

doi: 10.7690/bgzdh.2017.07.022

用于火工品压制的伺服压力机控制系统

赵建抒, 刘 辉

(中国兵器装备集团自动化研究所装药中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对目前国内火工品生产过程中普遍使用的几种压药方式存在压力精度低、稳定性差等问题, 设计 1 台整机防爆的精密电子伺服压机, 并重点研究作为压机核心的控制系统的搭建和压力控制算法设计。基于某类火工品压药过程中的具体工艺要求及技术指标, 确定该型号压机的整体结构及电气控制系统设计, 结合压药过程中压力被控对象的特点, 设计一种基于变速积分 PID 算法的压药压力控制方法, 并进行压药过程实验。试验结果表明: 该算法的压药压力控制效果明显优于经典 PID 算法, 成功实现了压机有效工作区间内输出压力 0.3% 的技术要求。该防爆伺服压机已成功应用于我国某厂的火工品压制生产中。

关键词: 火工品; 电子伺服压机; 压力控制; 变速积分 PID

中图分类号: TJ410.5⁺2 **文献标志码:** A

Study on Servo Press Control System for Pressing of Initiating Explosive Device

Zhao Jianshu, Liu Hui

(Center of Ammunition Charging, Automation Research Institute of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the low accuracy, poor stability and other problems of common use pressing modes in Chinese initiating explosive device manufacturing process, design an overall explosion-proof electronic servo press device, and focused on the building of control system and the design of pressure control algorithm. Based on the specific process requirements and technical specifications of a certain initiating explosive device pressing process, determined the overall structure and design of the electrical control system for the press, combined with pressure controlled target characteristics in the pressing process, designed a pressure control strategy which is based on the PID with variable speed integral, and carried out the pressing test. The results showed that the effect of the method in this paper is obviously better than the classical PID algorithm, output pressure in the effective working range successfully achieved the technical requirements which are forced accuracy of 0.3%, and the explosion-proof electronic servo press has been successfully used in the initiating explosive device pressing process of a Chinese factory.

Keywords: initiating explosive device; electronic servo press; pressure control; variable speed integral PID

0 引言

火工品作为武器弹药和其他爆燃系统的关键组件, 对于其装配主体性能有着决定性的影响, 因此保证火工品质量就变得尤为重要。火工品的质量除了与所用材料、产品设计等因素有关外, 更重要的是必须有可靠的生产工艺保证, 这一点更是在实际生产中被放大。而在火工品的整个生产工艺中, 压药工艺是其生产过程中最为关键的工艺之一^[1]。压药过程中的压力精度、加压速度和保压时间等参数都对火工品的质量有着重要影响。目前, 我国大多数火工品厂仍普遍采用手扳杠杆压力机、气动压力机或秤式杠杆压机进行小吨位的火工品压制。上述压药方式普遍存在压力精度及稳定性差, 更换产品时设备调整不方便、数字化程度低等缺点, 最终导致生产出来的火工品良品率低, 且安全隐患多^[2]。

因此研制出可靠性高、柔性好的火工品压制生产设备对提高我国火工品生产能力和水平具有非常重要的意义。笔者所在团队基于当前火工品生产压制现状, 创新性地设计了 1 台整机防爆的精密电子伺服压机。该压机能够达到 0.3% 以上的压力精度, 其压力在 100~2 000 kg 范围可调, 保压时间可以随意设定, 真正实现了火工品压制过程中的柔性化和数字化。而上述性能指标的成功实现是以一个高效稳定的控制系统为核心和基础的。基于此, 笔者重点研究了该压机的控制系统搭建及压力控制算法设计, 使得压力控制精度等性能指标能够满足设备的技术要求。

1 设备简介(如图 1)

该型号防爆精密电子伺服压机的机械部分主要

收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-04-10

作者简介: 赵建抒(1990—), 男, 内蒙古人, 满族, 硕士, 助理工程师, 从事计算机应用技术研究。

由机架、压机本体、防爆罩和防尘罩等组成，其中压机本体是该设备的核心功能组件，用以实现火工品压制过程中的压力精密控制输出。压机本体采用 4 柱布置形式，中间横梁导向，伺服电缸布置在压机上横梁上，防爆伺服电机与电缸水平布置安装。中间横梁上安装有高精度防爆压力传感器，在伺服电缸的驱动下能随中间横梁一起运行，伺服压力机的控制器接收其压力检测值，通过算法的运算处理，实现压制过程中输出压力的实时高精度闭环控制。

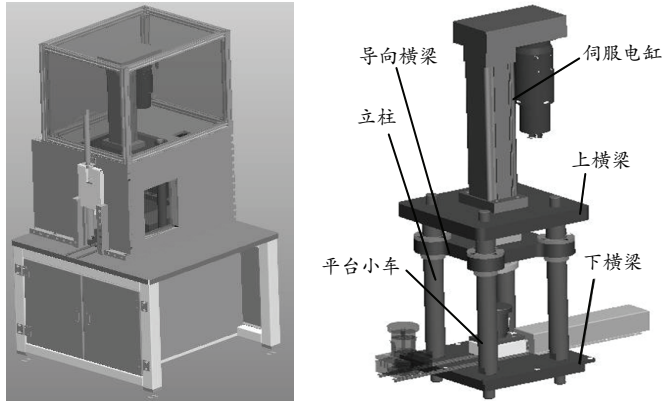


图 1 防爆精密电子伺服压机 3D 结构

2 控制系统搭建

该型防爆伺服压力机的工作原理框图如图 2。

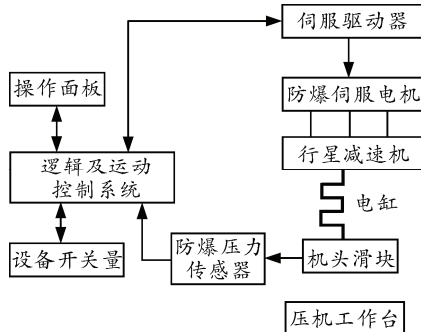


图 2 防爆精密电子伺服压机工作原理

防爆精密电子伺服压机主要由以下几个功能组分构成，分别实现设备的控制、检测、执行等任务。

1) 逻辑与运动控制系统：主要完成人机交互、信号采集和控制输出、压制压力的闭环控制以及其他系统所需的逻辑控制；

2) 伺服驱动器：响应运动控制器的控制输出信号并转换为伺服电机可以接受的驱动输出，完成电机端的半闭环运动控制；

3) 防爆伺服电机：防爆伺服压机压力输出的动力源；

4) 防爆压力传感器：检测机头滑块端承受的实时压力，并转化为运动控制器所能够识别的标准电

信号，作为压力闭环控制系统的反馈输入；

5) 其他机械装置：主要包括减速增力机构、电缸等。

基于客户需求以及设备结构设计思想，在整个控制系统的设计上，笔者采用了高可靠的 PC-Based 系统来构建整个控制系统，利用基于 EtherCAT 的工业以太网总线实现信号、数据高速可靠的传递。将当前世界最先进的基于 PC 运动控制技术和现场实时以太网总线技术相结合，该系统打破传统控制器的概念，通过软硬件的结合，将具有主流处理器速度的 IPC 作为运动控制、数据采集以及人机界面的主系统，通过高速的 EtherCAT 现场总线将开放灵活、功能齐全的 I/O 模块系统、伺服电机驱动控制单元连接起来，构成运算处理速度更快、模块更精简、集成度更高的控制系统方案。整个控制系统总体构成如图 3 所示。

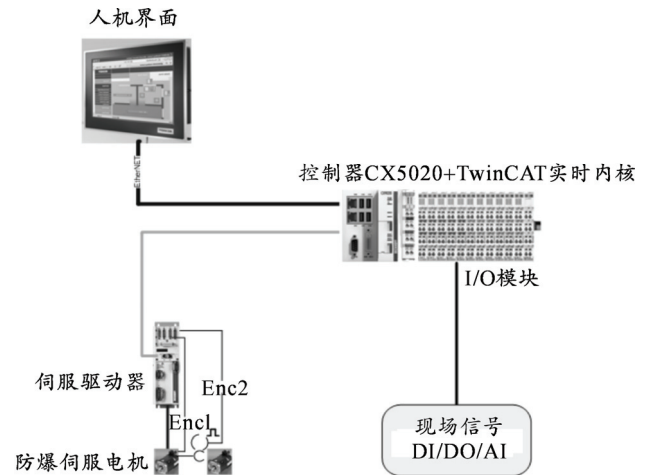


图 3 控制系统总体构成

该方案采用 BECKHOFF 嵌入式 PC 控制器 CX5020 作为系统的主控制器，通过 EtherCAT 总线连接 I/O 扩展模块，能够接入压力反馈输入信号，并通过 EtherCAT 总线控制伺服电机，实现输出压力的闭环控制。人机界面 (human machine interface, HMI) 可显示和记录压力实时变化曲线，有效地保证了整个伺服压机的控制精度。该系统具有以下特点：

1) CX5020 控制器为高性能的嵌入式 PC，使用实时运动控制内核，集成了逻辑控制和运动控制，较传统的 PLC+运动控制器的方式，简化了系统的组成模块；

2) 该控制方案具有高实时性，控制周期为 100 μs 左右，较 PLC 毫秒级的控制周期而言，其实时性有了较大提高；

3) 相对于传统的解决方案，系统结构简单，易

于维护和管理；

4) 可靠性高，采用总线控制方式，减少了控制计算机与伺服控制器和现场 I/O 信号之间的直接联系，大大减少了接线和走线的工作量，有效降低安装调试和维护成本，提高系统可靠性。

3 压制过程压力控制方案设计

根据不同火工品生产工艺的要求，为了满足柔性化的设计原则，本系统兼具定压控制和定(限)位控制 2 种常见的火工品压制成型方式。定压控制方式是指当压头运动到工件所在位置时，施以指定的压力并保持一定的时间后，即完成对工件的定压控制。定(限)位控制方式则是指当压头以一定的速度运动到工件的极限位置(限位块)后保持一定时间，即完成了对工件的定位压制。其中，定(限)位控制方式简单、易于实现，在此不做详细阐述，下面主要就定压控制方式的压力精确控制策略进行说明。

伺服电机系统包含扭矩控制模式、速度控制模式和位置控制模式 3 种工作方式，其中扭矩控制模式由于响应速度要求较高，不适合用于系统中靠电机驱动的其他参数闭环控制，以数控机床为代表的伺服系统典型应用场合，多使用速度模式或位置模式来实现执行机构速度、位置等参数的控制。结合伺服压机的工作特点和技术要求，最终采用伺服驱动系统的位置模式来实现执行机构位置和压力的精密控制。

针对本台压机，可以将其工作过程分为 4 个阶段，即快速下冲阶段、材料建压阶段、成型保压阶段和快速返回阶段，运动过程的不间断变速曲线如图 4 所示。

1) 下冲阶段。

在该阶段压头没有接触到需要被压制的物料，此时的压力传感器反馈回的压力值极小，可以近似为零，按照工艺要求此时压机应该以较高的速度下压，降低压机空行程的运行时间，以提高生产节拍。

2) 材料压制阶段。

该阶段压头已经接触到需要被压制的物料，此时压力传感器的反馈压力值呈现指数式的增加，压力值的变化率越来越大，为了保证压制过程的平稳性，防止出现压力过冲现象，应将该段的下压速度大幅降低，并且使得压头的下压速度和承受的反向压力成反比关系，即压力越大速度越低，当压力值达到工艺设定值时，压头应可靠停止。

3) 成型保压阶段。

成型保压阶段是指在压机实际输出压力满足系统精度要求后，为了保证火工品成型后的密度均匀性等工艺指标要求，需要压机稳定输出设定压力作用于待压制的火工品一定时间，即工艺要求产品的保压时间，是整个压制过程的关键效能阶段，需要压机能够对外界的扰动做出快速响应，保证整个阶段的机头压力精确平稳输出。

4) 快速返回阶段。

该阶段压机已经完成对物料的压制，此时压机快速提升，机头压力为零。

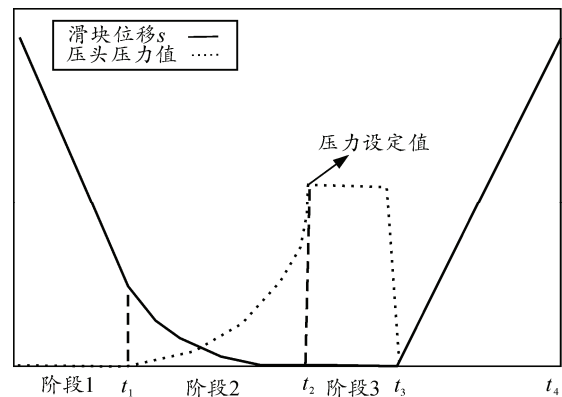


图 4 速度与压力变化曲线

基于上述说明和分析，采用伺服系统的位置模式，通过调节伺服电机相对运动距离和运动速度来调整压机滑块的下压位置和速度，进而实现滑块压力的间接控制。控制系统的框图如图 5 所示，是一个设定值控制系统，系统的输入为工艺过程中的压力设定值，被控量为伺服压机的压力输出值。

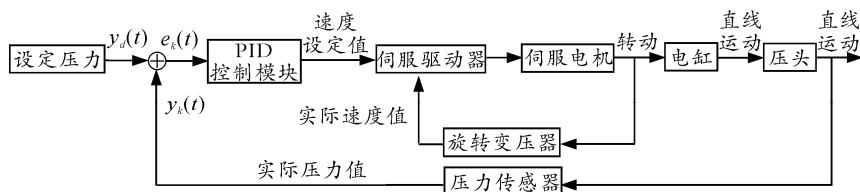


图 5 压力控制系统框图

该控制系统为双闭环的控制系统，系统内部的闭环在伺服驱动器内完成，用来实现对电机转速的

实时闭环控制，是伺服系统本身具有的半闭环。外部的闭环以被控压力作为控制对象，实现了对压机

输出压力的全闭环控制。该闭环的控制器为嵌入式 PC 中编译的控制算法模块,压力检测系统采用了高精度的压力传感器和模拟信号高速采集模块,保证了反馈环节的精度和效率。控制器将压力设定值和实际压力值做差,通过内部的算法计算处理,得到当前状态下伺服电机的移动距离值,由伺服驱动器输出给定的控制值驱动电机转动,从而控制直线电缸完成对工件的压制,使得电缸实际输出压力值逐渐靠近压力的设定值,直到满足规定的压力精度。

在图 5 所示的压力控制系统中,伺服电机系统、压力传感器以及执行机构等组件,其性能已经确定,压力控制精度主要受控制算法的性能影响。因此设计一个稳定高效的控制器就显得至关重要。

PID 控制算法作为最长盛不衰的经典控制算法,问世至今已有近 80 年历史,具有算法简单、鲁棒性好和可靠性高等优点,广泛应用于过程控制和运动控制等领域^[3]。笔者首先使用经典的位置型 PID 控制器,以设定压力值作为系统输入,机头运动距离作为系统输出,进行了压力控制测试。实际操作中,在 PC 控制器内编译了位置型 PID 控制器,并封装成一个功能模块,实现了压制过程中的压力闭环控制。PID 参数整定遵循 Z-N 手动调节法^[4],依次调节比例放大系数、积分时间参数以及微分时间参数,保证了参数整定的有序性,避免了对参数的盲目调节。所得试验数据如表 1 所示。

表 1 基于经典 PID 控制的压力控制试验数据

| 序 | 压力设定值/N | 压力最大值/N | 超调量/% | 稳定时间/s |
|----|---------|---------|-------|--------|
| 1 | 5 000 | 5 180 | 3.60 | 10.8 |
| 2 | 5 000 | 5 182 | 3.64 | 10.6 |
| 3 | 8 000 | 8 316 | 3.95 | 11.0 |
| 4 | 8 000 | 8 303 | 3.79 | 11.2 |
| 5 | 10 000 | 10 330 | 3.30 | 11.1 |
| 6 | 10 000 | 10 352 | 3.52 | 11.4 |
| 7 | 12 000 | 12 457 | 3.80 | 11.3 |
| 8 | 12 000 | 12 460 | 3.83 | 11.3 |
| 9 | 14 000 | 14 611 | 4.36 | 11.5 |
| 10 | 14 000 | 14 600 | 4.29 | 11.8 |
| 11 | 16 000 | 16 702 | 4.39 | 11.8 |
| 12 | 16 000 | 16 693 | 4.33 | 11.9 |
| 13 | 18 000 | 18 725 | 4.02 | 12.1 |
| 14 | 18 000 | 18 759 | 4.22 | 12.3 |

表 1 中的稳定时间是指从机头接触到待压模具直到输出压力精度满足 0.5%要求时的调节时间,稳态误差是稳定时间后压力基本稳定值与设定值的最大偏差。

从表中可以看出,动态过程普遍存在较大超调。为了控制火工品压制过程中产品密度的一致性,保证产品质量,应尽量降低压装过程中的压力超调量。另外压制过程中的调节时间过长,导致产品的生产

节拍不能够满足技术指标要求,在参数整定过程中,无论如何调节,始终无法解决上述问题,该类问题也是常规 PID 控制特征缺陷的具体体现。由于系统惯性环节的存在,再加之人对其控制品质提出较高要求,最终使得经典 PID 控制无法满足本类火工品压制成型的控制要求。

通过分析经典 PID 控制算法在电子伺服压机压力控制过程中存在的诸多问题,为了在保证系统稳定性和控制精度的同时,降低系统的超调量,笔者对经典的 PID 控制器进行改进,设计了一种基于变速积分控制的 PID 控制器。该控制算法作为改进的 PID 算法之一,其基本思想是设法改变积分项的累加速度,使其与控制器输入端的偏差值对应起来,偏差越大,积分效果越弱,以便提高系统的响应速度,降低超调量;偏差越小,积分效果越强,以便提高系统的稳态误差^[5]。

经离散化处理后的位置型 PID 表达式如下:

$$u_k = K_P e_k + K_I \sum_{j=0}^k e_j + K_D (e_k - e_{k-1}) \quad (1)$$

变速积分为了使得积分项的累加速度与偏差大小对应起来,为此需设置一个关联函数 $f[e_k]$,是关于偏差 e_k 的函数:当 e_k 增大时,关联函数 $f[e_k]$ 的值减小;反之,则增大。对公式(1)中的积分项表达式 $K_I \sum_{j=0}^k e_j$ 进行处理,在每次采样后,用关联函数

$f[e_k]$ 与积分项中的偏差 e_k 相乘,再进行累加操作,变换后的表达式如下:

$$u_I(k) = K_I \left(\sum_{j=0}^{k-1} e_j + f[e_k] e_k \right) \quad (2)$$

式中 $u_I(k)$ 表示变速积分的积分项输出值。

函数 $f[e_k]$ 与当前偏差 $|e_k|$ 可以是线性的或高阶的,在本系统中,为了使得积分项的变化更平滑,将其设为以下形式:

$$f[e_k] = \begin{cases} 1 & |e_k| \leq b \\ \frac{1}{a^2} (|e_k| - a - b)^2 & b < |e_k| \leq a + b \\ 0 & |e_k| > a + b \end{cases} \quad (3)$$

从公式(3)中可以看到, $f[e_k]$ 的值在 0~1 区间内变化。当系统偏差绝对值 $|e_k|$ 大于偏差上限 $a + b$ 后, $f[e_k] = 0$, 不再进行累加即控制系统不再进行积分

操作。当偏差 $|e_k|$ 小于下限 b 时, $f[e_k]=1$, 则积分项为 $u_1(k) = K_I \sum_{j=0}^k e_j$, 与经典 PID 积分项相同, 积分作用最强。而偏差 $|e_k|$ 在区间 $[b, a+b]$ 时, 则累加的是部分当前偏差值, 其值在 $0 \sim |e_k|$ 之间呈反比关系变化。将公式(2)代入位置型 PID 算式(公式(1))中, 得到变速积分 PID 算式的完整表达式如下:

$$u_k = K_P e_k + K_I \left(\sum_{j=0}^{k-1} e_j + f[e_k] e_k \right) + K_D (e_k - e_{k-1}) \quad (4)$$

根据公式(4)构造变速积分 PID 控制算法程序流程图如图 6 所示。

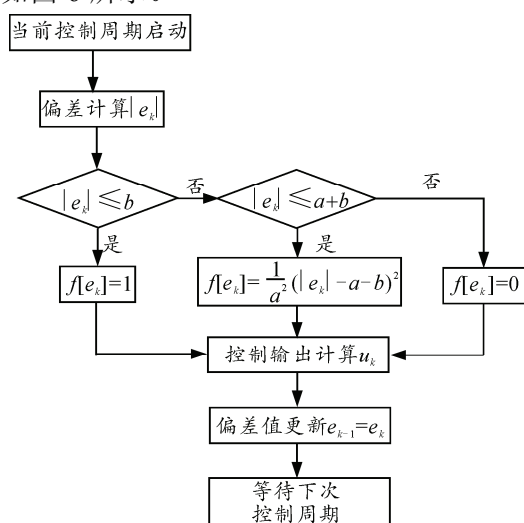


图 6 变速积分 PID 控制程序流程

在本电子伺服压力控制系统中, 要求压装压力在 200~4 000 kg 内可调, 对于关系函数 $f[e_k]$ 的 2 个边界点 $a, a+b$ 应该与目标压力值 F_s 对应起来。通过多次试验, 笔者最终确定边界点的取值方法如下:

$$b = 0.05F_s, a = 0.45F_s \quad (5)$$

采用变速积分 PID 控制算法的试验数据如表 2。将表 2 与表 1 对比可以看到: 采用变速积分 PID 控制器后, 压制过程中的压力超调量降低了一个数量级, 均控制在 0.3% 以下, 这样就保证了整个压制过程中的压力控制精度满足 0.5% 的指标要求。同时,

超调量的降低使得系统的震荡次数降低, 调节速度得到较大提高, 压力控制稳定时间缩短了 50% 左右, 系统的动态性能有了明显的改善, 各项性能指标均满足设计要求。

表 2 基于变速积分 PID 控制的压力控制试验数据

| 序 | 压力设定值/N | 压力最大值/N | 超调量/% | 稳定时间/s |
|----|---------|---------|-------|--------|
| 1 | 5 000 | 5 013 | 0.26 | 5.2 |
| 2 | 5 000 | 5 010 | 0.20 | 5.1 |
| 3 | 8 000 | 8 017 | 0.21 | 5.2 |
| 4 | 8 000 | 8 012 | 0.15 | 5.2 |
| 5 | 10 000 | 10 007 | 0.07 | 5.3 |
| 6 | 10 000 | 10 010 | 0.10 | 5.3 |
| 7 | 12 000 | 12 016 | 0.13 | 5.3 |
| 8 | 12 000 | 12 019 | 0.16 | 5.4 |
| 9 | 14 000 | 14 028 | 0.20 | 5.6 |
| 10 | 14 000 | 14 030 | 0.21 | 5.5 |
| 11 | 16 000 | 16 039 | 0.24 | 5.6 |
| 12 | 16 000 | 16 044 | 0.28 | 5.8 |
| 13 | 18 000 | 18 047 | 0.26 | 5.8 |
| 14 | 18 000 | 18 039 | 0.22 | 5.7 |

4 结束语

笔者以用于火工品压制成型的某型号防爆精密电子伺服压机的压力控制为研究方向, 依次开展了压机控制系统搭建和控制算法的设计, 并分别设计了经典位置型 PID 控制器和变速积分 PID 控制器, 用以实现压装压力的闭环控制。实际测试结果表明: 变速积分 PID 控制算法在该压力控制系统中, 具有更好的静态和动态性能。该控制算法已在某型号防爆精密电子伺服压机的压力控制中成功使用, 压力控制精度可以达到 0.3% 以上, 可以在其他压机压力控制系统或类似的控制过程中推广应用。

参考文献:

- [1] 王凯民, 王文站, 张玲香. 90 年代美国火工品技术发展规划及研究进展[J]. 火工品, 2000(4): 37-42.
- [2] 张学舜, 毕可俊, 张胜, 等. 火工品压药设备机电一体化研究[J]. 火工品, 2001(3): 13-15.
- [3] 宁宗夏. PID 参数对控制系统稳定性影响的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 1-4.
- [4] 李国林. PID 控制器参数整定技术研究与优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 17-23.
- [5] 陶永华, 伊怡欣, 葛芦生, 等. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 8-11.