

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.12.014

基于PID控制的粉末成型机下冲回弹装置设计*

孙维超¹, 陆宝春¹, 孙祥青^{1,2}

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 2. 扬州市海力精密机械制造有限公司, 江苏扬州 211407)

摘要:针对目前机械式全自动粉末成型压机下冲回弹装置中普遍采用的“定量供油装置”出现的抗污染能力差、回弹行程不易调节、可靠性差等问题,进行了分析研究,提出了一种采用PLC作为PID控制器,伺服比例阀作为先导阀,配合距离传感器所组成的高精度下冲定量回弹闭环控制系统。设计中计算了液压缸、伺服比例阀的传递函数,并对PID控制器进行了Matlab仿真,同时对系统进行了建模和实际调试。研究表明,该系统运行稳定、响应速度快、可靠性高、操作方便,能够提高产品的质量,为今后机械式粉末成型压机下冲定量回弹装置的设计和改造提供了设计依据,对于提高机械式粉末成型机的产品合格率具有一定的现实意义。

关键词:粉末成型机;伺服比例阀;PID控制器

中图分类号:TH39;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)12-1492-04

Resilient device of automatic powder molding machine based on PID controller

SUN Wei-chao¹, LU Bao-chun¹, SUN Xiang-qing^{1,2}

(1. School of Mechatronics Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094 China;

2. Yangzhou Haili Precision Machinery Manufacturing Co., Ltd, Yangzhou 211407 China)

Abstract: Aiming at the resilient device of the lower punch in automatic powder molding machine, poor antipollution ability, uneasy travel adjustment and poor reliability were researched, and a new closed-loop control system based on PLC as a PID controller, servo proportional valve as a pilot valve and a distance sensor was proposed. The transfer function of hydraulic cylinder and servo proportional valve were tested and the PID controller was simulated by Matlab. The results indicate that the system operates stably and reliably, with better real-time performance and has an important meaning on design of the resilient device, which can improve the quality and raise the qualified rate of products.

Key words: powder molding machine; servo proportional valve; PID controller

0 引言

随着汽车产业的快速发展,中小型零部件需求不断提升,机械式粉末成型机作为中小型零部件快速成型中的重要生产装备,其智能化升级改造的需求日益迫切^[1]。在压机压制产品成型过程中,模架的下一冲和下二冲受力同时被压缩,由于下一冲与下二冲的长度不同,弹性回复量相应地也存在差异。因此弹性回

复之后,下一冲的上表面与产品轴肩面产生一定量的间隙。产品出模是通过阴模向下运动实现,出模时阴模内壁与产品侧壁之间会产生巨大的摩擦力,该摩擦力形成力臂,从而在出模时拉碎产品,降低了产品的合格率,增大了生产成本^[2-3],因此必须尽可能减小回弹间隙。

传统的下冲回弹补偿机构采用电磁换向阀,通过手动调节螺母控制定量油缸活塞的运动行程而控制顶出油缸的顶出量。这种手动的调节方式需要操作人员在批量压制前通过经验进行多次调节与试压^[4-5],来获

收稿日期:2016-06-27

基金项目:江苏省重点研发计划资助项目(BE2015125)

作者简介:孙维超(1992-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事机械设备控制与监测方面的研究。E-mail:zdhxsly@njit.edu.cn

得合适的压制参数。这大大增加了操作人员的工作量和调试时间。目前国内生产的中、大吨位压机,主要采用这种手动旋钮调节方式,如宁波汇众粉末机械制造有限公司的 FY 系列高精度粉末成型机;国外一些大吨位压机也有采用交流伺服控制,但造价较高,如德国道尔斯特公司的 TPA 系列高效自动压机。

本研究将采用三菱 FX3U 系列 PLC 作为 PID 控制器,伺服比例阀作为先导阀,配合距离传感器形成一套闭环的控制系统,替代国内传统的“定量供油装置”,实现对下冲回弹行程的控制。

1 回弹装置负载固有频率计算

根据液压闭环控制系统设计要求: $f_v \geq 3f_L$ 。伺服比例阀的相频宽 f_v 至少应为负载固有频率 f_L 的 3 倍以上^[6-9]。其中,负载固有频率 f_L 可以由下式进行计算:

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\beta A^2}{MV}}$$

(1)

根据机械式粉末成型压机的设计要求可知:活塞面积 $A_c = 0.008 \text{ m}^2$;油缸行程 $S = 0.01 \text{ m}$;油缸容积为 $V = 8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$;油液弹性模量 $\beta = 700 \text{ MPa}$;机械式粉末成型压机由于吨位不同,模架的质量存在较大差异,由于回弹装置只有在较大吨位压机上才会安装,且由两个液压缸支撑模架回弹,因此负载质量取最大压制力的一半 $M_f = 175 \times 10^3 \text{ kg}$,模架质量取 $M_f = 1 \times 10^3 \text{ kg}$,总质量为 $M = 176 \times 10^3 \text{ kg}$ 。带入上式得负载的固有频率为: $f_L = 18 \text{ Hz}$ 。

本研究采用 MA-DLHZO-T 系列伺服比例阀作为先导阀,该阀 $\pm 50\%$ 输入信号时, $f_v \approx 90 \text{ Hz} \geq 3f_L$,满足设计要求。该阀是直动式滑阀结构,比例电磁铁后端刚性连接一个 LVDT 位置传感器,根据放大器输入电信号的大小提供方向控制及无压力补偿的流量控制。由于该阀具有在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,零点漂移 $\leq 1\%$ 等特点,特别适合作为闭环系统的控制元件。

2 回弹装置位置反馈数学模型建立

机械式粉末成型压机下冲回弹装置位置反馈伺服控制系统的结构框图如图 1 所示。

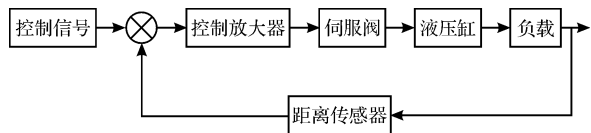


图 1 伺服控制系统结构框图

该系统实际为最常见的闭环反馈液压控制系统。

安装在下冲台上的距离传感器采集得到的电流值通过 FX2N-A/D 模块转换成电压值,在 PLC 中通过计算公式转换成实际距离值,并在触摸屏上实时显示下一冲、下二冲当前位置。操作人员输入调节量后,通过 PLC 内部的 PID 控制器计算调节量,以电压值作为控制量,输入伺服比例阀中。伺服比例阀根据得到的电压值控制阀芯开口的方向和大小。液压缸的活塞杆推动负载平台的上下运动。

下冲回弹装置位置反馈伺服控制系统数学模型如图 2 所示。

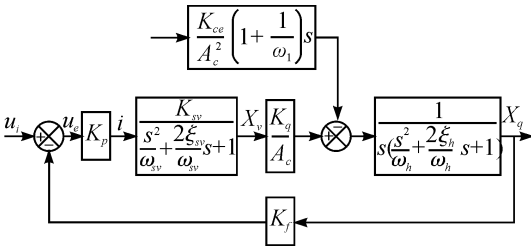


图 2 下冲回弹装置位置反馈伺服控制系统模型

3 各项参数确定

3.1 液压伺服比例阀传递函数确定

对于选用的 MA-DLHZO-T 系列伺服比例阀,其额定压力可以达到 31.5 MPa ,额定流量 q 为 100 L/min ,阀芯最大位移为 $x_v = 3 \text{ mm}$ 。当阀口压降 $\Delta P = 3 \text{ MPa}$ 时,对应流量为 9 L/min(P-T) ;当阀口压降 $\Delta P = 7 \text{ MPa}$ 时,对应流量为 14 L/min(P-T) 。伺服比例阀传递函数计算方法如下:

- (1) 伺服比例阀阻尼系数 $\xi_{sv} = 0.7$;
- (2) 伺服比例阀固有频率 $\omega_{sv} = 500 \text{ rad/s}$;
- (3) 由于该伺服比例阀为线性阀芯,且最大输入电压为 $V = 10 \text{ v}$,因此伺服比例阀的流量增益计算如下^[10]:

$$K_{sv} = \frac{x_v}{V} = 0.0003 \text{ m/v}$$

(2)

由上所述可知,伺服比例阀传递函数可以用下式确定:

$$G_1(s) = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} = \frac{0.0003}{\frac{s^2}{500^2} + \frac{1.4}{500}s + 1}$$

(3)

由于本研究选用的 MA-DLHZO-T 型伺服比例阀的最大输入信号为 $-10 \text{ V} \sim +10 \text{ V}$,需要加入饱和度模块,饱和度的上、下线分别取 $+10$ 和 -10 。

3.2 阀控液压缸的传递函数确定

- (1) 阀控缸的流量增益

即为伺服比例阀的流量增益。可以用下式表示:

$$K_q = \frac{q}{x_v} = 0.556 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

同时可以算出: $K_q/A_c = 69.5$ 。

(2) 总流量压力系数

其中阀芯与阀套间隙的行向间隙 $r_c = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$; 对于全开口阀, 阀面积梯度 $w = \pi d = 7 \times 10^{-3} \times \pi$; 油液的动粘度 $\mu = 1.4 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。因此: $K_c = \pi w r_c^2 / 32 \mu = 3.86 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N} \cdot \text{s}$ 。

总流量压力系数: $K_{ce} = K_c + C_{ip}$ 。

液压缸总泄漏系数相对小的多, C_{ip} 可以忽略不计。

(3) 阻尼系数 ξ_h

液体的弹性模量 $\beta_e = 0.7 \times 10^3 \text{ MPa}$; 油缸面积 $A_c = 0.008 \text{ m}^2$; 初始容积 $V_0 = A \times s = 8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$; 液压缸活塞等效质量 $M_t = 1.76 \times 10^5 \text{ kg}$ 。阻尼系数由下式确定:

$$\xi_h = \frac{K_{ce}}{A_c} \sqrt{\frac{\beta_e M_t}{V_0}} = 0.6 \quad (5)$$

(4) 容积滞后频率 ω_1

$$\omega_1 = \beta_e K_{ce} / V_0 = 33.775 \text{ rad/s} \quad (6)$$

(5) 液压谐振频率 ω_h

$$\omega_h = \sqrt{\frac{\beta_e A_c^2}{V_0 M_t}} = 56.41 \text{ rad/s} \quad (7)$$

(6) 阀控缸传递函数 $G_2(s)$

阀控缸传递函数可以通过下式计算:

$$X_p(s) = \frac{\frac{K_q}{A_c} X_v(s) - \frac{K_{ce}}{A_c} \left(1 + \frac{1}{\omega_1 s}\right) F_L(s)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (8)$$

扰动系数为 $K_{ce}/A_c^2 = 0.06 \times 10^{-6}$, 相对于 K_q/A_c 小得多, 因此可以忽略不计^[11]。则阀控缸的传递函数可简化至如下式所示:

$$G_2(s) = \frac{X_p(s)}{X_v(s)} = \frac{\frac{K_q}{A_c}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} = \frac{69.5}{s \left(\frac{s^2}{56.41^2} + \frac{1.2}{56.41} s + 1 \right)} \quad (9)$$

其中, 输出为液压缸的位移 $X_p(s)$, 输入则是伺服比例阀的位移 $X_v(s)$ 。

3.3 距离传感器传递函数参数

对于机械式粉末成型压机一下冲和二下冲之间的

弹性回复的差距最大不会超过 10 mm, 即距离传感器最大输入量取 10 mm。距离传感器输出电流通过 FX2N-4AD 模块转换成输出最大为 10 V 的电压信号。距离传感器增益为: $K_f = 1\,000 \text{ V/m}$ 。

4 PID 参数调制及动态仿真分析

本研究在 Matlab/simulink 中建立的传递函数如图 3 所示。

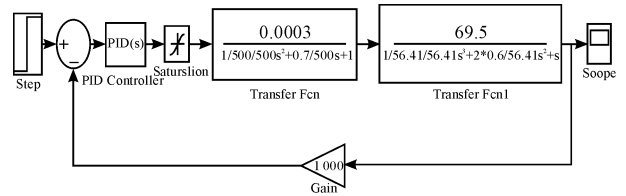


图 3 simulink 仿真图

本研究对 PID 参数进行调节, 发现当比例系数增加时, 系统的响应灵敏度增大, 动态跟踪误差也减小了, 在有静差的情况下有利于减少静差。但过大的比例系数会使系统有较大的超调, 产生振荡, 稳定性受到破坏。增大积分系数有利于减少超调, 减少振荡, 使系统更加稳定, 但过大的积分系数会使系统变得不稳定。增大微分系数有利于加快系统的响应, 使超调量减少。

多次调节后, 得到的阶跃响应输入时的时域响应曲线如图 4 所示。

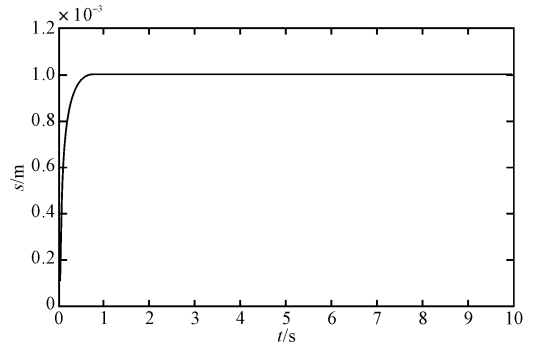


图 4 时域响应曲线

此时, $P = 0.4$, $I = 0.02$, $D = 0.01$, 系统闭环响应时间约为 800 ms, 最大超调量约为 0.199%, 开环模稳定裕度为 22.2 db (86.3 rad/s), 相稳定裕度为 69.8° (0.884 rad/s), 位移变换平稳, 总体符合系统的要求。

需要注意的是在图 4 的尾部, 系统有微小的振荡, 这是因为液压缸有一个死区, 死区的油量越大, 系统的不稳定性越高。该系统中死区对不稳定性的影响极小^[12-14]。

开环函数伯德图如图 5 所示。

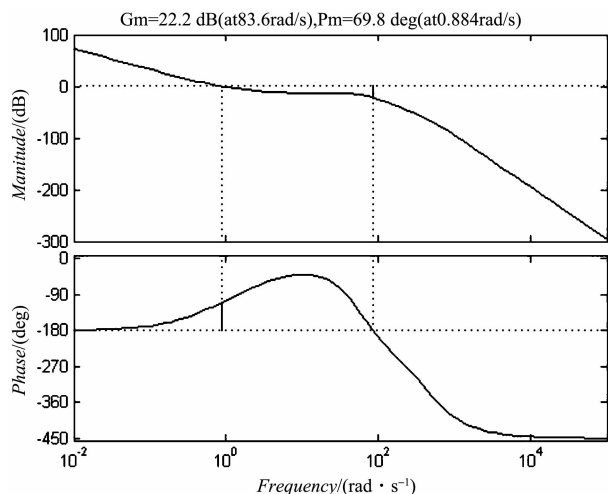


图 5 伯德图

5 设备调试及结果分析

本研究采用压机现用的三菱 FX3U 系列 PLC 作为 PID 控制器,在触摸屏上根据下一冲、下二冲当前位置,输入下一冲、下二冲的调节量,进行现场调试,实物压机如图 6 所示。



图 6 现场压机图

本研究以压制常用的汽车齿轮轮毂作为测试对象,经过一段时间的生产压制,产品不合格的概率大大降低,达到了设计要求。降低了生产成本,提高了压机的性能。

由于采用的是普通的 PID 控制,比例控制项会在系统开机、停车或大幅变换时,频繁的加减速和换向,再经过积分项的累加后,会使控制器输出超出执行机构所能承担极限的输出值,造成很大的超调和长时间的振荡。该系统由于 PLC 的限制,采用的是设定饱和值的方法,使得调节值不会超过系统的调节能力,但是

同时也在一定程度上降低了控制质量。如果使用单片机进行控制,可以在当控制量进入饱和区后,将增大积分项的累加忽略,只执行减小积分项的累加。在惯性环节中用带惯性环节的实际微分器替代纯微分的方法,会收到更好效果。但这会增加压机控制成本。

6 结束语

本研究提出了基于 PID 控制的粉末机下冲回弹装置的设计方案。实践证明,该系统运行稳定、响应迅速、可靠性高、操作方便,有很大实用价值。

参考文献 (References):

- [1] 卫俊俊. 粉末成型机远程监控与维护系统的研发[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2015.
- [2] 韩凤麟. 粉末冶金零件压制成形中裂纹的成因与对策[J]. 粉末冶金技术,1999,17(3):209-215.
- [3] 陈鼎,张倩霞,宁荣,等. 粉末冶金铝合金的疲劳裂纹扩展行为[J]. 材料导报,2014,28(17):10-14.
- [4] 严培义. 机械式粉末成形机及定量供油系统[P]. 中国专利:CN103522575A,2014-01-22.
- [5] 严培义. 粉末成形机下冲回弹装置定量供油系统[P]. 中国专利:CN103522584A,2014-01-22.
- [6] 张贵,黄静华,夏永胜. 基于 PLC 的电液比例伺服系统模糊 PID 控制研究[J]. 机床与液压,2014,42(1):83-85.
- [7] 须民建,李文峰,廖强,等. 液压系统伺服比例阀数字控制技术[J]. 液压气动与密封,2015,33(3):32-34.
- [8] 骆志云,张春华,王铃. 挖掘机器人电液比例位置自调整 PID 控制技术研究[J]. 兵工自动化,2014,33(10):72-76.
- [9] 刘国平,夏五星,齐大伟,等. 电液比例阀独立颤振的叠加方法研究[J]. 机床与液压,2014,42(5):49-51.
- [10] SAMAKWONG T, ASSAWINCHAICHOTE W. PID Controller Design for Electro-hydraulic Servo Valve System with Genetic Algorithm[J]. *Procedia Computer Science*, 2016(86):91-94.
- [11] LIU C, JIANG H. A seventh-order model for dynamic response of an electro-hydraulic servo valve[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014,27(6):1605-1611.
- [12] 吴宏鑫,沈少萍. PID 控制的应用与理论依据[J]. 控制工程,2003,10(1):37-42.
- [13] MICCIO M, COSENZA B. Control of a distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers[J]. *Journal of Process Control*, 2014,24(5):475-484.
- [14] 王蕾,宋文忠. PID 控制[J]. 自动化仪表,2004,25(4):1-6.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

孙维超,陆宝春,孙祥青. 基于 PID 控制的粉末成型机下冲回弹装置设计[J]. 机电工程,2016,33(12):1492-1495.

SUN Wei-chao, LU Bao-chun, SUN Xiang-qing. Resilient device of automatic powder molding machine based on PID controller[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(12):1492-1495.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>