

李昊轩,王清岩,钟蔚岭,等. IR-90全液压铁钻工夹持定位精度及其影响因素. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(4): 1305-1315. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220333.

Li Haoxuan, Wang Qingyan, Zhong Weiling, et al. IR-90 Full Hydraulic Iron Roughneck Clamping Positioning Accuracy and Its Influencing Factors. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1305-1315. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220333.

IR-90全液压铁钻工夹持定位精度及其影响因素

李昊轩¹, 王清岩^{1,2}, 钟蔚岭¹, 盛洁¹, 李苓豪¹, 金赠伍¹

1. 吉林大学建设工程学院, 长春 130026

2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室(吉林大学), 长春 130026

摘要:铁钻工为先进的钻井辅助作业设备,但国内铁钻工在自动化程度、夹持定位精度和工作平稳性方面有较多不足。为了解决此问题,本文设计了一种新型的铁钻工结构及其液压控制系统。首先通过机-液联合仿真分析,研究了铁钻工上卸扣过程中钻杆轴线的偏移角度和径向力变化;然后在此基础上对铁钻工的控制系统进行优化,采用同步分流马达和PID(比例积分微分)控制,进一步分析液压缸增加输入流量对固定钳和动钳的液压缸同步性能、夹持定位精度及接头螺纹径向力的影响。结果表明:采用PID控制时比同步分流马达夹持效果更好,当单个液压缸输入流量为18 L/min时,固定钳夹紧钻杆时钻杆轴线绕x、y轴偏角能控制在0.10°和0.06°以内,响应速度在6.8 s左右,上下钻杆重心沿x和y轴方向的距离可以分别控制在1.93和2.85 mm之内,保证了固定钳和动钳的夹持定位精度以及动作快速性和稳定性。接头螺纹径向力曲线也表明了铁钻工冲扣时钻杆接头间产生的不平衡径向力(17.2 kN)远大于旋扣时(641.0 N),更易导致钻头磨损。

关键词:铁钻工;定位精度;机-液联合仿真分析;不平衡径向力;钻井

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220333

中图分类号:P634.9

文献标志码:A

IR-90 Full Hydraulic Iron Roughneck Clamping Positioning Accuracy and Its Influencing Factors

Li Haoxuan¹, Wang Qingyan^{1,2}, Zhong Weiling¹, Sheng Jie¹, Li Linghao¹, Jin Zengwu¹

1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

2. Key Laboratory of Complicated Conditions Drilling Technology (Jilin University), Ministry of Land and Resources, Changchun 130026, China

Abstract: Iron roughneck is advanced drilling auxiliary operation equipment, and domestic iron

收稿日期:2022-12-07

作者简介:李昊轩(1997-),男,博士研究生,主要从事钻探机具及材料方面的研究,E-mail:597214819@qq.com

通信作者:王清岩(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事钻探装备及自动化机具等方面的研究,E-mail:wangqy@jlu.edu.cn

基金项目:国家深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-09-05)

Supported by the National Deep Exploration Technology and Experimental Research Project (SinoProbe-09-05)

roughnecks have many shortcomings in automation degree, clamping positioning accuracy and work smoothness. In order to solve the problem, a new type of iron roughneck structure and its hydraulic control system are designed in this paper. Firstly, through the machine-hydraulic co-simulation analysis, the axis deviation angle and radial force change of the drill pipes during the makeup and breakout process of the iron roughneck were studied. Then, the control system of the iron roughneck is optimized on this basis, and the synchronous motor and PID (proportional integral differential) control are used to further analyze the influence of increasing hydraulic cylinders input flow rate on the synchronous performance of the hydraulic cylinders, clamping positioning accuracy and radial force of the joint thread of the fixed plier and moving plier. The results show that PID control has better clamping effect than synchronous motor. When the input flow rate of a single hydraulic cylinder is 18 L/min, the x and y axial deviation angles of the drill pipe can be controlled within 0.10° and 0.06° when clamped with fixed plier, and the response speed is about 6.8 seconds. The distance between the center of gravity of the upper and lower drill pipes along the x and y axis directions can be respectively controlled within 1.93 and 2.85 mm, which ensures the clamping positioning accuracy, rapidity and stability of the fixed plier and the moving plier. The radial force curve of the joint thread also indicates that the unbalanced radial force between the drill pipe joints during the iron roughnecks punching (17.2 kN) is much greater than that of the spinning (641.0 N), which is more likely to cause the drill bit to wear.

Key words: iron roughneck; positioning accuracy; machine-hydraulic co-simulation analysis; unbalanced radial force; drilling

0 引言

随着钻井设备自动化水平的不断提高,在深井钻探作业中使用的自动化装备也越来越多。铁钻工作为先进的钻井辅助作业设备,代替了传统的液压大钳,主要用于对钻杆和套管进行旋扣、上紧扣、冲扣和卸扣等动作。其使用极大地降低了工作强度,提高了施工安全性和工作效率。国内关于铁钻工的研究才刚刚起步,相较于国外较先进的产品,国内铁钻工在自动化程度、夹持定位精度和工作平稳性方面仍有较大差距,其不足之处包括:本身的自动化、集成化程度较低;夹持速度慢、效率低;由于液压缸存在同步误差导致夹持定位精度低,在拧卸过程中钻杆接头螺纹因承受较大径向偏载易产生磨损,需要进行多次人工微调;旋扣时偏扣、旋扣不到位等^[1-7]。现有的铁钻工无法满足日益增长的施工需求,应进一步开发适用性广、定位精度高的产品。

本文拟开发一种新型的铁钻工结构及其液压控制系统。首先需要对全液压铁钻工进行结构优化,保证其结构紧凑,以能够很好地适应空间局限的钻井平台,提高空间使用率;然后进一步针对铁钻工的夹持定位精度进行分析,对液压控制系统进行优化,提高夹持定位精度,确保同步完成不同点位的钻杆

及套管上卸扣,以期开发产品可更好地适应深井作业的需求。

1 全液压铁钻工设计

全液压铁钻工实物如图1所示。全液压铁钻工结构如图2所示。铁钻工由固定钳、动钳、支架和旋扣钳组成。

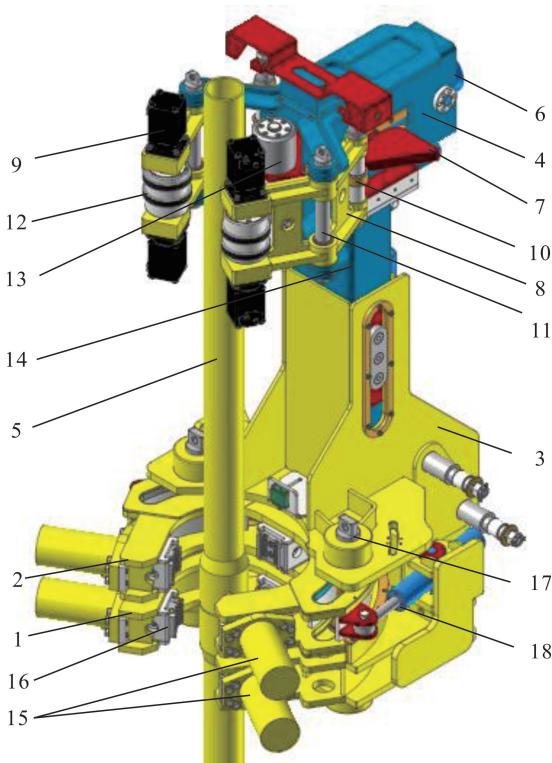
固定钳和动钳均包含沿固定钳和动钳夹紧中心呈 120° 分布的三只液压缸,活塞杆前端安装有夹块。固定钳通过螺栓连接固定,固定钳与支架的立销进行孔轴配合。动钳上有设计好的弧形槽,弧形槽与支架的立销配合,使动钳可以沿固定路线进行旋转。动钳和固定钳之间安装有浮动装置,使动钳可以上下浮动,以补偿铁钻工上卸扣时钻杆接头螺纹旋入旋出所产生的轴向位移。上卸扣油缸通过螺纹连接固定在固定钳上,油缸杆通过孔轴连接与动钳进行配合,从而驱动上卸扣油缸进行上卸扣动作。固定钳和动钳统称为主钳。旋扣钳采用滚轮结构和曲面斜楔式结构,滚轮结构保留了钻具的旋转自由度,曲面斜楔结构提高了夹持钻杆的平稳性。固定钳和动钳均采用三点对中式结构,相对于两点式钳体,三点对中式结构更适用于大转矩工作。

旋扣钳由旋扣油缸、楔形推板、旋扣臂、摆线马达、切线滚轮、支撑轮和限位轮组成,旋扣钳夹紧钻



图 1 全液压铁钻工

Fig.1 Full hydraulic iron roughneck



1. 固定钳;2. 动钳;3. 支架;4. 旋扣钳;5. 钻杆;6. 旋扣油缸;7. 楔形推板;8. 旋扣臂;9. 摆线马达;10. 切线滚轮;11. 销轴;12. 支撑轮;13. 限位轮;14. 旋扣支架;15. 液压缸;16. 活塞杆;17. 立销;18. 上卸扣油缸。

图 2 全液压铁钻工结构图

Fig.2 Structure diagram of full hydraulic iron roughneck

杆后可以对钻杆进行上卸扣动作。旋扣钳夹持钻杆时,液压缸活塞杆伸出,先带动楔形推板伸出,旋扣臂通过后端切线滚轮与楔形推板的接触绕销轴转动,再通过旋扣臂前端的支撑轮和楔形推板上的限位轮夹紧钻杆。旋扣钳与支架间安装有浮动油缸,

使旋扣钳在进行上卸扣动作时可以进行浮动,以补偿上卸扣时钻杆接头螺纹旋入旋出所产生的轴向位移。上卸扣动作通过旋扣臂前端的摆线马达带动支撑轮旋转实现。结束工作后,旋扣钳通过夹持臂后端的碟簧进行复位。旋扣钳可以沿旋扣支架上的导轨前后浮动,旋扣钳夹持钻杆时便于钻杆与井口对中。

全液压铁钻工工作原理为:上扣时,固定钳夹紧下部钻杆,旋扣钳夹紧上部钻杆进行对中,摆线马达带动夹持臂前端滚轮旋转,驱动钻杆进行旋扣;钻杆旋合完成后,动钳夹持钻杆,旋扣钳松开,通过上卸扣油缸带动进行上紧扣动作。卸扣时,首先固定钳夹紧下部钻杆,动钳夹紧上部钻杆,通过上卸扣油缸带动进行冲扣动作;然后旋扣钳夹紧上部钻杆,动钳松开,旋扣臂前端的摆线马达驱动钻杆进行卸扣。

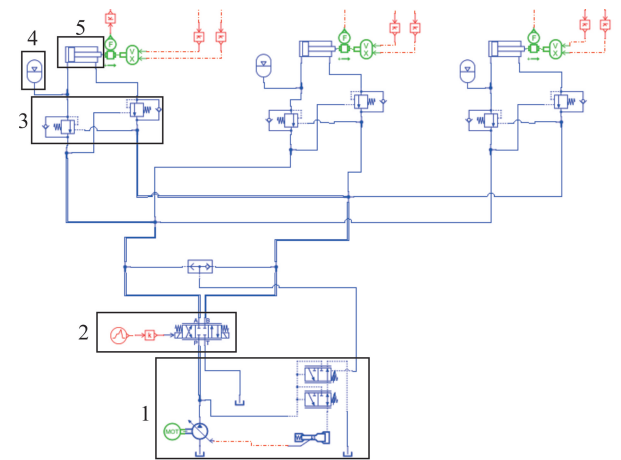
2 全液压铁钻工液压控制系统建模

由于动钳需要对钻杆进行卸扣或上紧扣动作,因此动钳需要两个液压回路进行控制:一个是夹持动作控制回路,该回路控制动钳夹紧待卸扣或待上紧扣的钻杆;另一个是上卸扣动作控制回路,夹紧钻杆后,该回路控制动钳旋转,对钻杆进行卸扣或上紧扣动作。

2.1 固定钳、动钳夹持动作控制回路模型

2.1.1 液压控制系统原理

固定钳和动钳夹持动作控制回路模型均如图 3 所示,该液压系统包括负载敏感变量泵、电液比例换向阀、平衡阀、蓄能器和液压缸。



1. 负载敏感变量泵;2. 电液比例换向阀;3. 平衡阀;4. 蓄能器;5. 液压缸。

图 3 固定钳和动钳液压系统控制回路模型

Fig.3 Hydraulic system control loop model of fixed and moving pliers

固定钳和动钳液压系统控制回路采用了负载敏感变量泵,固定钳夹块伸出时,液压泵输出最大流量;当电液比例换向阀关闭或固定钳夹紧钻杆后,液压泵输出流量几乎变为 0,减少了液压系统的损耗^[8-9]。同时该回路采用了平衡阀,一方面可防止活塞杆伸出过快,导致钻杆发生偏斜,提高定位精度;另一方面可起到锁紧作用,防止因震动或碰撞导致活塞杆回弹,提高固定钳夹持稳定性。液压缸前设置了蓄能器,蓄能器既可以缓冲液压系统中的压力波动,又可以起到给液压系统保压的作用。

工作原理:固定钳和动钳液压系统控制回路中电液比例换向阀均通过一组分段线性信号控制,在 0 到 5 s 内,信号控制电液比例换向阀阀芯逐渐打开,5 s 后阀芯保持打开状态不变;开始夹持时,分段线性信号控制所有电液比例阀处于右位,液压油进入液压缸左腔,三只液压缸活塞杆伸出,带动三个夹块同时夹持钻杆。

2.1.2 参数设置

该全液压铁钻工夹持钻杆时夹持管径范围取决于旋扣钳,旋扣钳能夹持的最大管径 Φ 为 298 mm。当液压缸活塞杆前端夹块与钻杆的摩擦系数取 0.15 时,可以进一步计算单个液压缸所需提供的最大作用力。液压缸最大作用力 F_{\max} 计算公式为

$$F_{\max} = p_n A_n - p_1 A_1 - v f$$

式中: p_n 和 p_1 分别为液压缸活塞两侧无杆和有杆的液体压力,由于夹持钻杆时液压缸无杆腔通油箱,此时 p_1 取 0; A_n 和 A_1 分别为液压缸活塞两侧无杆和有杆的面积,液压缸内腔直径为 100 mm,活塞杆直径为 60 mm; v 为活塞杆运动速率,夹紧钻杆时活塞杆速率为 0; f 为动摩擦系数。

液压系统参数如表 1 所示。负载敏感变量泵采用 Danfoss 公司的 45 系列开式轴向柱塞泵,由于液压缸活塞杆行程小且行程终了后才会受到较大载荷,因此为变量泵设计一个较小的输出流量,即电动机转速为 750 r/min,液压泵的排量为 40 mL/r,液压泵的输出流量为 30 L/min,分流后每个液压缸输

表 1 液压系统参数

Table 1 Parameters of hydraulic system

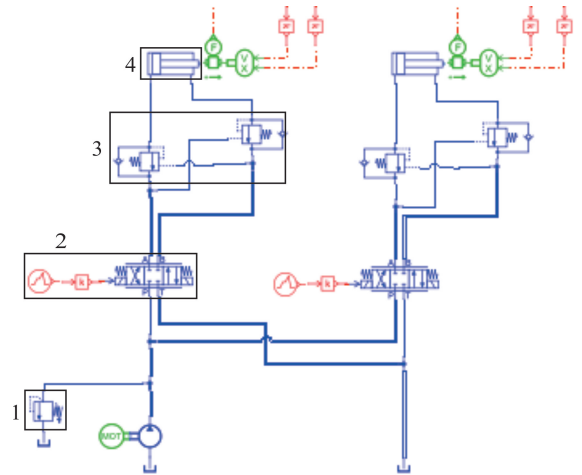
参数	数值
液压系统工作压力/MPa	≥ 8
电动机转速/(r/min)	750
液压泵排量/(mL/r)	40
液压泵输出流量/(L/min)	30

入流量约为 10 L/min。液压回路中的蓄能器主要起到缓冲压力波动的作用,其容积越大回路的响应速度越慢,因此其容积选择 1 L。

2.2 动钳上卸扣动作控制回路模型

2.2.1 液压控制系统原理

动钳上卸扣动作控制回路模型如图 4 所示。动钳的上卸扣动作控制回路的工作原理为:动钳夹紧钻杆后,动钳的上卸扣动作控制回路开始工作,分段线性信号控制两个电液比例换向阀打开,其中一个处于右位,一个处于左位;两个换向阀控制两个液压缸的活塞杆分别伸出和缩回,进而实现动钳的上卸扣钻杆动作。两个液压缸同时工作可以提高效率。



1. 溢流阀;2. 电液比例换向阀;3. 平衡阀;4. 液压缸。

图 4 动钳上卸扣动作控制回路模型

Fig.4 Upper shackle action control loop model of moving plier

2.2.2 参数设置

由于上紧扣和冲扣动作需要很大的瞬间作用力,因此为液压泵设计一个较大的输出流量,即电动机转速为 150 r/min,液压泵的排量为 40 mL/r,液压泵的输出流量为 60 L/min,分流后每个液压缸输入流量约为 30 L/min。

3 全液压铁钻工机-液联合仿真分析

3.1 上扣时钻杆定位精度

上扣过程中主要针对旋扣钳夹持钻杆时钻杆的定位精度进行分析。假设固定钳夹持下方钻杆后,下方钻杆处于中心位置,则铁钻工的定位精度主要通过上下钻杆重心距离及钻杆的轴线偏移角度进行判断(图 5)。

上下钻杆的重心位移曲线如图 5a 所示。由图

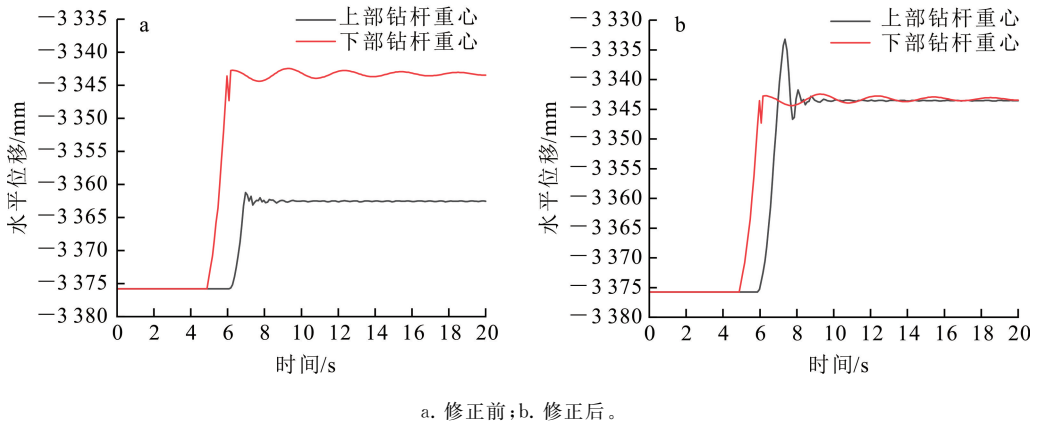


图 5 修正前后夹紧时上下钻杆重心位移

Fig.5 Displacement of the center of gravity of upper and lower drill pipes before and after correction during clamping

5a 通过计算可知,沿活塞杆伸出的方向,上下钻杆重心位置偏差量约为 19.07 mm。旋扣钳夹持钻杆时,钻杆直径一定,钻杆相对于旋扣钳的位置固定。因此通过调节碟簧进行修正,使卸扣钳沿支架导轨向远离钻杆的方向移动19.07 mm,从而使上下钻杆可以更好地对中,调整后上下钻杆的重心位移曲线如图 5b 所示。可见安装调节碟簧可使上下钻杆水平位移基本相同,提高了旋扣钳的对中效果。

夹紧钻杆后钻杆会发生小幅度的摆动,上部钻杆轴线偏移角度曲线如图 6 所示。由图 6 可知,旋扣钳夹紧上部钻杆 20 s 后,钻杆沿 x 轴和 y 轴的偏角分别为 0.018° 和 0.005° ,轴线偏移角度较小;说明修正后的旋扣钳夹持钻杆时定位精度更高。

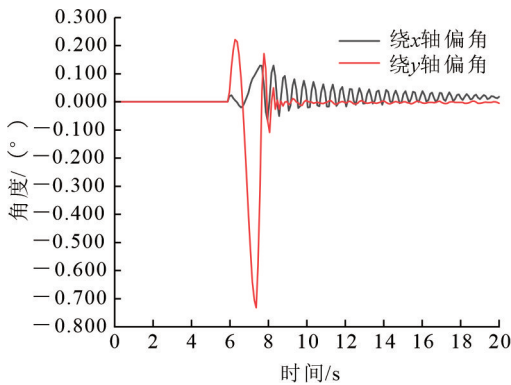


图 6 卸扣时上部钻杆轴线偏移角度

Fig.6 Axis deviation angle of upper drill pipe during screwing

3.2 卸扣时钻杆受力

铁钻工进行卸扣动作时,固定钳夹持下部钻杆,先由动钳夹紧上部钻杆进行冲扣动作,再由旋扣钳

夹持钻杆进行进一步的卸扣动作。该过程中主要考虑旋扣钳、动钳和固定钳夹紧钻杆时,上下钻杆接头螺纹间会产生不平衡径向力。该不平衡径向力会直接影响接头螺纹的磨损情况,因此应进一步分析接头螺纹径向力情况,如图 7 所示。

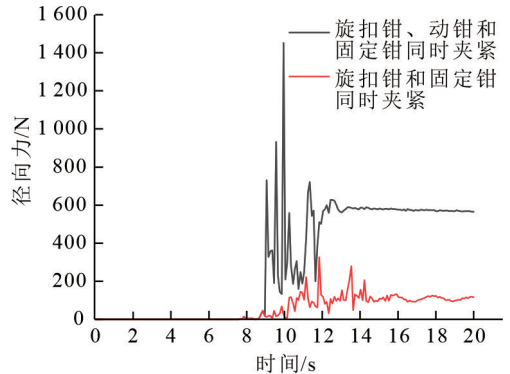


图 7 卸扣时接头螺纹径向力变化

Fig.7 Radial force change between joint threads during screwing

由图 7 可知:旋扣钳、动钳和固定钳同时夹紧钻杆时接头螺纹受到的径向力峰值为 1452.21 N,终值应力为 565.75 N;而旋扣钳和固定钳同时夹紧钻杆时接头螺纹受到的应力峰值为 326.51 N,终值应力为 115.48 N。可见动钳和固定钳同时夹紧钻杆会导致接头螺纹产生不平衡径向力。这是因为钻杆位置的随机性,动钳和固定钳夹紧油缸活塞杆接触钻杆的时间不同,受到负载不同,产生了液压缸同步位置误差,进而导致两者夹持中心偏差较大,形成了较大的径向力;因此应进一步对铁钻工的液压系统进行优化,提高动钳和固定钳液压缸工作的同步性。

4 全液压铁钻工固定钳和动钳液压控制系统优化

4.1 基于同步分流马达的多液压缸同步控制

4.1.1 同步分流马达液压控制回路原理

同步分流马达液压控制回路如图8所示。与原回路相比,该回路保留了电液比例换向阀、平衡阀和蓄能器的设计,不同的是采用了一组同步分流马达。同步分流马达由多个等排量液压马达组成,这些马达的轴进行了刚性连接。

三个液压缸通过同步分流马达进行等流量分流,控制液压缸活塞杆同步伸出,进而提高固定钳及动钳夹持钻杆时的定位精度。该液压回路的工作原理为:固定钳和动钳夹持钻杆时,三个电液比例换向阀同时打开,电动机驱动马达等流量输出,进而控制液压缸活塞杆端部夹块同步夹紧钻杆^[10-13]。

该同步分流马达液压控制回路相较于原回路采用了三个将轴刚性连接的马达,因此电动机转速设为250 r/min,液压泵的排量仍为40 mL/r,液压泵的输出流量为10 L/min,保证每个液压缸输入流量仍为10 L/min。

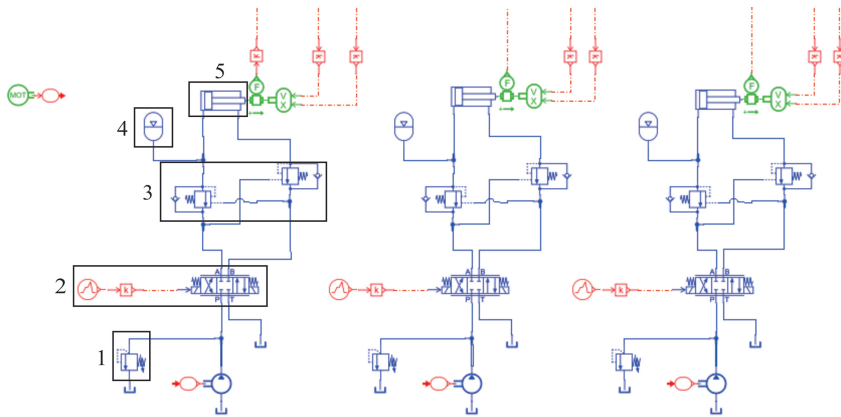
4.1.2 夹持定位精度机液联合仿真分析

轴刚性连接的同步分流马达作为一个开环控制方式,在一般工况下其同步性控制好且方法简单。但铁钻工夹持钻杆时,由于钻杆位置的随机性,液压缸受力情况不同,为研究同步分流马达控制的液压系统同步性能,先针对铁钻工固定钳的夹持情况进行分析。

液压缸输入流量为10 L/min时,钻杆的轴线偏移角度如图9a所示。固定钳夹持钻杆时,钻杆轴线偏移角度很小,在 $-0.10^{\circ} \sim 0.26^{\circ}$ 之间(图9a),液压缸同步性好。但由于固定钳夹持钻杆时夹持位置处于钻杆端部,夹紧钻杆后钻杆会产生一定的波动,此时液压缸输入流量较小,液压缸伸出速度慢,钻杆波动角度小;因此应进一步分析增大液压缸输入流量时钻杆轴线的偏移情况,证明液压缸输入流量对液压缸同步性是否有影响。

液压缸输入流量为14、18和22 L/min时,钻杆轴线偏移角度曲线如图9b、c、d所示。在液压缸活塞杆前端夹块未接触钻杆时,活塞杆可以同步伸出;但由于钻杆中心并不在井口处,先接触钻杆的液压杆受到较大阻力,较其他液压杆速度慢,导致固定钳夹持钻杆时钻杆出现摆动情况。对比图9中出现钻杆轴线绕 x 、 y 轴偏角的时间可知,在一定范围内液压缸输入流量越大,液压缸活塞杆伸出速度越快;但当流量达到22 L/min时,钻杆轴线绕 x 轴偏角达到 0.30° ,偏角明显增大,液压缸输入流量应小于22 L/min。液压缸流量控制在18 L/min以内时,钻杆轴线绕 x 轴偏角可以保持在 0.10° 左右,绕 y 轴偏角可以保持在 0.10° 以内。当液压缸输入流量为10、14、18和22 L/min时,固定钳夹紧钻杆的时间(响应速度)分别为11.8、8.5、6.6和6.1 s,液压缸输入流量超过18 L/min后,响应速度的提升幅度已经很小。

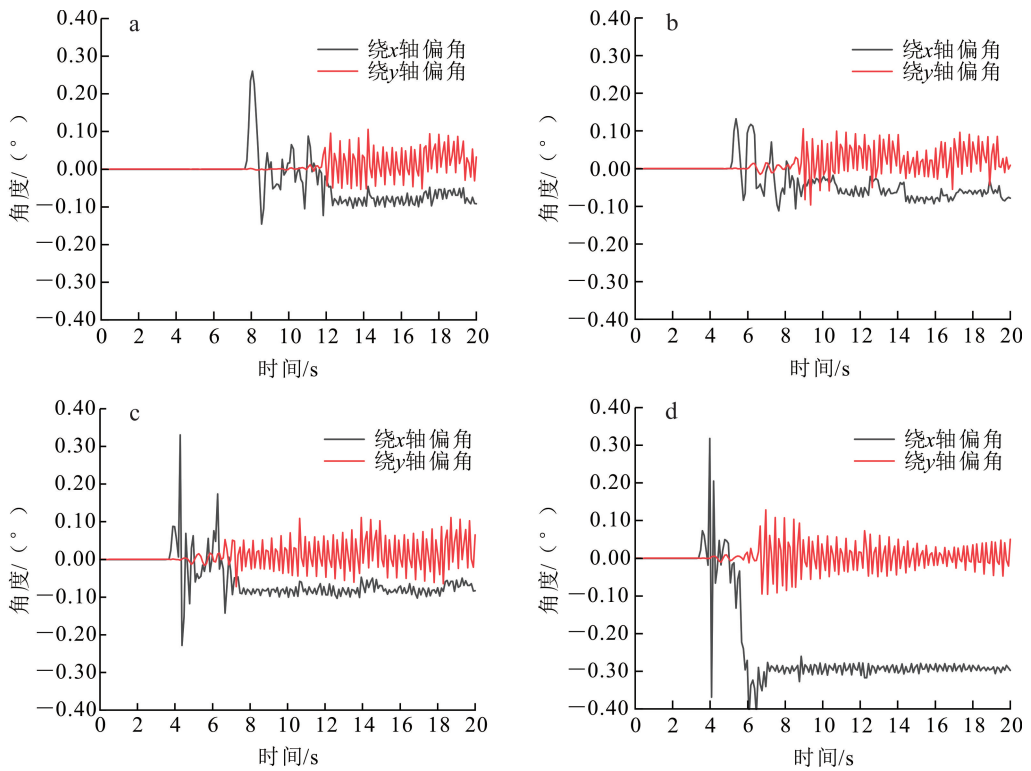
同时根据仿真分析可知,上下钻杆重心沿 x 轴和 y 轴方向的距离分别可以控制在2.12和7.86 mm



1. 溢流阀;2. 电液比例换向阀;3. 平衡阀;4. 蓄能器;5. 液压缸。

图8 采用同步分流马达控制的固定钳和动钳液压系统模型

Fig.8 Hydraulic system model of fixed and moving pliers with synchronous motor control



a. 液压缸输入流量为 10 L/min; b. 液压缸输入流量为 14 L/min; c. 液压缸输入流量为 18 L/min; d. 液压缸输入流量为 22 L/min。

图 9 采用同步分流马达控制时钻杆轴线偏移角度

Fig.9 Axis offset angle of drill pipe with synchronous motor control

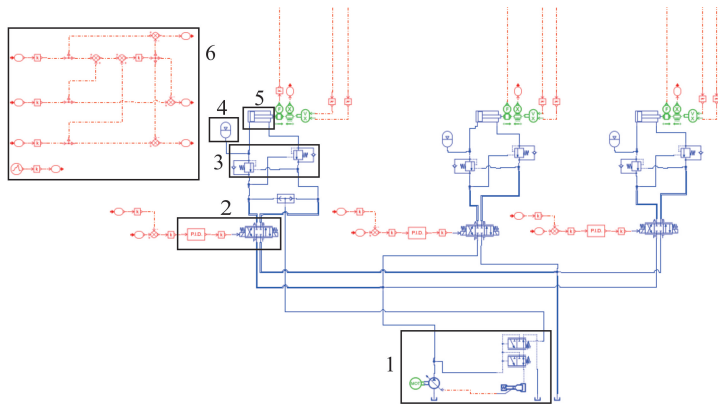
以内。因此,同步分流马达控制液压回路的等流量输出,且当液压缸输入流量为 18 L/min 时,可以保证铁钻工固定钳和动钳有较快的响应速度和良好的夹持定位精度。

4.2 基于模糊 PID 的多液压缸同步控制

4.2.1 PID 控制原理

为提高固定钳和动钳液压缸工作的同步性,对

其液压系统采用液压闭环控制,使实际输出与设计输出实现同步,从而增加固定钳和动钳夹持定位精度,减小钻杆接头螺纹收到的径向力。PID 同步控制液压控制回路如图 10 所示,该回路采用了均差补偿的控制策略,通过传感器测得三个液压缸的位移,取其平均值作为设定输出,当液压缸位移大于平均值时,液压缸的输入流量变小,活塞杆伸出速度变



1. 负载敏感变量泵; 2. (PID 控制) 电液比例换向阀; 3. 平衡阀; 4. 蓄能器; 5. 液压缸; 6. 均差补偿控制。

图 10 采用 PID 控制的固定钳和动钳液压系统模型

Fig.10 Hydraulic system model of fixed and moving pliers with PID control

慢,反之则活塞杆伸出速度变快。液压泵设定输入流量为 30 L/min。

PID 控制公式为

$$i = K_p u + K_i \int_{t_0}^t u dt + K_d \frac{du}{dt}.$$

式中: i 为输出信号; u 为输入信号; K_p 为比例系数; K_i 为积分时间常数; K_d 为微分时间常数; t 为时间; t_0 为初始时间。

比例系数 K_p 的作用是发生偏差时立即产生控制减少偏差;积分时间常数 K_i 的作用是消除静差,提高系统误差度;微分时间常数 K_d 的作用是加快系统动作速度,减少响应时间。由于固定钳和动钳从开始工作到夹紧钻杆时间很短,因此可以忽略微分时间常数,仅设置比例系数和积分时间常数^[14-18]。

4.2.2 夹持定位精度及应力

为研究 PID 控制液压系统的同步性能,先针对铁钻工固定钳的夹持情况进行分析,当液压缸输入流量分别为 30、42、54 和 66 L/min,即单个液压缸输入流量分别为 10、14、18 和 22 L/min 时,钻杆轴线偏移角度如图 11 所示。

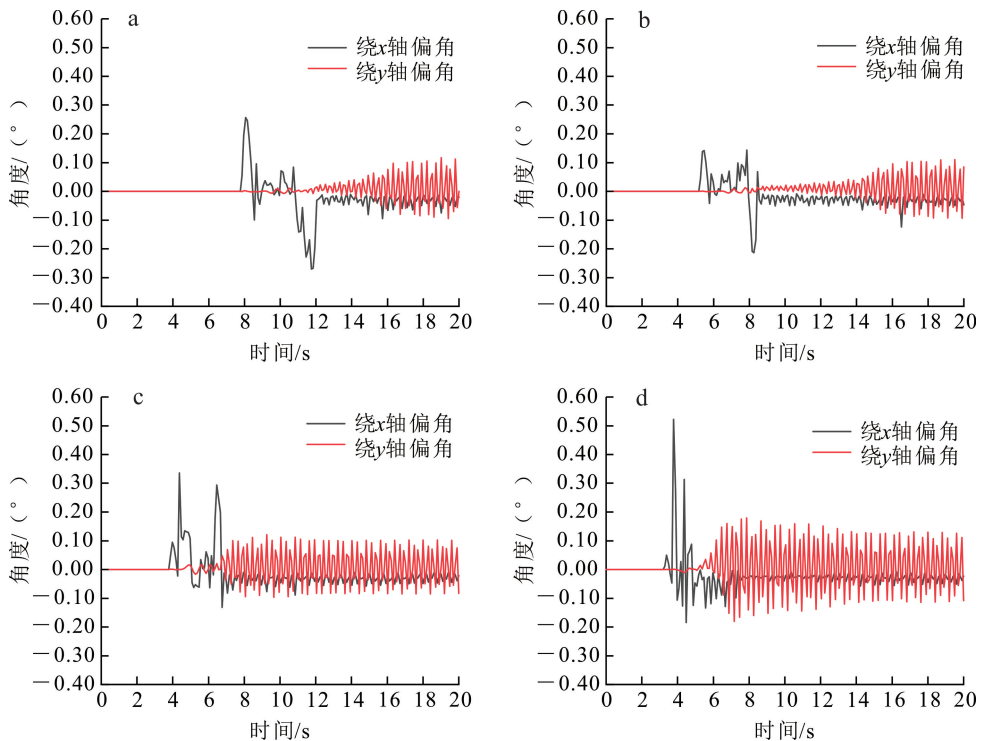
通过图 11 可知,随着液压缸输入流量增大,钻杆轴线偏移角度增大,但增加的幅度并不大,液压缸

输入流量不超过 54 L/min 时,钻杆轴线绕 y 轴偏角可以控制在 0.10° 以内,钻杆轴线绕 x 轴偏角可以控制在 0.06° 以内。当液压缸输入流量分别为 30、42、54 和 66 L/min 时,固定钳夹紧钻杆的时间(响应速度)分别为 11.8、8.5、6.8 和 5.5 s,液压缸输入流量越大,固定钳响应速度越快,但响应速度的提升幅度越小。

根据仿真分析可知,当液压缸输入流量不超过 54 L/min 时,上下钻杆重心沿 x 轴和 y 轴方向的距离分别可以控制在 1.93 和 2.85 mm 以内,其定位精度较高。因此在单个液压缸输入流量为 18 L/min 时,PID 控制既可以保证固定钳的响应速度,也可以使固定钳夹持钻杆保持较好的定位精度。

进一步对钻杆间接头螺纹径向力进行分析,可研究液压缸输入流量与钻杆间接头螺纹径向力的关系。接头螺纹径向力变化曲线如图 12 所示。由图 12 可知,随着液压缸输入流量增大,夹持钻杆速度变快,同时接头螺纹径向力峰值会增大,但径向力终值基本不变。可见液压缸输入流量对钻杆间接头螺纹径向力的影响不大。

综上所述,同步分流马达和模糊 PID 控制均可以保证铁钻工固定钳和动钳有较好的夹持定位精



a. 液压缸输入流量为 30 L/min;b. 液压缸输入流量为 42 L/min;c. 液压缸输入流量为 54 L/min;d. 液压缸输入流量为 66 L/min。

图 11 采用 PID 控制时钻杆轴线偏移角度

Fig.11 Axis offset angle of drill pipe with PID control

度;但想通过同步分流马达使固定钳和动钳达到较高的夹持定位精度,还需要保证液压缸负载均匀和管路对称布置。在实际工作中,由于现场条件复杂和加工精度不高等原因,这些条件很难满足;而PID控制可以对液压缸工作时产生的误差进行补偿,因此基于模糊PID的多液压缸同步控制更为实用。

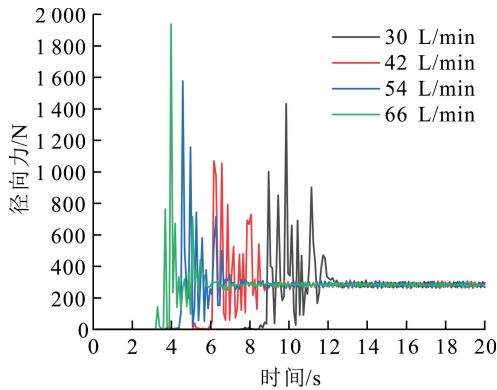


图12 采用PID控制时接头螺纹径向力

Fig.12 Radial force between joint threads with PID control

5 优化后全液压铁钻工上卸扣时钻杆接头螺纹受力

铁钻工主要功能是对钻杆套管进行旋扣、上紧扣、冲扣和卸扣等动作,本文主要对铁钻工旋扣和冲扣过程进行钻杆接头螺纹径向力分析。当钻杆进行旋合时,首先由旋扣钳夹紧钻杆,10 s后旋扣钳前端的摆线马达带动上部钻杆进行旋扣,旋扣时钻杆接头螺纹径向力变化曲线如图13a所示。由图13a可知,铁钻工进行旋扣动作时,钻杆接头螺纹会产生较大的不平衡径向力,其峰值为641.0 N。

当上部钻杆进行冲扣时,固定钳夹紧下部钻杆,动钳夹紧上部钻杆,10 s后卸扣油缸带动动钳旋转冲扣,冲扣时钻杆接头螺纹径向力变化曲线如图13b所示。由图13b可知,铁钻工进行冲扣动作时,钻杆接头螺纹也会产生较大的不平衡径向力,其峰值为17.2 kN。

综上所述,铁钻工进行上卸扣动作时,均会产生一定不平衡径向力,但进行冲扣动作时产生的径向力远远大于旋扣钻杆时产生的径向力;这种较大的不平衡径向力会加剧钻杆接头螺纹的磨损情况,甚至导致钻杆接头螺纹失效。

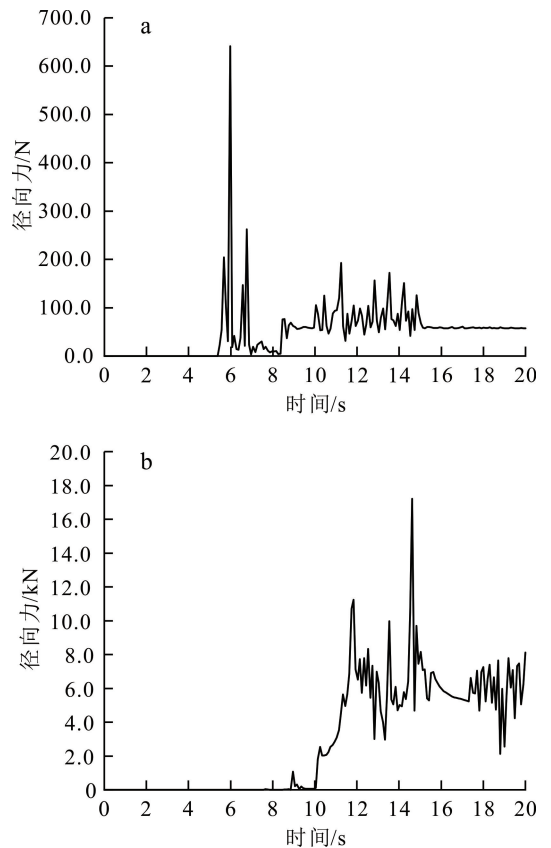


图13 旋扣时(a)和冲扣时(b)接头螺纹径向力

Fig.13 Radial force of joint threads during spinning (a) and punching (b)

6 结论与建议

1)采用PID同步控制,使各液压缸活塞杆位移相对于各液压缸位移均值的偏差值进行流量补偿,可以减小钻杆位置随机性导致的液压缸同步误差,在液压缸输入流量较大的情况下能有效提高铁钻工夹持钻杆时固定钳和动钳液压缸的夹持定位精度。

2)铁钻工上卸扣钻杆时,会产生较大的不平衡径向力。这种较大的不平衡径向力会加剧钻杆接头螺纹的磨损情况,甚至导致钻杆接头螺纹失效。

针对分析得到的不平衡径向力变化情况,可以进一步对钻杆接头螺纹的应力状态进行有限元分析,以研究不平衡径向力对钻杆接头螺纹磨损的影响,并进一步研究如何减弱这种不平衡径向力。

参考文献(References):

[1] 任红伟.深水海洋平台自动化铁钻工研制[J].中国石油大学胜利学院学报,2021,35(3):85-88.

Ren Hongwei. Development of Automatic Iron Drillers

- for Deep-Water Offshore Platforms [J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2021, 35(3): 85-88.
- [2] 程晓丽, 杨琨, 黄元元, 等. 三点直推式铁钻工冲扣钳壳体关键制造技术[J]. 机械工程师, 2021(7): 161-162, 167.
Cheng Xiaoli, Yang Kun, Huang Yuanyuan, et al. Key Manufacturing Technology for Three-Point Direct-Push Iron Roughneck Clamping Plier Housing [J]. Mechanical Engineer, 2021(7): 161-162, 167.
- [3] 郑显赫, 王清岩, 盛洁, 等. HIR-90 型全液压铁钻工自动定位过程分析[J]. 世界地质, 2022, 41(3): 664-674.
Zheng Xianhe, Wang Qingyan, Sheng Jie, et al. Analysis of Automatic Positioning Process of HIR-90 Fully Hydraulic Iron Roughneck [J]. World Geology, 2022, 41(3): 664-674.
- [4] 李权. 铁钻工旋扣装置优化及其滚轮性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Li Quan. Research on Optimization of Iron Roughneck Spinner Mechanism and Performance of Spin-Roller [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [5] 景佐军, 徐小鹏, 南树枝, 等. 铁钻工旋扣碳纖維滚轮优化与试验[J]. 机械工程师, 2021(3): 75-78.
Jing Zuojun, Xu Xiaopeng, Nan Shuqi, et al. Optimization and Testing of the Carbon Fiber Roller in an Iron Roughneck's Spinner [J]. Mechanical Engineer, 2021(3): 75-78.
- [6] 甘心. 页岩气钻井用机械式螺杆冲击器结构设计与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1215-1222.
Gan Xin. Structural Design and Application of Mechanical PDM Impactor Used in Shale Gas Wells [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1215-1222.
- [7] 马银龙, 张诗彧, 周福军, 等. 孕镶金刚石钻头优化设计及其在甘青隧道应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1845-1853.
Ma Yinlong, Zhang Shiyu, Zhou Fujun, et al. Impregnated Diamond Bit Optimal Design and Application in Ganqing Tunnel [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1845-1853.
- [8] 鲍继兵, 李捷, 王毫旗. 基于 AMESim 的液压挖掘机负载敏感液压控制系统仿真分析[J]. 工程机械, 2022, 53(7): 56-63.
Bao Jibing, Li Jie, Wang Haoqi. Simulation Analysis of Load Sensing Hydraulic Control System of Hydraulic Excavator Based on AMESim [J]. Construction Machinery and Equipment, 2022, 53(7): 56-63.
- [9] 潘锋. 电液双控负载敏感比例多路阀先导回路研究[J]. 煤矿机械, 2022, 43(10): 29-31.
Pan Feng. Study on Pilot Circuit of Electro-Hydraulic Double Control Load Sensitive Proportional Multi-Channel Valve [J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(10): 29-31.
- [10] 付景超, 韩泽昱. 基于滑模的三维 Couplet 系统鲁棒控制[J]. 吉林大学学报(理学版), 2023, 61(4): 943-949.
Fu Jingchao, Han Zeyu. Robust Control of Three-Dimensional Couplet System Based on Sliding Mode [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2023, 61(4): 943-949.
- [11] 刘向阳, 蒋众, 何寥, 等. 同步分流马达选型分析及试验研究[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(12): 50-54.
Liu Xiangyang, Jiang Zhong, He Liao, et al. Selection Analysis and Experiment Research of Hydraulic Synchronous Motor [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020, 40(12): 50-54.
- [12] 王贵桥, 高扬, 张福波, 等. 基于同步马达的液压多缸同步提升系统仿真研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(19): 148-152.
Wang Guiqiao, Gao Yang, Zhang Fubo, et al. Simulation Research of Hydraulic Multi-Cylinder Synchronous Lifting System Based on Gear-Motor Flow-Divider [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(19): 148-152.
- [13] 钱韡恺, 卞永明, 马利忠, 等. 基于 AMESim 的双液压缸同步提升系统仿真分析[J]. 机电一体化, 2022, 28(1): 15-21.
Qian Weikai, Bian Yongming, Ma Lizhong, et al. Simulation Analysis of Double Hydraulic Cylinder Synchronous Lifting System Based on AMESim [J]. Mechatronics, 2022, 28(1): 15-21.
- [14] 王刚, 宋英杰, 唐武生, 等. 基于串级 PID 的机器鱼位姿控制算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(3): 734-742.
Wang Gang, Song Yingjie, Tang Wusheng, et al. Posture Control Algorithm of Robotic Fish Based on Cascade PID [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2022, 60(3): 734-742.
- [15] 吴翠红, 郝芯. 多缸液压机的模糊自整定积分分离 PID 同步控制[J]. 锻压技术, 2022, 47(3): 146-153.

- Wu Cuihong, Hao Xin. Fuzzy Self-Tuning Integral Separation PID Synchronous Control on Multi-Cylinder Hydraulic Press[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(3): 146 - 153.
- [16] 陈杰, 泮进明. 基于误差反馈的双缸液压系统同步模糊PID控制系统设计[J]. 锻压技术, 2022, 47(3): 142 - 145, 168.
- Chen Jie, Pan Jinming. Design on Synchronous Fuzzy PID Control System for Double-Cylinder Hydraulic System Based on Error Feedback[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(3): 142 - 145, 168.
- [17] 周山旭, 罗艳蕾, 杜黎. 水田整平机驱动液压缸模糊PID同步控制仿真设计[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(11): 29 - 32.
- Zhou Shanxu, Luo Yanlei, Du Li. Fuzzy PID Synchronous Control Simulation Design of Driving Hydraulic Cylinder for Paddy Field Leveler [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2021, 41(11): 29 - 32.
- [18] 涂凌志. 多点同步液压顶升系统研究与应用[J]. 起重运输机械, 2022(10): 58 - 63.
- Tu Lingzhi. Research and Application of Multi-Point Synchronous Hydraulic Jacking System[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2022(10): 58 - 63.