实线为定差溢流阀阀芯位移曲线。从图 7 中可以看出,在阶跃输入信号下,系统瞬时存在超调和震荡,这是由于阶跃载荷下,引起回转液压系统的定差溢流阀的阀芯发生振动,造成系统压力发生波动,进而使得马达的输出扭矩发生波动,随着时间推移波动逐渐消失,与负载扭矩相适应。

图 8(a)为回转液压系统设置定差溢流阀后,回转马达负载腔压力和泵供油压力变化曲线,图 8(b)为回转液压系统不设置定差溢流阀时泵供油压力和回转马达负载腔压力变化曲线。可以看出,系统设置定差溢流阀时,泵出口压力始终保持比负载压力高一个设定压力。系统未设置定差溢流阀时,泵出口压力有高压溢流损失,且泵出口压力与负载压力差值大,表明系统的节流损失大。

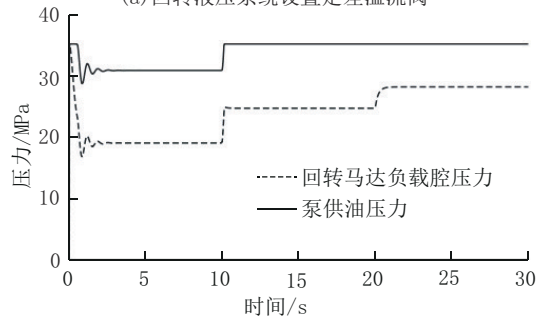
由图 9 可以看出,系统设置定差溢流阀后,海底钻机动力头马达负载发生变化时,动力头马达输出转速基本保持不变,只是在负载变化的瞬间发生波动,然后趋于平稳。这是由于负载发生变化后,回转液压系统中的定差溢流阀会对负载变化进行感知和反馈,使得泵出口压力做出相应调整,保持比例方向阀前后的压差不变,回转马达输出转速不变。

给比例方向阀电磁铁输入不同电流,改变比例方向阀的开度(如图 9 所示),动力头的输出转速会发生相应的变化,实现调速功能,满足不同地层对转速的需求。改变比例方向阀开度瞬时输出转速有一个波动,很快趋于稳定。

图 10 为比例方向阀阀口全开时,改变定差溢流阀弹簧预紧力,回转系统输出转速曲线图。由图 10 可以看出,定差溢流阀的弹簧预紧力越大,回转系统输出转速越高。但此时作用在比例方向阀两端的压差变大,压力油通过比例方向阀时,系统功率损失增加。



(a) 回转液压系统设置定差溢流阀



(b) 回转液压系统不设置定差溢流阀

图 8 泵供油压力与负载压力变化曲线

Fig.8 Variation curve of pump oil supply pressure vs load pressure

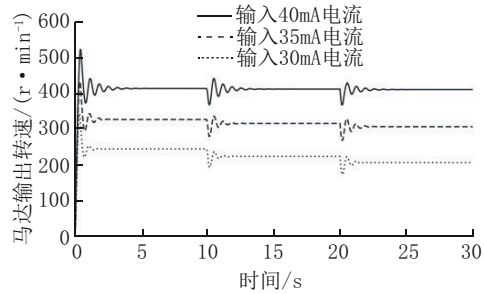


图 9 回转系统调速曲线

Fig.9 Speed regulation curve of the rotation system

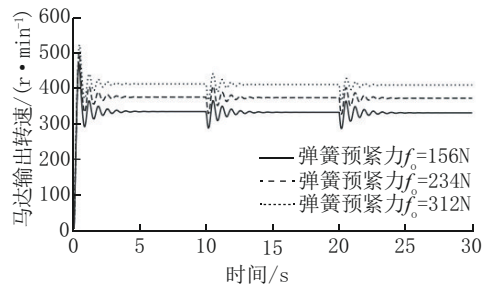


图 10 改变定差溢流阀弹簧预紧力,回转系统输出转速曲线

Fig.10 Output speed curve of the rotation system when changing the spring preload of the differential relief valve

5 结论

(1)海底钻机回转液压系统中设置定差溢流阀,

能够使得比例方向阀前后的压差保持不变,有效降低负载的波动对回转系统转速的影响,实现泵供油压力按需供给,有效降低溢流损失,实现系统节能。

(2)定差溢流阀使得泵出口压力始终大于负载压力一个设定值,在定量泵供油系统中,可以使得系统不工作时处于卸荷状态。

(3)调节定差溢流阀弹簧的预紧力,可以改变回转系统的输出转速和速度的平稳性,输出转速随定差溢流阀弹簧预紧力的增大而增大,合理调节定差溢流阀弹簧预紧力,能提高定差溢流阀的使用性能。

参考文献(References):

- [1] 鄢泰宁,补家武,李邵军.浅析国外海底取样技术的现状及发展趋势——海底取样技术介绍之一[J].地质科技情报,2000,19(2):67-70.
YAN Taining, BU Jiawu, LI Shaojun. Brief study on the international present condition and developing tendency of the technology of sea floor sample drilling[J]. Geological Science and Technology Information, 2000,19(2):67-70.
- [2] 刘德顺,金永平,万步炎,等.深海矿产资源岩心探测取样技术与装备发展历程与趋势[J].中国机械工程,2014,25(23):3255-3265.
LIU Deshun, JIN Yongping, WAN Buyan, et al. Review and development trends of deep-sea mineral resource core sampling technology and equipment[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(23):3255-3265.
- [3] 闫凯,孙军,杨慧良,等.海洋区域地质调查技术方法进展[J].海洋开发与管理,2018,35(9):107-114.
YAN Kai, SUN Jun, YANG Huiliang, et al. Progress in technologies and methods of regional marine geology survey[J]. Ocean Development and Management, 2018,35(9):107-114.
- [4] 倪国江.海洋资源开发技术发展趋势及我国的发展重点[J].海洋技术,2009,28(1):133-136.
NI Guangjiang. Development in marine resources development technology and China's strategic focus[J]. Journal of Ocean Technology, 2009,28(1):133-136.
- [5] 郑苗壮,刘岩,李明杰,等.我国海洋资源开发利用现状及趋势[J].海洋开发与管理,2013,30(12):13-16.
ZHENG Miaozhuang, LIU Yan, LI Mingjie, et al. Current state and trend of development and utilization of marine resources in China[J]. Ocean Development and Management, 2013,30(12):13-16.
- [6] 邬长斌,刘少军,戴瑜.海底多金属硫化物开发动态与前景分析[J].海洋通报,2008,27(6):101-109.
WU Changbin, LIU Shaojun, DAI Yu. Exploitation situation and prospect analysis of seafloor polymetallic sulfides[J]. Marine Bulletin, 2008,27(6):101-109.
- [7] 杨建民,刘磊,吕海宁,等.我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J].中国工程科学,2020,22(6):1-9.
YANG Jianmin, LIU Lei, LÜ Haining, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect[J]. Chinese Engineering Science, 2020,22(6):1-9.
- [8] 彭奋飞,王佳亮,万步炎,等.适用于海底钻机的保压绳索取心钻具设计[J].钻探工程,2021,48(4):97-103.
PENG Fenfei, WANG Jialiang, WAN Buyan, et al. Design of the pressure-coring tool for underwater drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):97-103.
- [9] T.Freudenthal, G.Wefer. Drilling cores on the sea floor with the remote-controlled sea floor drilling rig MeBo[J]. Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, 2013(2):329-337.
- [10] 张汉泉,陈奇,万步炎,等.海底钻机的国内外研究现状与发展趋势[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(1):1-7.
ZHANG Hanquan, CHEN Qi, WAN Buyan, et al. Current research and development trends of seabed drill rig[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016,31(1):1-7.
- [11] 王纪森,林志纲.基于AMESim负载敏感系统仿真与分析[J].机床与液压,2012,40(8):78-79.
WANG Jisen, LIN Zhigang. The simulation and analysis of load sensitive system based on AMESim[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2012,40(8):78-79.
- [12] 付永领.AMESim系统建模和仿真实例教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.
FU Yongling. AMESim System Modeling and Simulation Example Tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011.
- [13] 谭宗柒,戴浩林,汪云峰.基于AMESim的深度模拟器液压系统设计及仿真[J].机床与液压,2009,37(2):150-152,200.
TAN Zongqi, DAI Haolin, WANG Yunfeng. Design and simulation of hydraulic depth simulator based on AMESim[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2009,37(2):150-152,200.
- [14] 刘旭光,白祖卫,吕佩东,等.DGZ-150B型旋喷钻机提升系统稳定性分析及改进[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):88-93.
LIU Xuguang, BAI Zuwei, LÜ Peidong, et al. DGZ-150B stability analysis and improvement of lifting system of rotary jet drilling rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):88-93.
- [15] 谭玉山,王金友,林宝新,等.液动力头岩心钻机的负载敏感液压回路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(3):32-34.
TAN Yushan, WANG Jinyou, LIN Baoxin, et al. Load sensing hydraulic circuit on hydraulic driving head core drill[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(3):32-34.
- [16] 刘晓林,刘家誉,王嘉瑞,等.海底基盘控制系统方案设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):77-82,93.
LIU Xiaolin, LIU Jiayu, WANG Jiarui, et al. Design of control system for seafloor template[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):77-82,93.

(编辑 李艺)