

多缸驱动液压机主动纠偏系统的模糊 PID 控制

汪志能, 刘 衡, 董楚峰

(湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 多缸驱动液压机的纠偏性能直接决定锻件的加工质量, 由于液压系统的时滞性、多缸间的耦合特性以及复杂偏心力矩等因素的影响, 液压机的活动横梁极易出现偏转现象。针对这一难题, 基于活动横梁的力平衡及力矩平衡, 建立了多缸驱动液压机纠偏过程的数学模型, 以液压缸伸出量为控制变量, 以偏转角度为目标函数, 建立了纠偏系统模糊控制规则表, 形成了适应性较强的模糊 PID 控制方法。仿真结果表明: 在模糊 PID 控制作用下, 活动横梁在均变载荷下的稳态倾斜程度为 0.2×10^{-3} rad, 在脉动载荷下能在 4.2 s 内迅速恢复到平衡位置。该方法的响应速度快、稳态精度高, 能实现高精度纠偏。

关键词: 多缸; 液压机; 纠偏; 模糊 PID 控制; 数学模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.022

中图分类号: TP271

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 03-0137-05

Fuzzy-PID control on active rectify deviation system for multi-cylinder driving hydraulic machine

Wang Zhineng, Liu Heng, Dong Chufeng

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The rectify deviation performance of multi-cylinder driving hydraulic machine directly determines the processing quality of forgings. Due to the influences of factors such as time log of hydraulic system, coupling characteristics between multiple cylinders and complex eccentric moments, the movable crossbeam of the hydraulic machine is prone to deflection. Therefore, considering the above problems, a mathematical model for the rectify deviation process of the multi-cylinder driving hydraulic machine was established according to the force balance and the moment balance of the movable beam, and taking the extension of hydraulic cylinder as the control variable and the deflection angle as the objective function, the fuzzy control rule table of the rectify deviation system was proposed, and the fuzzy PID control method with strong adaptability was formed. Simulation results show that under the action of fuzzy PID control, the steady-state inclination of the movable crossbeam is 0.2×10^{-3} rad under the uniform load, and it can quickly return to the equilibrium position within 4.2 s under the pulse load. In all, this method can achieve high-precision rectify deviation with fast response speed and high steady-state accuracy.

Key words: multi-cylinder; hydraulic machine; rectify deviation; fuzzy PID control; mathematical model

多缸驱动液压机被广泛应用于航空航天等领域的大型复杂锻件的精密加工, 其精度体现了我国在制造业的综合实力^[1]。在锻造过程中, 由于锻坯材料流向的不均匀性、液压缸与活动横梁之间的安装位置误差, 以及液压系统本身的时滞性, 液压机的各个液压缸很难保证位置同步^[2-3]。这种液压缸的不同步极易造成活动横梁的偏转, 从而严重影响锻件的加工精度。因此, 为获得高精度的锻件, 多缸驱动液压机需具备极高的纠偏性能。

然而, 多缸驱动液压机是一个复杂的机电液耦合系统, 目前针对多缸液压系统的纠偏控制研究的文献较多。李栓柱等^[4]针对双缸同步系统建立了理论模型, 并设计了免疫神经网络 PID 控制器。谢金晶等^[5]提出了内环压力控制和外环位置控制的方法。田英等^[6]比较了“串联型”和“并联型”同步控制结构的同步误差, 提出了“并联型”同步控制结构更适合液压缸同步控制的结论。李胜永^[7]进一步发现采用误差反馈的方法较并联型控制结构具有更高的精度。尽管李栓柱等^[4]、谢金晶等^[5]、田英等^[6]与李胜永^[7]的控制算法具有控制精度高和响应速度快的特点, 但他们所针对的对象仅是两个简单的液压缸, 与多缸液压机存在极大的差别。在多缸液压机方面, 目前部分学者将多缸液压系统简化为

收稿日期: 2021-02-20; 修订日期: 2021-05-25

基金项目: 湖南科技大学博士科研启动基金资助项目 (E52055);

湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ5184)

作者简介: 汪志能 (1988-), 男, 博士, 讲师

E-mail: 873866634@qq.com

双缸液压系统,如刘忠伟等^[8]、杨继东等^[9]考虑到多缸建模的复杂性,根据活动横梁的偏转特点,将被动同步系统简化为双缸作用系统,该方法虽然有利于进一步简化系统,但忽略了多缸之间的耦合特性。在实际工程应用中,多缸驱动系统多采用 PID 控制。PID 算法简单,应用较广,但该算法的适应性不强,尤其对于耦合程度较高的锻压系统,其控制精度很难满足工程要求。因此,建立多缸液压系统的数学模型以及开发适应性较强的纠偏控制对提高多缸液压系统的纠偏性能具有重要的工程意义。

本文针对多缸耦合系统建立了系统的数学模型,针对该耦合模型提出了适应性较好的模糊 PID 算法,通过定义模糊算法自动调整 PID 的 3 个控制参数,从而实现了多缸系统的高性能纠偏。仿真结果表明,该模糊 PID 控制方法对于均变扰动力矩的稳态控制精度达到了 $0.2 \times 10^{-3} \text{ rad}$,对于脉动干扰力矩,

活动横梁能在 4.2 s 内迅速恢复到平衡位置,响应速度快、控制精度高,完全适应实际工程的需要。

1 多缸主动纠偏原理

多缸驱动液压机的工作原理如图 1 所示,其中, A_0 为柱塞缸横截面积, x 、 y 、 z 为坐标轴, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为 4 个柱塞缸的工作压力。4 个柱塞缸通过 4 个单独的液压回路供油,柱塞缸在下行过程中驱动活动横梁向下挤压锻坯,为保证锻件的加工精度,活动横梁在下压过程中严禁出现偏转倾斜的情况。事实上,锻坯形状的非对称性极易产生较大的偏转力矩,而液压系统的非线性时变特征也极易引起 4 缸不同步现象,为保证零件的加工精度,4 缸必须具备较强的纠偏能力。图 1b 为 4 个柱塞缸在活动横梁的位置布局图,在锻压过程中,活动横梁一旦偏转,可以通过改变 4 个液压缸的伸出长度来实现纠偏。

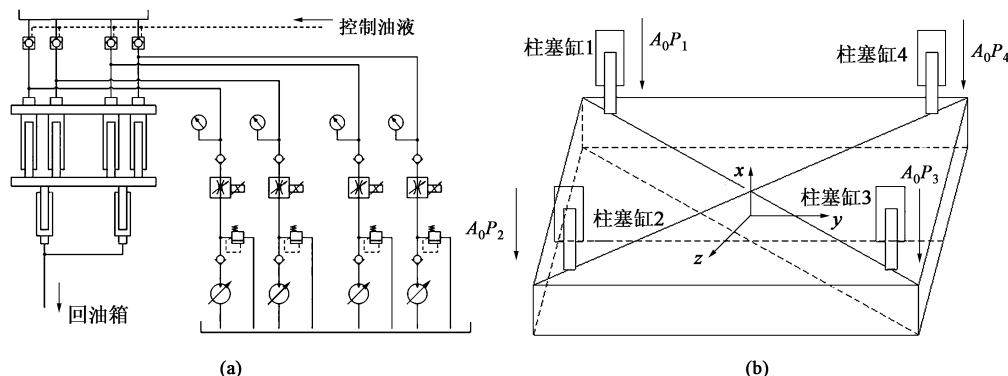


图 1 多缸主动纠偏原理图

(a) 液压原理图 (b) 活动横梁受力图

Fig. 1 Principle diagram of multi-cylinder active rectify deviation

(a) Principle diagram of hydraulic (b) Force diagram of movable crossbeam

2 纠偏系统数学建模

纠偏系统为一个复杂的机液耦合系统,可分别对其液压系统和机械系统建立相应的数学模型。4 缸由 4 个独立油泵供油,并通过独立的比例流量阀进行控制。对比流量阀分析可知,在锻压过程中,比例流量阀的流量工作在线性区域,因此,比例流量阀的模型可简化为:

$$Q_i = K_s u_i \quad (1)$$

式中: K_s 为增益系数; Q_i 为第 i 个比例流量阀的输出流量; u_i 为第 i 个比例流量阀的输入电压。

油液经过比例流量阀进入柱塞缸,根据油液的连续性性质,在柱塞缸内的输入流量与液压缸的运

动速度必须满足式 (2) 所示的连续性方程:

$$Q_i - c_t P_i = A_0 \cdot \frac{dx_{ci}}{dt} + A_0 \cdot \frac{x_{ci}}{\beta_e} \cdot \frac{dP_i}{dt}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

式中: x_{ci} 为第 i 个柱塞缸的位移; P_i 为第 i 个柱塞缸的工作压力; c_t 为泄漏系数; β_e 为油液体积弹性模量; t 为时间。

4 个柱塞缸均与活动横梁铰接,其布局图如图 2 所示,对活动横梁进行受力分析,根据刚体的运动定律,活动横梁绕 y 轴的偏转情况满足式 (3):

$$0.5A_0(P_2 + P_3 - P_1 - P_4)l_2 + M_y = J_y \ddot{\alpha} + B_e \dot{\alpha} + K_{Qy} \alpha \quad (3)$$

式中: M_y 为绕 y 轴的外界扭矩; J_y 为绕 y 轴的转动惯量; B_e 为阻尼系数; K_{Qy} 为绕 y 轴的抗扭刚度; l_2 为液压缸 1

和液压缸2之间的距离; α 为活动横梁绕 y 轴的偏角。

同时, 活动横梁绕 z 轴的偏转情况满足式 (4):

$$0.5A_0(P_1 + P_2 - P_4 - P_3)l_1 + M_z = J_z \ddot{\beta} + B_z \dot{\beta} + K_{Qz} \beta \quad (4)$$

式中: M_z 为绕 z 轴的外界扭矩; J_z 为绕 z 轴的转动惯量; K_{Qz} 为绕 z 轴的抗扭刚度; l_1 为液压缸1和液压缸4之间的距离; β 为活动横梁绕 z 轴的偏角。

另外, 根据活动横梁上柱塞缸的布局特征, 可得柱塞缸的伸出位移满足式 (5):

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ x_{c2} \\ x_{c3} \\ x_{c4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5l_1 & 0.5l_2 \\ 0.5l_1 & 0.5l_2 \\ 0.5l_1 & -0.5l_2 \\ -0.5l_1 & -0.5l_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: x_{c1} 、 x_{c2} 、 x_{c3} 、 x_{c4} 为4个柱塞缸的位移。

令: $\mathbf{x} = [\alpha \ \beta \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4]^T$, $\mathbf{y} = [\alpha \ \beta]^T$, $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$, $\mathbf{f} = [M_y \ M_z]^T$ 。其中: \mathbf{x} 为状态向量; \mathbf{y} 为输出向量; \mathbf{u} 为输入向量; \mathbf{f} 为干扰力矩向量; u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 为4个比例流量阀输入电压。

根据式 (1)~式 (5), 液压机系统的状态方程可写为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{u} + \mathbf{B}_2\mathbf{f} \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 4} \\ \mathbf{J}^{-1}[-\mathbf{K}_1 & -\mathbf{B} & \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{T}] & \\ \mathbf{0}_{4 \times 2} & -\frac{\mathbf{A}}{K_L} \cdot \frac{K_s \beta_e}{V} \cdot \mathbf{T} & -\frac{c_1}{K_L} \cdot \frac{K_s \beta_e}{V} \cdot \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}$,
 $\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \frac{K_s \beta_e}{V} \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}$, 为输入控制矩阵; $\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{J}^{-1} & \mathbf{0}_{4 \times 2} \end{bmatrix}$,

为外界干扰矩阵; $\mathbf{C} = [\mathbf{I}_{2 \times 2} \ \mathbf{0}_{2 \times 6}]$, 为输出矩阵; $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_y & 0 \\ 0 & J_z \end{bmatrix}$, 为转动惯量矩阵; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_e & 0 \\ 0 & B_e \end{bmatrix}$, 为阻尼

矩阵; $\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} K_{Qy} & 0 \\ 0 & K_{Qz} \end{bmatrix}$, 为刚度矩阵; $\mathbf{T} =$

$$\begin{bmatrix} -0.5l_1 & 0.5l_2 \\ 0.5l_1 & 0.5l_2 \\ 0.5l_1 & -0.5l_2 \\ -0.5l_1 & -0.5l_2 \end{bmatrix}, \text{为力臂矩阵; } \mathbf{I} \text{ 为单位矩阵; } V$$

为柱塞缸初始体积; K_L 为柱塞缸刚度。

3 多缸纠偏控制方法设计

4个柱塞缸在驱动下行过程中, 活动横梁易绕 y 轴或者 z 轴偏转, 对活动横梁的偏转情况分析可知, 活动横梁绕 y 轴偏转可通过加长柱塞缸1的伸出长度来纠偏, 活动横梁绕 z 轴偏转可通过缩短柱塞缸2的伸出长度来纠偏, 因此, 在锻压过程中, 4个柱塞缸在提供驱动力的同时, 纠偏动作仅仅通过改变柱塞缸1和柱塞缸2的伸出长度即可实现。另外, 活动横梁往往同时绕 y 轴和 z 轴偏转, 两偏转方向具有较强的耦合性, 普通的PID控制方法很难达到较高的控制精度, 因此, 采用智能性和鲁棒性较好的模糊PID对柱塞缸1和柱塞缸2进行控制, 从而实现活动横梁的快速纠偏。模糊PID控制原理如图2所示, 其中, ke_1 、 ke_2 分别为绕 y 轴和绕 z 轴的偏转角增益系数, kec_1 、 kec_2 分别为绕 y 轴和绕 z 轴的偏转角速度增益系数, E_1 、 E_2 分别为绕 y 轴和绕 z 轴的偏转角, Ec_1 、 Ec_2 分别为绕 y 轴和绕 z 轴的偏转角速度。

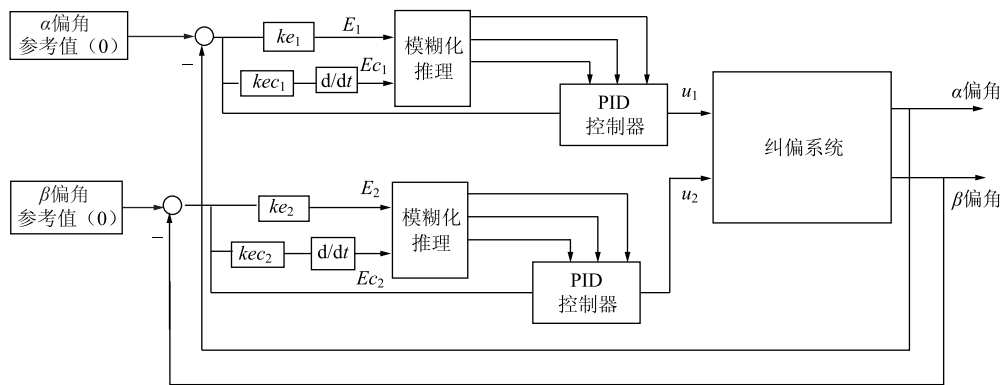


图2 纠偏过程模糊PID控制原理图

Fig. 2 Principle diagram of fuzzy-PID control for rectify deviation process

通过建模分析可知,活动横梁绕 y 轴和 z 轴的动力学特征具有类似性,因此,对活动横梁两个方向的纠偏控制器均可采用相同的模糊 PID 控制。模糊 PID 控制是根据偏转角的变化情况动态修正 PID 的比例控制参数 k_p 、积分控制参数 k_i 、微分控制参数 k_d ,从而实现活动横梁的快速纠偏。其中, k_p 、 k_i 、 k_d 的动态修正过程主要包括变量模糊化、规则表建立以及清晰化过程。

模糊化过程包括对输入变量和输出变量的模糊化。输入变量为偏转角和偏转角的变化速度。活动横梁偏转时其偏转角度一般为 $0 \sim 0.01$ rad,因此,偏转角的基本论域为 $[-0.01 \sim 0.01]$,偏转角变化速度的基本论域为 $[-0.1, 0.1]$ 。输出变量为:比例控制参数修正量 Δk_p 、积分控制参数修正量 Δk_i 、微分控制参数修正量 Δk_d 。参考文献 [10], Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的论域可定义为 $[-6, 6]$,对输入、输出变量的大小情况均采用 7 个模糊状态表示: {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大},将该状态简写为: {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

输入与输出变量的隶属度函数采用正态分布函数,模糊 PID 控制规则的应用已经十分成熟,结合液压机纠偏工况的特点,模糊控制规则表采用文献 [11] 所示的规则表。根据文献 [11] 和文献 [12] 的模糊规则表,运用最大隶属度解模糊器进行模糊判决,经过推理运算,可获得 3 个参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的大小:

$$k_p = k_{p0} + \Delta k_p \quad (8)$$

$$k_i = k_{i0} + \Delta k_i \quad (9)$$

$$k_d = k_{d0} + \Delta k_d \quad (10)$$

式中: k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 为 PID 的 3 个参数的初值。

4 纠偏性能仿真

液压机纠偏系统的相关仿真参数如表 1 所示。液压机在锻压过程中,随着锻压位移的增加,外界扰动转矩不断增长,为模拟纠偏系统的纠偏性能,结合文献 [7]~文献 [9],液压机在压制过程中的外界扰动转矩基本呈线性增长,但对于形状不规则的锻坯,坯料在各方向的流动具有不均匀性,外界负载存在脉动变化情况,为衡量纠偏系统的性能,扰动力矩采用图 3 与图 4 所示的均变力矩和脉动力矩。

图 5 为在均变力矩作用下活动横梁的偏转情况,在 $0 \sim 4$ s 内,随着扰动力矩的增加,活动横梁

表 1 纠偏系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of rectify deviation system

参数	数值
转动惯量 $J_y / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$	1.2×10^8
转动惯量 $J_z / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$	4.1×10^8
抗扭刚度 $K_{Qy} / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	5.7×10^{10}
抗扭刚度 $K_{Qz} / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	3.5×10^{10}
阻尼系数 $B_e / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	6×10^6
柱塞缸横截面积 A_0 / m^2	2.5447

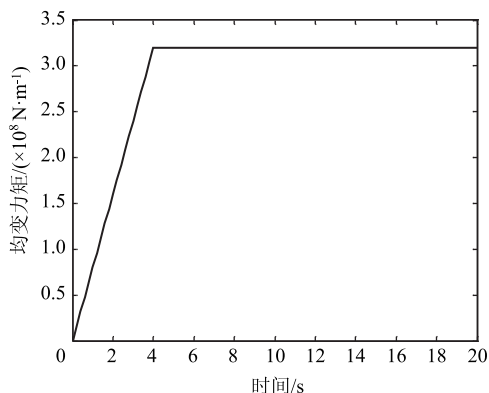


图 3 均变力矩

Fig. 3 Uniformly varying torque

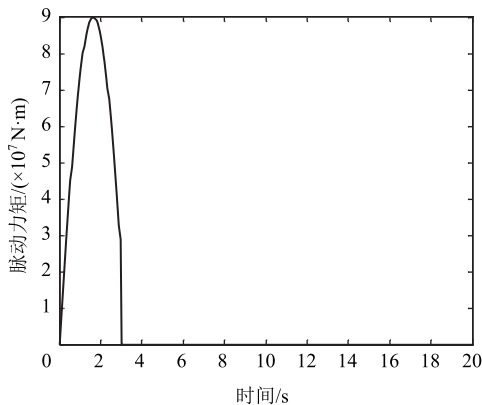


图 4 脉动力矩

Fig. 4 Pulsating torque

逐渐偏转, $4 \sim 12$ s 内活动横梁慢慢恢复到平衡位置,且 α 、 β 偏转角分别稳定在 0.2×10^{-3} 和 0.18×10^{-3} rad,偏转角极小,在该工况下,系统的纠偏精度较高。

图 6 为在脉动力矩作用下活动横梁的偏转情况,在 $0 \sim 1.5$ s 内活动横梁在 y 和 z 轴方向的偏转角达到了 11×10^{-4} rad,由于模糊控制器的作用,活动横梁的偏转角在 1.5 s 后迅速减小,在恢复到平衡位置的过程中,活动横梁具有一定的超调现象,但超调时间极短,在 4.2 s 时活动横梁完全恢复到平衡位置,这说

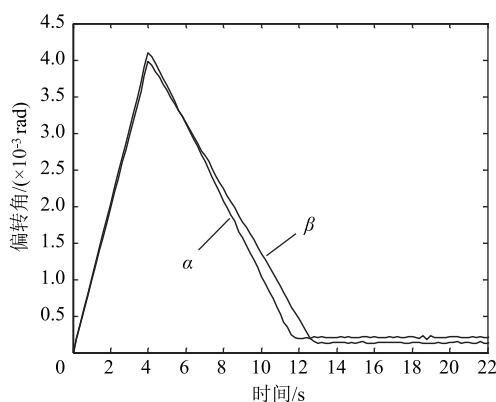


图5 均变力矩作用下活动横梁偏转情况

Fig. 5 Deflection of movable crossbeam under uniformly varying torque

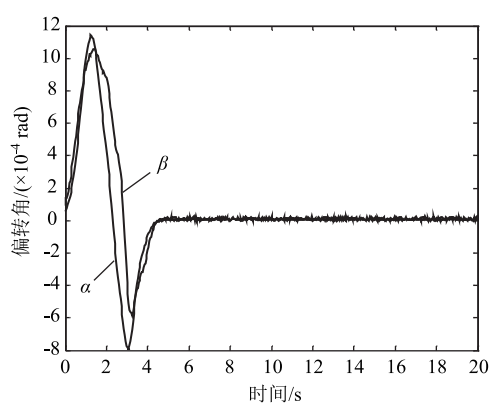


图6 脉动力矩作用下活动横梁偏转情况

Fig. 6 Deflection of movable crossbeam under pulsating torque

明该纠偏系统对脉动力矩也具备较好的抑制作用。

综合分析,液压机在均变力矩和脉动力矩的扰动作用下,活动横梁均具备较快的恢复至平衡位置的能力,这说明模糊PID控制器对该液压系统具有良好的纠偏作用。

5 结论

(1) 综合考虑了多缸驱动液压机的受力特点,结合液压元件的数学模型,建立了液压机纠偏过程的数学模型,为研究多缸液压机的纠偏策略提供了理论基础。

(2) 考虑到活动横梁在空间偏转方向耦合作用的特征,提出了双模糊PID控制策略,对绕y轴和绕z轴方向的偏转均采用自适应性较强的模糊PID控制,仿真结果表明,双模糊PID控制对于常规的均变力矩以及脉动力矩均具备较强的纠偏能力。

参考文献:

[1] Li D, Fu X, Zuo Z, et al. Investigation methods for analysis of

transient phenomena concerning design and operation of hydraulic-machine systems-A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 26-46.

- [2] Li L, Huang H, Zhao F, et al. An energy-saving method by balancing the load of operations for hydraulic press [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22 (6): 2673-2683.
- [3] 袁海伦, 史宇麟, 王康. 万吨级锻造液压机工艺体系的建立 [J]. 锻造与冲压, 2021, (1): 77-80.
Yuan H L, Shi Y L, Wang K. The form of the forging process system for the over 10000-ton hydraulic forging press [J]. Forging & Metalforming, 2021, (1): 77-80.
- [4] 李栓柱, 李登攀, 李灿. 基于免疫神经网络的双缸液压机同步PID控制 [J]. 机械工程师, 2019, (2): 139-142.
Li S Z, Li D P, Li C. Double-cylinder hydraulic press synchronous PID control based on immune neutral network algorithm [J]. Mechanical Engineer, 2019, (2): 139-142.
- [5] 谢金晶, 黄明辉, 陆新江. 大型模锻压机驱动系统的分层控制策略 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45 (5): 1463-1468.
Xie J J, Huang M H, Lu X J. Hierarchical control strategy of large forging equipment drive system [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45 (5): 1463-1468.
- [6] 田英, 余阳, 王兴波. 四柱式液压机双缸“串并联”同步控制结构研究 [J]. 液压与气动, 2021, (1): 20-26.
Tian Y, She Y, Wang X B. 'Series parallel' synchronous control structure of four column hydraulic press [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, (1): 20-26.
- [7] 李胜永. 锻造液压机双缸同步控制系统研究 [J]. 液压与气动, 2020, (7): 99-105.
Li S Y. Research on the synchronous control system of two cylinders for forging hydraulic press [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (7): 99-105.
- [8] 刘忠伟, 汤迎红, 邓英剑. 巨型模锻压机驱动与同步过程联合控制的研究 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35 (4): 514-522.
Liu Z W, Tang Y H, Deng Y J. Research on joint control of combined drivers with synchronization for giant forging hydraulic press [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35 (4): 514-522.
- [9] 杨继东, 车海伟, 刘昆. 大型模锻压机多液压缸同步控制系统的研究 [J]. 机床与液压, 2015, 43 (14): 85-87.
Yang J D, Che H W, Liu K. Research on large forging presses multi-cylinder synchronous control system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43 (14): 85-87.
- [10] Kouba N E Y, Menaa M, Hasni M, et al. A new robust fuzzy-PID controller design using gravitational search algorithm [J]. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology, 2019, 11 (3): 331-352.
- [11] Hussien A A, Marie M J, Gaeid K S. Effect of fuzzy PID controller on feedback control systems based on wireless sensor network [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020, 10 (3): 2416-2425.
- [12] Tian Y, Cao Z, Hu D, et al. A fuzzy PID-controlled iterative calderon's method for binary distribution in electrical capacitance tomography [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.