

机械变速压力机电液伺服自动控制系统设计

潘冬

(陕西国防工业职业技术学院 数控工程学院, 西安 710300)

摘要: 针对当前机械变速压力机运行效率偏低、抗干扰能力较差等问题, 提出一种基于 TMS320LF2407A 的机械变速压力机电液伺服自动控制系统设计方法; 对于系统的硬件部分, PLC 对压力信号进行采集, 电源模块采用稳压器完成 12~5 V 的 DC/DC 转化; 利用晶振当作振荡源与闭合回路结合完成时钟模块的设计; 系统的软件部分根据位置式的 PID 控制算法对机械变速压力机执行元件进行控制, 完成软件的设计; 实验证明, 所设计的控制系统稳定性好, 具有很好的抗干扰能力。

关键词: 压力机; 电液伺服; 自动控制系统

Mechanical Speed Pressure Electromechanical Hydraulic Servo Automatic Control System Design

Pan Dong

(Numerical Control Engineer Institute, ShaanXi Institute of Technology, Xi'an 710300, China)

Abstract: In view of the low efficiency and poor anti-interference ability of the mechanical transmission press, a design method of electro hydraulic servo automatic control system for mechanical transmission pressure based on TMS320LF2407A is presented. For the hardware part of the system, PLC collects the pressure signal, and the power module adopts the voltage regulator to complete the DC/DC conversion of 12~5 V. The oscillator is used as the oscillation source and the closed loop is combined to complete the design of the clock module. The software part of the system controls the actuating element of the mechanical variable speed press according to the position type PID control algorithm, and completes the design of the software. The experimental results show that the designed control system has good stability and good anti-interference ability.

Keywords: press; electro-hydraulic servo; automatic control system

0 引言

随着时间的推移, 液压技术应运而生, 已经发展到了可成熟运用的程度^[1]。液压技术的迅速发展使其很快地应用至锻压设备、农用机械、航空航天等领域中^[2]。近些年来, 随着计算机的不断发展, 尤其是液压伺服自动控制技术, 它已经成为了现代控制技术中必不可少的手段, 其连接起了微电子技术和大型控制对象, 达到了对对象进行控制的目的^[3]。

当前, 我国液压工业的起步比较晚, 20 世纪的 60 年代我国引进了一批液压元件, 并对其进行了研制, 又自行设计和生产了低压和高压等多个液压系列^[4]。80 年代至 90 年代, 我国大刀阔斧实现了液压行业的改造, 并扩大了与发达国家在技术上的交流, 引进了大量国外先进液压产品与技术。

机械变速压力机是根据曲柄连杆或者肘杆机构等构成的传动锻压机械, 其工作平稳、操作条件好、自动化, 比较适用于自动生产线^[5]。为了提高机械变速压力机的工作效率, 需要对其控制系统进行设计。当前机械变速压力机控制系统设计方法无法对其进行稳定高效地设计。而电液伺服技术为基于液压传动技术和自动控制技术的新兴技术, 利用了其中的关键元件, 就是电液伺服阀, 实现了电、液之间的转换, 这使小功率电信号可对大功率液压元件进行控制^[6]。电液伺服系统尺寸小, 反映速度比较快, 而且抗负载刚度也比较大, 能够快速精确地重

复输入规律。随着电液伺服控制技术的不断发展, 电液伺服阀元件批量化生产, 降低了电液伺服控制系统成本。综上所述, 利用电液伺服技术可对机械变速压力机的自动控制系统进行稳定可靠地设计。

为了提高多工位压力机的生产线自动化生产水平, 王延年^[7]等人提出了利用运动控制器对送料机械手的控制系统设计策略。对送料机械手整体的结构、工作流程以及伺服系统进行研究与分析, 描述了控制系统硬件结构, 介绍了运动控制器软件功能, 并根据电子凸轮完成机械手于 X、Y、Z 三个方向和 8 个伺服轴联动。该方法下的自动控制系统较为简单, 但是并不完善。为了减少人力和物力, 同时给设计以及对曲柄伺服压力机进行优化的一系列系统组件, 提供可行性参考, 鲁文其^[8]等人利用 Simulink 研发了曲柄伺服压力机数字化集成仿真系统, 该系统根据运动控制、电驱动、传动机构几部分组建。运动控制模块设计了恒速以及变速驱动工作形式, 电驱动模块引入了电子飞轮中的永磁交流伺服以及电机组合, 永磁交流伺服利用了速度外环和电流内环两个控制结构矢量控制方案, 加入变参数积分分离中的 PI 调节器, 而机械转动机构根据的是曲柄连杆机构。该方法提高了压力机的工作效率, 但不够稳定。为实现压力机在特定条件下精确控制, 洪瑞^[9]等人提出利用牛顿迭代法实现压力机控制系统的设计。该方法根据几何法组建曲柄转角滑块位移数学方程式, 获得运动学的方程式, 依据仿真拟合出曲柄转角滑块位移数学公式, 通过 MATLAB 软件对目标工艺曲线进行拟合, 利用牛顿迭代算法完成了通过滑块位移对转角多点一次性求解, 通过计算结果以拟合曲柄转角时间

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-08-14。

作者简介: 潘冬(1980-), 男, 陕西城固人, 硕士, 副教授, 主要从事机械工程数控技术方向的研究。

函数, 采用 STM32 完成输出目标脉冲。该方法具有一定的稳定性, 但运行效率较低^[10]。

1 机械变速压力机电液伺服自动控制系统设计

在机械变速压力机电液伺服自动控制系统设计中, 以 TMS320LF2407A 作为控制系统核心, 以高性能的 PLC 控制模块为辅助, 再根据 CTM1050 完成机械变速压力机电液伺服自动控制系统硬件结构的设计, 具体的系统设计参数如表 1 所示。

表 1 压力机电液伺服自动控制系统参数

项目	数值
控制劲度系数	8N/mm
控制精度	±1%
油压	15bar
加载阀额定流量	5L/min
负载质量	70kg
工作温度	-10~125℃

1.1 机械变速压力机电液伺服自动控制系统整体框架

机械变速压力机电液伺服自动控制系统的整体框架中, 将传感器收集到的信号进行模数转换, 利用控制算法实现数字信号的处理, 并输出一组信号完成对电液伺服阀的控制。该系统包括电源电路、A/D 与 D/A 转换、存储器模块、接口电路、时钟和复位电路与串口模块。

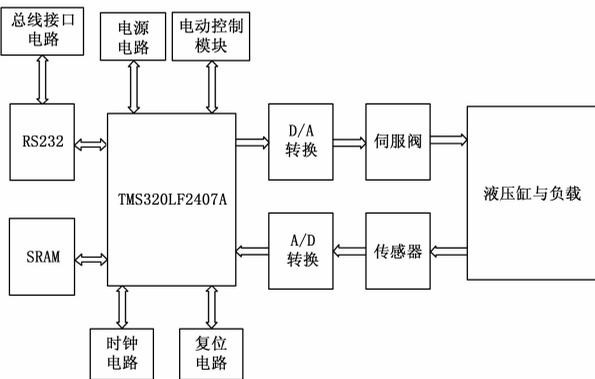


图 1 压力机电液伺服自动控制系统整体框架

1.2 机械变速压力机电液伺服自动控制模块

在图 2 中, 机械变速压力机电液伺服自动控制模块程序主要包含, 自编全浮点的运算和变参数 PID 程序, 内置 PID 指令的输出范围受限, 无法进行实时控制的问题得以解决。光栅尺把压力机下压盘的位移变换成 AB 两相脉冲, 而 PLC 根据中断的方式接受脉冲, 完成计数功能, 然后经软件四倍频, 提高位移的测量精度以及分辨率, 调理转换为提高加载力的测量与控制精度的重点。压力机电液伺服自动控制系统利用了高分辨率和高精度的压力传感器, 与调理转换模块。该压力传感器满量程精度是 ±0.1%, 调理转换将压力传感器应变信号放大, 历经 24 位 A/D 转换器将其转换成数字量, 且编码为浮点数, 利用其总线输出, 最终 PLC 根据通信的形式采集压力信号。上图中力的控制为半闭环, 是依据控制液压力缸的压力间接所控制的, 不过经过 0.3 级的标准测力仪进行标定后, 对压力机的控制完全可以达到误差为 ±1% 的要求。

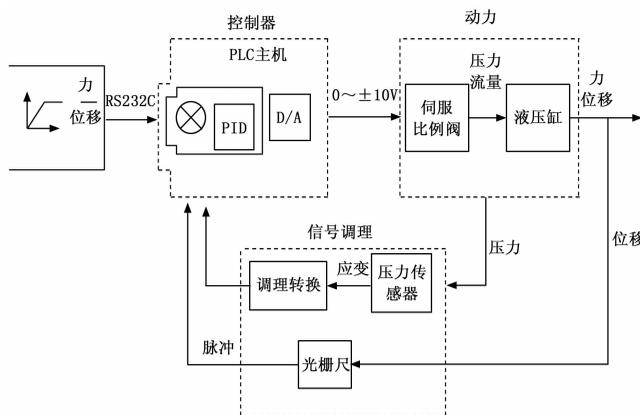


图 2 压力机电液伺服自动控制模块

1.3 机械变速压力机电液伺服自动控制系统电源电路

在图 3 压力机电液伺服自动控制系统电源电路中, 为了提高电压的稳定性以及精度, 采用了 LM2575 系列的稳压器完成 12~5 V 的 DC/DC 转化。LM2575 系列的稳压器具有使用简单的特点, 内部设置频率补偿, 并集成了固定振荡器, 具有比较完善的电流限制保护、热关断, 仅需添加少量的外围元件就能够组建高效的稳压电路, 其中的特性参数是: 最大的输入电压为 45 V, 输出电压为 5 V, 固定的震荡频率为 54 kHz, 输出的稳压容差为 4%, 转换的效率为 75%~88%, 工作的温度为 -40~125℃, 只需 4 个外围元件。

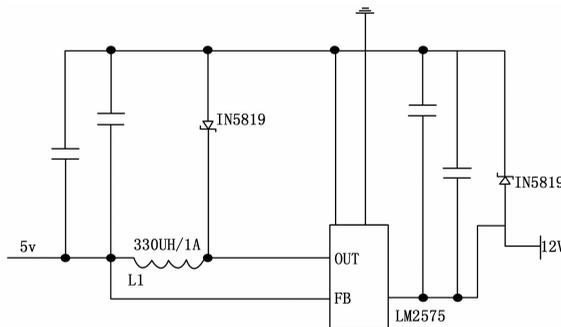


图 3 压力机电液伺服自动控制系统电源电路

1.4 机械变速压力机电液伺服自动控制系统时钟电路

在压力机电液伺服自动控制系统时钟电路中, 利用 16 MHz 晶振当作振荡源, 其中的两个引脚和 X1 与 X2 引脚连接形成闭合回路, 并配合内部的震荡工期生成控制系统的时钟信号。另外, 需在晶振两个引脚位置, 接入两个 20 pf 匹配电容和一个 1 M 匹配电阻。由此可提高机械变速压力机电液伺服自动控制系统的稳定性。

1.5 机械变速压力机电液伺服自动控制系统复位电路

该复位电路是在 TMS320LF2407A 进行初始化, 和运行过程中出现故障时, 使压力机恢复至原始状态的关键手段。压力机电液伺服自动控制系统复位电路分为: 电源上的电复位与手动复位。为了调试方便, 这里采用手动复位形式, 在控制系统运行时, 仅需按复位按钮, 就可以实现 TMS320LF2407A 的复位。

1.6 机械变速压力机电液伺服自动控制系统接口电路

在机械变速压力机电液伺服自动控制过程中, 可能会与压

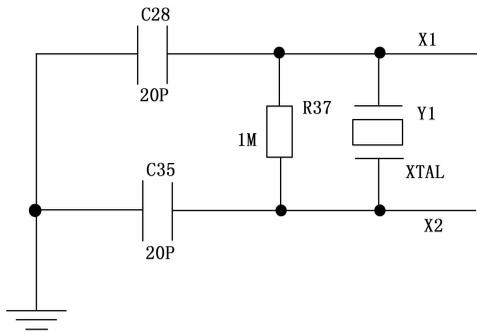


图 4 压力机电液伺服自动控制系统时钟电路

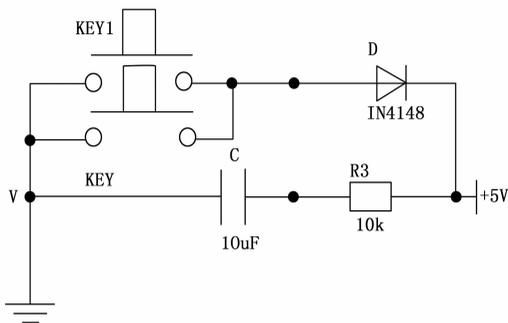


图 5 压力机电液伺服自动控制系统复位电路

力机自身其他部分控制单元数据交换，特别是和发动机进行通信交换得到发动机的转速信息时，需要和压力机的 CAN 总线连接。在 TMS320LF2407A 内部集成两个 32 位 CAN 功能控制器，其符合 CAN2.0B 协议标准，这大大减少了各部分通信时 CPU 的开销，仅需增加 CAN 收发器就可以完成 CAN 的通信功能，简化了外围电路。这里选取了 CTM1050 的 CAN 收发器所设计的 CAN 总线接口电路，CTM1050 其实是一款面积不到 3 cm²，内部聚集了全部的 CAN 收发器件和 CAN 隔离高速 CAN 收发器芯片，不需要再增加光耦以及 DC/DC 隔离等其他的元器件，可以直接和 CAN 控制器进行连接，这样就实现了将 CAN 控制器逻辑电平变换为 CAN 总线中差分电平的功能。在上图中的压力机电液伺服自动控制系统总线接口电路中，TMS320LF2407A 的 CAN 控制器发送端和接收端连至 CTM1050 芯片的 TXD 以及 RXD 引脚，然后经 CANH 和 CANL 连至 CAN 总线上，为抑制机械变速压力机信号在总线的传输畸变与地面反射，要在 CANH 与 CANL 之间接入匹配的电阻 R1。

2 机械变速压力机电液伺服自动控制系统软件设计

在以 TMS320LF2407A 为控制核心的机械变速压力机电液伺服自动控制系统中，其稳定性和系统响应速度等均十分重要，由此需要利用某种方式对其进行控制。PID 控制算法具有简单、易控、鲁棒性好而且精度高的特点，PID 控制算法是从模拟 PID 控制，发展到数字的 PID 控制器。PID 控制规律是机械变速压力机电液伺服自动控制系统中比较常见的控制规律，其结构图如图 7 所示。

依据图 7 的控制算法原理，确定了 PID 为线性控制，其控制量为给定量 $r(t)$ 与输出量 $y(t)$ 间的偏差 $e(t)$ ，表达式为：

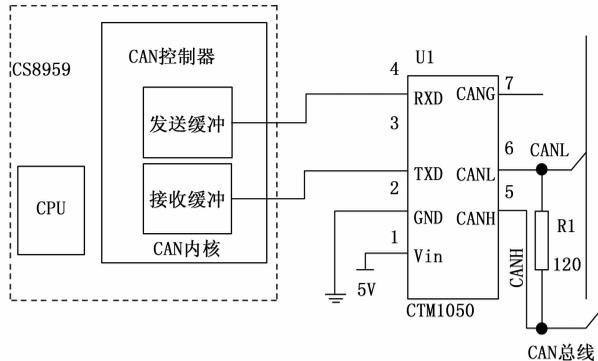


图 6 压力机电液伺服自动控制系统接口电路

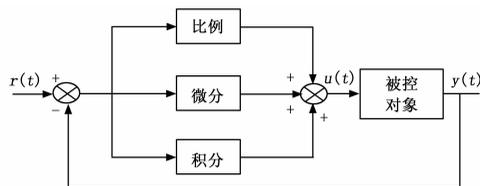


图 7 PID 控制原理

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

进而得到 PID 在机械变速压力机电液伺服自动控制规律为：

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D}{dt} \right] \quad (2)$$

式中， k_p 代表比例系数， T_i 代表积分时间常数， T_D 代表微分时间常数， k 代表采样序号， T 代表采样周期。根据式 (2) 可知，利用数字 PID 控制对机械变速压力机电液伺服自动控制的软件进行设计时，一般根据的是位置式的 PID 控制算法与增量式的 PID 控制算法。但机械变速压力机电液伺服自动控制系统是智能控制，所以连续 PID 控制算法无法直接使用，必须先进行离散化。

位置式的 PID 控制算法根据一系列的采样时刻点 kT 替换 PID 控制算法的连续时间量 t ，表达式为：

$$\begin{cases} t \approx kT (k = 0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e(k-1)T}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{cases} \quad (3)$$

根据上式，可以获得离散 PID 的表达式：

$$u(k) = k_p [ek] + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1)) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j)T + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (4)$$

式中， $e(k)$ 代表 k 时刻和 $(k-1)$ 时刻得到的偏差信号。通过上式可知，位置式的 PID 控制算法利用输出量直接对机械变速压力机执行元件进行控制，所输出的值和执行元件位置直接对应。

为了进一步对机械变速压力机电液伺服控制系统的软件进行高效设计，利用增量式的 PID 算法对压力机进行控制。增量式的 PID 控制算法输出量为控制系统的增量 $\Delta u(k)$ ，且根据递推原理获取：

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

$$\Delta u(k) = k_p[e(k) - e(k-1) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))]$$
(5)

通过上式可知，增量式的 PID 控制算法仅需知前三次的偏差，就能够获得增量。而在 PID 控制算法中，参数 k_p 、 k_i 、 k_d 对机械变速压力机电液伺服自动控制系统的性能有着决定性作用，下面分析它们对控制系统的影响。

首先分析的是比例系数 k_p ，它是影响机械变速压力机电液伺服自动控制系统响应速度和精度的关键参数， k_p 越大，系统的响应速度越快。

其次是积分系数 k_i ，它是影响机械变速压力机电液伺服自动控制系统稳态误差的重要参数， k_i 越大，系统积分速度越快，且稳态误差去除的也比较快。

最后是微分系数 k_d ，它是影响机械变速压力机电液伺服自动控制系统的动态性能的重要参数。PID 控制微分环节所反映的偏差信号变化趋势，和抑制偏差向多个方向的变化，能够降低超调，进而增加机械变速压力机电液伺服自动控制系统的稳定性。

本文 PID 的控制参数利用试凑法获取： $k_p = 5$ ， $k_d = 0.05$ ， $k_i = 0.1$ 。上述的 3 个参数在 PID 控制算法对机械变速压力机电液伺服自动控制系统软件设计中，起着关键的作用，而 PID 算法可对以上 3 个参数进行有效控制，达到最佳效益。

3 实验结果与分析

3.1 实验步骤

1) 通过对本文方法与文献 [7-8] 方法进行的实验，分析时间和输出量之间的关系，将对不同方法伺服系统的阶跃响应进行对比。

2) 根据输出量利用位置式的 PID 控制算法和增量式的 PID 算法对压力机进行控制效果的参数进行对比，分析电液伺服自动控制系统控制效果。

3.2 实验参数与环境

实验过程中，机械变速压力机中的参数：活塞内直径为 45 cm，活塞行程为 40 cm，阀阻尼比为 0.7，质量块为 250 kg，阀压降为 7 MPa，阀固有频率为 80 Hz，位移传感器的增益为 100，输入电流为 10 mA。将上述实验参数输入至 Matlab/Simulink 平台上，实验对象如图 8 所示，将不同方法应用至该试验对象，观察不同方法的整体性能。

1) 电液伺服自动控制系统的阶跃响应是判断机械变速压力机运行效率的重要指标，通过时间和输出量之间的关系，图 9 将对不同方法伺服系统的阶跃响应进行对比。

2) 在机械变速压力机电液伺服自动控制系统中加入 5 000 N 的扰动，观察不同方法扰动阶跃响应。

3) PID 控制算法中的 3 个参数 k_p 、 k_i 和 k_d 决定了控制系统的控制性能，如果它们的值选取得当，可以获得良好的控制效果。表 2 为本文方法迭代 5 次 3 个参数的变化。

3.2 实验结果

从图 9 可以看出，文献 [7] 方法与文献 [8] 方法控制的响应静差都较小，而且控制的响应速度缓慢且滞后，调整的时间较长。本文所提方法机械变速压力机电液伺服自动控制模块利用了自编全浮点的运算和变参数 PID 程序，内置 PID 指令的输出范围受限，解决了无法实时控制的问题，加快了响应速

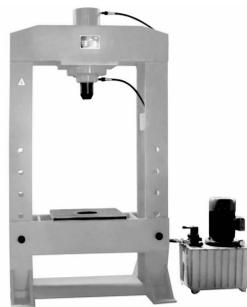


图 8 实验对象

度，调整的时间短，基本没有超调，控制效果良好。

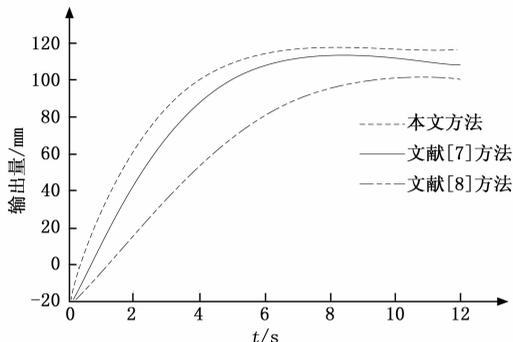


图 9 不同方法的伺服系统的阶跃响应对比

分析图 10 可知，加入 5 000 N 的扰动之后，本文方法的阶跃响应速度已然很快，而文献 [7] 方法提出了利用运动控制器对送料机械手的控制系统进行设计的策略，其中并没有设置合理的参数对其稳定性进行控制，但本文方法中分别利用了 3 个参数对控制系统进行控制，提高了扰动情况下系统的稳定性和响应速度。

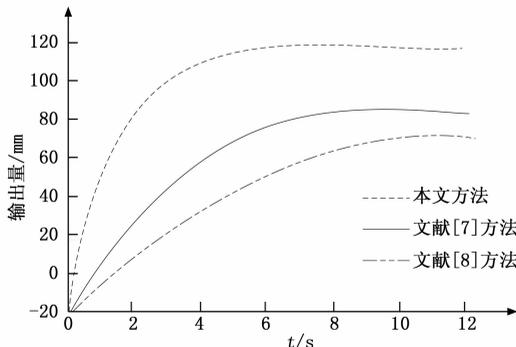


图 10 不同方法加入 5000N 扰动阶跃响应

表 2 本文方法对 3 个参数的控制效果

迭代数量/次	k_p	k_i	k_d
1	5	0.2	0.05
2	4	0.1	0.04
3	5	0.1	0.05
4	4	0.2	0.06
5	6	0.1	0.05

根据表 2 可知，本文方法可对 k_p 、 k_i 和 k_d 进行很好地控制，本文方法利用位置式的 PID 控制算法根据输出量直接对机

整,比 IP 控制器上升比较快,超调量小,但稳态有静差,如图 7 所示。

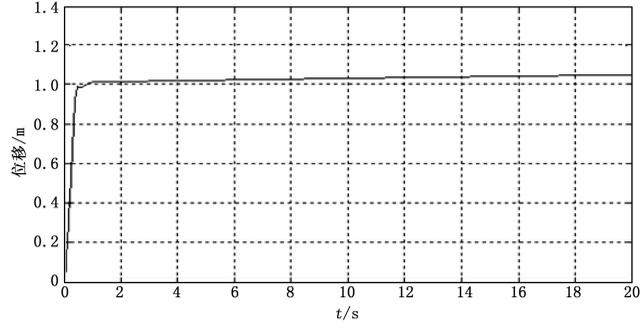


图 7 模糊控制器的位置输出仿真实验结果

采用模糊/IP 控制器,当质量发生 10 倍变化的情况下,系统输出响应如图 8 所示。

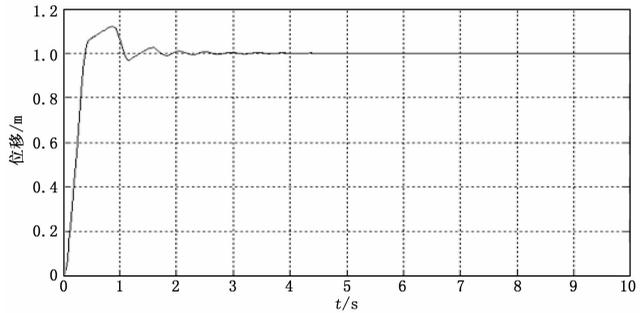


图 8 模糊/IP 位置控制器的位置输出响应

由图 8 可见,应用 IP 控制器虽然波形很快趋于稳定,但是在达到稳定状态前有一段非常明显的超调和振荡,且幅度较大,显然这样难于满足永磁直线电机位置伺服系统的高精度要求,甚至对电机造成很大的损害;采用模糊控制器虽然最终达到了稳定,但是精度不好,主要是专家经验不是很丰

(上接第 76 页)

机械变速压力机执行元件进行控制,并进一步通过增量式的 PID 算法对压力机进行控制,由此可以很好地控制上述 3 个参数。

4 结束语

电液伺服自动控制系统广泛应用至军事以及民用等各个方面,它具有响应速度快、输出功率大、控制精度高等特点,而在机械变速压力机上的应用也十分常见,本文利用软硬件结合的方式对机械变速压力机电液伺服自动控制系统进行设计,具有良好地控制性能。但依然需要对某些方面做进一步提高:

- 1) 对于系统中存在的多输入及多输出现象应做进一步研究;
- 2) 应对自动控制系统的设计与实现的成本进行控制,从而进一步提高本文方法的整体性能;
- 3) 随着科技的日新月异,机械变速压力机电液伺服自动控制系统也应随着时代的进步而进步,更好地服务大众。

参考文献:

[1] 郭艳艳,邓显文. 无级变速器的电液伺服波动规律分析 [J]. 科技通报, 2015, 31 (12): 266-268.

富,模糊控制对于小误差的反应比较迟钝,模糊规则及其隶属函数的设置有待改善,模糊控制对高精度控制效果不是很理想;而模糊/IP 控制器,不仅能达到稳定状态,相比单纯的 IP 控制超调现象得以缓解,也相比单纯的模糊控制将达到良好的精度,能够满足变参数系统的控制,控制效果良好。

通过仿真实验分析可以得到这样的结论,IP 控制器和模糊控制器具有各自鲜明的特点,对于控制要求的满足程度各不相同,但是模糊/IP 控制器可以在结合两者各自的优点的同时,很好的满足控制要求。

5 结论

本文针对高精度永磁直线同步电机位置伺服控制系统,考虑系统参数和外界扰动的变化,研究了模糊/IP 位置控制器的设计,包括输入、输出变量的选取、模糊子集隶属函数和模糊控制规则的建立等,仿真实验结果表明了模糊/IP 位置控制的混合控制方法优于单独的模糊控制器或 IP 位置控制器,具有良好的动态和静态性能。

参考文献:

[1] 周济. 智能制造 中国制造 2025 的主攻方向 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (17): 2273-2284.

[2] 蔡锐龙,李晓栋,钱思思. 国内外数控系统技术研究现状与发展趋势 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35 (4): 493-500.

[3] 刘金琨. 智能控制 (第三版). 北京: 电子工业出版社, 2011.

[4] Chaudhary H, Panwar V, Prasad R. Adaptive neuro fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016; 27 (6): 1299-1308.

[5] 郭庆鼎,周悦,郭威. 高精度永磁直线同步电动机伺服系统鲁棒位置控制器的设计 [J]. 电机与控制学报, 1998; 2 (4) 208-212.

[6] 于浩祥,初红霞,王希凤. MATLAB 实用教程——控制系统仿真与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[2] 樊索,莫健华,叶春生. 伺服压力机机械负载模拟系统的设计 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34 (6): 877-880.

[3] 那奇,韩宝玲,罗庆生,等. 液压驱动型四足机器人电液伺服控制系统仿真建模与实验分析 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3398-3401.

[4] 徐建,余常文,黄华,等. 抗扰控制器的理论与仿真 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (8): 118-124.

[5] 宋世哲,邓志良. 基于 PLC 与电液伺服的编环机控制系统设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (21): 143-146.

[6] 陈红兵,孙运吉,邵会兵. 基于多数据源的电液伺服机构模型可信度评估 [J]. 计算机仿真, 2017, 34 (3): 29-32.

[7] 王延年,丁恒. 多工位冲压生产线自动送料机械手控制系统设计 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (6): 55-60.

[8] 鲁文其,阮建国,金海,等. 曲柄伺服压力机数字化仿真系统开发及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21 (5): 1334-1342.

[9] 洪瑞,叶春生. 基于牛顿迭代算法的伺服压力机控制系统研究 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (12): 82-87.

[10] 黄静,李长春,延皓,等. 改进 HHT 在线滤波算法在电液伺服系统控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33 (8): 1096-1104.