

坑道钻机模块化双泵站功率匹配实验研究

鲁飞飞 凡东 田宏亮

引用本文:

鲁飞飞, 凡东, 田宏亮. 坑道钻机模块化双泵站功率匹配实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 171–178.

LU Feifei, FAN Dong, TIAN Hongliang. Experimental study on power matching of modular double pumping stations of tunnel drilling rig[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 171–178.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.12.0860>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于ATO模式的煤矿井下多变幅履带钻机模块化平台开发

ATO mode-based modular platform development of variable luffing crawler drilling rig used in underground coal mine
煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 8–13,19 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.002>

15 000 N · m大功率定向钻机关键技术研究

Research on key technology of the 15 000 N · m high-power directional drilling rig
煤田地质与勘探. 2019, 47(2): 7–12 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.002>

轻量化坑道钻机的研制及应用

Development and application of lightweight underground drill rig
煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 46–52 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.007>

煤矿井下坑道钻机电控自动化技术研究

Research on electronically controlled automation technology of underground drilling rig for coal mine
煤田地质与勘探. 2020, 48(3): 219–224 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.031>

煤矿井下钻机远程控制系统设计

Design of remote control system of drilling rig in coal mines
煤田地质与勘探. 2019, 47(2): 20–26 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.004>

全液压车载钻机给进回路负载特性分析及设计

Analysis of load characteristics and design of feeding circuit of fully hydraulic truck-mounted drilling rig
煤田地质与勘探. 2017, 45(6): 182–186 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.06.030>



移动阅读

鲁飞飞, 凡东, 田宏亮. 坑道钻机模块化双泵站功率匹配实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 171-178. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.12.0860

LU Feifei, FAN Dong, TIAN Hongliang. Experimental study on power matching of modular double pumping stations of tunnel drilling rig[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 171-178. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.12.0860

坑道钻机模块化双泵站功率匹配实验研究

鲁飞飞^{1,2}, 凡东², 田宏亮²

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:为解决坑道钻机动力泵站重量大、搬迁运输难题, 提出通过模块设计, 将泵站进行拆分, 采用小排量双动力双泵合流解决方案。化整为零, 可有效减小单个泵站的运输尺寸及重量, 并可根据工况需求选择单泵站或双泵合流提高钻机使用的灵活性, 同时降低能耗。负载敏感系统具有节能、负载适应性好、调速方便等优点, 然而双负载敏感泵系统合流时, 2 个泵的输出功率不平衡, 钻机输出参数不符合设计是亟需解决的难题。理论分析指出, 两个负载敏感泵与负载敏感阀之间的反馈管路差异影响 2 个泵的功率平衡, 然后建立双动力双泵负载敏感系统动态模型。基于该模型, 动态分析双负载敏感泵系统压力流量特性, 重点分析反馈管路以及压力补偿器对双泵站功率平衡的影响, 并提出双负载敏感泵系统功率匹配方法。通过台架实验对理论分析结果进行验证, 结果表明, 管路差异对双泵双动力负载敏感泵合流系统输出特性有较大的影响。在反馈管路中设置阻尼并根据管路匹配阻尼参数, 可实现双泵输出参数的基本平衡。通过微调压力补偿器弹簧预压缩量, 可使系统达到较好平衡, 消除管路差异影响。该方法解决了 2 个泵站输出功率不平衡问题, 该方法有较强的普适性和应用价值, 对坑道钻机液压泵站的模块化设计具有重要的参考意义。

关键词: 模块化; 双泵站; 功率平衡; 负载敏感系统; 合流; 坑道钻机

中图分类号: TD41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)08-0171-08

Experimental study on power matching of modular double pumping stations of tunnel drilling rig

LU Feifei^{1,2}, FAN Dong², TIAN Hongliang²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to solve the problems of heavy weight, relocation and transportation of the power pumping station of tunnel drilling rigs, it is proposed to divide the pumping station through modular design, and adopt the solution of small-displacement, dual-power and dual-pump confluence, effectively reducing the transportation size and weight of a single pump station. A single-pump station or a double-pump confluence is chosen according to the working conditions to improve the flexibility of the drilling rig and reduce energy consumption. The load-sensing system has the advantages of energy saving, good load adaptability, and convenient speed regulation. However, when the dual-load-sensing pump system merges, the output power of the two pumps is unbalanced, and the output parameters of the drilling rig do not meet the design requirements, which are urgent problems to be solved. Through theoretical analysis, it is proposed that the difference of the feedback pipeline between the two load-sensitive pumps and the load-sensitive valve affects the power balance of the two pumps, and then the dynamic model of the dual-power dual-pump load-sensitive system is established. Based on the model, the pressure-flow characteristics of the dual-load sensitive pump system are dynamically analyzed, the influence of the feedback pipeline and pressure compensator on the power balance of the dual-pumping station is analyzed, and the power matching method of the dual-load-sensitive pump system is proposed. The theoretical analysis results are verified by the bench test. The results show that the pipeline difference has a great influence on the

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-04-09

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2021XAYJB02)

第一作者: 鲁飞飞, 1987 年生, 男, 陕西宝鸡人, 博士研究生, 副研究员, 研究方向为煤矿井下钻探装备. E-mail: lufeifei@cctegxian.com

output characteristics of the dual-pump dual-dynamic load-sensitive pump confluence system. Setting damping in the feedback line and matching damping parameters according to the line can realize the basic balance of the output parameters of the two pumps. By fine-tuning the spring pre-compression of the pressure compensator, the system can achieve a better balance and eliminate the influence of pipeline differences. The problem of the unbalanced output power of the two pump stations is solved. The method has strong universality and application value, providing an important reference for the modular design of the hydraulic pump station of the tunnel drilling rig.

Keywords: modular; double power and double pump; power balance; load sensitive system; confluence; tunnel drilling rig

坑道勘探可避开上部采空区,相对于地表勘探能节省大量的钻探工作量,沿矿床层带多角度钻孔,实现金属矿山的边探边采,是一种经济、高效的勘探手段^[1-2]。受矿山巷道运输条件限制,大功率钻机搬迁运输困难,为解决这一问题,通过模块设计,将设备进行模块化拆分,采用小排量双动力双泵合流解决方案。化整为零,可有效减小单个泵站的运输尺寸及重量。由于负载敏感系统能够实现负载独立的流量输出,无溢流损失,有较好的节能效果。然而双负载敏感泵系统合流时,2个泵的输出功率不平衡,钻机输出参数不符合设计要求是亟需解决的难题。

相关学者对负载敏感系统与钻机液压系统开展研究,殷新胜等^[3]对负载敏感技术在全液压动力头式坑道钻机上的应用进行分析,研究负载敏感技术的节能、流量稳定,操控简便等特性。刘庆修等^[4]对 GDY-2000L 工程钻机负载敏感液压系统进行研究,对负载敏感控制阀和限压阀及整个液压系统进行建模与仿真,对系统压力自适应特点进行系统分析和总结。宋海涛等^[5]对采用负载敏感传动控制的钻机回转液压回路进行建模仿真,并分析负载敏感泵负载时所反馈油管的通径和长度对液压系统动态特性的影响,得出负载敏感液压系统对负载反馈油管的要求。孔晓武^[6]对负载敏感系统和阀控系统管道效应分别从时域和频域两个角度,对现存的各种流体管道数学模型进行分析和对比。陈随英等^[7]得出负载敏感变量泵输出流量和压力可实时与负载相适应,补偿压力约为 1.5 MPa,可有效提高液压系统效率,减少系统发热。李昊^[8]对负载敏感阀弹簧刚度,反馈管路长度,反馈管路内径和阻尼孔直径与多执行器同时动作时负载敏感液压系统稳定性之间的关系进行了研究。目前对负载敏感系统研究主要集中在单泵系统,缺乏双动力双负载敏感系统的相关理论研究,对双泵合流负载敏感系统功率匹配尚缺乏理论及依据。本研究旨在解决双泵功率平衡问题,采用液压系统计算机仿真技术,建立系统模型,得到系统动态输出特性,重点分析反馈管路以及压力补偿器对双泵站功率平衡的影响,并通过坑道钻机能力检测试验台进行钻机性能测试试验,结合仿真结果与

试验数据进行对比分析,从而解决双负载敏感泵输出功率匹配问题。

1 工作原理与分析

为解决坑道钻机单个泵站重量大,转场运输困难的问题,研制了 ZDY1200G 型轻量化坑道钻机,该钻机泵站采用模块化设计思想,为减轻单个模块重量,泵站采用双泵站设计^[9],2个电机分别驱动2个负载敏感泵,合流后为系统供油。钻机由操纵台、主机、双动力泵站4部分组成,如图1所示。



图1 ZDY1200G 钻机
Fig.1 ZDY1200G drilling rig

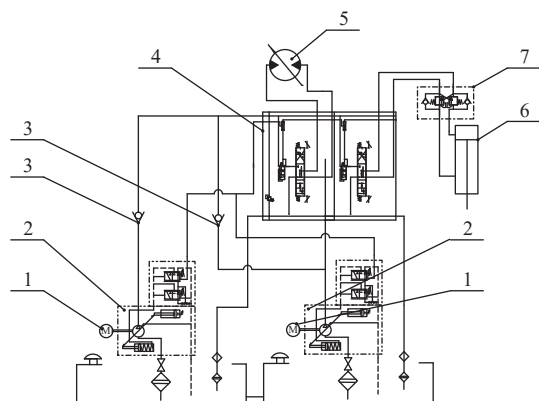
负载敏感系统原理如图2所示,2个负载敏感泵作为高压油源,为保证一个泵故障时,其另一泵不受影响,在2个负载敏感泵的出口分别设计了单向阀。负载敏感阀反馈油直接与2个泵的负载反馈LS口连接,根据负载敏感泵基本原理,节流阀流量与节流阀两端压差 Δp 及节流阀开口度有关,当 Δp 与节流阀开口度固定不变时,泵输出流量恒定,不受负载变化影响, Δp 由泵的压力补偿阀调定。

负载敏感系统流量方程^[10-11]为:

$$Q = C_d \omega x_v \sqrt{\frac{2(p_s - p_L)}{\rho}} \quad (1)$$

式中: Q 为节流口的流量, L/min; p_s 、 p_L 分别为节流口前后油压, MPa; x_v 为节流阀的位移量, mm; C_d 为流量系数; ω 为节流口面积梯度; ρ 为油密度, kg/m³。

从式(1)可以看出,若使流量与负载无关,只与节流口(负载敏感阀开口)有关,需维持节流阀口压差恒定,因此,在泵的斜盘控制回路上设置压力补偿阀,维持节流阀口前后压差恒定。执行机构工作时,保持多路阀开口度不变,压力补偿阀受负载压力、泵压及补偿压力(一般取 1.2~2.0 MPa)共同作用,处于平衡状态,



1—电机；2—负载敏感泵；3—单向阀；4—负载敏感阀；
5—回转马达；6—给进油缸；7—平衡阀

图2 双泵系统原理

Fig.2 Schematic diagram of the multi pump system

当负载变化时,压力补偿阀动作最终维持节流阀前后压差不变,从而实现负载独立的流量控制,使泵的流量只与阀的开口相关。

压力补偿阀阀芯力平衡方程^[12-14]:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m_c} [-B_c \dot{x} - k_c x + A_c (p_s - p_L)] \quad (2)$$

式中: x_c 为阀芯的位移, mm; m_c 为阀芯质量, kg; B_c 为阻尼系数; k_c 为阀芯弹簧刚度, N/m; A_c 为阀芯的横截面积, mm²。

如图2所示, ZDY1200G 坑道钻机双泵系统中, 泵出口并联, 反馈管路并联, 在不考虑管路差异时, 可得:

$$p_{S1} = p_{S2}; p_{L1} = p_{L2} \quad (3)$$

式中: p_{S1} 为泵1节流口前油压, MPa; p_{S2} 为泵2节流口前油压, MPa; p_{L1} 为泵1节流口后油压, MPa; p_{L2} 为泵2节流口后油压, MPa。

$$Q_1 = Q_2 = \frac{1}{2} C_d \omega x_v \sqrt{\frac{2(p_s - p_L)}{\rho}} \quad (4)$$

式中: Q_1 为泵1的流量; Q_2 为泵2的流量。

实际应用中, 反馈管道的压力传输特性如方程^[11-13]:

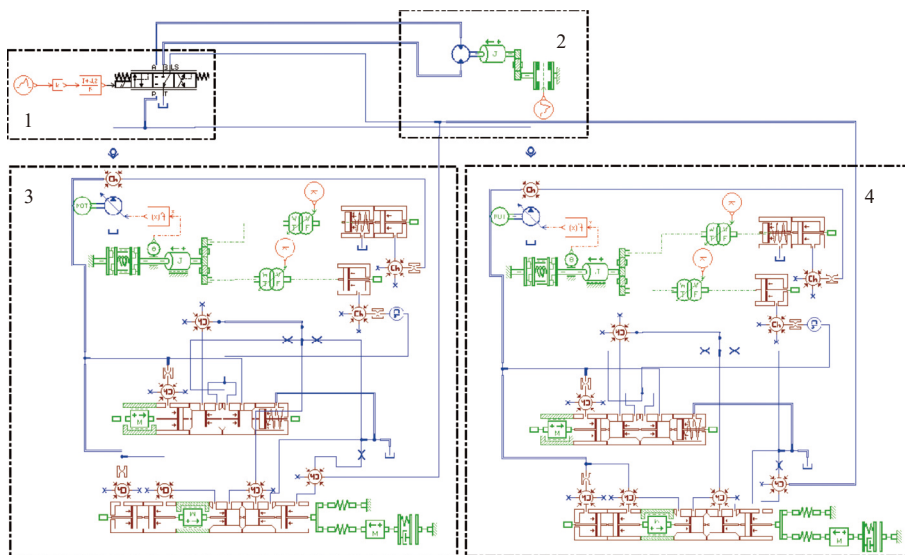
$$\Delta p = \left(\frac{128\rho\nu L}{\pi d^4} + \frac{4\rho L}{\pi d^2} \right) Q \quad (5)$$

式中: Δp 为管道进出口压差, MPa; d 为管道内径, mm; L 为管道长度, m; ν 为运动黏度, m²/s。

由式(5)可知, 在管道流量相同的情况下, 管道压损与管道长度成正比。在单泵系统中, 泵到阀、阀反馈油到泵, 管路相对比较简单, 公式推导过程中, 通常忽略了管路等对系统的影响。然而在双泵系统中, 由于管路相对比较复杂, 压力补偿阀之间会相互干扰, 使得个别压力补偿阀调节范围及频率增大, 降低了压力补偿阀使用寿命, 同时造成个别泵压力波动, 降低系统控制精度及平稳性^[15-16]。

2 双泵负载敏感系统建模及仿真

分析负载敏感系统工作原理, 采用液压系统动态分析软件 AMESim 建立其动态模型^[17-22], 如图3所示。



1—负载敏感阀；2—动力头；3—泵1；4—泵2

图3 双泵负载敏感系统

Fig.3 Multi pump load sensing system model

根据表1中钻机主要参数, 初步设定模型主要参数见表2。

2.1 不考虑管路影响

在不考虑管路影响的情况下, 初步设定2条反馈

管路长度均为1 m, 压力补偿器弹簧刚度为5 479 N·m, 弹簧初始力为11.5 N, 多路阀开度为40%, 模拟负载转矩由200 N·m逐渐增加至1 200 N·m, 系统总效率60%。测试系统输出特性曲线如图4所示。

表 1 ZDY1200G 主要性能参数
Table 1 ZDY1200G parameters

名称	参数
转速/(r·min ⁻¹)	300~1 000
转矩/(N·m)	0~1 200
动力头减速比	2.4
泵1功率/kW	40
泵2功率/kW	40
电机转速/(r·min ⁻¹)	1 450
泵1排量/(mL·r ⁻¹)	45
泵2排量/(mL·r ⁻¹)	45
马达排量/(mL·r ⁻¹)	160

表 2 模型主要参数
Table 2 Main parameters of the model

名称	参数
马达排量/(mL·r ⁻¹)	160
动力头减速比	2.4
泵1排量/(mL·r ⁻¹)	45
泵2排量/(mL·r ⁻¹)	45
电机转速/(r·min ⁻¹)	1 450
多路阀通径/mm	15
反馈管路通径/mm	6
系统最高工作压力/MPa	28

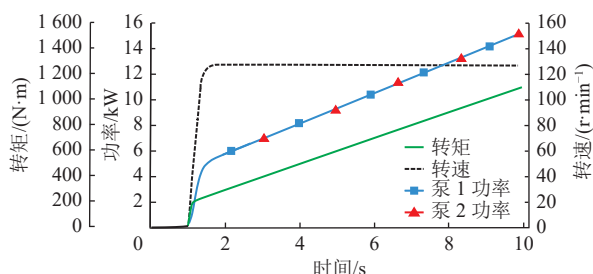


图 4 不考虑管路差异仿真结果

Fig.4 Simulation results without pipeline differences considered

从图 4 中可以看出,在不考虑管路影响的情况下,在负载从 200 N·m 逐渐增大到 1 200 N·m 过程中,动力头转速始终保持不变,2 个泵的输出功率曲线逐步增大且完全重叠。

2.2 考虑管路影响

在实际应用中,由于模块化钻机动力泵站结构、管路、接头无法保证完全一致,因此在其他设置不变的情况下,取泵 2 的反馈管路长度为 2 m,其余参数与图 4 完全一致,模拟结果如图 5 所示。

从图中可以看出,在负载从 70 N·m 逐渐增大到 240 N·m 过程中,动力头转速基本保持不变,此时动力头输出功率逐渐增大,泵 1 功率增速明显大于泵 2,当泵 2 的输出功率超过 7.9 kW 时,功率不再增加,且随

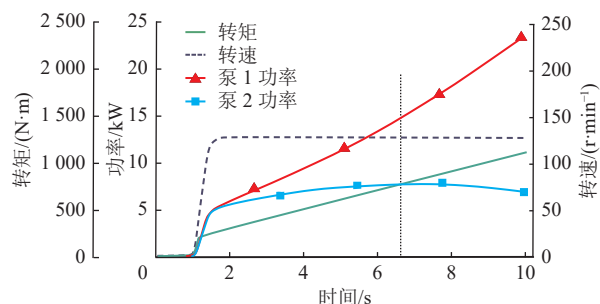


图 5 考虑管路差异模拟结果

Fig.5 Simulation results with pipeline differences considered

着动力头总功率的增加,泵 2 输出功率有减小趋势。模拟结果同时印证了理论分析结果,双泵双动力负载敏感系统反馈管路长度差异,使得 2 个负载敏感泵输出功率无法平衡。从分析结果可以看出,在反馈管路长度差异较大时,较长反馈管路的泵输出功率并不是随负载增大而增大,而是达到某一极值后呈下降趋势,从而降低了动力头最大输出功率。

2.3 设置阻尼孔

实际应用中,很难做到 2 个反馈回路完全一致,因此,需要重新匹配 2 个泵的反馈回路,以平衡 2 个泵的功率。通常有 2 种方式,一种是调节压力补偿弹簧与压缩量,另一种是在反馈回路中设置阻尼,以匹配 2 条反馈回路参数。优化后的模型如图 6 所示,图 6 中橙色椭圆圈是改进部分。

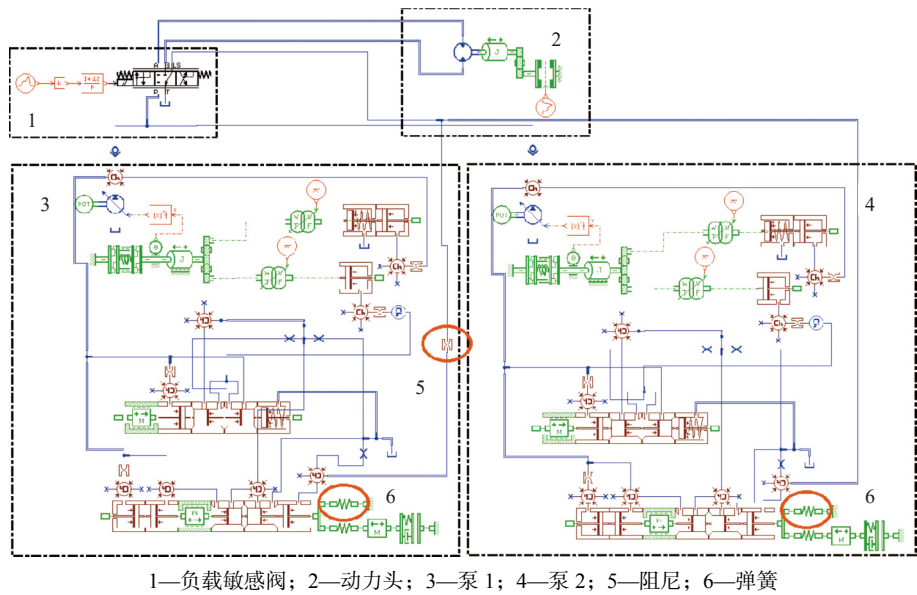
单纯在泵 1 的反馈回路中设置阻尼,通过改变阻尼孔孔径,实现两泵功率的平衡。当泵 1 反馈管路通径为 6 mm,长度为 1 m,泵 2 的反馈管路通径为 6 mm,长度为 2 m 时,动力头负载保持为 1 200 N·m 不变,多路阀开口度仍然为 40%,改变阻尼孔大小,动态模拟结果如图 7 所示。从图中可以看出,当阻尼孔通流面积为 2.65 mm² 时,2 个泵的输出功率达到平衡。

2.4 调节压力补偿器

在不改变管路的情况下,通过调节压力补偿器弹簧预压缩量,实现两泵功率的平衡。模拟结果表明,当泵 1 反馈管路通径为 6 mm,长度为 1 m;泵 2 的反馈管路通径为 6 mm,长度为 2 m 时,动力头负载保持为 1 200 N·m 不变,多路阀开口度仍然为 40%,调节弹簧预压力为 8.9 N,动态模拟结果如图 8 所示。从图中可以看出,对比调整前后可以看出,通过调节压力补偿器预压缩弹簧,可使 2 个泵的输出功率达到平衡(泵 1 和泵 2 功率曲线重合)。

2.5 优化模型后负载适应性

为了进一步验证模型动态分析结果,通过模拟负载变化过程,进一步验证系统输出特性,在多路阀开口不变的情况下,模拟负载变化,结果如图 9 所示。1~10 s 负载在 200~1 200 N·m 之间连续变化,在 10 s 负载由



1—负载敏感阀；2—动力头；3—泵 1；4—泵 2；5—阻尼；6—弹簧

图 6 双泵负载敏感系统改进模型

Fig.6 Improved model of the double-pump load sensing system

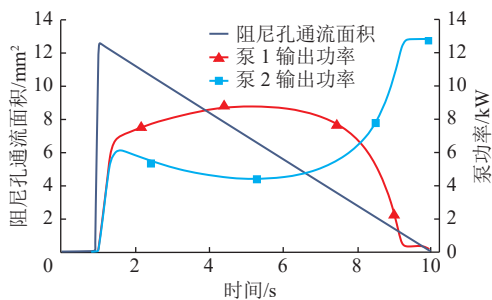


图 7 阻尼孔通流面积与双泵功率匹配

Fig.7 Matching of flow area and power

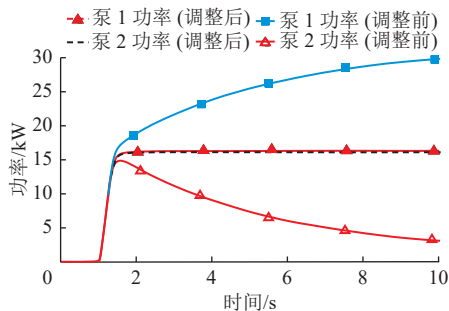


图 8 微调压力补偿器双泵功率模拟结果

Fig.8 Simulation results of fine tuning pressure compensator

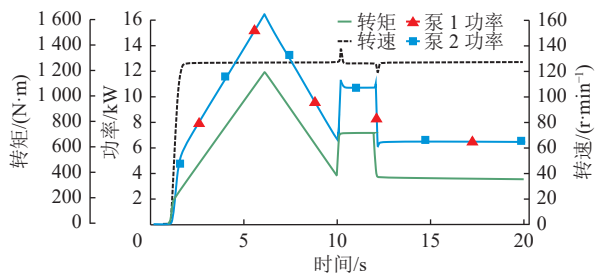


图 9 负载适应性模拟

Fig.9 Load adaptability simulation

400 N·m 增加到 1 200 N·m, 在 12 s 负载减小到 400 N·m。从模拟结果可以看出, 无论是负载连续变化, 还是突变, 2 个泵的输出功率基本平衡, 说明重新调整参数以后, 2 泵的輸出匹配较好, 且具有较好的负载适应性。

3 室内实验

为进一步验证理论分析结论, 在国家安全生产西安勘探设备检验检测公司坑道钻机试验台对钻机进行测试试验, 该试验台的能力参数见表 3。

表 3 测试台测试参数范围

Table 3 Test parameters and scope of the test bench

名称	参数
给进起拔力/kN	160
转速/(r·min ⁻¹)	0~1 500
转矩/(N·m)	0~7 000
回油压力/MPa	0~3
系统压力/MPa	40
马达进出口压力/MPa	0~30
流量/(L·min ⁻¹)	6.7~250.0
油温/℃	0~100
功率/kW	45

3.1 实验方案

2 个泵站分别编号为泵 1、泵 2, 2 个负载敏感泵反馈管路长度分别为 1、2 m。在不做系统匹配的情况下, 对钻机进行加载测试, 输出功率作为参考结果。对比在反馈回路较短的泵站管路中, 设置直径 1 mm 阻尼前后钻机动力头输出参数。对 ZDY1200G 坑道钻机双泵负载敏感系统进行试验测试, 主要包括以下步骤:

(1) 控制动力头转速为 1 000 r/min, 将扭矩从 20 N·m 增大到 260 N·m, 分别测量 2 个泵的实际输出功率, 每间隔 2 min 记录一次数据。

(2) 控制动力头转速为 350 r/min, 将扭矩从 20 N·m 增大到 1 200 N·m, 分别测量 2 个泵的实际输出功率, 每间隔 2 min 记录一次数据。

3.2 匹配前双泵功率输出特性

如图 10 中, 钻机正常启动后, 动力头不同转速下, 对钻机加载, 间隔 2 min 测一次, 实测结果可以看出, 从 4~6 min 动力头转速基本不变。随着扭矩的增加, 泵 1 电机的输出功率由 35 kW 增大到 37 kW, 泵 2 电机的功率基本没有变化。在 8~10 min, 负载扭矩不变, 转速突然降低, 此时泵 1 电机的输出功率保持为 37 kW 不变, 而 2 号泵电机的输出功率由 22 kW 增大到了 37 kW。测试结果表明, 未调整之前, 无论是低转速工况还是高转速工况, 负载变化过程中, 2 个泵站电机的功率差值较大, 且动力头的输出参数达不到理论输出。

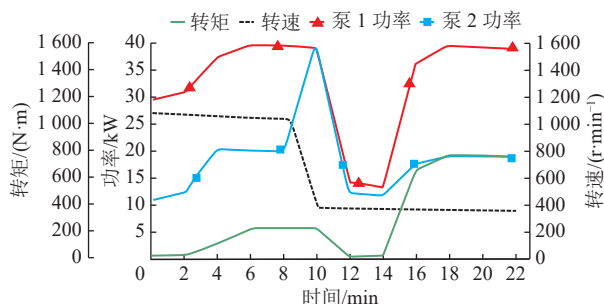


图 10 未设置阻尼测试结果

Fig.10 Test results with damping not added

3.3 设置阻尼后双泵功率输出特性

根据理论分析及仿真结果, 为匹配 2 个泵站的输出功率, 在负载敏感泵 1 的反馈管路中设置孔径 1 mm 的阻尼孔, 然后进行加载测试, 测试结果如图 11 所示。在 2~6 min, 动力头转速为 1 000 r/min, 逐渐增大负载扭矩, 在此过程中, 动力头转速基本不变, 说明负载敏感系统具有较好的速度刚性。在加载过程中, 泵 1 电机的输出功率由 21.5 kW 逐渐增大到 39.5 kW, 泵站 2 电机功率由 20 kW 逐渐增大到 38 kW, 但在 6~19 min, 随着负载的进一步增加, 泵站 1 电机的功率明显增加的较快, 而且出现了过载, 泵 2 电机的功率增加则明显放缓。

为了进一步对比测试结果, 将管路中的阻尼孔径改为 0.8 mm, 进行加载测试, 测试结果如图 12 所示。在 2~6 min, 动力头输出转速为 1 000 r/min, 逐渐增大负载扭矩, 在此过程中, 动力头转速基本不变, 说明负载敏感系统具有较好的速度刚性。在加载过程中, 泵 1 电机的输出功率由 19.5 kW 逐渐增大到 37.5 kW,

泵 2 电机功率由 20 kW 逐渐增大到 38 kW, 但是在 6~10 min, 随着负载的进一步增加, 2 号电机的功率增加的要快一些, 同样出现了过载。

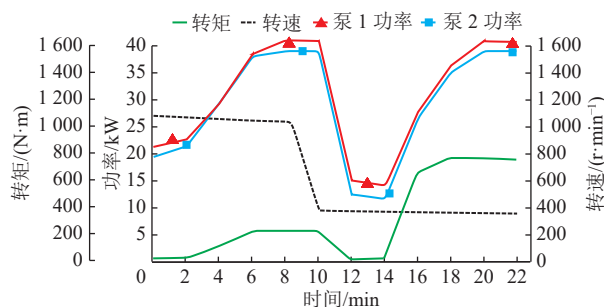


图 11 设置阻尼后台架测试结果

Fig.11 Test results of adding 1 mm damping backstage

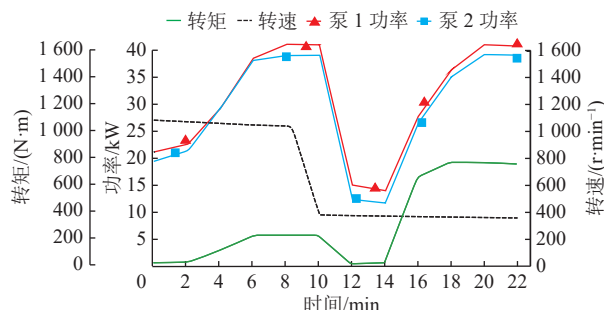


图 12 0.8 mm 阻尼孔通径后台架测试结果

Fig.12 Test results of adding 0.8 mm damping backstage

对比图 11 和图 12 测试结果, 在管路中设置合适的阻尼, 可实现 2 个模块化泵站功率的匹配, 然而在实际操作中, 单纯地设置阻尼存在 2 方面的问题:

(1) 由于动态模型无法完全模拟实际管路, 为了更好地匹配 2 个泵站的功率, 需要经过多次测试来优选合适阻尼孔大小。

(2) 从测试结果可以看出, 阻尼孔孔径微小变化, 便造成 2 个泵站输出功率较大的变化, 这对阻尼孔的加工精度要求较高, 实际中较难控制其加工精度。

3.4 设置阻尼后同时调节压力补偿器输出特性

为了提高可操作性, 同时降低阻尼孔加工精度, 在管路中设置孔径 1 mm 的阻尼孔后, 加载过程中, 微调泵的压力补偿器, 测试结果如图 13 所示。从图中可以

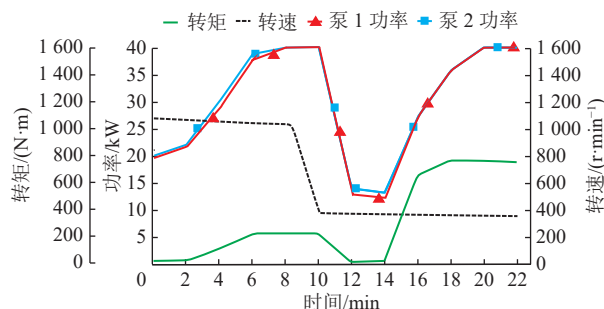


图 13 微调补偿压力后测试结果

Fig.13 Test results after fine adjustment of compensation pressure

看出,无论是在低转速大转矩还是高转速小转矩工作状况下加载,2个泵的输出功率都保持了较好的平衡,满足钻机输出参数要求,最终使实测数据与理论计算结果接近。

4 结论

a. 管路差异对双泵双动力负载敏感泵合流系统输出特性有较大的影响,会造成实测输出与理论输出存在较大偏差。

b. 在反馈管路中设置阻尼并根据管路匹配阻尼参数,可实现双泵输出参数的基本平衡,通过微调压力补偿器弹簧预压缩量,可使系统达到较好平衡,消除管路差异影响。

c. 通过建立双负载敏感泵系统动态模型,动态分析结合测试实验可有效缩短研究周期并降低成本,较好地解决了坑道钻机模块化泵站功率匹配难题。该方法有较强的普适性和应用价值,对坑道钻机液压泵站的模块化设计具有借鉴意义。

d. 通过设置阻尼孔及调整压力补偿器弹簧,均需要根据每一套设备进行重新匹配,在应用中,仍存在操作不便的情况,后续将进一步开展匹配方法优化的研究。

参考文献(References)

- [1] 凡东,王瑞泽,田宏亮,等.轻量化坑道钻机的研制及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 46-52.
FAN Dong, WANG Ruize, TIAN Hongliang, et al. Development and application of lightweight underground drill rig[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 46-52.
- [2] 滕吉文. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发[J]. *地质通报*, 2006, 25(7): 767-771.
TENG Jiwen. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(7): 767-771.
- [3] 殷新胜,田宏亮,姚克,等.负载敏感技术在全液压力头式坑道钻机上的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2008, 36(1): 75-77.
YIN Xinsheng, TIAN Hongliang, YAO Ke, et al. Application of load sensitive technology to mine roadway hydraulic driving head drilling rig[J]. *Coal Science and Technology*, 2008, 36(1): 75-77.
- [4] 刘庆修,田宏亮,凡东,等.基于AMESim的GDY-2000L工程钻机负载敏感液压系统仿真分析[J]. *煤炭工程*, 2012(1): 125-127.
LIU Qingxiu, TIAN Hongliang, FAN Dong, et al. Simulation analysis on load sensitive hydraulic system of GDY-2000L engineering drilling rig base on AMESim[J]. *Coal Engineering*, 2012(1): 125-127.
- [5] 宋海涛,吴晓光,殷新胜,等.负载反馈油管对负载敏感液压系统动态特性影响的探讨[J]. *机械设计与制造*, 2009(1): 200-201.
SONG Haitao, WU Xiaoguang, YIN Xinsheng, et al. The influence of the feed back pipe to load sensing system dynamic characteristic[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(1): 200-201.
- [6] 孔晓武.带长管道的负载敏感系统研究[D].杭州:浙江大学, 2003.
KONG Xiaowu. Research on load sensing system with long pipeline[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [7] 陈随英,赵建军,毛恩荣,等.负载敏感变量泵结构建模与性能分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 40-49.
CHEN Suiying, ZHAO Jianjun, MAO Enrong, et al. Structural modeling and performance analysis of load-sensing variable pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(3): 40-49.
- [8] 李昊.单泵多执行器负载敏感液压系统稳定性的研究[D].西安:长安大学, 2016.
LI Hao. Study on stability of load sensing hydraulic system of one pump for multi-actuators[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [9] 王瑞泽,鲁飞飞,凡东,等.ZDY1200G钻机在某铅锌矿坑道中深孔勘探中的应用[J]. *化工矿物与加工*, 2020, 49(5): 38-41.
WANG Ruize, LU Feifei, FAN Dong, et al. Application of ZDY1200G in medium deep hole exploration in tunnel of lead-zinc mine[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2020, 49(5): 38-41.
- [10] 付永领,荆慧强.弯管转角对液压管道振动特性影响分析[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(13): 165-169.
FU Yongling, JING Huiqiang. Elbow angle effect on hydraulic pipeline vibration characteristics[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(13): 165-169.
- [11] 冯婷,刘文广,胡显忠.基于AMESim的单泵多执行器负载敏感液压系统仿真分析[J]. *甘肃科学学报*, 2017, 29(3): 117-120.
FENG Ting, LIU Wenguang, HU Xianzhong. Simulation analysis of load sensing hydraulic system of single pump and multi actuator based on AMESim[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2017, 29(3): 117-120.
- [12] 田宏亮.瓦斯抽采履带式坑道钻机的研制与应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2008, 36(5): 77-80.
TIAN Hongliang. Manufacture and application on track-mounted rig for gas drainage[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2008, 36(5): 77-80.
- [13] 常江华,凡东,田宏亮.全液压车载钻机给进回路负载特性分析及设计[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(6): 182-186.
CHANG Jianghua, FAN Dong, TIAN Hongliang. Analysis of load characteristics and design of feeding circuit of fully hydraulic truck-mounted drilling rig[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(6): 182-186.
- [14] 刘耀林.负载敏感斜盘式轴向柱塞变量泵静态特性研究[D].兰州:兰州理工大学, 2016.
LIU Yaolin. A study on static and dynamic characteristic of the load-sensing swash plate axial variable piston pump[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [15] 郭治富,张子飞,王虹.负载敏感泵参数辨识与计算方法研

- 究[J]. *液压与气动*, 2017(7): 67–70.
- GUO Zhifu, ZHANG Zifei, WANG Hong. Parameter identification and calculation for load-sensing pump[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2017(7): 67–70.
- [16] 胡引弟. M4系列负载敏感比例多路阀中压力补偿阀的静动态特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- HU Yindi. The research on static and dynamic characteristics of the pressure compensation valve in M4 series load-sensing proportional multi-way valve[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [17] 方鹏. 15 000 N·m大功率定向钻机关键技术研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(2): 7–12.
- FANG Peng. Research on key technology of the 15 000 N·m high-power directional drilling rig[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(2): 7–12.
- [18] 鲁力群, 张鹏, 史蕾蕾, 等. 基于负载敏感控制的木墩机粉碎系统研究[J]. *机床与液压*, 2018, 46(4): 70–74.
- LU Liqun, ZHANG Peng, SHI Leilei, et al. Research on crushing system of stump machine based on load-sensing control[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2018, 46(4): 70–74.
- [19] 张锐, 姚克, 方鹏, 等. 煤矿井下自动化钻机研发关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(5): 59–63.
- ZHANG Rui, YAO Ke, FANG Peng, et al. Key technologies for research and development of automatic drilling rig in underground coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(5): 59–63.
- [20] 王晨升, 姚丽英, 苏芳, 等. 回撤吊车负载敏感液压系统设计与仿真分析[J]. *液压与气动*, 2018(6): 49–53.
- WANG Chensheng, YAO Liying, SU Fang, et al. Design and simulation analysis of load sensing hydraulic system for shield mule[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(6): 49–53.
- [21] 翁寅生, 邬迪, 鲁飞飞, 等. 煤矿井下钻机远程控制系统设计[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(2): 20–26.
- WENG Yinsheng, WU Di, LU Feifei, et al. Design of remote control system of drilling rig in coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(2): 20–26.
- [22] 梁春苗, 姚宁平, 姚亚峰, 等. 径向活塞式液压卡盘动态特性仿真与试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(5): 246–253.
- LIANG Chunmiao, YAO Ningping, YAO Yafeng, et al. Simulation and experimental study on dynamic characteristics of radial piston hydraulic chuck[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(5): 246–253.

(责任编辑 郭东琼)