

泥水平衡盾构破碎机液压马达低压侧压力吸空问题优化设计

马 杰

(中国铁建重工集团股份有限公司, 湖南长沙 410100)

摘要:破碎机是泥水平衡盾构机的关键部件之一,通常采用液压马达驱动滚轮机构破碎岩石,其液压系统为闭式系统。在工作过程中,破碎机受到冲击负载时有时会瞬时卡停,此时液压马达低压侧的压力会在短时间内急剧下降甚至出现液压马达压力吸空现象,进而导致马达损坏。本文针对现有破碎机液压系统存在的这一问题,深入分析了破碎机在冲击负载工况下瞬间卡停时,液压马达低压侧出现压力吸空现象的原因,并提出了一种增加补油蓄能器的优化方案。通过对该方案进行仿真分析和试验验证,确定采用在破碎机左右驱动马达出口处各增加1个4 L蓄能器的优化方案,以此解决破碎机液压马达因压力吸空而损坏的问题。

关键词:泥水平衡盾构机;破碎机;闭式液压系统;液压马达;压力冲击;低压侧压力吸空;补油蓄能器

中图分类号:TU621;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0134-07

Optimized design for the problem of pressure suction void in the low-pressure side of the hydraulic motor of the slurry balance shield crusher

MA Jie

(China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited, Changsha Hunan 410100, China)

Abstract: The crusher is one of the key components of the slurry balance shield machine, which generally uses hydraulic motors to drive the roller mechanism to crush rocks. Its hydraulic system is a closed system. The impact load on the crusher can sometimes cause it to momentarily stop, and the pressure on the low-pressure side of the hydraulic motor drops sharply to negative pressure for a short period of time, causing the hydraulic motor to become empty and resulting in motor damage. This article focuses on the problems existing in the hydraulic system of crushers, analyzes the reasons for the pressure suction on the low-pressure side of the hydraulic motor when the crusher suddenly stops under impact load conditions, and proposes an optimization scheme to increase the oil replenishment accumulator. Through simulation analysis and experimental verification of the scheme, it is proposed to adopt an optimized solution of adding a 4L accumulator at each outlet of the left and right drive motors of the crusher, in order to solve the problem of damage caused by pressure suction of the hydraulic motor of the crusher.

Key words: slurry balance shield machine; crusher; closed hydraulic system; hydraulic motor; pressure impact; pressure suction void on the low-pressure side; oil replenishment accumulator

0 引言

破碎机是泥水平衡盾构机的核心部件之一,在泥水平衡盾构机掘进过程中主要用于破碎较大粒

收稿日期:2025-02-07; 修回日期:2025-03-17 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.017

作者简介:马杰,男,汉族,1986年生,工程师,硕士,主要从事盾构机液压系统设计与研究工作,湖南省长沙市经济技术开发区东七路88号,625797355@qq.com。

引用格式:马杰.泥水平衡盾构破碎机液压马达低压侧压力吸空问题优化设计[J].钻探工程,2025,52(3):134-140.

MA Jie. Optimized design for the problem of pressure suction void in the low-pressure side of the hydraulic motor of the slurry balance shield crusher[J]. Drilling Engineering, 2025,52(3):134-140.

轮驱动装置、储料斗等组成^[1-2]。其中滚轮驱动装置一般采用由液压泵和液压马达组成的闭式液压系统来驱动。由于地质情况复杂、破碎岩石种类多变,破碎机工作过程中负载变化较大,有时出现大颗粒硬岩会导致破碎机驱动滚轮瞬间卡停。在驱动滚轮卡停瞬间,驱动滚轮的液压马达受到压力冲击导致其高压侧压力急剧升高,系统配置的高压溢流阀开启对马达进行压力保护;同时液压马达低压侧压力会急剧下降,有时甚至会下降到马达最小许用背压以下,从而出现马达短时间吸空现象。液压马达如果频繁在此工况下工作很容易损坏。

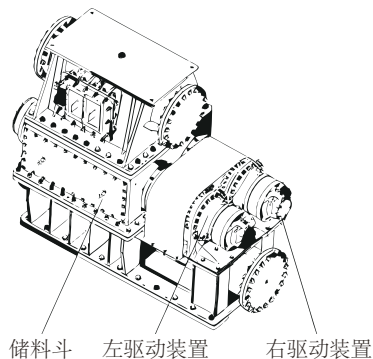


图1 破碎机结构

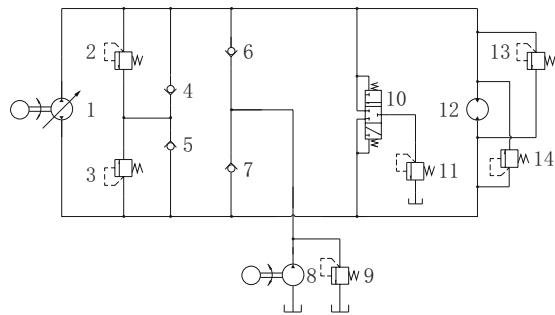
Fig.1 Structure of crusher

朱有伟等^[3]和胡军科等^[4]研究表明,液压马达低压侧压力吸空是造成液压马达损坏的主要原因之一。李帅^[5]和周飞鹏等^[6]研究了泵控马达闭式系统中的压力脉动特性和压力脉动产生的原因。张跃军等^[7]和李勇宽^[8]研究了闭式系统压力脉动抑制方法。本文在现有研究基础上,通过研究破碎机瞬间卡停工况下液压马达压力随负载的变化关系,分析液压马达低压侧失压甚至吸空的原因,结合相关理论给出破碎机瞬间卡停工况下改善液压马达吸空的优化方案,并对该方案进行仿真分析和试验验证。

1 破碎机工况分析

1.1 液压系统原理

泥水平衡盾构破碎机液压系统是由变量泵1和液压马达12组成的闭式液压系统,如图2所示。电动机驱动变量泵1为液压马达12提供液压油,将液压能转化为破碎机滚轮的机械能,驱动破碎机左右滚轮旋转从而挤压破碎岩石。变量泵1与液压马达



1—变量泵;2、3—溢流阀;4、5—补油单向阀;
6、7—单向阀;8—补油泵;9、11、13、14—溢流
阀;10—冲洗阀组;12—液压马达

图2 破碎机液压原理

Fig.2 Hydraulic schematic diagram of crusher

12通过液压管路和液压接头连接,组成闭式液压系统。由于变量泵和马达的容积损失及冲洗流量消耗,需要外接补油泵8对闭式系统中损失的油液进行补充,设置溢流阀9来调节补油泵压力。闭式泵为变量泵,采用电比例控制方式,通过控制两个电比例伺服阀实现泵排量的调节。变量泵1叠加阀组包含高压溢流阀2和3、补油单向阀4和5。为了平衡闭式系统的油液温度,增设一组冲洗阀组10和溢流阀11。为防止液压马达12过载,马达两侧设置高压溢流阀13和14。

1.2 破碎机马达卡停工况分析

针对现场使用中出现的相关问题,现场对破碎机受冲击负载瞬间卡停工况时滚轮驱动液压马达高压侧和低压侧的压力进行了相关测试,测试曲线如图3所示。

左滚轮和右滚轮驱动马达的高压侧和低压侧

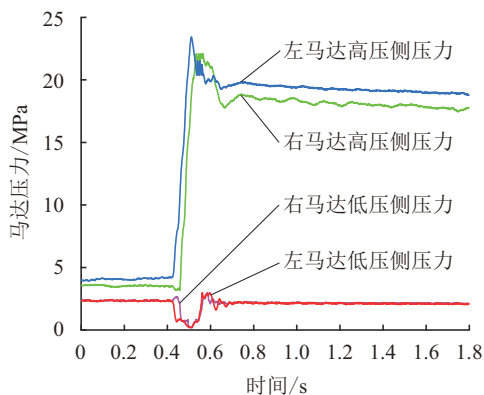


图3 破碎机卡停工况马达压力曲线

Fig.3 Motor pressure curve for crusher stuck working condition

压力变化见图3。根据测试曲线分析破碎机受冲击载荷瞬间卡停时,左滚轮和右滚轮驱动马达高压侧压力快速升高,直到达到马达高压溢流阀设置的溢流压力,马达高压侧的高压溢流阀开启溢流。同时低压侧压力快速降低,降低到最低值0.2 MPa时不再降低。此时左右滚轮驱动马达的低压侧压力均低于马达最小许用背压,测试此状态持续时间约为120 ms。

当破碎机在破碎较硬岩石工况下导致滚轮瞬间卡停时,马达高压侧出现压力峰值,低压侧压力会持续约120 ms低于马达低压侧推荐压力值^[9-10],甚至出现马达短时吸空现象,长期在此工况下工作会导致马达损坏。

1.3 破碎机马达吸空原因分析

闭式液压系统中,马达低压侧压力的提高能有效抑制压力脉动^[11-12]。闭式液压系统补油泵输出的流量用于补充变量泵和马达的泄漏损失、补充冲洗阀交换的流量和向变量泵的变量机构提供控制油。当补油泵输出的流量大于变量泵泄漏量、马达泄漏油量和冲洗阀冲洗流量之和时,补油泵多余的流量由补油溢流阀溢流,使系统低压侧的压力维持在补油溢流阀的设定压力^[13-15]。如果低压侧压力过低则变量泵变量机构不能正常工作。对于特殊工况,例如受到冲击负载或负载突然增大引起马达高压侧压力升高,同时低压侧压力也急剧突变,变量泵变量机构的控制油压力也随之变化。变量机构控制油压力的变化必然会引起变量泵排量的变化,进而引起闭式系统压力的变化^[16-17]。

因此负载变化对马达低压侧压力的影响过程为:(1)马达负载增大—高压侧压力升高—系统溢流流量增加—低压侧进油量减少—低压侧压力降低—变量泵控制油压力降低—变量泵排量减小—马达转速降低—马达回油量减少—马达低压侧压力降低;(2)马达负载减小—高压侧压力降低—系统溢流量减少—低压侧进油量增加—低压侧压力升高—变量泵控制压力升高—变量泵排量增大—马达转速升高—马达回油量增加—马达低压侧进油量增加。

所以当破碎机遇到坚硬岩石时,破碎机马达受到压力冲击瞬间卡停,马达高压侧压力发生突变,此时马达高压侧溢流阀瞬间开启,马达高压侧油液短时间无法进入马达低压侧,出现低压侧流量非饱

和状态,马达低压侧油液被闭式泵瞬间吸入,导致马达低压侧油液流量瞬间降低而压力短时快速下降到马达最小许用背压以下,甚至出现马达短时吸空现象。因此保证马达低压侧压力的稳定,对闭式液压系统的正常工作有重要意义。

2 破碎机马达吸空优化措施

2.1 增大补油泵排量

闭式泵低压侧回油小于高压侧油液输出时,如果补油泵的补油流量足以弥补这部分流量差值,则可保证马达低压侧压力不会降低,系统补油流量可通过下式计算:

$$Q = \frac{V - \Delta p}{\beta_e \Delta t} \quad (1)$$

式中: Q ——系统补油流量; V ——液压系统中油液的有效体积; β_e ——油液的有效体积弹性模量; Δp ——系统压力变化; Δt ——系统压力变化所经历的时间; $\Delta p/\Delta t$ ——系统压力增加率。

破碎机闭式系统变量泵与马达高压侧之间采用液压软管连接。在冲击负载工况下,系统压力增加率和油液的有效体积弹性模量取合理数值,计算出补油泵所需补油量会大大超出系统配置补油泵排量。由于仅在冲击瞬间需要大流量补油,如果配置大流量补油泵则在正常工况下补油泵大部分流量将通过补油溢流阀溢流,能量损失较大。因此增大补油泵排量的方案不可行。

2.2 增加补油单向阀

姜振楠等^[18]提出闭式液压系统马达增加补油单向阀可以改善冲击负载下马达低压侧压力下降情况,但受到补油单向阀开启时间和管路长度等因素影响,补油单向阀的响应时间无法满足马达短时间低压侧压力下降需要。所以破碎机闭式系统增加补油单向阀改善马达低压侧压力降低效果并不明显。

2.3 增加补油蓄能器

闭式系统中安装蓄能器,可以用来吸收系统压力冲击和稳定闭式系统低压侧的压力。当负载突变或泵排量突变引起系统压力超过设定值时,蓄能器能吸收压力冲击和脉动,同时能维持闭式系统压力稳定。理论上蓄能器的容积越大吸收压力脉动效果越好,蓄能器的固有频率和系统压力脉动频率越接近,吸收压力脉动和维持系统压力稳定效果

越好^[19]。

闭式系统增加蓄能器,冲击瞬间低压侧补油容积计算公式为^[20]:

$$\Delta V = -\Delta p V / \beta_e \quad (2)$$

式中: ΔV ——冲击瞬间低压侧的补油容积。

计算出蓄能器的低压侧补油容积值。当蓄能器作为辅助动力源使用时,蓄能器的容积计算公式为:

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(p_1/p_2\right)^{1/n} - \left(p_0/p_2\right)^{1/n}} \quad (3)$$

式中: V_0 ——蓄能器容积; p_1 ——系统最低工作压力; p_2 ——系统最高工作压力; p_0 ——充气压力,按 $0.9p_1 > p_0 > 0.25p_2$; n ——气体多变指数。

经过计算,所需蓄能器容积为7.28 L时,即可满足冲击负载导致压力冲击下马达低压侧补油需求,相较增大补油泵排量和增加补油单向阀方案更容易实现。

3 破碎机优化方案仿真研究

3.1 Automation Studio简介

Automation Studio 液压仿真软件是由加拿大Famic公司开发的支持多学科领域的专业液压系统仿真软件,是一款具有设计和动态仿真功能的软件工具。该软件具有对液压系统进行模拟、测试、仿真和分析等功能。由于图形化元件库直接封装了数学模型,程序员直接调用系统的图形化元件库建立液压系统原理图,即可实现液压系统的模型建立、仿真分析及结果输出与显示的全部过程。它不仅能对所设计的液压系统进行整体分析、评估和优化,而且缩短了系统设计周期,解决了传统液压系统设计繁琐、实验难度大等问题,为液压系统的现代化设计提供了一种新的解决方案^[21-22]。

3.2 仿真模型建立

由于Automation Studio软件已经包括了系统中所需的液压元件,各元件模型在该软件中用图标表示,数学模型已经封装在内,只需要调出图标后连线即可由计算机自动生成回路的仿真模型^[23]。所以直接调用该软件专业液压库的液压元件,搭建破碎机闭式液压系统仿真模型如图4所示。

3.3 仿真结果分析

为研究冲击载荷下破碎机马达低压侧压力变

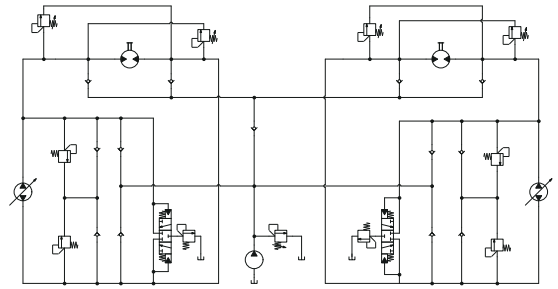


图4 破碎机闭式液压系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of closed hydraulic system for crusher

化情况,采用阶跃负载对马达高压侧进行加载,初始负载为5 MPa,然后分别加10、15、20、25 MPa压力阶跃冲击负载进行仿真分析,马达低压侧压力曲线如图5所示。

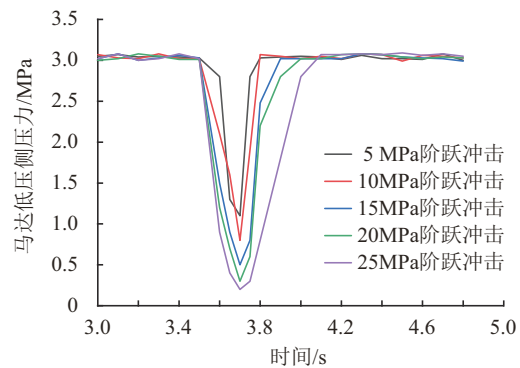


图5 阶跃负载下马达低压侧压力曲线

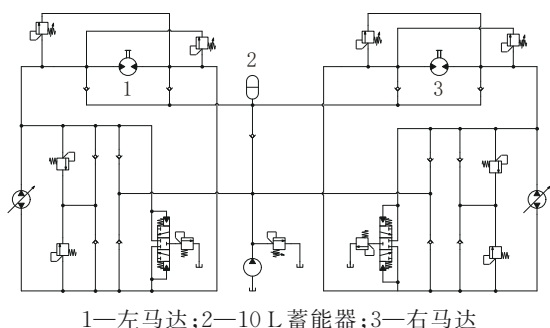
Fig.5 Low-pressure side pressure curve of motor under step load

由图5可以看出,当阶跃负载 >15 MPa时,马达低压侧压力会下降到马达最小许用背压(0.5 MPa)以下,并且随着阶跃负载的增大马达低压持续时间逐渐增加,马达若长时间在该工况下工作会严重影响寿命,导致失效损坏。为解决此问题,根据前述计算结果,采用两种优化方案:方案一在补油泵出口处增加1个10 L蓄能器,方案二在破碎机左右驱动马达出口处各增加1个4 L蓄能器,优化方案仿真模型如图6、图7所示。

对两个优化方案仿真模型加5、10、15、20、25 MPa阶跃负载,仿真曲线如图8所示。

仿真结果表明:

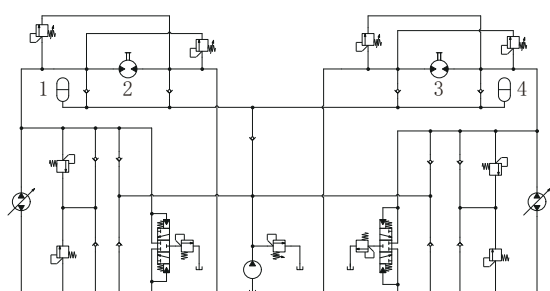
(1)系统增加蓄能器后马达低压侧压力降低问题有明显改善,满足马达最小许用背压要求。



1—左马达;2—10 L蓄能器;3—右马达

图6 增加10 L蓄能器仿真模型

Fig.6 Simulation model of adding 10 L accumulator



1、4—4 L蓄能器;2—左马达;3—右马达

图7 增加4 L蓄能器仿真模型

Fig.7 Simulation model of adding 4 L accumulators

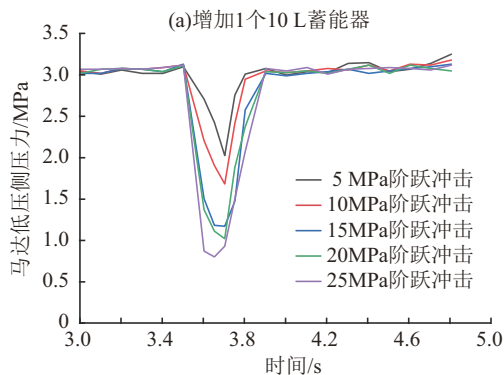
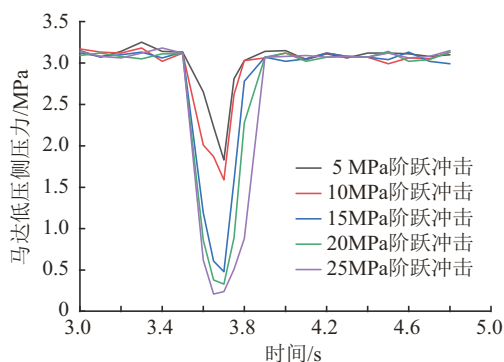


图8 增加蓄能器马达低压侧压力曲线

Fig.8 Pressure curve of the low-pressure side of the motor after adding accumulators

(2)方案二马达低压侧压力下降幅值比方案一小。

(3)方案二马达低压侧压力下降持续时间比方案一短。

仿真结果表明,方案二对破碎机马达低压侧压力吸空改善效果优于方案一。

4 破碎机优化方案试验测试

4.1 测试试验平台搭建

根据优化方案,分别对方案一和方案二进行试验测试,如图9所示。



图9 增加蓄能器试验测试

Fig.9 Test of adding accumulators

4.2 测试结果分析

破碎机瞬时卡死工况方案一和方案二的试验测试曲线如图10所示,通过测试曲线分析:

(1)方案一和方案二对低压侧压力降低问题有明显改善,马达低压侧压力满足马达最小许用背压要求。

(2)方案二在破碎机左右驱动马达出口处各增加1个4 L蓄能器,改善情况明显优于方案一在补油泵出口处增加1个10 L蓄能器。增加2个4 L蓄能器在破碎机瞬时卡死时(即最大25 MPa阶跃负载)马达低压侧压力最低压力仍有0.8 MPa,满足马达低压侧规定的0.5 MPa以上背压的要求,从而保证了冲击载荷下马达的寿命。

(3)采用优化设计方案后,马达低压侧压力特性有所改善,试验测试结果与仿真分析结果一致。

通过仿真分析和试验测试,确定采用方案二,

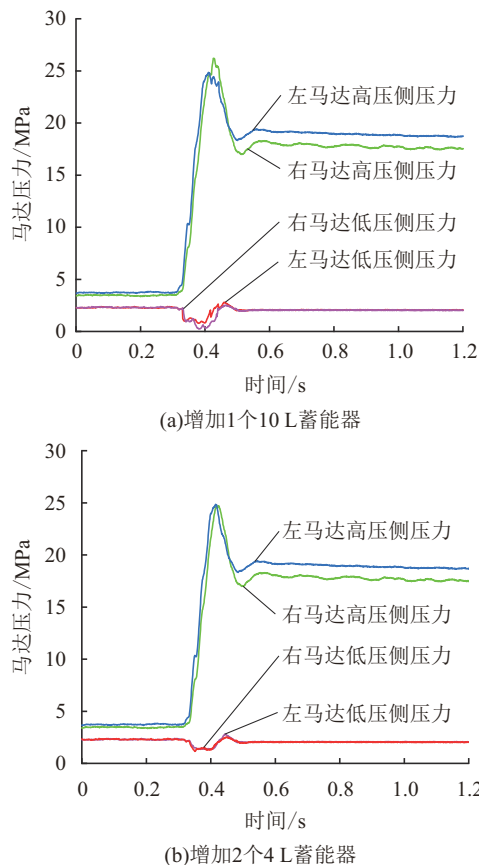


图10 增加蓄能器马达压力曲线

Fig.10 Pressure curve of the motor after adding accumulators

即在破碎机左右驱动马达出口处各增加1个4 L蓄能器的优化方案,来解决破碎机受冲击负载瞬时卡停工况下,液压马达低压侧压力短时急剧下降到马达最小许用背压以下,甚至出现马达短时吸空导致损坏的问题。

5 结论

(1)破碎机闭式液压系统在受到冲击负载下闭式泵输出油流量与马达回油流量不等等原因,导致马达低压侧压力短时急剧下降到马达最小许用背压以下,甚至出现马达短时吸空,从而影响马达使用寿命。

(2)闭式系统增设蓄能器方案能有效改善冲击负载下马达低压侧压力下降的问题,避免马达出现吸空,提高了冲击载荷下马达的使用寿命。

参考文献(References)(References):

[1] 杨国平,高军浩,陈博. 液压破碎锤的三维建模及改进设计[J].

机械设计与制造,2011(5):41-43.

YANG Guoping, GAO Junhao, CHEN Bo. Improved design and 3D modeling of YC70 hydraulic impactor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(5):41-43.

[2] 杨达,陈宝义,曹宏宇,等. 基于冲击载荷的硬质合金球齿碎岩机理研究[J]. 钻探工程,2022,49(1):142-152.

YANG Da, CHEN Baoyi, CAO Hongyu, et al. Study on rock fragmentation mechanism of carbide spherical teeth based on impact load[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):142-152.

[3] 朱有伟,许顺海. 泥水平衡盾构机破碎机液压元件故障分析及改进方法[J]. 工程机械与维修,2018(2):52-54.

ZHU Youwei, XU Shunhai. Analysis and improvement method of hydraulic component faults in mud water balance shield machine crusher[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2018(2):52-54.

[4] 胡军科,周创辉,刘鑫. 清筛机挖掘链闭式液压系统低压侧压力对系统输出特性的影响[J]. 中国铁道科学,2012,33(5):47-53.

HU Junke, ZHOU Chuanghui, LIU Xin. Effect on the system output characteristics by the low pressure of excavating chain closed hydraulic system of ballast cleaning machine[J]. China Railway Science, 2012,33(5):47-53.

[5] 李帅. 泵控马达闭式回路调速控制系统特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.

LI Shuai. Research on pump-control-motor closed-circuit speed governing control system characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[6] 周飞鹏,赵磊,刘阳阳,等. 闭式泵控马达液压系统压力脉动特性研究[J]. 工程机械与维修,2020,(S1):190-192.

ZHOU Feipeng, ZHAO Lei, LIU Yangyang, et al. Research on pressure pulsation characteristics of closed pump controlled motor[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2020(S1):190-192.

[7] 张跃军,李友渔,刘增元,等. 闭式液压系统压力脉动与振动抑制试验研究[J]. 今日制造与升级,2022(8):104-106.

ZHANG Yuejun, LI Youyu, LIU Zengyuan, et al. Experimental study on pressure pulsation and vibration suppression of closed hydraulic systems[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2022(8):104-106.

[8] 李勇宽. 压力波动对液压系统稳定性的影响[J]. 科技资讯,2010(5):35-35.

LI Yongkuan. The influence of pressure fluctuations on the stability of hydraulic systems[J]. Science & Technology Information, 2010(5):35-35.

[9] 胡竞湘,谭立新. 液压马达脉动问题研究[J]. 机床与液压,2008,36(12):78-80,15.

HU Jingxiang, TAN Lixin. Study on the hydraulic pulse of hydraulic motors[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008,36(12):78-80,15.

[10] 邱华,彭儒金,戴圣海. CTG-200型全液压工程钻机的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):50-55.

QIU Hua, PENG Rujin, DAI Shenghai. Development of CTG-200 type full hydraulic engineering drill and its application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(11):50-55.

[11] 徐绳武. 泵控系统在国外的应用[J]. 液压气动与密封,2010,

- 30(3):1-4.
- XU Shengwu. Development of Pump-Controlled-System abroad[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2010, 30(3):1-4.
- [12] 吴浩. 声频环保钻机液压系统设计与应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(1):76-83.
- WU Hao. Design and application of the hydraulic system of sonic drill rig[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1):76-83.
- [13] 马松岭. 关于工程机械静液压传动装置分析[J]. 科技风, 2018(25):159.
- MA Songling. Analysis of Static Hydraulic Transmission Device for Construction Machinery[J]. Technology Wind, 2018(25):159.
- [14] 桑月仙. 闭式液压系统补油泵研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
- SANG Yuexian. Study on charge pump of closed hydraulic system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [15] 林海斌. 应对闭式非驱动液压系统冲击负载的解决方案[J]. 液压气动与密封, 2011, 31(10):59-61.
- LIN Haibin. Solution for closed circuit Non-Propel hydraulic systems subject to shock loading[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2011, 31(10):59-61.
- [16] 张刚, 郭建宇. 煤渣破碎机闭式液压系统补油压力不稳故障分析及解决[J]. 机床与液压, 2021, 49(3):181-184.
- ZHANG Gang, GUO Jianyu. Fault analysis and solution for unsteady replenishing pressure of slag crusher closed hydraulic system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(3):181-184.
- [17] 杨斌. 盾构闭式液压系统马达失效分析[J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(3):75-77.
- YANG Bin. Failure analysis of motor in closed hydraulic system of shield[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2024, 37(3):75-77.
- [18] 姜振楠, 王欣, 宋晓光, 等. 大型履带起重机起升机构闭式液压集中式补油系统研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(7):79-83.
- JIANG Zhennan, WANG Xin, SONG Xiaoguang, et al. Research on closed hydraulic centralized charging system for lifting mechanism of large crawler crane[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(7):79-83.
- [19] 王佳, 傅连东, 袁昌耀, 等. 蓄能器在AGC液压系统中吸收液压冲击的研究[J]. 液压与气动, 2009(6):17-19.
- WANG Jia, FU Liandong, YUAN Changyao, et al. Research on hydraulic accumulator absorbing pressure pulsation in the AGC hydraulic system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2009(6):17-19.
- [20] 张利平. 液压控制系统及设计[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- ZHANG Liping. Hydraulic Control System and Design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [21] Famic Technologies Inc. Automation Studio User's Guide [M]. Canada: Famic Technologies Inc., 2014.
- [22] 刘成武. 基于Automation Studio铲运机转向液压系统设计[J]. 机床与液压, 2015, 43(23):136-141.
- LIU Chengwu. Design on hydraulic steering system in LHD based on Automation Studio[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(23):136-141.
- [23] 曹贺, 郭竟男, 宋广彬. Automation Studio在液压系统设计中的应用[J]. 机床与液压, 2010, 38(18):53-55.
- CAO He, GUO Jingnan, SONG Guangbin. Application of Automation Studio in hydraulic system design[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(18):53-55.

(编辑 王跃伟)