

20T 锻造操作机液压控制系统*

李阁强¹ 江兵¹ 周斌² 马淑叶² 杨守强²

(1. 河南科技大学机电工程学院, 洛阳 471003; 2. 安阳锻压机械工业有限公司, 安阳 455000)

摘要: 锻造操作机是自动化锻造作业中不可缺少的重要装备之一。以 20T 载荷全液压锻造操作机为对象, 针对其重载、定位精度要求高、惯量大的技术特点, 对操作机各执行机构液压控制系统进行设计, 包括大车行走系统、夹钳旋转系统、平行升降系统、水平缓冲系统、夹持系统和侧移摆移系统。建立操作机关键控制系统(大车行走系统、夹钳旋转系统)的数学模型, 采用模糊 PID 控制算法, 基于 Matlab/Simulink 和 AMESim 联合仿真技术仿真研究系统的动态特性, 并进行试验验证。结果表明, 操作机各液压系统回路设计合理, 采用模糊控制策略的大车行走系统和夹钳旋转系统的实时性强、鲁棒性好, 实现了操作机平稳、准确、快速控制。

关键词: 锻造操作机 液压控制系统 模糊 PID 控制 仿真 试验

中图分类号: TH271+.31; TG316.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0352-07

Hydraulic Control System of 20T Forging Manipulator

Li Geqiang¹ Jiang Bing¹ Zhou Bin² Ma Shuyue² Yang Shouqiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. Anyang Forging-press Machinery Industry Corporation, Anyang 455000, China)

Abstract: The forging manipulator was one of the important equipments in the automatic forging job. In order to design the 20T hydraulic forging manipulator with the performance characteristics of overload, high positioning accuracy and large inertia, the hydraulic control systems for the actuating mechanism of forging manipulator were designed. The hydraulic control systems consisted of driving system, clamp rotation system, parallel lifting system, horizontal buffer system, clamping system and lateral swing system. Mathematical models of manipulator's key control system (driving system and clamp rotation system) were improved. Based on Matlab/Simulink and AMESim co-simulation technology, simulation and analysis on the dynamic characteristics of driving system and clamp rotation system with fuzzy PID control algorithm were given. The experiments were taken to verify the system performance, and the results showed that the designs of the hydraulic system circuits were reasonable. The accuracy and rapidity of the forging manipulator control system were achieved. The real-time response and robust performance of the driving system and clamp rotation system with fuzzy control strategy are strong and stable.

Key words: Forging manipulator Hydraulic control system Fuzzy PID control Simulation Test

引言

锻造操作机是锻造车间实现锻造机械化与自动化的重要设备, 用于夹持锻件配合压机完成锻造工艺动作, 可以提高劳动生产率, 改善产品质量, 减轻

劳动强度。随着液压技术的发展和进步及其在锻造操作机上应用所表现出的优越性, 国外锻造操作机几乎全部采用全液压式结构, 并能实现与锻压机联动的要求, 进一步提高了锻造生产能力。而我国锻造操作机的研发、生产起步较晚, 大吨位锻造操作机

收稿日期: 2014-08-04 修回日期: 2014-09-03

* 国家自然科学基金资助项目(51175148)

作者简介: 李阁强, 副教授, 博士, 主要从事液压伺服控制研究, E-mail: hitligeqiang@163.com

主要还是依赖进口,并且操作机整体技术水平相对落后,生产能力在百吨以下。近年来随着我国国力的增强,铁路、船舶、核电等重大装备领域迅速发展,对大型复杂锻件的需求日益迫切,也对锻造行业和锻造操作机的发展提出了更高的要求^[1-5]。

锻造操作机是集机电液控一体化的复杂装备,其大负载、大惯量和冲击载荷给传动系统的设计带来很大困难。因此,大型锻造操作机液压回路及其控制技术的研究,对于我国锻造操作机的研发,乃至锻造行业的发展具有十分重要的意义^[6-11]。针对锻造操作机负载惯性大、载荷冲击频繁、工作环境恶劣等特点,设计载荷为 20 t 的操作机液压控制系统,并进行理论分析和试验研究,实现对锻造操作机稳定、准确、快速控制。

1 20T 锻造操作机原理

设计的 20T 全液压摆移式锻造操作机,整体结构采用大刚度墙板框架结构,主体构件由优质钢板焊接而成,采用专用的垂直升降四连杆机构。其主要结构为大车行走机构、钳身部分、升降部分、液压部分和电气部分,锻造操作机总装图如图 1 所示。

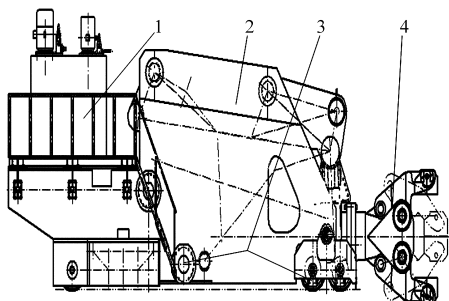


图 1 锻造操作机总装图

Fig. 1 Arrangement of forging manipulator

1. 液压和电气部分 2. 升降机构 3. 大车行走机构 4. 钳身

大车为分体结构,两侧为左右墙板,中间为前连接横梁和后连接横梁;大车行走机构采用机械传动液压驱动方式,由车轮部分、传动链轨、传动链轮等组成,车轮采用单侧双轮缘平踏面车轮,每侧两个链轮,每个链轮均为液压马达驱动,且具有实时涨紧功能,消除链齿侧隙;钳口夹持机构由钳箱、钳臂、钳口、夹紧油缸等机构组成,采用短臂杠杆形式夹紧,夹紧块与钳臂连接处连接牢固且易于拆卸更换,钳头旋转装置上设有超载保护、制动及缓冲装置,同时在液压回路中设置平衡保护回路,保证钳头可停止于任何位置;升降机构由前吊杆、侧移横梁、前摇臂、平行升降液压缸、机械连杆、后摇臂、倾斜缸等构成,采用液压缸驱动,分为平行升降和钳头仰俯两个独立的控制系统,可分别操作。

2 锻造操作机液压控制系统设计

锻造操作机主运动机构通常采用解耦设计,分为 6 个相对独立的运动,即大车行走、夹钳旋转、平行升降、水平缓冲、夹持和侧移摆移。根据表 1 提出的技术要求,设计出相应的液压控制系统。

表 1 锻造操作机技术要求

Tab. 1 Technical parameters of forging manipulator

参数	数值
夹持质量 m/t	20
夹持力矩 $t/(N \cdot m)$	60
大车速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	0 ~ 36
钳头转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	18
钳杆左右侧移量 L/mm	200
钳杆上/下倾斜角度 $D/(\circ)$	7/10
额定油压 p/MPa	20

2.1 大车行走系统

该系统分为左右两个对称的电液比例控制系统,4 个液压马达驱动,用 4 组插装阀和比例换向阀通过控制油路实现大车的定位和锁紧,比例换向阀通径为 25 mm,在压降为 1 MPa 时最大流量可达 390 L/min,液压马达排量为 107 mL/r。由于大车和锻件惯性大,为了减小起停冲击,采用蓄能器和溢流阀及蓄能器和单向阀的设计方案,蓄能器充气压力为 20 MPa,容量 10 L,溢流阀调定压力 22 MPa,单向阀开启压力为 0.05 MPa。为了缓冲锻造作业时被动受力,系统设有溢流阀,蓄能器吸收大车行走过程中产生的振动冲击,溢流阀起过载保护作用。大车右半部分原理图如图 2 所示。

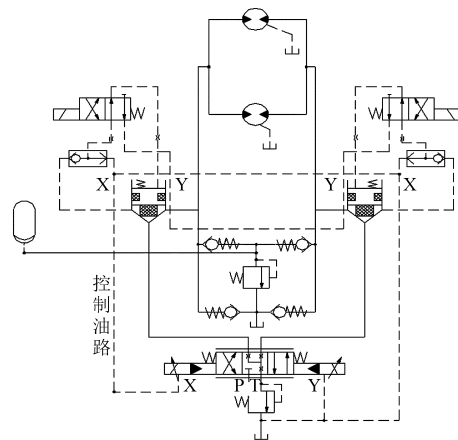


图 2 大车行走系统液压原理图

Fig. 2 Schematic diagram of driving hydraulic system

2.2 夹钳旋转系统

该系统通过调节电液比例方向阀的开度,控制液压马达的旋转方向和速度,通过液压马达的旋转驱动夹钳夹持锻件旋转。为了防止负载过大使油路

液压过载,并减小马达制动时的液压冲击,采用两组液压马达并行驱动,蓄能器和溢流阀结合使用,使马达平稳地停止,如图3所示。该系统中蓄能器容量为4 L,充气压力为20 MPa,其余元件参数选取同大车行走系统。

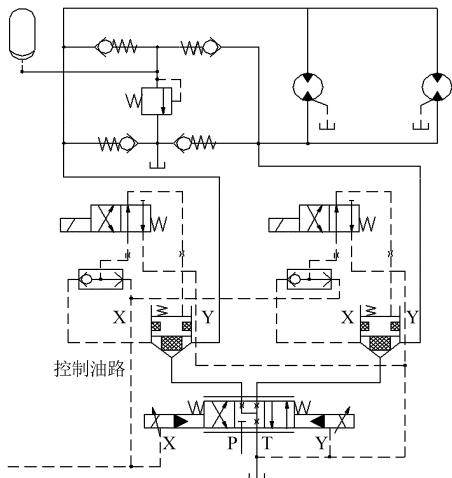


图3 夹钳旋转系统液压原理图

Fig.3 Schematic diagram of clamp rotation hydraulic system

2.3 平行升降系统

该系统的功能是实现夹钳夹持锻件垂直方向上平行升降或保持在一定的位置,采用带行程调节的插装阀可以调节升降的速度。蓄能器将液压缸下降过程中的高压油储存起来,液压缸上升时向系统释放高压油,保证系统压力,起到缓冲的作用,溢流阀过载保护,如图4所示。该系统中液压缸缸径200 mm,杆径140 mm,行程1350 mm,蓄能器充气压力为8 MPa,容量40 L,溢流阀调定压力22 MPa。

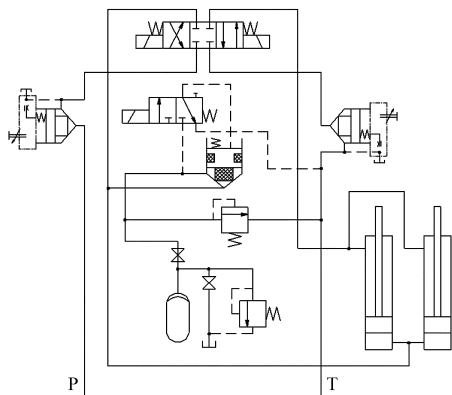


图4 平行升降系统液压原理图

Fig.4 Schematic diagram of parallel lifting hydraulic system

2.4 水平缓冲系统

该系统由钳架左右水平缓冲缸等构成,水平缓冲是双作用缓冲,即对钳架前、后均能缓冲。利用减压阀将回路压力降到6~8 MPa,通过电磁换向阀使操作机在工作时,缓冲油缸始终和蓄能器相通,利用

液压的平稳性和蓄能器吸收脉冲的特性,使水平缓冲处于平稳状态,如图5所示。该系统中液压缸缸径160 mm,杆径90 mm,行程±300 mm,蓄能器充气压力为3 MPa,容量25 L,溢流阀调定压力8 MPa。

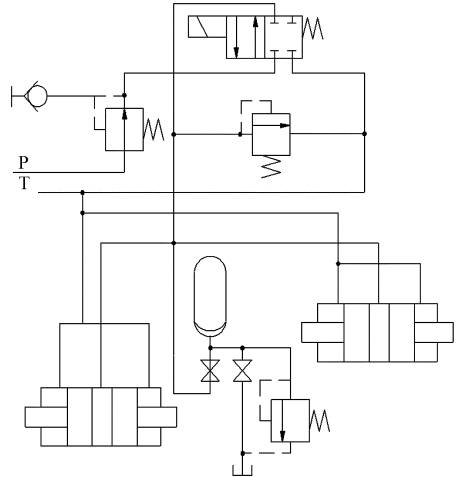


图5 水平缓冲系统液压原理图

Fig.5 Schematic diagram of horizontal buffer hydraulic system

2.5 夹持系统

该系统通过控制夹紧缸的运动实现钳口的松开和夹紧,并能在夹持锻件时保持一定的夹紧压力。由电液换向阀控制夹紧和松开,夹紧时压力油进入油缸无杆腔,油缸推动钳口夹紧,蓄能器起保压及过载保护作用。当电液换向阀处于中间位置时,油路被切断,蓄能器中的压力油即可补偿回路内油液的泄漏,保证夹紧压力不降低,使锻件在锻造过程中保持被夹紧状态,溢流阀起过载保护作用,如图6所示。该系统中液压缸缸径400 mm,杆径350 mm,行程750 mm,蓄能器充气压力为10 MPa,容量25 L,溢流阀调定压力22 MPa。

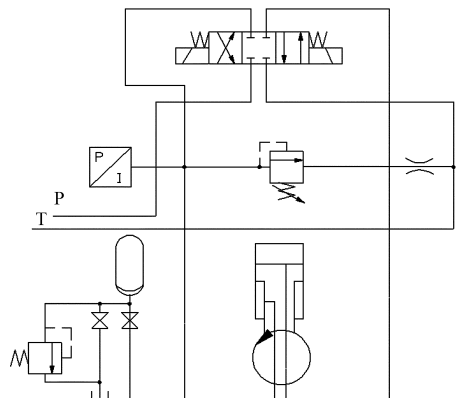


图6 夹持系统液压原理图

Fig.6 Schematic diagram of clamp hydraulic system

2.6 侧移摆移系统

侧移机构由前后侧移缸前后侧移横梁、内置位移传感器及缓冲装置构成。同时配有阻尼机构,具

有侧移限位及缓冲装置,以吸收侧移产生的冲击和防止钳架在锻造过程中横向摆动。该系统由 2 个三位四通和 2 个二位四通电磁换向阀共同控制前侧移和后侧移的动作,使前侧移缸和后侧移缸完成左右侧移和左右摆移,液压缸缸径 240 mm,杆径 90 mm,如图 7 所示。

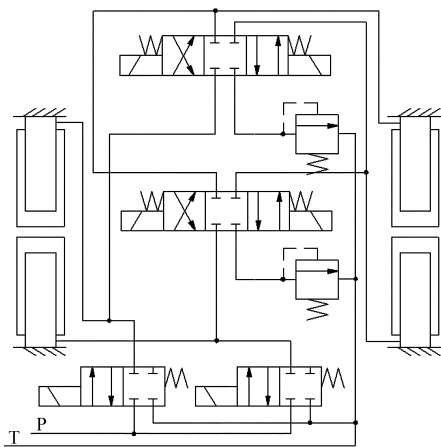


图 7 侧移摆移系统液压原理图

Fig. 7 Schematic diagram of lateral swing hydraulic system

3 大车行走、夹钳旋转系统建模与控制策略

大车行走、夹钳旋转是锻造操作机的两个主要运动,其液压控制系统的位置控制准确性、可靠性是操作机正常工作和保证锻件质量的前提,因此对其系统的控制性能进行仿真研究。

3.1 系统建模

大车行走系统和夹钳旋转系统都是由电液比例方向阀、液压马达、负载组成的液压伺服系统。其液压动力元件即阀控液压马达的动态特性决定整个系统的性能,因此确定阀控马达系统的数学模型是分析整个驱动系统的前提。

为了得到液压动力元件的数学模型,首先列写电液比例阀的流量方程、液压马达的流量连续性方程和液压马达与负载的力矩平衡方程,经拉氏变换后为

$$Q_L = K_q X_V - K_c p_L \quad (1)$$

$$Q_L = D_m s \theta_m + C_{tm} p_L + V_t s p_L / (4\beta_e) \quad (2)$$

$$p_L D_m = J_t s^2 \theta_m + B_m s \theta_m + G \theta_m + T_L \quad (3)$$

式中 K_q ——比例阀流量增益

K_c ——比例阀流量-压力系数

p_L ——负载压降 Q_L ——负载流量

X_V ——比例阀阀芯位移

D_m ——液压马达排量

θ_m ——液压马达转角

T_L ——作用在马达轴上的任意外负载力矩

B_m ——液压马达和负载的粘性阻尼系数

G ——负载的扭转弹簧刚度

J_t ——液压马达轴上的总惯量

V_t ——液压马达两腔及连接管道总容积

β_e ——油液有效弹性模量

C_{tm} ——液压马达总泄漏系数

经推导,可得阀芯位移和外负载干扰同时作用于马达的角位移表达式

$$\theta_m = \frac{K_q X_V - \frac{1}{D_m^2} \left(K_c + C_{tm} + \frac{V_t}{4\beta_e} s \right) T_L}{\frac{V_t J_t}{4\beta_e D_m^2} s^3 + \left(\frac{J_t K_{ce}}{D_m^2} + \frac{B_m V_t}{4\beta_e D_m^2} \right) s^2 + \left(1 + \frac{B_m K_{ce}}{D_m^2} + \frac{G V_t}{4\beta_e D_m^2} \right) s + \frac{G K_{ce}}{D_m^2}} \quad (4)$$

式中 K_{ce} ——比例阀总流量-压力系数

此阀控液压马达系统中,马达和最终负载均是通过齿轮刚性连接,故弹性负载可以不计,即 $G=0$,

又通常情况下 $\frac{B_m K_{ce}}{D_m^2} \ll 1$,故简化可以得到液压马达轴的转角对阀芯位移的传递函数为

$$\frac{\theta_m}{X_V} = \frac{\frac{K_q}{D_m}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (5)$$

其中 $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e D_m^2}{V_t J_t}}$ $\xi_h = \frac{K_{ce}}{D_m} \sqrt{\frac{\beta_e J_t}{V_t}}$

上述公式中各参数取值为: $K_q = 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$; $K_{ce} = 1.25 \times 10^{-12} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$; $K_c = 4.55 \times 10^{-13} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$; $D_m = 1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{rad}$; $\beta_e = 6.9 \times 10^{-8} \text{ Pa}$; $J_t = 104 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $V_t = 4.72 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; $C_{tm} = 7 \times 10^{-13} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$ 。

3.2 控制策略

大车行走、夹钳旋转的准确平稳定位直接影响锻造的效率和工件的质量,因此需要采用合适的控制方法。工程上常用的传统 PID 控制算法简单、实时性强,但 PID 参数整定却不能实时在线调整,常用于线性系统。而操作机大车行走、夹持旋转系统具有时变性和非线性强、负载干扰大的特性,因此采用模糊 PID 控制策略并结合模糊逻辑推理与 PID 控制的特点,能在线实时非线性调节控制参数,其算法实时性和鲁棒性强,实现容易,理论上能够满足系统要求^[12-14]。

模糊控制器包含大车行走位移(或夹钳旋转角度)的误差 e 和误差变化率 \dot{e} 两个输入, PID 系数的增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 3 个输出。PID 控制器中,调整其 3 个参数的变化规则如下: $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$, $K_i =$

$K_{i0} + \Delta K_i, K_{d0} = K_{d0} + \Delta K_d$ 。其中 K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 是 PID 控制的 3 个初始参数, K_p, K_i, K_d 为 PID 控制器输出参数。定义 e 和 \dot{e} 的模糊集论域均为 $\{-1, 1\}$, 同样 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊集论域也定义为 $\{-1, 1\}$ 。将模糊输入变量和输出变量的模糊集合都划分为 7 个等级, 用语言变量表示为 $\{\text{PB}(\text{正大}), \text{PM}(\text{正中}), \text{PS}(\text{正小}), \text{ZO}(\text{零}), \text{NS}(\text{负小}), \text{NM}(\text{负中}), \text{NB}(\text{负大})\}$, 所有模糊子集的隶属度函数均为三角形曲线。模糊控制器参数整定规则是: 当系统误差较大时, 应取较大的 K_p 和较小的 K_d , 使系统响应加快; 当系统误差中等时, 应取较小的 K_p 及适当的 K_i 和 K_d , 使系统具有较小的超调; 当系统误差较小时, 应取较大的 K_p 和 K_i 以及适当的 K_d , 避免系统在平衡点附近振荡。根据模糊规则进行模糊推理得到的结果是一个模糊集合, 然后采用重心法对模糊输出变量进行去模糊化处理。根据不同的输入变量, 离线计算出每一个模糊量所对应的精确输出量, 制作成模糊输出控制表, 实际应用时, 只需通过查表, 即可求得模糊控制器当前的精确输出值。

3.3 模型搭建

利用 AMESim 元件库中成熟的液压元件模块来建立夹钳旋转控制系统仿真模型, 同时基于 Matlab/Simulink 建立模糊 PID 控制算法的仿真模型^[15]。通过联合仿真技术, 将大车行走、夹钳旋转控制系统仿真和运动控制算法仿真结合起来, 真实模拟机构的实际工况, 系统联合仿真模型如图 8 所示, 仿真主要参数如表 2 所示。

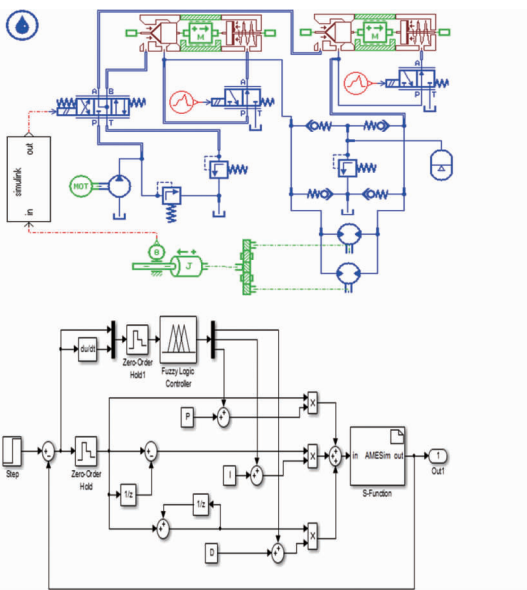


图 8 联合仿真模型

Fig. 8 Combined simulation model

4 仿真与试验测试

基于上述设计的操作机液压控制原理, 由安阳

表 2 仿真主要参数

Tab. 2 Main parameters of simulation

参数	数值
负载质量 m_1/t	20
大车质量 m_2/t	120
系统压力 p_1/MPa	10
系统流量 $Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	556
马达排量 $V/(mL \cdot r^{-1})$	107
齿轮传动比 I	4.6
链轮直径 D_1/m	0.656

锻压机械工业有限公司为某用户单位生产的 20T 全液压摆移式锻造操作机如图 9 所示。由于锻造操作机、锻件以及锻压机的成本非常高, 所以需要通过试验来验证仿真结果的正确性和操作机液压系统的可靠性。

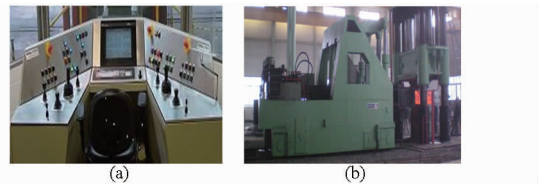


图 9 20T 全液压摆移式锻造操作机

Fig. 9 Lateral swing hydraulic of 20T forging manipulator

(a) 控制台 (b) 操作机本体

4.1 大车行走仿真与试验测试

设计要求操作机大车行走误差 $\pm 10 \text{ mm}$, 在快锻工况下, 完成了操作机轴向进给 0.06 m 、 0.12 m 的仿真研究, 在常锻工况下, 完成了操作机连续轴向进给 0.1 m 的仿真研究。试验测试传感器为日本光洋旋转编码器, 通过试验得到系统给定位移时编码器不同采样时间的数值, 描点法绘制试验曲线。两种 PID 控制下大车行走系统动态特性曲线和试验测试结果如图 10 所示。

从图 10 两种控制策略的仿真曲线可以看出, 采用模糊 PID 控制时大车稳定性明显得到提升, 稳态误差满足 $\pm 10 \text{ mm}$ 要求, 并且在不同工况下, 系统达到稳态时间约 0.6 s , 锻压机的工作周期为 1 s , 能实现与锻压机的联动送进。同时试验结果与仿真结果基本吻合, 进一步验证了设计方案和仿真模型的准确性。

4.2 夹钳旋转仿真与试验测试

设计要求操作机夹钳旋转速度最快 18 r/min , 旋转精度 $\pm 1^\circ$, 当给定旋转角度为 15° 、 30° 和 60° 时, 两种 PID 控制下夹钳旋转系统动态特性曲线和试验测试结果如图 11 所示。试验测试的选择和过程同大车行走系统。

从图 11 两种控制策略的仿真曲线可以看出, 采用模糊 PID 控制时改善了夹钳系统动态性能, 稳态

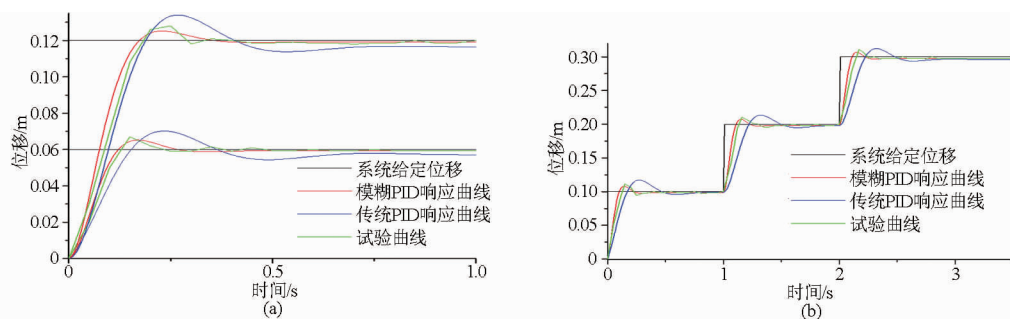


图 10 大车行走系统仿真与试验曲线

Fig. 10 Simulation and trial curves of driving system

(a) 快锻工况 (b) 常锻工况

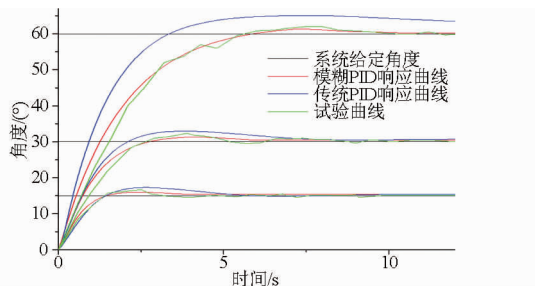


图 11 夹钳旋转系统仿真与试验曲线

Fig. 11 Simulation and trial curves of clamp rotation system

精度明显提高。而采用传统 PID 控制时,系统超调比较大,偏差过大,增加锻件回炉次数,延长锻造周期,并且随着输入角度增加系统稳态误差越来越大。试验结果与模糊 PID 控制结果基本相同,验证了系统设计方案和物理模型的准确性。

5 结论

(1) 根据技术要求,设计出了锻造操作机各执行机构的液压控制系统。建立了大车行走、夹钳旋转机构的数学模型和系统仿真模型。

(2) 采用模糊 PID 控制策略,基于 Matlab/Simulink 和 AMESim 联合仿真技术,将系统仿真和运动控制算法仿真结合起来,真实模拟机构的实际工况。仿真结果表明,实现了夹钳旋转、大车行走的准确定位,提高了系统的鲁棒性和适应性,实现与锻压机的联动送进,提高了生产效率,降低了系统能耗。

(3) 通过产品试验测试,验证了设计方案和仿真模型的正确性,实现了锻造操作机的稳定、准确、快速控制。

参 考 文 献

- 余发国,高峰,郭为忠,等. 锻造操作机的回顾与展望[J]. 机械设计与研究,2007(增刊):12-15.
Yu Faguo, Gao Feng, Guo Weizhong, et al. Review and expectation of forging manipulators [J]. Machine Design and Research, 2007(Supp.): 12-15. (in Chinese)
- 张营杰,卫凌云,牛勇,等. 锻造操作机发展现状与研究方向[J]. 锻压装备与制造技术,2012(2):11-14.
Zhang Yingjie, Wei Lingyun, Niu Yong, et al. Developing status and trend of forging manipulator [J]. China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology, 2012(2): 11-14. (in Chinese)
- 梁音,赵绪平,王驰,等. 大型锻造操作机研究进展[J]. 科技成果纵横,2010(2):55-57.
- Ren Yunpeng, Lu Chongshao, Han Qingkai, et al. Simulated comparison on kinematics properties of two typical mechanisms of forging manipulator [C] // Proceedings of SPIE 6794, ICMIT 2007:Mechatronics, MEMS and Smart Materials, 2008:67942N.
- 高峰,郭为忠,宋清玉,等. 重型制造装备国内外研究与发展[J]. 机械工程学报,2010,46(19):92-107.
Gao Feng, Guo Weizhong, Song Qingyu, et al. Current development of heavy-duty manufacturing equipments [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 92-107. (in Chinese)
- Chen G L, Wang H, Lin Z Q, et al. Performance analysis of a forging manipulator based on the composite modeling method [C] // 1st International Conference Intelligent Robotics and Applications, Berlin: Springer, 2008:152-160.
- 傅新,徐明,王伟,等. 锻造操作机液压系统设计与仿真[J]. 机械工程学报,2010,46(11):49-54.
Fu Xin, Xu Ming, Wang Wei, et al. Hydraulic system design and simulation of the forging manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 49-54. (in Chinese)
- 王凤喜. 大锻件生产行业与锻造技术发展[J]. 锻压机械,2002(4):3-6.
- 姚保森. 我国锻造液压机的现状与发展[J]. 锻压装备与制造技术,2005,40(3):28-30.
Yao Baosen. States and development of Chinese hydraulic forging press [J]. China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology, 2005,40(3): 28-30. (in Chinese)
- 余发国,高峰,史巧硕. 基于 GF 集的锻造操作机构型方法[J]. 机械工程学报,2008,44(2):152-159.

- Yu Faguo, Gao Feng, Shi Qiaoshuo. Type synthesis for forging manipulators based on GF set[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 152 - 159. (in Chinese)
- 11 赵勇,林忠钦,王皓,等. 重型锻造操作机的操作性能分析[J]. 机械工程学报,2010,46(11):69 - 75.
Zhao Yong, Lin Zhongqin, Wang Hao, et al. Manipulation performance analysis of heavy manipulators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 69 - 75. (in Chinese)
- 12 陈燎原. 电液伺服系统的模糊控制研究[J]. 农业机械学报,2002,33(1):90 - 93.
Chen Liaoyuan. Fuzzy control of electro-hydraulic servo system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 90 - 93. (in Chinese)
- 13 王幼民,刘有余. 电液位置伺服系统的自适应控制[J]. 农业机械学报,2006,37(12):160 - 163.
Wang Youmin, Liu Youyu. Adaptive control research for electro-hydraulic position servo system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 160 - 163. (in Chinese)
- 14 郑江. 锻造操作机电液比例位置控制系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2003.
Zheng Jiang. Research on electro-hydraulic proportional control of forging manipulator [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- 15 石红雁,许纯新,付连宇. 基于 SIMULINK 的液压系统动态仿真[J]. 农业机械学报,2000,31(5):94 - 96.
Shi Hongyan, Xu Chunxin, Fu Lianyu. Study on dynamic simulation of hydraulic system based on SIMULINK[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(5): 94 - 96. (in Chinese)

(上接第 372 页)

- 13 Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [C] // Proceedings of 2000 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC2000, 2000, 1: 84 - 88.
- 14 Nebro A J, Durillo J J, García-Nieto J, et al. SMPSO: a new PSO-based metaheuristic for multi-objective optimization [C] // IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-criteria Decision-making, 2009: 66 - 73.
- 15 孟红云,张小华,刘三阳. 用于约束多目标优化问题的双群体差分进化算法[J]. 计算机学报,2008,31(2):228 - 235.
Meng Hongyun, Zhang Xiaohua, Liu Sanyang. A differential evolution based on double populations for constrained multi-objective optimization problem [J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(2): 228 - 235. (in Chinese)
- 16 贺毅朝,王熙照,刘坤起,等. 差分演化的收敛性分析与算法改进[J]. 软件学报,2010,21(5):875 - 885.
He Yichao, Wang Xizhao, Liu Kunqi, et al. Convergent analysis and algorithmic improvement of differential evolution [J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 21(5): 875 - 885. (in Chinese)
- 17 Kukkonen S, Lampinen J. GDE3: the third evolution step of generalized differential evolution [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2005, 2005: 443 - 450.
- 18 Li H, Zhang Q. Multi-objective optimization problems with complicated pareto sets, MOEA/D and NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 12(2): 284 - 302.
- 19 Coello Coello, Carlos A, Lechuga M S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization [C] // Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, 2002: 1051 - 1056.
- 20 Durillo J J, Nebro A J, Luna F, et al. jMetal: a java framework for developing multi-objective optimization [R]. Technical Report ITI-2006-10, Dpto. De Lenguajes y Ciencias de la Computación, University of Málaga, 2006.
- 21 Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach [J]. Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257 - 271.
- 22 Durillo J J, Nebro A J. jMetal: a java framework for multi-objective optimization [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(10): 760 - 771.